

	DIN IEC 61468 (VDE 0491-6-2)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE

ICS 27.120.20

Einsprüche bis 2019-05-29

Entwurf

**Kernkraftwerke –
Instrumentierung mit sicherheitstechnischer Bedeutung –
Kerninstrumentierung – Eigenschaften und Prüfverfahren für
Neutronendetektoren ohne äußere Energieversorgung
(IEC 45A/1232/CD:2018);
Text Deutsch und Englisch**

Nuclear power plants –
Instrumentation systems important to safety –
In-core instrumentation – Characteristics and test methods of self-powered neutron detectors
(IEC 45A/1232/CD:2018);
Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-03-29 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 63 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Inhalt	Seite
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Allgemeine Vorteile von Neutronendetektoren ohne äußere Energieversorgung.....	12
5 Aufbau und Konstruktion	12
6 Anwendungsempfehlungen	15
6.1 Allgemeines	15
6.2 Flusssichtdarstellung – Kernüberwachung und -beobachtung	15
6.4 Kernschutz.....	15
6.5 Reaktorauschanalyse.....	15
6.6 Klassifizierung	15
7 Auslegungsempfehlungen.....	15
7.1 Allgemeines	15
7.2 Reproduzierbarkeit von SPND-Eigenschaften	16
7.4 Elektrisches Störgerauschen.....	16
7.5 Lebensdauer.....	16
8 Prüfmethoden	16
8.1 Allgemeines	16
8.2 Baumusterprüfung	16
9 Kalibrierung des Detektors	17
9.1 Ort der Kalibrierung	17
9.2 Absolutkalibrierung	17
9.4 In-Core-Kalibrierung	18
9.5 Kalibrierverfahren	18
Anhang A (informativ) Prinzipien und Eigenschaften von Detektoren ohne äußere Energieversorgung	20
A.1 SPND-Antwortmechanismen.....	20
A.2 Betazerfall (verzögerte Wirkung).....	20
A.3 Neutroneneinfang (prompte Wirkung).....	20
A.4 Photoelektrischer Effekt (prompte Wirkung).....	20
A.5 Compton-Effekt (prompte Wirkung).....	20
A.6 Beschaffenheit des Ansprechverhaltens eines SPNDs	21
A.7 Wechselwirkung mit thermischen Neutronen	21
A.8 Gamma-Wechselwirkung	21
A.9 Dynamische Kenngrößen von SPNDs	21

A.10	Abbranddauer des Detektors	22
A.11	Messfehler	22
A.11.1	Allgemeines	22
A.11.2	Fehler bei der Bestimmung der wirklichen SPND-Antwort	22
A.11.3	Durch die Gamma-Komponente des SPND-Stroms bestimmter Fehler	23
A.11.4	Durch Leckströme bestimmter Fehler	23
A.11.5	Durch den Signalleiterstrom bestimmter Fehler	24
A.12	Kenngößen eines Detektors ohne äußere Energieversorgung	24
A.12.1	Allgemeines	24
A.12.2	Kenngößen von Vanadium-Emittern	25
A.12.3	Kenngößen von Kobalt-Emittern	25
A.12.4	Kenngößen von Rhodium-Emittern	26
A.12.5	Kenngößen von Silber-Emittern	26
A.12.6	Kenngößen von Platin-Emittern	26
A.12.7	Kenngößen von Hafniumdioxid-Emittern	26
A.13	Messlanzen	27
A.13.1	Allgemeines	27
A.13.2	Typische unten befestigte Rhodium-Messlanze für Druck-Leichtwasserreaktoren	27
A.13.3	Typische oben befestigte Rhodium-Messlanze für Leichtwasserreaktoren vom WWER-Typ	27
A.13.4	Typische oben befestigte Kobalt-Messlanze für Druck-Leichtwasserreaktoren	27
A.13.5	Typische Messlanze für Schwerwasserreaktoren	27
	Literaturhinweise	32
Bilder		
Bild 1	– Typischer integraler Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung	12
Bild 2	– Typischer modularer Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung	13
Bild A.1	– Vereinfachte Ersatzschaltung eines SPND	24
Bild A.2	– Unten befestigte Rhodium-Detektorlanze für Druckwasserreaktoren	28
Bild A.3	– Oben befestigte Rhodium-Detektorlanze für WWER Reaktoren mit vier Thermoelementen (TC – Thermoelement)	28
Bild A.4	– Oben befestigte Rhodium-Detektorlanze für WWER Reaktoren mit Füllstandsmessfühler (TC – Thermoelement, TCLS – beheiztes Thermoelement des Füllstandsmessfühlers)	29
Bild A.5	– Oben befestigte Kobalt-Detektorlanze für Druckwasserreaktoren	30
Bild A.6	– CANDU-Druck-Schwerwasserreaktor-Messlanze	31
Tabellen		
Tabelle 1	– Kenngößen von SPDN-Emittern	13
Tabelle A.1	– Beispiele von Spezifikationen für typische SPNDs, die in Leistungsreaktoren verwendet werden	25

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 45A/1232/CD:2018 „Nuclear power plants – Instrumentation systems important to safety – In-core instrumentation – Characteristics and test methods of self-powered neutron detectors“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom SC 45A „Instrumentation, control and electrical power systems of nuclear facilities“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium UK 967.1 „Elektro- und Leittechnik für kerntechnische Anlagen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnichtsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Einleitung

a) Technischer Hintergrund, hauptsächliche Inhalte und Organisation der Norm

Diese internationale Norm enthält Anforderungen (wird später ergänzt)

Diese Norm ist für die Benutzung durch Betreiber von KKWs, Systemgutachtern und Lizenzgebern vorgesehen.

b) Einordnung der vorliegenden Norm in die Struktur der IEC-SC45A Normenreihe

IEC 61468 ist ein IEC-SC45A-Dokument der dritten Ebene, das ... abdeckt (wird später ergänzt).

IEC 61468 ist in Verbindung mit ... (wird später ergänzt) ...zu lesen, die Anforderungen für ...(wird später ergänzt) ... enthält.

Mehr Details über die Struktur der IEC-SC45A-Normenreihe finden sich in Abschnitt d) dieser Einleitung.

c) Empfehlungen und Einschränkungen betreffend die Anwendung dieser Norm

Diese Norm enthält genauere Anforderungen für die folgenden Punkte:

(wird später ergänzt)

Um sicherzustellen, dass die Norm über längere Zeit relevant bleibt, wurde der Schwerpunkt eher auf prinzipielle Themen gelegt und nicht auf spezifische Technologien.

d) Beschreibung der Struktur der IEC-SC45A-Normenreihe und der Beziehungen zu weiteren Dokumenten der IEC sowie Dokumenten anderer Organisationen (IAEA, ISO)

Die **IEC 61513** und die IEC 63046. stellen die Eingangsdokumente der Normen des IEC/SC 45A dar. **IEC 61513** enthält allgemeine Anforderungen an die leittechnischen Systeme und Geräte, die zur Ausführung sicherheitstechnisch wichtiger Funktionen in Kernkraftwerken genutzt werden. IEC 63046 enthält allgemeine Anforderungen an elektrische Energiesysteme von KKWs, sie deckt Energieversorgungen einschließlich der Versorgung leittechnischer Systeme ab. **IEC 61513** und IEC 63046 sind im Zusammenhang und auf Gleichrang befindlich zu betrachten.. Durch die **IEC 61513** und die IEC 63046 wird die SC-45A-Normenreihe strukturiert und ein komplettes Rahmenwerk für allgemeine Anforderungen zu Leittechnik und elektrischen Systemen für Kernkraftwerke gebildet.

In **IEC 61513** und IEC 63046 wird direkt auf andere Normen des IEC/SC 45A verwiesen, die allgemeine Themen wie die Kategorisierung von Funktionen und die Klassifizierung von Systemen, Qualifizierung, Trennung von Systemen, Maßnahmen gegen Versagen aufgrund gemeinsamer Ursachen, Software- und Hardwareaspekte programmierbarer digitaler Systeme, Koordination von Sicherheits- und IT-Sicherheitsanforderungen sowie das Änderungsmanagement. behandeln. Die Normen, auf die direkt verwiesen wird, bilden die zweite Ebene und sollten zusammen mit **IEC 61513** und IEC 63046 als ein in sich konsistenter Satz von Dokumenten betrachtet werden.

Die dritte Ebene bilden Normen des IEC/SC 45A, auf die in **IEC 61513** oder in IEC 63046 nicht direkt verwiesen wird. Diese Normen behandeln spezielles Gerät, technische Methoden oder spezifische Aktivitäten. Sie beziehen sich hinsichtlich der allgemeinen Themen auf die Dokumente der zweiten Ebene, können jedoch im Allgemeinen für sich alleine benutzt werden.

Eine vierte Ebene erweitert die Normen des IEC/SC 45A um Technische Berichte, die nicht normativ sind.

In den IEC SC 45A Normen werden die Prinzipien und grundsätzlichen Aspekte der Sicherheit und IT-Sicherheit der IAEA-Sicherheitsstandards und den relevanten Dokumenten der IAEA-Standards zur nuklearen IT-Sicherheit (NSS) umgesetzt. Dies betrifft insbesondere den Standard SSR-2/1, in dem die Sicherheitsanforderungen für die Auslegung von Kernkraftwerken festgeschrieben wird, und SSG-30 für die Sicherheitsklassifikation der Strukturen, Systeme und Komponenten in KKW, SSG-39 für die Auslegung der Leittechnik in KKW, SSG-34 für die Auslegung der Stromversorgung in KKW und NSS 17 für die IT-

Sicherheit von Rechnern in Nuklearanlagen. Terminologie und Definitionen in den IEC/SC 45A Normen stimmen mit denen, die von der IAEA verwendet werden, überein.

Für IEC 61513 und IEC 63046 wird ein Darstellungsformat verwendet, das dem der grundlegenden Sicherheitsnorm IEC 61508 ähnlich ist, mit einem Sicherheitslebenszyklus als Gesamtrahmen und einem Systemlebenszyklus. Mit IEC 61513 und IEC 63046 werden die allgemeinen Anforderungen von IEC 61508-1, IEC 61508-2 und IEC 61508-4 für die Anwendung auf dem nuklearen Sektor umgesetzt. In diesem Rahmen entsprechen IEC 60880, IEC 62138 und IEC 62566 bezogen auf den nuklearen Sektor der Norm IEC 61508-3. IEC 61513 und IEC 63046 beziehen sich bei den Themen der Qualitätssicherung (QS) sowohl auf ISO als auch auf IAEA GS-R-3, IAEA GS-G-3.1 und IAEA GS-G-3.5. Auf der Ebene 2 ist die IEC 62645 bezüglich der IT-Sicherheit das Top-Level-Dokument der IEC SC 45A IT-Sicherheitsnormen. Sie baut auf den gültigen grundlegenden Prinzipien und Hauptkonzepten der generischen IT-Sicherheitsnormen, insbesondere ISO/IEC 27001 und ISO/IEC 27002, auf. Es passt sie an den kerntechnischen Zusammenhang an, vervollständigt sie und stimmt sie auf die IEC 62443 Reihe ab. Auf der Ebene 2 ist IEC 60946 bezüglich Warten das Top-Level-Dokument der IEC SC 45A Warten Normen und IEC 62342 das Top-Level-Dokument der IEC SC 45A Alterungsmanagement Normen.

ANMERKUNG 1 Es wird angenommen, dass für die Auslegung von leittechnischen Systemen in Kernkraftwerken, die konventionelle Sicherheitsfunktionen enthalten (z. B. in Bezug auf Arbeitssicherheit, Schutz von Vermögenswerten, chemische und prozesstechnische Gefährdungen), internationale oder nationale Normen angewandt werden.

ANMERKUNG 2 Das Arbeitsgebiet des IEC SC 45A wurde im Jahr 2013 erweitert, um Elektrische Systeme zu behandeln. In den Jahren 2014 und 2015 wurden im IEC SC 45A Diskussionen geführt, um zu entscheiden wie und wo allgemeine Anforderungen an die Auslegung elektrischer Systeme berücksichtigt werden sollen. Die IEC SC 45A Experten empfahlen eine unabhängige Norm mit allgemeinen Anforderungen an elektrische Systeme auf dem gleichen Level wie IEC 61513 zu entwickeln. Das Projekt IEC 63046 wurde jetzt zu diesem Zweck gestartet. Wenn IEC 63046 veröffentlicht wird, dann wird diese ANMERKUNG 2 in der Einleitung der IEC SC 45A Normen entfernt.

**Kernkraftwerke –
Instrumentierung mit sicherheitstechnischer Bedeutung –
Kerninstrumentierung – Eigenschaften und Prüfverfahren für
Neutronendetektoren ohne äußere Energieversorgung**

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm gilt für In-Core-Neutronendetektoren, d. h. Neutronendetektoren ohne äußere Energieversorgung (SPND), die für den Einsatz in für die Sicherheit von Kernreaktoren wichtigen Systemen vorgesehen sind: Schutz und Leittechnik. Die Norm beinhaltet Eigenschaften von und Prüfverfahren für SPNDs. Die Norm behandelt auch die hauptsächlichen Quellen von Fehlern und Möglichkeiten zu ihrer Minimierung.

Neutronendetektoren ohne äußere Energieversorgung können für die Messung der Neutronenflussdichte und der zugehörigen Parameter in Kernreaktoren benutzt werden. Für diese Anwendung sind Detektoren mit Rhodiumemitter am weitesten verbreitet.

In der Norm werden dynamische Merkmale, Emitterabbbrand, Identität und andere Faktoren, die die Betriebseigenschaften der Detektoren beeinflussen, betrachtet.

Neben SPND mit Rhodiumemitter werden in der Norm SPND mit Emittlern aus anderen Materialien und deren Haupteigenschaften betrachtet.

Die Norm beinhaltet Anforderungen, Empfehlungen und Anleitungen bezüglich der Auswahl von SPND-Typen und Eigenschaften für verschiedenartige mögliche Anwendungen. Die Norm beinhaltet in Bezug auf SPND präzisere Vorgaben als IEC 51313 und **IEC 60568**, unter Berücksichtigung der IAEA-Sicherheitsrichtlinien.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60050-395:2014, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 395: Nuclear Instrumentation: Physical phenomena, basic concepts, instruments, systems, equipment and detectors*

IEC 60515:2007, *Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – Radiation detectors – Characteristics and test methods*

IEC 60568:2006, *Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – In-core instrumentation for neutron flux density (flux) measurements in power reactors*

IEC 61226, *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Classification of instrumentation and control functions*

IEC 61513:2011, *Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – General requirements for systems*

3 Begriffe

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Hintergrund- oder Leiterkompensation (eines Detektorsignals)

(en: background or lead-compensation (of a self-powered detector signal))

Methode, die zur Kompensation von Hintergrundbeiträgen zum SPND-Strom angewandt wird. Das wird meistens durch die Platzierung eines „emitterlosen“ Hintergrunddetektors im Reaktorkern erreicht, oder durch die Verwendung von Detektoren mit einem internen Kompensationsleiter.

3.2

Betazerfall

(en: beta decay)

radioaktiver Zerfallsprozess, bei dem die Massenzahl A unverändert bleibt, aber die Ordnungszahl Z sich ändert. Die (dabei ablaufenden) Prozesse schließen Elektronenemission (β^- Zerfall), Elektroneneinfang und Positronenemission (β^+ Zerfall) ein

3.3

Abbrand

(en: burn-up)

Abbau oder Verringerung der Anzahl der Targetatome, wenn diese einer thermischen Neutronenflussdichte über eine Zeitdauer ausgesetzt sind, durch die Umwandlung in andere Radioisotope

3.4

Abbranddauer

(en: burn-up life)

Zeitdauer, nach der bei einem gegebenen Wert der Neutronenflussdichte mit einer gegebenen Energieverteilung die Menge des strahlungsempfindlichen Emittermaterials sich derart verringert, dass die Kenngrößen des Detektors aus der Toleranz herausfallen, die für die vorgegebene Anwendung festgelegt wurde

3.5

Einfangsquerschnitt

(en: capture cross-section)

Maß für die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Stoß- oder Wechselwirkungsprozesses, ausgedrückt als Wirkfläche, welche Targetteilchen gegenüber auftreffenden Teilchen für den Ablauf der Kernreaktion aufweisen

3.6

Compton Effekt

Compton-Streuung

(en: Compton effect, Compton scattering)

Effekt, der auftritt, wenn ein hochenergetisches Photon durch die Wechselwirkung mit einem Elektron von seinem ursprünglichen Weg abgelenkt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Elektron wird aus seinem Orbit herausgestoßen und das Röntgenphoton verliert durch die Wechselwirkung Energie, aber es durchläuft weiter das Material/Medium entlang eines geänderten Wegs. Energie und Impuls werden bei diesem Prozess erhalten. Die energetische Veränderung hängt vom Streuwinkel und nicht von der Natur des streuenden Mediums ab. Da das gestreute Photon weniger Energie besitzt, hat es eine größere Wellenlänge als das Einfallsphoton.

[QUELLE: IEV 395-02-07]

3.7

Wirkungsquerschnitt

(en: cross-section)

σ

Maß für die Wahrscheinlichkeit einer Kernreaktion eines bestimmten Typs, ausgedrückt als Wirkfläche, welche Targetteilchen gegenüber auftreffenden Teilchen für den Ablauf der Kernreaktion aufweisen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Standardeinheit zur Messung nuklearer Wirkungsquerschnitte ist das Barn, welches gleich 10^{-28} m^2 oder 10^{-24} cm^2 ist.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein mikroskopischer Wirkungsquerschnitt kann für jeden Ablauf einer Kernreaktion bestimmt werden (Einfang, Spaltung, n - n' , n - $2n$, n - g , ...).

Anmerkung 3 zum Begriff: Der makroskopische Wirkungsquerschnitt ermöglicht die Berechnung der Anzahl von Wechselwirkungen für eine vorgegebene Reaktion in einem gegebenen Material; dieser Wert ist das Produkt aus dem zugehörigen Wirkungsquerschnitt und der Anzahl der Teilchen im Volumen des Materials; er wird in m^{-1} oder cm^{-1} ausgedrückt.

[QUELLE: IEV 395-01-23]

3.8

Zerfallskonstante

(en: decay constant)

λ

Zerfall je Zeiteinheit dN/dt für einen Atomkern, dividiert durch die Anzahl der Kerne N , die zur gleichen Zeit t vorhanden sind

$$\lambda = -\frac{1}{N} \times \frac{dN}{dt}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Zerfallskonstante wird als Kehrwert von Sekunden (s^{-1}) ausgedrückt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Zerfallskonstante darf als Gesamtwahrscheinlichkeit des radioaktiven Zerfalls (Zerfall und/oder Kernumwandlung) angesehen werden.

[QUELLE: IEV 395-01-11]

3.9

In-Core Neutronendetektor

(en: in-core neutron detector)

Detektor, fest oder bewegbar, der zur Messung der Neutronenflussdichte in einem definierten Bereich des Reaktorkerns ausgelegt ist

3.10

Integraler Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung

(Kabeltyp-Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung)

(en: integral self-powered neutron detector (cable-type self-powered neutron detector))

Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung, bei dem das Anschlusskabelteil eine Erweiterung des Detektorteils ist, d. h. der Emitter ist direkt mit der Kern/der Signalleitung verbunden; beide Teile besitzen eine gemeinsame Isolation und der Kollektor des Detektors ist auch der Außenmantel des Anschlusskabelteils (siehe [Bild 1](#))

3.11

Modularer Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung

(vorkonfektionierter Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung)

(en: modular self-powered neutron detector (prefabricated self-powered neutron detector))

Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung, der durch mechanische Verbindung, Verschweißen oder Verlöten eines Detektors (Emitter, Isolator, Kollektor) mit einem Anschlusskabel (Kern/Signalleitung, Isolator, Außenmantel) hergestellt wurde (siehe [Bild 2](#))

3.12

photoelektrischer Effekt

(en: photoelectric effect)

vollständige Absorption eines Photons durch ein Atom unter Emission eines Hüllenelektrons

[QUELLE: IEV 395-02-08]

3.13

prompte Antwort

(en: prompt response)

Signalerzeugung eines Neutronendetektors ohne äußere Energieversorgung auf der Basis der (n , γ , e)-Reaktion

3.14

radioaktive Halbwertszeit

(en: radioactive half-life)

Zeitdauer, in der die Aktivität eines radioaktiven Isotops auf die Hälfte seines Ausgangswerts sinkt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Halbwertszeit hängt mit der Zerfallskonstante λ durch die Beziehung $T_{1/2} = \ln(2)/\lambda \approx 0,693/\lambda$ zusammen. Der Wert wird in Sekunden (s) ausgedrückt.

[QUELLE: IEV 395-01-12]

3.15

instabiles Isotop

radioaktives Isotop

(en: radioisotopes, radioactive isotopes)

instabile Arten von Atomen, die die Ordnungszahl Z des gleichen Elements, aber andere Massenzahlen A besitzen; Isotop eines Elements welches einem Zerfall ausgesetzt ist

3.16

Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung^{N1}

(en: self-powered neutron detector (SPND))

neutronenempfindlicher Strahlungsdetektor, der keine externe Energieversorgung benötigt und aus drei Grundelementen besteht: einem Emitter, der mit den Neutronen wechselwirkt um Elektronen zu emittieren; einem Kollektor, der diese Elektronen erfasst und einem Isolator, der den Emitter vom Kollektor isoliert (siehe Bild 1) und die Neutronenflussdichte in ein elektrisches Signal umwandelt

3.17

Selbstabschirmung

(en: self-shielding)

Eigenabsorption des Emitters: wenn der Emitterdurchmesser anwächst, sinkt die Entkommenswahrscheinlichkeit eines Elektrons, das im Innern des Emitters entstanden ist, und der Wirkungsgrad der Stromerzeugung lässt nach

3.18

Empfindlichkeit (eines Detektors)

(en: sensitivity (of a detector))

Empfindlichkeit eines Detektors für die zu messende Strahlung. Diese Empfindlichkeit ist gegeben durch:

$$S = \frac{\text{Veränderung der Ausgangsgröße (Detektorantwort)}}{\text{Veränderung der Eingangsgröße (zu messende Strahlung)}}$$

In den meisten Anwendungen hängt die Detektorantwort linear von der zu messenden Strahlung ab.

3.19

Empfindlichkeit (eines Detektors) zur bedingten Neutronenflussdichte

(en: sensitivity (of a detector) to conditional neutron flux density)

Empfindlichkeit bei einer Neutronenenergie von $E_0 = 0.025$ eV.

Anmerkung 1 zum Begriff: Unter Verwendung des Westcott-Formalismus¹ kann der SPND-Strom (I_n), der in Neutronenfeldern mit weichen Spektrum induziert wird, dargestellt werden als:

$$I_n = S_0 \cdot \Phi_0 \cdot [g(T) + r \cdot s(T)]$$

^{N1} Nationale Fußnote: In der deutschsprachigen technischen Literatur ist es häufig üblich, den englischen Begriff „self-powered neutron detector“ sowie die Abkürzung SPND zu verwenden.

¹ Siehe Westcott C.H., Walker W.H., Alexander I.K., *Cross Sections and Cadmium Ratios for the Neutron Spectra of Thermal Reactors* – in Proceedings of the Second United Nations International Conference of the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958. V.16, United Nations, 1959.

Dabei ist:

- S_0 die SPND-Empfindlichkeit zur bedingten Neutronenflussdichte;
 $r = \Phi_{\text{et}}/\Phi_T$ der epithermische Parameter des Neutronenfelds;
 $g(T)$ und $s(T)$ die Westcott-Parameter – Berechnete Werte, die vom SPDN-Emitterdurchmesser und der Neutronengastemperatur abhängen.

3.20

thermisches Neutron

(en: thermal neutron)

Neutron mit einer kinetischen Energie nahe der von Neutronen im thermischen Gleichgewicht mit den Atomkernen des umgebenden Mediums

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Falle einer Maxwellschen Atomkernverteilung ist die wahrscheinlichste Energie 0,025 eV bei 293 K, die einer Neutronengeschwindigkeit von 2 200 m/s entspricht.

Anmerkung 2 zum Begriff: In der Praxis ist die Obergrenze etwa 1 eV.

[QUELLE: IEV 395-02-17]

3.21

Standzeit

(en: useful life)

Betriebszeit unter Bestrahlung und Umgebungsbedingungen innerhalb festgelegter Grenzen, nach deren Ablauf die Detektorkenngrößen die festgelegten Toleranzen überschreiten

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Begrenzung der Standzeit ist üblicherweise mit Abbrandprozessen und der Leistungsfähigkeit der Messeinrichtung verbunden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Standzeit kann als einwirkender Teilchenstrom, Zeit usw. ausgedrückt werden.

3.22

SWR

(en: BWR)

Siedewasserreaktor

3.23

CANDU

(en: CANDU)

Name eines kanadischen Reaktordesigns, bei welchem Natururan als Brennstoff und schweres Wasser als Moderator und Kühlflüssigkeit verwendet wird. Eine Abkürzung für CANada, Deuterium, Uranium.

3.24

Schwerwasserreaktor

(en: HWR)

mit schwerem Wasser (D₂O) gekühlter und moderierter Reaktor.

3.25

Leichtwasserreaktor

LWR

(en: LWR)

mit leichtem Wasser gekühlter und moderierter Reaktor. Handelsübliche Typen umfassen den Druckwasserreaktor (DWR) und den Siedewasserreaktor (SWR).

3.26

DWR

(en: PWR)

Druckwasserreaktor

3.27

RBMK

(en: RBMK)

grafitmoderierter und mit leichtem Wasser gekühlter Reaktor

3.28

SPND

(en: SPND)

Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung

3.29

WWER

(en: VVER)

Abkürzung für den russischen Namen „Wasser-Wasser Leistungsreaktor“ – DWR-Typ

4 Allgemeine Vorteile von Neutronendetektoren ohne äußere Energieversorgung

In Neutronendetektoren ohne äußere Energieversorgung (SPNDs) wird die Wechselwirkung von Neutronen und Atomkernen genutzt, um einen Strom zu erzeugen, der proportional zur Neutronenflussdichte ist. Das Funktionsprinzip von SPNDs ist im [Anhang A](#) dargestellt.

Im Vergleich zu anderen Detektortypen haben SPNDs folgende Vorteile:

- sie benötigen keine Stromversorgung;
- einfacher und robuster Aufbau;
- relativ klein und gut geeignet für den Einbau in den Reaktorkern;
- gute Stabilität unter Temperatur, Druck, Strahlung und anderen Bedingungen.

5 Aufbau und Konstruktion

Ein typischer SPND besteht aus dem Emitter, der aus einem Material mit großem Wirkungsquerschnitt für Neutronen besteht, seinem ihn umgebenden Isolator, dem Kollektor und dem Anschlusskabel.

Entsprechend ihrer Auslegung und Herstellungstechnologie werden SPNDs in zwei Typen eingeteilt:

- integraler (oder Kabeltyp-) SPND (siehe Bild 1), bei dem die Signalleitung und das Anschlusskabel direkt mit dem Emitter zusammengehören; die Isolation um den Emitter ist identisch mit der Isolation der Signalübertragungsleitung und der Kollektor ist eine Erweiterung des Anschlusskabelmantels;
- modularer (oder vorkonfektionierter) SPND (siehe [Bild 2](#)), der aus getrennten Detektor- und Anschlusskabelteil besteht.

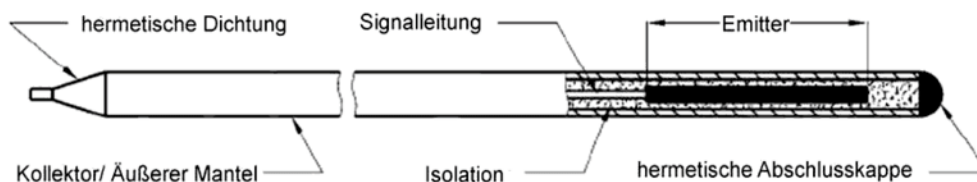


Bild 1 – Typischer integraler Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung

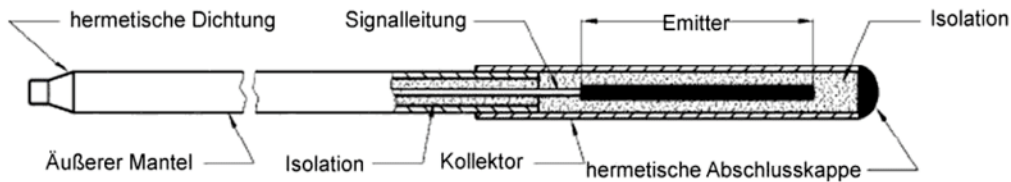


Bild 2 – Typischer modularer Neutronendetektor ohne äußere Energieversorgung

SPNDs sind in verschiedenen Ausführungen mit Bereichen der empfindlichen Länge von wenigen Zentimetern bis zur vollständigen Höhe des Reaktorkerns verfügbar. Die Auslegung eines SPNDs sollte die korrekte Auswahl von Emittertyp und -dicke sowie Mantel- und Isolationsmaterialtypen und Abmessungen beinhalten, um die mechanische Auslegung für eine spezifische Aufgabe zu optimieren.

SPND-Emitter sollten aus Materialien hergestellt werden, die gegen die Betriebsbedingungen des Detektors widerstandsfähig sind, und mit großen Wirkungsquerschnitten für die Wechselwirkung mit Neutronen im Bereich der zu messenden Neutronenenergie.

Für Anwendungen in Leistungsreaktoren werden typischerweise in SPNDs die Emittmaterialien Vanadium, Kobalt, Rhodium, Silber, Platin und Hafniumdioxid verwendet. Diese Materialien sollten benutzt werden, weil sie relativ hohe Schmelztemperaturen und relativ große Wirkungsquerschnitte für thermische Neutronen aufweisen und verträglich mit dem SPND-Herstellungsprozess sind. Andere Emitter, wie zum Beispiel Kadmium, Gadolinium, und Erbium, dürfen in SPNDs für Niedrigtemperatur-Experimentalreaktoren verwendet werden, aber sie sind für Leistungsreaktoren nicht geeignet.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über einige wichtige Kenngrößen von SPDN-Emittern, die in Anwendungen für Leistungsreaktoren verwendet werden.

Tabelle 1 – Kenngrößen von SPDN-Emittern (1 von 2)

Emittermaterial	Stabile Isotope	Zusammensetzung %	Wirkungsquerschnitt b	Folgeisotope	Halbwertszeit	Anwendung
Vanadium	$^{23}\text{V}^{50}$	0,24	100	$^{23}\text{V}^{51}$	Stabil	HWR-Flussdichtedarstellung
	$^{23}\text{V}^{51}$	99,76	4,9	$^{23}\text{V}^{52}$	3,76 min	LWR-Flussdichtedarstellung
Kobalt	$^{27}\text{Co}^{59}$	100	37	$^{27}\text{Co}^{60}$	5,27 Jahre	LWR-Flussdichtedarstellung LWR-Regelung LWR – lokaler Kernschutz
Rhodium	$^{45}\text{Rh}^{103}$	100	11 (8 %)	$^{45}\text{Rh}^{104}$	4,4 min	LWR-Flussdichtedarstellung
			135 (92 %)	$^{45}\text{Rh}^{104}$	42 s	
Silber	$^{47}\text{Ag}^{107}$	51,82	35	$^{47}\text{Ag}^{108}$	2,42 min	Modernisierte RBMK, Flussdichtedarstellung
	$^{47}\text{Ag}^{109}$	48,18	93	$^{47}\text{Ag}^{110}$	24,4 s	
Hafniumdioxid	$^{72}\text{Hf}^{174}$	0,18	390	$^{72}\text{Hf}^{175}$	70 d	LWR-Regelung HWR-Regelung
	$^{72}\text{Hf}^{176}$	5,20	15	$^{72}\text{Hf}^{177\text{m}}$	51,4 min	
	$^{72}\text{Hf}^{177}$	18,50	380	$^{72}\text{Hf}^{178\text{m}}$	31 Jahre	
	$^{72}\text{Hf}^{178}$	27,14	75	$^{72}\text{Hf}^{179\text{m}}$	25,1 d	
	$^{72}\text{Hf}^{179}$	13,75	65	$^{72}\text{Hf}^{180\text{m}}$	5,5 h	
	$^{72}\text{Hf}^{180}$	35,23	14	$^{72}\text{Hf}^{181\text{m}}$	42,4 d	

Tabelle 1 (2 von 2)

Emitter-material	Stabile Isotope	Zusammen-setzung %	Wirkungs-querschnitt b	Folge-isotope	Halbwerts-zeit	Anwendung
Platin	$^{78}\text{Pt}^{192}$	0,78	14	$^{78}\text{Pt}^{193\text{m}}$	4,3 d	RBMK Flusssichtedarstellung
	$^{78}\text{Pt}^{194}$	32,90	2	$^{78}\text{Pt}^{195\text{m}}$	4,1 d	RBMK lokale Regelung
	$^{78}\text{Pt}^{195}$	33,80	24	$^{78}\text{Pt}^{196}$	Stabil	RBMK lokaler Schutz
	$^{78}\text{Pt}^{196}$	25,30	1	$^{78}\text{Pt}^{197\text{m}}$	1,3 h	
	$^{78}\text{Pt}^{198}$	7,22	4	$^{78}\text{Pt}^{199}$	30,8 min	

Das Material des Kollektors und des Anschlusskabelmantels muss Strahlung und Korrosionseffekten widerstehen, letzteres ist besonders für Detektoren wichtig, die sich direkt im Primärkühlmittel befinden. Um Korrosionseffekte zu unterbinden und die Lebensdauer zu verlängern, dürfen SPNDs so eingebaut werden, dass sie nicht in direkten Kontakt mit dem Primärkühlmittel kommen.

Der Kollektor darf aus Nickellegierungen hergestellt werden, die sich durch hervorragende Korrosionsfestigkeit auszeichnen. Bei der Auswahl des Kollektormaterials (sowie des Isolators) sollte beachtet werden, dass das Vorhandensein auch kleiner Mengen von Verunreinigungen mit einem großen Wirkungsquerschnitt für die Wechselwirkung mit Neutronen zur Detektoranzeige beitragen kann.

Die Isolierung sollte eine extrem niedrige Wahrscheinlichkeit für eine Wechselwirkung mit Neutronen oder Gammastrahlen besitzen. Bei Betriebsbedingungen, muss der Isolationswiderstand des Detektors erheblich größer sein als der Widerstand der Übertragungsleitung und der Eingangswiderstand des Messgeräts, um Verluste durch die Isolation zu vermeiden. Keramische Oxide sind die bevorzugten Materialien, weil sie einen hohen spezifischen Widerstand besitzen und den aggressiven Umgebungsbedingungen im Innern eines Kernreaktors standhalten können.

Üblicherweise dürfen drei Materialien für die Isolation in SPDNs, die in Leistungsreaktoren eingesetzt werden, verwendet werden, nämlich Al_2O_3 , MgO und SiO_2 . Al_2O_3 wurde für die meisten Anwendungen ausgewählt da es ohne weiteres verfügbar und in Pulverform weniger feuchtigkeitsempfindlich als MgO ist. Wegen der Bildung des beta-aktiven Isotops $^{13}\text{Al}^{28}$ dürften jedoch die Ströme in den Übertragungsleitungen mit einer Al_2O_3 -Isolation größer sein als die Ströme in den Übertragungsleitungen mit MgO -Isolation. MgO ist hygroskopisch und es ist deshalb empfindlich für Kabelquellung, wenn Feuchtigkeit in den Kabelmantel eindringt. SiO_2 darf in einigen Anwendungen benutzt werden, weil seine geringe Dichte die Übertragung von Elektronen vom Emmitter zum Kollektor verbessert und dadurch die Empfindlichkeitscharakteristik maximiert. Jedoch hat SiO_2 bei hohen Temperaturen einen geringeren Isolationswiderstand als MgO oder Al_2O_3 .

Üblicherweise wird als Übertragungsleitung ein ein- oder zweiadriges Kabel mit mineralischem Isolator in einer Metallhülle benutzt. Die Minimierung des Beitrags der Wechselwirkung der Übertragungsleitung mit Neutronen und Gammastrahlung kann durch die Wahl geeigneter Materialien bei der Kabelauslegung und dem Verhältnis der geometrischen Abmessungen der Leiter und des Kabelmantels erreicht werden.

Bei der Verwendung eines einadrigen Kabels als Übertragungsleitung kann der Beitrag der Wechselwirkung der Übertragungsleitung mit Neutronen und Gammastrahlung durch die Verwendung eines Hintergrund-SPNDs (SPND ohne Emmitter, hergestellt aus demselben Kabel) erreicht werden.

Bei Verwendung eines zweiadrigen Kabels ist eine Ader mit dem Emmitter verbunden und die zweite wird als Hintergrunddetektor verwendet. In diesem Fall spielt die Gleichheit des Materials und der Geometrie der Leitungen eine wichtige Rolle. Um die Unterschiede in den Bestrahlungsbedingungen der Leitungen zu kompensieren, werden die Leiter verdreht (verdrehte Leitungen).

6 Anwendungsempfehlungen

6.1 Allgemeines

Für jede spezielle Aufgabe sollte ein SPND mit optimalen Eigenschaften für die Lösung dieser Aufgabe gewählt werden. Gleichzeitig ist für die Lösung so gut wie aller Probleme eine kleine Abbrandrate des Emitters unbedingt notwendig. Hoher Abbrand ist zulässig, wenn ein Kalibrierungssystem verfügbar ist oder der Abbrand durch die Berechnungsmethode berücksichtigt wird.

6.2 Flusssichtdarstellung – Kernüberwachung und -beobachtung

SPNDs dürfen für die Flusssichtdarstellung und Kernüberwachung und -beobachtung mit oder ohne zugehörigem Kalibrierungssystem verwendet werden.

6.3 Regelung

SPNDs dürfen für Regelungszwecke verwendet werden, jedoch hängt die Akzeptanz einer Signalverzögerung von folgenden Einschränkungen ab:

- axiale Leistungsverteilungsregelung darf moderate Verzögerungen tolerieren;
- integrale Leistungsregelung darf keine Signalverzögerung erlauben.

6.4 Kernschutz

Die erforderlichen Eigenschaften von SPNDs, die für Zwecke des lokalen Kernschutzes eingesetzt werden, hängen von dem Übergangsverhalten der Flusssichtwerte ab.

Prompte Signalantwort oder ausreichende dynamische Kompensation, um prompte Signalantwort zu erreichen, ist erforderlich.

Geringe Empfindlichkeit, die typisch für prompt reagierende SPND-Auslegungen ist, darf bei Verwendung von rauscharmen Verstärkern akzeptiert werden.

6.5 Reaktorrauschenanalyse

SPNDs können auch für die Analyse des Reaktorrauschens, das zusätzliche Informationen über den Reaktorkern und seine Bestandteile enthält, genutzt werden.

Für die Analyse des Reaktorrauschens sind SPNDs mit sehr schnellen Signalantwortzeiten erforderlich.

6.6 Klassifizierung

SPNDs dürfen als Sensoren in Messkanälen für Funktionen mit unterschiedlicher sicherheitstechnischer Bedeutung verwendet werden. Diese müssen nach **IEC 61226** kategorisiert werden.

7 Auslegungsempfehlungen

7.1 Allgemeines

Die Materialien, die zur Auslegung von SPNDs benutzt werden, sollten den Effekten von Strahlung, Temperatur, Druck, mechanischen Schwingungen und chemischer Korrosion, die durch die bestehende Umgebung im Reaktorkern bedingt sind, standhalten.

Die Auslegung des Detektors sollte, falls notwendig, die Möglichkeit der Befestigung im Reaktorkern vorsehen und die während des Transports und des Einbaus notwendige Biege- und Dehnungsfestigkeit besitzen.

7.2 Reproduzierbarkeit von SPND-Eigenschaften

Die Auslegung eines SPNDs sollte die Reproduzierbarkeit von SPND-Merkmalen sicherstellen, die durch die hohe Präzision der Herstellung von SPND-Teilen und durch die Berücksichtigung der Effekte von Geometrieänderungen der SPND-Teile und der Reinheit der Materialien, die wegen der Empfindlichkeit verwendet werden, erreicht werden kann.

Ein hoher Grad der Reproduzierbarkeit der Empfindlichkeit des SPNDs ermöglicht eine hohe Genauigkeit bei Relativwertmessungen.

Die Bestätigung der Gleichheit der geometrischen Abmessungen des SPND und des bei seiner Herstellung verwendeten Materials kann als indirekte Kalibrierungsmethode genutzt werden.

7.3 Hintergrundsignal

Das Hintergrundsignal wird hauptsächlich durch die von Neutronen und Gammateilchen induzierten Ströme im Signalkabel erzeugt. Eine Kompensation darf durch die Verwendung eines separaten SPNDs und der Subtraktion dessen Signals vom SPND-Signal erreicht werden. Eine andere Technik bezieht die Verwendung von zweiadrigen Kabeln (mit verdrehten oder unverdrehten Leitungen) in den SPND-Aufbau ein, wobei ein Leiter mit dem Emitter verbunden ist und der zweite Leiter als Hintergrundleiter verwendet wird.

7.4 Elektrisches Störrauschen

Elektrisches Störrauschen sollte durch geeignete Erdung und sorgfältige Auslegung der Kabeltrassen und der Kabelführung minimiert werden.

7.5 Lebensdauer

Die Lebensdauer eines SPND darf entweder als Abbranddauer und/oder Standzeit ausgedrückt werden. Die Abbranddauer des Detektors (siehe Definitionen) hängt von der Abbrandrate des SPND-Emittermaterials, dem Störabstand und dem geforderten Wert für den Messfehler in einem Anwendungsfall ab.

Die Standzeit eines SPNDs hängt von der Stabilität des Detektors bezüglich der Betriebsbedingungen und der Abbrandrate des Emitters ab.

8 Prüfmethoden

8.1 Allgemeines

Die vorgeschlagenen Prüfmethoden für SPNDs sollten den in IEC 60515 und IEC 60568 empfohlenen Anleitungen folgen.

8.2 Baumusterprüfung

Die Baumusterprüfung von SPNDs sollte alle kritischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften, die in den Abschnitten 5 und 6 dieser Norm aufgezeigt wurden, berücksichtigen. Der Schwerpunkt sollte auf Leistungsmerkmalen, die für den Langzeitbetrieb unter In-Core-Bedingungen maßgeblich sind, liegen, um die Langzeitstabilität der mechanischen und elektrischen Eigenschaften nachzuweisen. Prüfungen, die In-Core-Umgebungsbedingungen simulieren, einschließlich Druck- und Temperaturwechsel, sollten in einem solchen Umfang durchgeführt werden, dass gezeigt wird, ob von der SPND-Auslegung erwartet werden kann, dass sie die Anforderungen in Bezug auf die Versagenswahrscheinlichkeit in einem Leistungsreaktor erfüllen.

Für Baumusterprüfungen wird empfohlen, dass mindestens drei SPNDs einer bestimmten Auslegung nach ihrer mechanischen und elektrischen Spezifikation baumustergeprüft werden sollten.

8.3 Abnahmeprüfungen

SPNDs und Einbauten müssen Endprüfungen unterzogen werden, um sicherzustellen, dass alle bestehenden Anforderungen erfüllt wurden.

Die folgenden Kenngrößen müssen an allen hergestellten SPNDs gemessen werden:

- Unversehrtheit von SPND-Mantel und -Detektorhülle bei maximalen hydrostatischen Druck- und Temperaturbedingungen (für Auslegungen mit nassem Einbau);
- Isolationswiderstand bei Temperaturen von 15 °C bis 30 °C (zulässige Isolationswiderstandswerte sollten die Anforderungen für diesen Detektor erfüllen);
- in einigen Fällen ist es notwendig, den Isolationswiderstand bei der maximalen Betriebstemperatur zu messen (typische maximale Betriebstemperatur 350 °C));
- Durchgängigkeit der Emitter-Signalleitungsverbindung (durch Detektion einer Abnahme des Isolationswiderstands des SPND, wenn der Emittereinbauort erwärmt wird, durch Kapazitätsmessung oder eine andere geeignete Methode);
- der Emittereinbauort im SPND. Das wird üblicherweise durch die Anwendung von Röntgentechniken (in zwei oder mehr Ebenen) durchgeführt.

Zusätzlich sollte die Schwankung der Neutronenempfindlichkeit des SPND in einem Fertigungslos festgestellt werden. Das darf durch die Kalibrierung einer Zufallsstichprobe des Fertigungsloses oder durch die Kontrolle der geometrischen Abmessungen im Herstellungsprozess des Detektorelements, das den Empfindlichkeitswert beeinflusst, und die nachfolgende Berechnung der Schwankung ausgeführt werden.

9 Kalibrierung des Detektors

9.1 Ort der Kalibrierung

Die Kalibrierung von Neutronendetektoren ohne äußere Energieversorgung darf am Einbauort oder, vor dem endgültigen Einbau, in einem Prüfreaktor durchgeführt werden. Wenn die Prüfung in einem Prüfreaktor erfolgt, sollte man nicht vergessen, dass Detektoren nach einer Bestrahlung einige Zeit gelagert werden sollten bevor sie zum Einbauort transportiert und eingebaut werden, um die induzierte Aktivität zu reduzieren.

Da die Größenordnung des SPND-Signals vom Neutronenspektrum abhängt, ist es erforderlich, entweder abzusichern, dass das Neutronenspektrum identisch mit dem Spektrum ist, das während der Kalibrierung gemessen wurde, oder den Unterschied im Spektrum während der Messungen zu berücksichtigen.

9.2 Absolutkalibrierung

Die absolute Neutronenempfindlichkeit eines SPNDs darf durch eine Aktivierungsanalyse bestimmt werden. Die grundsätzliche Vorgehensweise umfasst die Bestrahlung des SPNDs mit einer Neutronenquelle (üblicherweise thermische) und die Messung des sich ergebenden Ausgangsstroms. Die Neutronenflussdichte während der Bestrahlung wird durch die Aktivierungsanalyse mit hoher Genauigkeit durch die Verwendung dünner Folien oder Drähte mit einem eindeutig festgelegten Wirkungsquerschnitt für den gewünschten Neutronenenergiebereich, z. B. Kobalt oder Gold für thermische Neutronen, bestimmt.

Die Empfindlichkeit wird einfach als gemessener Ausgangsstrom, dividiert durch die Neutronenflussdichte berechnet. Die Unsicherheit der Absolutkalibrierung beträgt üblicherweise 5 % bis 10 %, was durch eine große Anzahl von Einflussfaktoren bewirkt wird: der Fehler bei der Bestimmung der Flussdichte, der Fehler bei der Anordnung des SPNDs im Neutronenfeld, die zeitliche Variation des Neutronenfelds usw.

9.3 Vergleichskalibrierung

Die absolute Neutronenempfindlichkeit eines SPND darf durch den Vergleich mit einem Standard-SPND bestimmt werden. Die grundsätzliche Vorgehensweise umfasst die Bestrahlung des zu kalibrierenden SPND (der zu prüfende SPND) und eines Standard-SPND (ein Detektor mit bekannter absoluter Neutronenempfindlichkeit und physikalischen Eigenschaften, die identisch mit jenen des zu prüfenden SPND

sind) mit einer Neutronenquelle (üblicherweise thermische) unter gleichen Bedingungen und die Messung des sich ergebenden Ausgangsstroms.

Die Empfindlichkeit wird einfach als gemessener Ausgangsstrom des zu testenden SPND, multipliziert mit der absoluten Neutronenempfindlichkeit des Standard-SPND, dividiert durch die Neutronenflussdichte des Standard-SPND berechnet.

In diesem Fall ist der Kalibrierungsfehler größer als im Fall der Absolutkalibrierung, da zusätzlich zum Fehler der Absolutkalibrierung des Standard-SPND die Fehler bei der Anordnung des SPND und die aus den aufeinanderfolgenden Messungen und den zeitlichen Änderungen des Neutronenfeldes hinzukommen.

Die Vergleichskalibrierung kann indirekt durch den Vergleich der Parameter der Detektoren durchgeführt werden, die die Empfindlichkeit beeinflussen: die geometrischen Abmessungen der Komponenten des Detektors und deren Herstellungsmaterialien. Die Vergleichskalibrierung schließt den Fehler, der mit der Absicherung der Gleichheit der Bedingungen für die Detektorbestrahlung verbunden ist, aus.

9.4 In-Core-Kalibrierung

Es gibt verschiedenen bewährte In-Core-Kalibrierungssysteme, die fest eingebaute oder ortsveränderliche Detektoren verwenden, sowie Aktivierungstechniken. Diese beinhalten:

- fest eingebaute In-Core-Detektoren, die durch keine oder kleine Abbrandfaktoren gekennzeichnet sind;
- einzeln oder mehrfach ortsveränderliche In-Core-Spaltkammern oder Detektoren ohne äußere Energieversorgung, die in Kalibrierrohren innerhalb jeder Detektoranordnung ohne äußere Energieversorgung angeordnet sind;
- Säulen von Stahlkugeln, die Vanadium beinhalten und mit Luft oder einem anderen Gas bewegt und im Reaktorkern bestrahlt werden, und deren induzierte Aktivität später außerhalb des Reaktorkerns gemessen wird;
- Kalibrierung durch Normierung auf die Hauptregelgröße.

Die am weitesten verbreitete Methode der Kalibrierung unter Betriebsbedingungen ist die Kalibrierung durch Normierung auf die Hauptregelgröße (z. B. auf die Leistungsdichte). Diese Vorgehensweise erfordert eine spezielle stationäre Betriebsweise des Reaktors für die genaue Messung der thermischen Leistung.

9.5 Kalibrierverfahren

Die Prüfreaktor-Aktivierungsmethode darf verwendet werden, um relative oder absolute, von der Kalibrierung des Referenzdetektors abhängige Kalibrierergebnisse zu gewinnen.

In-Core-Kalibriermethoden liefern relative Daten, die mit der integralen Leistung des Reaktorkerns zusammenhängen können.

Verschiedene Korrekturen dürfen notwendig sein, um aufgrund der Beschaffenheit des Kalibriersystems genaue Ergebnisse zu erhalten, beispielsweise:

- Abschirmungskorrektur wegen Detektorüberlappung oder „Abschattung“;
- Korrekturen wegen Anschlusskabelempfindlichkeit;
- räumliche Korrekturen (Abstände, Orte);
- Empfindlichkeit in Bezug auf das Neutronenspektrum;
- Zeitabhängigkeit der Messung;
- zulässige Zeitbegrenzungen für die gesamte Kernflussdarstellung;
- radioaktiver Zerfall während des Transports und der Messung;
- SPND-Empfindlichkeit für Gammastrahlen.

9.6 Empfohlene Kalibrierungsfristen

Die Kalibrierungsfrist für In-Core-Kalibrierungssysteme sollte entsprechend der Abbrandrate des spezifischen SPND-Emittermaterials und der Zuordnung des Signals zu einer bestimmten Funktion gewählt werden.