

**Untersuchungen zum
sicheren Betrieb von
Forschungsreaktoren**

**AP 1 Einfluss spezifischer
Einrichtungen in
Forschungsreaktoren
auf die Sicherheit**

Untersuchungen zum sicheren Betrieb von Forschungsreaktoren

AP 1 Einfluss spezifischer
Einrichtungen in
Forschungsreaktoren
auf die Sicherheit

Isabell Fleck
Daniel Gockel
Timo Löher
Inés Mateos Canals
Manuel Obergfell
Isabel Steudel
Marcus Trapp
Rainer Wenke

November 2023

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4720R01300 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Experimentiereinrichtung, Forschungsreaktor, Klassifizierung

Kurzfassung

Dieser Bericht fasst Ergebnisse der Arbeiten zum Einfluss spezifischer Einrichtungen in Forschungsreaktoren auf die Sicherheit zusammen. Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag hierbei auf der Erstellung einer Methodik zur sicherheitstechnischen Klassifizierung von experimentellen Einrichtungen und Geräten in Forschungsreaktoren.

Ausgehend von dem IAEA Safety Guide SSG-24, der für experimentelle Einrichtungen und Geräte vier Sicherheitskategorien in Abhängigkeit von der Sicherheitssignifikanz unterscheidet, wurde in diesem Projekt eine Klassifizierung vorgenommen. Hierzu wurden für die Schutzziele – Einhaltung und Aufrechterhaltung der Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der Brennelemente und Begrenzung der Freisetzung von radioaktiven Stoffen (Erhalt der Barrieren) – je vier eigenständige Sicherheitskategorien definiert, um die Folgen aus Versagen, Fehlbedienung oder Betrieb bezogen auf die Einhaltung der Schutzziele zuzuordnen und somit die Sicherheitssignifikanz zu bestimmen. Für verschiedene experimentelle Einrichtungen und Geräte (Strahlrohre, kalte Quelle, heiße Quelle, Rohrpostanlagen, Konverterplatte, Bestrahlungs-/Dotierungsanlagen, thermische Säule) wurde darauf basierend eine generische Klassifizierung vorgenommen, welche die Sicherheitssignifikanz dieser Einrichtungen wiedergibt.

Ergänzend wurden die Folgen von Störfallverläufen und deren Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage für ausgewählte experimentelle Einrichtungen (Strahlrohre und kalte Quelle) mittels eines generischen ATHLET-Modells eines Forschungsreaktors untersucht.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
1	Einleitung	1
2	Zusammenstellung einer Übersicht über Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren und deren Betriebserfahrung.....	3
2.1	Strahlrohre/Neutronenleiter.....	4
2.2	Kalte Quellen	4
2.3	Heiße Quellen.....	5
2.4	Rohrpostanlagen/Bestrahlungseinrichtungen.....	6
2.5	Konverteranlagen	7
2.6	Thermische Säulen.....	8
2.7	In-Core Bestrahlungseinrichtungen.....	8
2.8	Betriebserfahrung mit Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren.....	9
3	Auswertung der regulatorischen Herangehensweise bei Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren	11
3.1	Übergeordnete Dokumente.....	11
3.1.1	IAEA-Dokumente	11
3.1.2	WENRA Safety Reference Levels für Forschungsreaktoren	17
3.2	Länderspezifische regulatorische Herangehensweisen.....	18
3.2.1	Ukraine	18
3.2.2	Russland	19
3.2.3	Niederlande	21
3.2.4	Frankreich.....	23
3.2.5	Australien	26
3.3	Fazit.....	29
4	Klassifizierung der Experimentiereinrichtungen.....	31

4.1	Methodik zur Klassifizierung von Experimentiereinrichtung.....	32
4.2	Klassifizierung in Sicherheitskategorien.....	34
4.2.1	Kontrolle der Reaktivität.....	36
4.2.2	Kühlung der Brennelemente	38
4.2.3	Einschluss von radioaktiven Stoffen (Erhalt der Barrieren)	39
4.2.4	Sicherheitskategorien experimenteller Einrichtungen.....	40
5	Untersuchung von Rückkopplungseffekten ausgewählter Experimentiereinrichtungen	45
5.1	Kalte Quelle	45
5.2	Leck im reaktivitätswirksamsten Strahlrohr	48
6	Zusammenfassung	55
	Literaturverzeichnis.....	57
	Abbildungsverzeichnis.....	61
	Tabellenverzeichnis.....	63

1 Einleitung

Auf Grund seiner jeweiligen Zielsetzung kommt in einem Forschungsreaktor eine Vielzahl von Experimentiereinrichtungen unterschiedlicher Bauart zur Anwendung (z. B. Bestrahlungseinrichtungen im Kern- und Moderatorbecken, Strahlrohrnasen, kalte und heiße Quellen in unmittelbarer Kernnähe). Je nach Bau- und Betriebsart des Reaktors und der Experimentiereinrichtungen, müssen diese bei der Bewertung der Sicherheit eines Forschungsreaktors berücksichtigt werden. Beispiele hierzu umfassen positive und negative Reaktivitätsänderungen durch Rohrpostsysteme, die Bestrahlung von Uran-Targets zur Isotopenproduktion oder zur Erzeugung schneller Neutronen (Konverter) zur medizinischen Anwendung, eine (teilweise) Freilegung des Kerns durch ein Versagen eines Strahlrohres sowie eine Gefährdung durch hohe Drücke und Temperaturen in Einrichtungen zur Simulation der Bedingungen in Leistungsreaktoren für Experimente im Rahmen der Brennelemententwicklung. Die Experimentiereinrichtungen können deshalb teils weitreichenden Einfluss auf die neutronenphysikalischen und thermohydraulischen Eigenschaften im stationären als auch transienten Verhalten des Reaktors haben. Zudem gilt es, die Schnittstellen zwischen den Experimentiereinrichtungen und den Sicherheitssystemen (z. B. Reaktorschutzsystem) zu berücksichtigen.

Der Einfluss der Experimentiereinrichtungen auf die Sicherheit von Forschungsreaktoren wird international und insbesondere im europäischen Kontext diskutiert. Die IAEA hat dieser Entwicklung 2012 mit der Veröffentlichung des SSG-24 „Safety in the Utilization and Modification of Research Reactors“ Rechnung getragen, welcher 2022 aktualisiert und überarbeitet wurde /IAE 22/. Mit den „Safety Reference Levels for Existing Research Reactors“ /WEN 20/ der WENRA wurden die Aspekte, welche spezifisch für Forschungsreaktoren sind, in den Sicherheitsanforderungen mitberücksichtigt und gesonderte Safety Reference Levels für Forschungsreaktoren festgelegt.

Im Rahmen dieses Vorhabens 4720R01300 „Untersuchungen zum sicheren Betrieb von Forschungsreaktoren“ wurde u. a. der Einfluss von Einrichtungen, welche spezifisch für Forschungsreaktoren sind, auf die Sicherheit von Forschungsreaktoren untersucht und bewertet. Hierbei galt es, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik insbesondere im Bereich der Experimentiereinrichtungen (z. B. Bestrahlungseinrichtungen im Kern und Moderatorbecken, Strahlrohrnasen, etc.) zu erfassen und offene Fragestellungen zu ermitteln sowie eine Methode für die Klassifizierung von Experimentiereinrichtungen zu entwickeln und anzuwenden, welche die Sicherheitssignifikanz dieser Einrichtungen wiedergibt.

In einem ersten Schritt wurden die Arten von Experimentiereinrichtungen und die zugehörige Betriebserfahrung erfasst (AP 1.1, in Abschnitt 2). In einem zweiten Schritt wurden regulatorische Bestimmungen und Genehmigungsprozesse von Experimentiereinrichtungen ausgewertet (AP 1.2, in Abschnitt 3). Der nächste Schritt bestand aus einer Klassifizierung der Experimentiereinrichtungen hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung. Hierbei wurden die spezifischen Einflussfaktoren, wie Einbauort oder mögliche Kritikalitätsveränderung der jeweiligen Experimentiereinrichtungen, erfasst und bewertet und die damit verbundenen Anforderungen ermittelt (AP 1.3, in Abschnitt 4). Als letzter Schritt wurden die möglichen Auswirkungen von durch Experimentiereinrichtungen ausgelösten repräsentativen Transienten/Störfällen auf die Sicherheit eines Forschungsreaktors mit Hilfe von neutronen-physikalischen Methoden bzw. eines bestehenden Analysesimulators untersucht (AP 1.4, in Abschnitt 5).

2 Zusammenstellung einer Übersicht über Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren und deren Betriebserfahrung

Für einen Überblick über Experimentiereinrichtungen in deutschen (BER II, FRM II, FRMZ) und ausländischen Forschungsreaktoren (TRIGA Wien, Opal, BR 1, BR 2, ILL-HFR, JHR, Osiris, Orphee, HFR Petten) wurden Unterlagen der verschiedenen Anlagen ausgewertet, um so zu den jeweiligen Einrichtungen der Anlagen Informationen zu erhalten und im Folgenden eine sicherheitstechnische Kategorisierung für Experimentiereinrichtungen zu ermöglichen. Hierzu wurden die Einbauorte der Experimentiereinrichtungen und somit der Abstand bzw. die Nähe dieser zum Reaktorkern erfasst, wie sie in einer allgemeinen Übersicht in Tab. 2.1 wiedergegeben sind. Ebenso wurden mögliche Versagensszenarien und deren Rückwirkung auf den Reaktor ermittelt, welche bei der Klassifizierung der Experimentiereinrichtungen herangezogen werden (siehe Tab. 4.1 im Abschnitt 4.2 auf Seite 35).

Tab. 2.1 Forschungsreaktoren, die wesentlichen Experimentiereinrichtungen und deren Einbauort

Forschungsreaktor	Experimentiereinrichtung	Einbauort
in den meisten FR	Strahlrohre	Am Kern, Reaktorbecken, Moderatortank, am Reflektor
Opal (AU), BER II (DE), FRM II (DE), ILL-HFR (FR), Orphee (FR)	Kalte Quelle	Am Kern, Moderatortank
FRM II (DE), ILL-HFR (FR), Orphee (FR)	Heiße Quelle	Am Kern, Moderatortank
Opal (AU), FRM II (DE), FRMZ (DE), JHR (FR), Osiris (FR), HFR Petten (NL), TRIGA Wien (A)	Bestrahlungsanlagen/Dotierungsanlagen	Am Kern, Reaktorbecken, Moderatortank, Absetzbecken, Reflektor
FRM II (DE)	Strahlrohrkonverteranlage	Moderatortank
FRMZ (DE), TRIGA Wien (A)	Thermische Säule	Reflektor, Reaktorbecken
BR 1 (BE), BR 2 (BE), BER II (DE), Osiris (FR)	In-core Bestrahlungseinrichtungen	Im Kern

Die Experimentiereinrichtungen, mögliche Versagensszenarien als auch Vorkehrungen zur Limitierung der Auswirkung oder frühzeitigen Erkennung auftretender Schäden werden im Folgenden diskutiert.

2.1 Strahlrohre/Neutronenleiter

Strahlrohre dienen dazu, im Reaktorkern erzeugte Neutronen über die Neutronenleiter zu den Experimentierplätzen zu leiten. Es gibt horizontale, schräge und vertikale Strahlrohre. Strahlrohre können direkt auf den Kern bzw. die jeweilige Neutronenquelle zeigen oder tangential dazu angeordnet sein. Je nach Entfernung der Strahlrohrnase zum Kern bzw. zur Quelle variiert das Neutronenspektrum. Tangentiale Strahlrohre transportieren deutlich weniger Gamma-Hintergrund und sind daher in vielen Fällen die bevorzugte Konfiguration.

Mögliche Versagensszenarien bei Strahlrohren sind Integritätsverluste/Beeinträchtigung der Barrierefunktion an verschiedenen Stellen. Abhängig vom jeweiligen Schadensort kann dies dazu führen, dass – je nach örtlichen Gegebenheiten – sich Moderator und Kühlmittel vermischen oder es zu Kühlmittelverlusten aus den Reaktorbecken in die Anlagenräume kommt. Im letzten Fall können damit auch radiologische Folgen für das Personal verbunden sein (Verschleppung). Reaktivitätsrückwirkungen sind ebenfalls denkbar, wenn sich Moderator und Kühlmittel mischen oder wenn sich aufgrund eines Lecks die ansonsten leeren Strahlrohre mit Wasser (H_2O oder D_2O) füllen.

Als präventive Maßnahmen werden verschiedene Lecküberwachungssysteme installiert, um Lecks frühzeitig erkennen und lokalisieren zu können. Zudem wird bei der Konstruktion der Strahlrohre darauf geachtet, dass mögliche Leckquerschnitte klein gehalten werden, um Leckraten zu minimieren.

2.2 Kalte Quellen

Als „Kalte Neutronenquelle“ wird eine Experimentiereinrichtung bezeichnet, in der niederenergetische („kalte“) Neutronen mit $E < 5 \text{ meV}$ gewonnen werden, die dann über Strahlrohre und Neutronenleiter zu den Experimenten geführt werden. Dazu wird ein kalter Zusatzmoderator in den Moderator tank eingebracht. Im Falle des FRM II ist dies flüssiges D_2 bei 25 K; es gibt jedoch auch kalte Quellen, die flüssiges oder (seltener)

überkritisches H_2 verwenden. In sogenannten ultrakalten Quellen kommt z. T. festes D_2 oder H_2 zum Einsatz.

Grundsätzliche Versagensarten bestehen in Leckereignissen oder im Ausfall der Kälteanlage oder Gasversorgung. Im Falle von Lecks sind grundsätzlich ein Eindringen von Luft oder ein Freisetzen des (dann gasförmigen) Moderators zu unterstellen, die zu brennbaren oder explosionsfähigen Atmosphären führen können. Aus diesem Grund und um eine thermische Isolierung zum Moderatortank zu erreichen, sind kalte Quellen mit einer Doppelwand-Konstruktion des Behälters ausgestattet, deren Zwischenraum zwischen den Behälterwänden evakuiert oder mit Inertgas (meist He oder N_2) gefüllt ist und auf Lecks von Moderator oder Kühlmittel überwacht wird. Sofern der Zwischenraum mit Inertgas gefüllt ist, steht dieser in der Regel unter Überdruck, so dass bei einem Leck kein unmittelbares Einströmen von Kühlmittel erfolgt, sondern erst Inertgas ausströmt.

Reaktivitätsrückwirkungen sind bei Störungen in der Kälteanlage vorstellbar. Jedoch würde ein fortgesetzter Reaktorbetrieb bei ausgefallener Kälteanlage zu einer starken Aufheizung und dadurch bedingter Beschädigung der Strukturwerkstoffe der kalten Quelle führen, weswegen bei einem Ausfall der Kälteanlage unbedingt die Reaktorleistung stark reduziert bzw. gleich RESA (Reaktorschnellabschaltung) ausgelöst wird. Daher spielen Reaktivitätsrückwirkungen nur eine untergeordnete Rolle.

Die ultrakalte Quelle des FRMZ unterscheidet sich im Wesentlichen von der zuvor beschriebenen, indem sie für Experimente in einem der Strahlrohre untergebracht und danach auch wieder entfernt werden kann.

2.3 Heiße Quellen

Mit einer heißen Neutronenquelle werden Neutronen im Energiespektrum 0,1 – 1 eV für Experimente zur Verfügung gestellt. Dazu wird ein heißer (ca. 2.600 °C) Graphitblock in den D_2O -Tank eingebracht. Der zylinderförmige Graphitblock wird ausschließlich durch Neutronen- und Gammastrahlung des Kerns aufgeheizt.

Grundsätzliche Versagensmöglichkeiten einer heißen Quelle sind Leckereignisse in der Umhüllung des Graphit-Moderators. Kommt es zum Kontakt zwischen (heißem) Graphit und Wasser (H_2O oder D_2O), würde letzteres verdampfen; ggf. wäre ein Druckaufbau zu unterstellen. Zur Verhinderung von Lecks und um eine thermische Isolierung zum

Moderatortank zu erreichen, sind heiße Quellen daher üblicherweise mit einer Doppelwand-Konstruktion der Behälter ausgestattet, in der der Zwischenraum zwischen beiden Behälterwänden evakuiert oder mit Inertgas (N_2 oder He) gefüllt ist und auf Lecks überwacht wird. Sofern der Zwischenraum mit Inertgas gefüllt ist, steht dieser in der Regel unter Überdruck, so dass bei einem Leck kein unmittelbares Einströmen von Kühlmittel erfolgt, sondern erst Inertgas ausströmt.

Zudem kann eine Temperaturüberwachung der Innenwand installiert sein. Überschreitet die Temperatur an der Innenwand einen bestimmten Wert, wird sicherheitsgerichtet (automatisch oder manuell) RESA ausgelöst.

Reaktivitätsrückwirkungen sind allenfalls zu erwarten, falls größere Mengen Graphit aus der heißen Quelle ausgewaschen werden und bspw. in den Reaktorkern gelangen. Angesichts der Doppelwandkonstruktion und den typischerweise kleinen Leckquerschnitten ist dies aber ein unwahrscheinlicher Effekt. Ebenso können Reaktivitätsrückwirkungen durch das Füllen des Zwischenraums der Doppelwand-Konstruktion mit Wasser (H_2O oder D_2O) bei einem Leck der äußeren Wandung auftreten.

2.4 Rohrpostanlagen/Bestrahlungseinrichtungen

Zur Bestrahlung von Werkstoffproben (z. B. verpackt in Polyethylenkapseln) können diese mittels Gebläse bis zu den Bestrahlungspositionen (z. B. im Moderatortank oder Reflektor) gefördert werden. Als Fördermedium kommt oft CO_2 hoher Reinheit zum Einsatz. Nach der Bestrahlung können die Proben in einer Parkposition unter Wasser zum Abklingen zwischengelagert werden. Die bestrahlten Proben können hinterher entweder in abgeschirmte Transportbehälter geladen oder mittels eines unterirdischen Rohrleitungssystems direkt zu Laboratorien transportiert werden. Eine Hochfluss-Rohrpostanlage kann für Substanzen mit Halbwertszeiten im Sekundenbereich vorhanden sein. Ihr Aufbau ist ähnlich der „normalen“ Rohrpostanlage. Ein Unterschied ist, dass die Be- und Entladestation mit Plätzen zur Probenmessung ausgestattet ist.

Für Langzeitbestrahlungen werden die Proben in Einheitskapseln aus Reinstaluminium verbracht. Diese werden in die Bestrahlungsrohre eingesetzt. Die Bestrahlungsrohre sind fest mit dem Moderatortank oder anderen Beckeneinbauten verbunden und werden durch Beckenwasser gekühlt. Bestrahlte Proben können oftmals unter Wasser an einer speziellen Stelle bis zur Entnahme abklingen.

Viele kleine Proben können auch mittels einer Drehteller-Bestrahlungseinrichtung bestrahlt werden. Dabei handelt es sich um einen rotierenden Zylinder, der die Proben aufnimmt. Die Drehung sorgt für eine Homogenisierung der Bestrahlung.

Hauptversagensszenarien von Bestrahlungseinrichtungen sind Lecks. So kann es entweder zum Eintrag von D_2O in das Beckenwasser kommen (sofern vorhanden), andererseits können Lecks auch zu Inventarverlust im Becken und/oder Moderatortank kommen. Bei Inventarverlust können auch radiologische Folgen für das Personal auftreten. Eine geeignete chemische Überwachung und ein Leckerkennungssystem können genutzt werden, um Lecks frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Reaktivitätsrückwirkungen und Neutronenflussschwankungen sind vorstellbar bei bestimmten Proben (z. B. Mo-99) in kernnahen Bestrahlungspositionen, wenn (ereignisbedingte) Verformungen/Geometrieänderungen auftreten oder Unregelmäßigkeiten in der Probenzusammensetzung vorhanden sind. Werden Abweichungen zu groß, kann die Reaktorleistung reduziert oder sicherheitsgerichtet eine RESA ausgelöst werden.

2.5 Konverteranlagen

Für einige Anwendungen wird ein intensiver Strahl schneller oder intermediärer Neutronen benötigt. Dafür kann mittels einer Konverteranlage eine Konverterplatte aus Uran-235 von außen z. B. in den Moderatortank eingefahren werden. In dieser Platte werden – induziert durch die Neutronen, die durch ein Strahlrohr zur Konverteranlage gelangen – Spaltungen ausgelöst, die zu einem Spaltspektrum aus schnellen Neutronen führen. Mittels eines Spektrumshifters und/oder Filtern kann ein intermediäres Neutronenspektrum erzeugt werden. Die erzeugten Neutronen werden durch das Strahlrohr zu den Experimenten geführt. Die Konverterplatte kann auch aus dem Strahlengang entfernt werden, sodass am Experiment ein thermisches Neutronenfeld ankommt.

Die Konverterplatte muss während des Betriebes aktiv gekühlt werden. Dafür steht üblicherweise ein aktives Kühlsystem zur Verfügung, dessen Funktionieren leittechnisch überwacht wird. Kommt es zu Störungen in der Plattenkühlung, wird daher die Platte aus dem Strahlengang entfernt und/oder RESA ausgelöst. Für die Abfuhr der Nachzerfallswärme der Platte ist meist keine aktive Kühlung notwendig. Signifikante Reaktivitätsrückwirkungen auf den Reaktorkern sind aufgrund der oft größeren Entfernung und der insgesamt eher geringen Menge U-235 unwahrscheinlich.

Weitere mögliche Versagensszenarien sind verschiedene Lecks. Je nach Einbausituation kann es potenziell zum Transport von Moderatormedium in das Beckenwasser und umgekehrt kommen. Denkbar sind auch Lecks mit einem Verlust von Beckenwasser oder Moderatormedium in die umliegenden Anlagenräume mit entsprechenden radiologischen Folgen für das Personal. Eine geeignete Lecküberwachung hilft, Lecks frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten. Zusätzlich sind konstruktive Vorkehrungen (z. B. kleine mögliche Leckquerschnitte, Doppeldichtungen) möglich.

2.6 Thermische Säulen

Zur Erzeugung thermischer Neutronen können sog. Thermische Säulen eingesetzt werden. Im Prinzip handelt es sich dabei um einen Graphit-Moderator, der in einem Behälter im Strahlengang eingebracht ist und die Neutronenstrahlung thermalisiert. Um Aufheizung wie bei einer heißen Quelle zu vermeiden, wird er durch Pool- oder Moderatormedium gekühlt.

Mögliche Versagensarten beschränken sich im Wesentlichen auf Leckereignisse. Lecks in der Umhüllung der Thermischen Säule könnten zum Inventarverlust von Becken- oder Moderatormedium (H_2O oder D_2O) führen. Eine Lecküberwachung kann derartige Schäden frühzeitig erkennen. Radiologische Folgen für das Personal wären ebenfalls möglich.

Reaktivitätsrückwirkungen wären dann zu unterstellen, wenn durch große Lecks signifikante Mengen Graphit ausgewaschen und in den Reaktorkern gelangen würden. Da Lecks aber üblicherweise klein beginnen (und dann über das Lecküberwachungssystem gefunden würden), ist dies ein unwahrscheinlicher Effekt.

2.7 In-Core Bestrahlungseinrichtungen

In den deutschen Forschungsreaktoren FRM II und FRMZ sind keine Experimente mit In-Core-Bestrahlungseinrichtungen möglich bzw. vorgesehen, weswegen hier keine vertiefte Beschreibung dieser Experimentiereinrichtung erfolgt. Für die Nutzung von In-Core-Bestrahlungseinrichtungen wird ein Reaktorkerndesign gewählt, bei dem Bereiche innerhalb des Reaktorkerns frei sind und ausreichend Raum bieten, so dass dort in sich geschlossene Experimentiereinrichtungen während des Betriebs platziert werden können. Diese Experimente sind in Konstruktionen untergebracht, die nach dem Mehr-

Barrieren-Prinzip konstruiert sind und deren Integrität entsprechend separat überwacht wird. Sie sind sehr unterschiedlich, je nach Art des Versuches, gestaltet (z. B. mit eigener Heizung, mit eigenem Druckwasserkreislauf).

2.8 Betriebserfahrung mit Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren

Vereinzelte Ereignisse in Forschungsreaktoren, bei denen Experimentiereinrichtungen betroffen waren und die zu Leistungsänderungen im Reaktor oder zu einem Leck führten, sind dokumentiert (Datenbank der IAEA zu Forschungsreaktoren – IRSRR, IGORR und RRFM Konferenzen). Insbesondere Ereignisse mit Experimentiereinrichtungen oder Proben, die zu Leistungsänderungen, der Auslösung einer RESA, Lecks, einer Verschleppung oder Freisetzung führten werden im Folgenden betrachtet.

2013 kam es in einem deutschen Forschungsreaktor zu einem Leck an einem Strahlrohr, was beim Entfluten eines Kollimators durch aufsteigende Blasen in das Betriebsbecken entdeckt wurde. In einem österreichischen Forschungsreaktor wurde 2001 bei einem Test an einem neuen pneumatischen Transfersystem eine Rohrverbindung im Pool zerstört und durch Druckunterschiede und den Siphon-Effekt kam es zu einem Kühlmittelverlust aus dem Pool heraus, bei dem es zu keinerlei Verschleppung kam. Die Konstruktion der Rohrverbindungen wurde angepasst. Zu Lecks an Strahlrohren kam es in den ersten Betriebsjahren eines australischen Forschungsreaktors. Diese traten an Strahlrohr-Durchführungsflanschen durch den Moderatortank auf, welche Doppeldichtungen besitzen, und wurden durch die Lecküberwachung für den Zwischenraum zwischen den Dichtungen erkannt. Eine genaue Ursache für diese Schäden wird nicht genannt. Das Dichtungskonzept für diese Doppeldichtungen wurde dahingehend überarbeitet, dass ein anderer Werkstoff verwendet wurde. Ebenfalls zu einem Leck führten gelockerte Verbindungsschrauben an einem Strahlrohr in einem russischen Forschungsreaktor im Jahr 1989. Dadurch gelangte kontaminiertes Beckenwasser bis in den Untergrund unter den Reaktor. Infolgedessen wurden Überwachungsmaßnahmen und Prüfintervalle angepasst.

Im Jahr 2004 löste sich in einem argentinischen Forschungsreaktor bei Handhabungsvorgängen mit Bestrahlungsproben am Reaktor unbeabsichtigt ein Xe-Probenbehälter und trieb an die Oberfläche. Durch die Strahlenschutzüberwachung wurde dadurch Alarm und auch eine RESA durch den Reaktorschutz ausgelöst. Die Belastung des

Personals blieb dabei unterhalb erlaubter Grenzwerte. Die Konstruktion der Handhabungswerkzeuge, der Behälterhalterungen wurde überprüft und wo möglich verbessert und die Schulung wurde intensiviert. Zu Schäden an Probenbehältern kam es u. a. im Jahr 2000 in einem indonesischen Forschungsreaktor, wobei es hier zu einer Freisetzung in das Primärkühlmittel kam, was durch die Gamma-Dosis-Überwachung erkannt wurde und eine RESA durch den Reaktorschutz verursachte. Der Probenbehälter war nicht richtig verschlossen. Im Jahr 1999 wurden zwei Proben in einem pakistanischen Forschungsreaktor beschädigt, da sie wegen eines Fehlers in der Rohrpostanlage zu lange bestrahlt wurden. Dadurch kam es auch zu einer Freisetzung in die Rohrpostanlage und in die Filter der Rohrpostanlage. Erhöhte Strahlenwerte wurden auch in angrenzenden Räumen gemessen. Die Räume mussten dekontaminiert werden. In einem polnischen Forschungsreaktor versagte 1991 die Dichtung eines Probenbehälters während der Bestrahlung, wodurch es zu einer Freisetzung innerhalb der Anlage kam, die unterhalb der Nachweisgrenze lag. Die Probenmenge in dem Behälter war größer als vorgesehen, wodurch in dem Behälter ein zu hoher Druck entstand.

Im Jahr 2001 traten Beschädigungen an Quarzglas-Proben, die wiederum in einem Probenbehälter untergebracht waren, in einem deutschen Forschungsreaktor auf. Das führte zu einer Verdrängung von Wasser innerhalb des Probenbehälters, der intakt blieb, und verursachte einen Leistungsanstieg im Reaktor. Infolgedessen wurde eine RESA durch den Reaktorschutz ausgelöst. Zu Leistungsexkursionen durch das Entfernen von Experimenten und infolgedessen zu RESA über das Reaktorschutzsystem kam es in einem amerikanischen Forschungsreaktor im Jahr 1986 und nochmals im Jahr 2022. In Folge des Ereignisses 2022 wurden administrative Änderungen vorgenommen.

3 Auswertung der regulatorischen Herangehensweise bei Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren

Im Folgenden werden internationale als auch nationale regulatorische Vorgaben an Forschungsreaktoren und deren Experimentiereinrichtungen u. a. hinsichtlich sicherheitstechnischer Einstufung von Experimentiereinrichtungen, Sicherheitsanalysen für Experimentiereinrichtungen und Auswirkungen von Experimentiereinrichtungen auf den Forschungsreaktor, untersucht. Hierbei wurden sowohl internationale Leitlinien (IAEA, WENRA) als auch nationale Leitlinien einiger ausländischer Länder (Ukraine, Russland, Niederlande, Frankreich, Australien) betrachtet.

3.1 Übergeordnete Dokumente

In verschiedenen Dokumenten der IAEA oder WENRA werden Vorgaben zum sicheren Betrieb von Forschungsreaktoren und deren Experimentiereinrichtungen gemacht. Diese internationalen Leitlinien werden von verschiedenen Staaten in unterschiedlichem Maße als Grundlage für nationale Regelwerke zu Forschungsreaktoren und deren Experimentiereinrichtungen genutzt.

3.1.1 IAEA-Dokumente

In zwei IAEA Dokumenten werden u. a. die Klassifizierung und Hinweise zur Umsetzung von Sicherheitsanforderungen (IAEA SSG-24) an Experimentiereinrichtungen sowie Beispiele für die Umsetzung von Anforderungen an die Auslegung und Gestaltung (IAEA Technical Reports Series No. 455) von Experimentiereinrichtungen in verschiedenen Forschungsreaktoren beschrieben, welche im Folgenden wiedergegeben werden.

3.1.1.1 IAEA SSG-24

Kapitel 3 des IAEA Dokuments IAEA SSG-24 „Safety in the Utilization and Modification of Research Reactors“ /IAE 12/ behandelt die Entwicklung eines Sicherheitsklassifizierungssystems, welches auf den möglichen Sicherheitsauswirkungen von Experimenten und den Auswirkungen von Nutzungs- oder Änderungsprojekten auf die Sicherheit von Forschungsreaktoren basiert. Die Kategorisierung von Experimenten soll dabei helfen, die Details und den Umfang von notwendigen Sicherheitsanalysen zu bestimmen sowie den sicherheitstechnischen Einfluss der experimentellen Geräte und Einrichtungen zu

erfassen, welcher bei der Auslegung entsprechend berücksichtigt werden muss. Hierbei sollten unter anderem Kritikalitätsaspekte, Reaktivitätsaspekte, Bestrahlungen innerhalb und außerhalb des Kerns, Experimente innerhalb oder außerhalb der biologischen Abschirmung oder Eindämmung, physikalische Bedingungen, Verhalten von Komponenten, mechanische bzw. thermische Beanspruchungen und Verhalten von Bauteilen berücksichtigt werden. Die Hinweise zur Umsetzung der Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach IAEA SSG-24 sind in Tab. 3.1 zusammengefasst. Alle Experimente sollten einer Sicherheitsklasse zugeordnet werden, die die potenziellen Auswirkungen auf die Sicherheit widerspiegelt. Die Klassifizierung bestimmt, in welchem Umfang Sicherheitsbewertungen durchzuführen sind. Die Sicherheitsklassen sind folgende:

- **Experimente mit erheblichen Auswirkungen auf die Sicherheit (SSG 24 Abschnitt 3.13 – 3.20, Seite 14 folgende)**

Die Sicherheitsanalyse und die Konstruktions-, Bau- und Inbetriebnahme-Verfahren sollten denen des Forschungsreaktors entsprechen, um sicherzustellen, dass sie den gleichen Anforderungen wie die vorhandenen Strukturen, Systeme und Komponenten entsprechen. Die Bewertung der Strahlenexposition sollte für alle Reaktorzustände durchgeführt werden und Änderungen sollten dokumentiert werden. Alle neuen oder geänderten Elemente, die für die Sicherheit wichtig sind, sollten dokumentiert werden und Informationen, die für eine Unfallanalyse und die Festlegung von mitigativen Maßnahmen gegen die Auswirkungen von Unfällen erforderlich sind, sollten ebenfalls definiert werden. Änderungen an Forschungsreaktoren und experimentellen Einrichtungen/Geräten, die einen erheblichen Einfluss auf die Sicherheit haben, sollten von den Sicherheitsausschüssen überprüft und der Regulierungsbehörde zur Überprüfung und Genehmigung, nach demselben Verfahren wie für den Reaktor selbst, vorgelegt werden. Wenn sich die Änderung am Forschungsreaktor oder der experimentellen Einrichtung auf die Bedingungen für die Erteilung der ursprünglichen Genehmigung auswirkt, sollte ein geeignetes Verfahren zur Überprüfung der Genehmigungsbedingungen angewendet werden. Ebenso sollten Betriebsverfahren und Notfallverfahren überprüft werden, um eventuelle Anpassungen aufgrund der Änderung am Forschungsreaktor oder der experimentellen Einrichtung vornehmen zu können und gegebenenfalls genehmigen zu lassen.

- **Experimente mit bedeutenden Auswirkungen auf die Sicherheit (SSG 24 Abschnitt 3.21 – 3.28, Seite 15 folgende)**

Die Sicherheitsdokumentation für solche Projekte, die komplexe Experimente, experimentelle Einrichtungen und Modifikationen umfassen kann, sollte eine umfassende und detaillierte Beschreibung des Experiments oder der Modifikation sowie seiner Konstruktion enthalten. Die Sicherheitsanalyse sollte alle Betriebszustände sowie die Unfallbedingungen abdecken und zeigen, dass die Genehmigungsbedingungen und die ursprünglichen Sicherheitsgrenzen nicht beeinträchtigt werden und, dass die radiologischen Folgen der experimentellen Einrichtung oder der Änderung am Forschungsreaktor innerhalb der erlaubten Grenzen für alle Betriebszustände als auch bei Unfallbedingungen liegen. Die Sicherheitsdokumentation für das Experiment sollte die Verantwortlichkeiten und Pflichten des Bedienungspersonals, der Experimentatoren und anderer am Projekt beteiligter Personen abdecken. Alle neuen oder geänderten Elemente, die für die Sicherheit wichtig sind, sollten in die Sicherheitsdokumentation aufgenommen werden. Die Sicherheitsdokumentation sollte vom Verantwortlichen der Anlage für die Reaktorsicherheit in Bezug auf Sicherheit, Funktionsfähigkeit und Kompatibilität mit anderen Experimenten und Reaktorsystemen überprüft und genehmigt werden. Änderungen an Forschungsreaktoren und experimentellen Einrichtungen, die bedeutende Auswirkungen auf die Sicherheit haben, sollten von den Sicherheitsausschüssen überprüft und der Regulierungsbehörde zur Überprüfung und Genehmigung gemäß den regulatorischen Anforderungen vorgelegt werden. Die Betriebs- und Notfallverfahren sollten dahingehend überprüft werden, ob sie infolge der Änderung oder Nutzung überarbeitet werden müssen.

- **Experimente mit geringer Sicherheitsbedeutung (SSG 24 Abschnitt 3.29 – 3.31, Seite 16)**

Experimente und Modifikationen mit geringer Sicherheitsbedeutung umfassen kleine Änderungen an Strukturen, Systemen oder Komponenten für wiederholte Probenbestrahlungen oder Experimente. Hierbei sollten Kriterien gegenüber der ursprünglichen Auslegung definiert werden, nach denen die Bestrahlung als sich wiederholendes Experiment angesehen werden kann und so eine Genehmigung durch den Verantwortlichen der Anlage für die Reaktorsicherheit ausreichend ist, ohne dass eine erneute Einreichung beim Sicherheitsausschuss oder bei den Regulierungsbehörden erforderlich ist. Dennoch sollten die Aufzeichnungen von Änderungen an

Forschungsreaktoren oder experimentellen Einrichtungen dem Sicherheitsausschuss zur Überprüfung vorgelegt werden.

- **Experimente ohne Auswirkung auf die Sicherheit (SSG 24 Abschnitt 3.32 – 3.34, Seite 16 f.)**

Eine Prüfung des Experiments oder dessen Modifikation ist notwendig. Diese sollte auf einer Beschreibung der Modifikation oder des Experiments zusammen mit einer Bewertung ihrer Auswirkungen beruhen. Die Sicherheitsausschüsse sollten die Aufzeichnungen über Änderungen an Forschungsreaktoren und experimentelle Einrichtungen regelmäßig überprüfen.

In den nachfolgenden Kapiteln des IAEA SSG-24 wird darüber hinaus beschrieben, dass experimentelle Einrichtungen und Geräte grundsätzlich so installiert, betrieben und außer Betrieb genommen werden sollten, dass die Sicherheit des Reaktors nicht beeinträchtigt wird und in allen Betriebszuständen die Strahlenexposition innerhalb der Dosisgrenzen bleibt. Die experimentellen Einrichtungen sollten so konzipiert sein, dass zusätzliche Anforderungen an das Reaktorabschaltsystem minimiert werden und sie ohne Aktivierung des Reaktorabschaltsystems in einen sicheren Zustand gebracht werden können. Wann immer möglich, sollten experimentelle Einrichtungen und Geräte so konzipiert sein, dass der Bedarf an aktiven Sicherheitsvorrichtungen minimiert wird (z. B. durch passive Systeme). Sicherheitsvorrichtungen, die mit dem Reaktorschutzsystem verbunden sind, sollten so ausgelegt sein, dass die Wirksamkeit des Reaktorschutzsystems erhalten bleibt. Im Fall, dass eine experimentelle Einrichtung eine Gefahr für den Reaktor oder das Personal darstellen könnte, sollte das Schutz- und Kontrollsystem dieser Einrichtung an das Reaktorschutzsystem angeschlossen werden, um bei Versagen der experimentellen Einrichtung eine Reaktorleistungsreduzierung oder Reaktorabschaltung vornehmen zu können. Die Versuchseinrichtungen sollten das Strahlenschutzprogramm nicht wesentlich beeinflussen und positive Reaktivitätseffekte sollten vom Reaktorschutzsystem sicher aufgenommen werden können. Des Weiteren sollten die Auswirkungen von Wechselwirkungen der Neutronen aus den experimentellen Einrichtungen mit Kernkomponenten, Brennstoff oder anderen Experimenten berücksichtigt werden. Hierbei sollten vor allem die Auswirkungen auf die Leistungsverteilung in den Brennelementen und auf die Steuerbarkeit von Reaktivitätsänderungen sorgfältig bewertet werden.

Tab. 3.1 Hinweise zur Umsetzung von Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach IAEA SSG-24 /IAE 12/

Hinweise zur Umsetzung von Anforderungen an experimentelle Einrichtungen/Geräte
<ul style="list-style-type: none">• Einteilung in Sicherheitsklassen (Sicherheitsanalysen entsprechend der Sicherheitsklasse)• Betrieb ohne Beeinflussung der Reaktorsicherheit• Strahlenexposition innerhalb der Dosisgrenzen• Anforderung an Reaktorabschaltsystem minimieren• Sicherer Zustand ohne Aktivierung des Reaktorabschaltsystems• Tolerierbare positive Reaktivitätseffekte• Berücksichtigung von Neutronen-Wechselwirkungen

3.1.1.2 IAEA Technical Reports Series No. 455

Der technische Report „Utilization Related Design Features of Research Reactors: A Compendium“ (IAEA Technical Reports Series No. 455) /IAE 07/ enthält eine Sammlung von Beiträgen zu den unterschiedlichen Einrichtungen (für Forschung, Ausbildung und Produktion) in verschiedenen Forschungsreaktoren. In den einzelnen Kapiteln wird auf verschiedene Forschungsreaktoren, den Entwurf, die Konstruktion und den Betrieb der experimentellen Einrichtungen sowie auf die Anforderungen an die unterschiedlichen experimentellen Einrichtungen oder Geräte eingegangen. Zu den Anforderungen zählen Sicherheitsanalysen in der Entwurfsphase, die es wiederum ermöglichen, die Anforderungen an die nukleare Sicherheit in die Planung zu integrieren und die Experimente/Geräte gemäß den Sicherheitsvorschriften zu entwerfen und zu integrieren. Weiterhin sollen sicherheitsrelevante Funktionen (Überwachung der Eindämmung, Energiefreisetzung, Freisetzung von Radioaktivität usw.) für das betreffende Experiment/Gerät, den Reaktor und die anderen experimentellen Einrichtungen vorhanden sein. Die Sicherstellung der Verfügbarkeit wird durch die Identifizierung von potenziellen Risiken, Gestaltung von Barrieren zur Begrenzung gefährlicher Stoffe und Berücksichtigung der Betriebszustände (u. a. Normalbetrieb, Unfall) in der Auslegung gewährleistet. Die Forschungsreaktoren beherbergen eine große Anzahl von Versuchsgeräten, die alle ihre eigenen Eigenschaften haben. Die experimentellen Geräte sollen so konzipiert sein, dass sie neben anderen experimentellen Geräten und Reaktoreinbauten funktionieren. und dürfen nur lokale Veränderungen hervorrufen, wie lokale Reduzierung des Flusses, Schatteneffekte und Änderung der Kühlbedingungen. Die Veränderungen sollen von

dem Forschungsreaktor und dessen Systemen beherrschbar sein. Darüber hinaus darf der Betrieb von Versuchsgeräten keine nennenswerten Betriebsänderungen oder eine Verringerung der Sicherheit des Forschungsreaktors bewirken. Weiterhin wird die Wartung von Geräten häufig durch das gleichzeitige Vorhandensein mehrerer Geräte auf engstem Raum erschwert. Deshalb sollen geeignete Mittel vorhanden sein, um Wartungen zu erleichtern. Die Anforderungen an die verschiedenen experimentellen Einrichtungen und Geräte, wie sie in verschiedenen Forschungsreaktoren bestehen, sind in Tab. 3.2 zusammengefasst.

Tab. 3.2 Beispiele für Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach IAEA Technical Reports Series No. 455 /IAE 07/

Experimentelle Einrichtung/Gerät	Anforderung
Strahlrohre	<ul style="list-style-type: none"> • Barrieren (Trennwände, Membranen, Stopfen) zur Vermeidung von Wassereintrag/-austrag • Abschirmung/Sicherheit gegen Neutronenleckage • Materialauswahl (Alterung, Versprödung durch Bestrahlung) • (Leckage-) Detektoren • Berücksichtigung Reaktivitätseinflüsse
Material- und Brennstoffexperimente	<ul style="list-style-type: none"> • Überwachung von relevanten Parametern (Neutronenfluss, Neutronenspektrum, T, Probenabmessung, Spaltgasdruck etc.) • Barrieren
Bestrahlungseinrichtungen für Radioisotop-Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeabfuhr (Proben, Probenbehälter) • Reaktivitätskontrollsysteme • Integrität des Probenbehälters (Kontaminationsvermeidung) • Barrieren
Kalte Quellen	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlung • automatische Reaktorabschaltung bei Kühlausfall/Betriebsinstabilität • Vermeidung von Wasserstoff-Sauerstoff-Gemischen durch Barrieren (Doppelbarrieren mit Inertgas/Vakuum) • Überwachung sicherheitsrelevanter Parameter

3.1.2 WENRA Safety Reference Levels für Forschungsreaktoren

Im WENRA Report „Safety Reference Levels for Existing Research Reactors“ /WEN 20/ werden im Kapitel „Experimentelle Einrichtungen und Experimente“ (Issue X) Aussagen zum sicheren Betrieb von Forschungsreaktoren und deren experimentellen Einrichtungen und Experimenten gemacht. In sieben Referenz Leveln werden übergeordnete Anforderungen an experimentelle Einrichtungen definiert. Generell gilt, dass die experimentellen Einrichtungen und Versuchsgерäte so ausgelegt sein sollen, dass die Sicherheit des Forschungsreaktors in allen Betriebszuständen oder unter Unfallbedingungen nicht beeinträchtigt wird. Weder Montage, Einsatz und Entfernung der Experimentiereinheit, noch Betrieb, Wartung oder Ausfall dürfen die Kontrolle der Reaktivität, das Reaktorschutzsystem, die Kühlkapazität oder den Einschluss radioaktiver Stoffe beeinträchtigen. Für jede experimentelle Einrichtung bzw. jedes Gerät soll die Auslegung durch eine Sicherheitsanalyse überprüft werden, die mindestens dessen radioaktives Inventar, dessen möglichen Beitrag zur Energieerzeugung des Reaktors, eventuell durch postulierte Ereignisse verursachte Schäden sowie Wechselwirkungen zwischen den Experimenten und dem Forschungsreaktor berücksichtigt. Alle Experimente, die eine sicherheitstechnische Bedeutung haben, sollen derselben Sicherheitsanalyse und denselben Verfahren für Konstruktion, Herstellung, Installation, Inbetriebnahme und Betrieb unterzogen werden, wie der Reaktor selbst. Wenn es für den sicheren Betrieb des Reaktors und der experimentellen Einrichtung erforderlich ist, soll die Überwachung der Betriebsparameter im Kontrollraum möglich sein. In Tab. 3.3 sind die Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte zusammengefasst.

Tab. 3.3 Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach WENRA /WEN 20/

Anforderungen an experimentelle Einrichtungen/Geräte
<ul style="list-style-type: none">• Auslegung entsprechend den Schutzziele zu Einhaltung der Reaktorsicherheit• keine Beeinträchtigung der Reaktivitätskontrolle, des Reaktorschutzsystems, der Kühlkapazität etc.• Sicherheitsanalyse jeder experimentellen Einrichtung/jedes Gerätes• Experimente mit Sicherheitsbedeutung: gleiche Anforderungen (u. a. an Konstruktion, Herstellung) wie bei Reaktor

3.2 Länderspezifische regulatorische Herangehensweisen

Die regulatorische Herangehensweise verschiedener Länder (Ukraine, Russland, Niederlande, Frankreich, Australien) hinsichtlich allgemeiner Vorgaben für Forschungsreaktoren und spezifischer Anforderungen an Experimentiereinrichtungen wird im Folgenden wiedergegeben.

3.2.1 Ukraine

„General Provisions on Subcritical Nuclear Facility Safety” /SNR 12/

Die ukrainischen Sicherheitsanforderungen an Forschungsreaktoren die unterkritisch betrieben werden „General Provisions on Subcritical Nuclear Facility Safety” /SNR 12/ beschreiben einleitend allgemeine Sicherheitskriterien, die das Personal, die Bevölkerung sowie die Umwelt vor radioaktiver Strahlung schützen sollen. Die Anforderungen an unterkritische kerntechnische Anlagen gelten auch für andere Forschungsreaktoren mit höherer Leistung und basieren auf den ukrainischen Strahlenschutznormen. Die organisatorischen und technischen Sicherheitsprinzipien werden in grundlegende Prinzipien (Gewährleistung der Sicherheitskultur, Vorgaben und Auflagen der Regulierungs- und Aufsichtsbehörde, Defense-in-Depth Strategie etc.) und allgemeine Prinzipien (u. a. Anwendung anerkannter technischer Praktiken, Berücksichtigung Human Factors) eingeteilt. Ein Überwachungssystem (CMS - control and management system) kontrolliert technische Prozesse, Komponenten und Einrichtungen sowie die Anlage generell und garantiert die Sicherheit des Reaktors bei Experimenten. Hierzu überwacht es Parameter, wie zum Beispiel den Neutronenfluss, und alarmiert bei Überschreitung von Grenzwerten. Eine Einbindung von Signalen von experimentellen Einrichtungen in den Reaktorschutz und ein automatisches Herunterfahren des Reaktors ist möglich. Experimentiereinrichtungen, für die dies vorgesehen ist, werden nicht explizit genannt. Vor der Durchführung von Experimenten soll eine Bewertung über die möglichen Auswirkungen auf die Reaktivität vorgenommen sowie Maßnahmen zur Gewährleistung der nuklearen Sicherheit festgelegt werden.

Unterschiedliche Unfallszenarien werden betrachtet, wie der Rohrbruch von experimentellen Einrichtungen, die sowohl in der Auslegung berücksichtigt werden als auch solche, die als auslegungsüberschreitend gelten. Ebenso wird die Einbringung positiver Reaktivität durch experimentelle Einrichtungen als ein Szenario aufgeführt.

Generell enthält dieses Dokument nur wenige explizit auf experimentellen Einrichtungen oder Geräte gemünzten Vorgaben (u. a. Einbindung des Reaktorschutzes, Wechselwirkungen durch Experimente, Unfallszenarien). Die Vorgaben beziehen sich auf den Reaktor insgesamt und schließen experimentelle Einrichtungen implizit ein. Die hieraus ableitbaren Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte sind in Tab. 3.4 zusammengefasst.

Tab. 3.4 Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach ukrainischen Leitlinien /SNR 12/

Anforderungen an experimentelle Einrichtungen/Geräte
<ul style="list-style-type: none"> • Überwachung von Grenzwerten • Berücksichtigung von Neutronenwechselwirkungen • Analyse der zu erwartenden Auswirkungen (z. B. auf Reaktivität) • Einhaltung des Strahlenschutzes • Auslegung entsprechend Erhalt der Reaktorsicherheit

3.2.2 Russland

Federal Rules and Regulations in the Area of Atomic Energy use „Requirements for Contents of Safety Analysis Reports for Nuclear Research Installations” (NP-049-17) /FED 17/;

Federal Rules and Regulations in the Area of Atomic Energy use „Nuclear Safety Rules for Critical Test Stands” (NP-008-16) /FED 16/

Das russische Regelwerk enthält keine spezifischen Anforderungen an Experimentiereinrichtungen. Hierzu werden generelle Auslegungsanforderungen an sicherheitsrelevante Systeme und Komponenten in Forschungsreaktoren, wie sie in /FED 17/ beschrieben werden, angewendet. Dazu zählen die Berücksichtigung von mechanischen, thermischen, chemischen, Strahlungs- und anderen internen Auswirkungen, die in den unterschiedlichen Betriebszuständen möglich sind, einschließlich Unfällen, sowie externen Einwirkungen. Die experimentellen Systeme und Komponenten werden unterschieden nach:

- Zweck
 - Normale Betriebssysteme/Komponenten
 - Sicherheitssysteme/-komponenten

- Auswirkungen auf die Sicherheit
 - Sicherheitsrelevant
 - Nicht sicherheitsrelevant
- Art der ausgeführten Sicherheitsfunktionen.

Dadurch wird eine Kategorisierung der experimentellen Einrichtungen in sicherheitsrelevante und nicht sicherheitsrelevante vorgenommen. Weiterhin werden die Komponenten in vier Sicherheitsklassen unterteilt. Ausfälle von Komponenten der Sicherheitsklasse 1 liegen außerhalb der Auslegung und führen zu Kernbrennstoffschäden. Die Sicherheitsklasse 2 umfasst Komponenten, deren Ausfall Beschädigungen am Kern und Primärkreislauf innerhalb der Auslegungsgrenzwerte umfasst sowie Sicherheitssystemausfälle, bei denen die entsprechenden Systeme ihre Funktionen nicht erfüllen können. Die Sicherheitsklasse 3 umfasst die sicherheitsrelevanten Komponenten, die nicht in den ersten beiden Klassen enthalten sind und Sicherheitsklasse 4 beinhaltet alle nicht sicherheitsrelevanten Komponenten. Informationen zum Stand von Sicherheitssystemen während der unterschiedlichen Betriebszustände sollen auch für experimentelle Einrichtungen und Geräte bereitgestellt werden.

Die Auslegung von experimentellen Einrichtungen und Geräten soll jegliche Möglichkeit einer spontanen Bewegung dieser Einrichtungen/Geräte sowie der Proben im Verlauf ihres Betriebs im Reaktor ausschließen. Der Einschluss radioaktiver Substanzen soll auch im Falle eines Bruchs der experimentellen Einrichtungen/Geräte/Proben durch Sicherheitsbarrieren und Lokalisierungssysteme gewährleistet sein. Die Sicherheitsbarrieren sowie Rohrleitungen und weitere Einrichtungen werden Pneumatik-, Druck- und Temperaturprüfungen unterzogen, ebenso gibt es Anforderungen an die verwendeten Materialien. Wenn das Einbringen bzw. Austauschen von experimentellen Komponenten und Proben einen positiven Reaktivitätsanstieg β_{eff} von mehr als 0,3 bewirkt, sind diese Arbeiten bei abgeschaltetem Reaktor durchzuführen /FED 16/. Weiterhin darf bei einem positiven Reaktivitätsanstieg β_{eff} von mehr als 0,3 eine zeitliche Änderungsrate $\beta_{\text{eff}/s}$ von 0,7 nicht überschritten werden. Vorgänge zum Installieren (Entladen) der Proben/Testobjekte können ohne Einschränkungen für das Einfügungsintervall (β_{eff} 0,3) und die zeitliche Änderungsrate ($\beta_{\text{eff}/s}$ 0,7) für einen positiven Reaktivitätsanstieg durchgeführt werden, falls dabei der Wert von k_{eff} (effektiver Neutronenmultiplikationsfaktor) vor, während und nach den Arbeiten 0,95 nicht überschreitet.

Des Weiteren sind die Bedingungen, der Umfang sowie die Häufigkeit von Inspektionen der experimentellen Einrichtungen und Geräten zu definieren. Durch Berechnungen und experimentelle Bewertungen sollen die Auswirkungen der experimentellen Einrichtungen auf die Reaktivität, die Aktivitätsverteilung innerhalb des Kerns und auf die Sicherheitssysteme dargelegt werden. Änderungen an experimentellen Einrichtungen/Geräten dürfen keine negativen Auswirkungen auf den sicheren Betrieb des Forschungsreaktors haben und wichtige Parameter (z. B. Neutronenflussdichte) sollen überwacht sein. Es soll eine sichere Durchführung der Experimente und der Probenbeladung und Probenentladung gewährleistet sein. Dazu zählt auch eine Minimierung der Strahlenbelastung für das Betriebspersonal. In Tab. 3.5 sind die Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte in russischen Forschungsreaktoren zusammengefasst.

Tab. 3.5 Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach russischen Leitlinien /FED 17/

Anforderung an experimentelle Einrichtungen/Geräte
<ul style="list-style-type: none"> • Einschluss radioaktiver Substanzen (Sicherheitsbarrieren, Überwachungssysteme) • Beschränkung des zulässigen Reaktivitätsanstieges • Evaluierung der Auswirkungen auf den Kern und Sicherheitssysteme • Überwachung von relevanten Parametern

3.2.3 Niederlande

Annex 6 der „Dutch Safety Requirements for Nuclear Reactors: fundamental Safety Requirements“ /ANV 15/

Der Anhang 6 der niederländischen Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (Dutch Safety Requirements, DSR) /ANV 15/ befasst sich mit den Sicherheitsanforderungen an Forschungsreaktoren. Änderungen des Neutronenflusses im Reaktorkern durch Experimente sollen analysiert werden. Angaben zur maximalen positiven Reaktivitätsänderungen, die durch Experimente verursacht werden können, sollen für den Reaktor im abgeschalteten als auch hochgefahrenen Zustand spezifiziert werden und zulässige Grenzwerte hierfür im Sicherheitsbericht angegeben werden. Strahlrohre, die Barrieren durchdringen oder sich innerhalb des Reaktorbeckens befinden, sollen als doppelwandige Konstruktion ausgelegt werden.

Anforderungen an experimentelle Einrichtungen sind insbesondere in Kapitel 5 wiedergegeben. Modifikationen am Reaktor oder an experimentellen Einrichtungen sollen bewertet, dokumentiert und hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf die Sicherheit gemeldet werden. Jede Änderung ist entsprechend ihrem Einfluss auf die nukleare Sicherheit des Forschungsreaktors zu kategorisieren. Hierbei wird für Details auf den IAEA Sicherheitsleitfaden SSG-24 „Safety in the Utilization and Modification of Research Reactors“ [IAE 22] verwiesen. Experimentelle Einrichtungen und Geräte dürfen die Sicherheit des Reaktors in keinem Betriebszustand beeinträchtigen und sollen so ausgelegt sein, dass sie weder bei Betrieb noch bei Ausfall eine inakzeptable Änderung der Reaktivität, eine Verringerung der Kühlleistung oder eine inakzeptable Strahlenexposition verursachen. Experimentelle Geräte mit erheblichen Auswirkungen auf die Sicherheit sollen nach Normen ausgelegt sein, die denen des Reaktors selbst entsprechen und sollen hinsichtlich der verwendeten Materialien, der strukturellen Integrität und der Bestimmungen zum Strahlenschutz vollständig kompatibel sein. Es sollen keine schädlichen Wechselwirkungen mit dem Reaktorschutzsystem entstehen und der Schutz und die Rückhaltefunktion für radioaktive Stoffe des Reaktors sollen erhalten bleiben.

Die Aktivität und Kontamination von bestrahlten Einrichtungen und Proben soll im Vorfeld von Experimenten evaluiert werden, sowohl unter der Annahme des wahrscheinlichsten Verlaufs eines Experiments als auch unter der Annahme der ungünstigsten Kombination aus menschlicher Fehlhandlung und dem Versagen von Einrichtungen. Weiterhin sind über in den Reaktor eingebrachte Materialien, Proben, Geräte und Vorrichtungen Aufzeichnungen zu führen und diese Gegenstände sind am Ende ihrer Bestrahlung zu entnehmen und zu erfassen. Diese Aufzeichnungen sollen die gemessene oder geschätzte Aktivität jedes Gegenstands enthalten. Des Weiteren sollen Experimente so konzipiert sein, dass das Reaktorschutzsystem nach Möglichkeit nicht eingreifen muss und ein sicherer Zustand ohne dieses erreicht werden kann.

Die Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte sind in Tab. 3.6 zusammengefasst.

Tab. 3.6 Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach den niederländischen Leitlinien /ANV 15/

Anforderungen an experimentelle Einrichtungen/Geräte
<ul style="list-style-type: none">• Bewertung von Modifikationen und deren Auswirkung auf Reaktorsicherheit• Auslegung entsprechend Erhalt der Reaktorsicherheit• Reaktivitäts-, Kühlleistungs-, Strahlenexpositionsänderungen nur innerhalb Akzeptanzbereich• Experimente mit Sicherheitsbedeutung: gleiche Anforderungen (Konstruktion, Herstellung etc.) wie an Reaktor• Berücksichtigung von Neutronen-Wechselwirkungen• Anforderungen an Reaktorschutzsystem minimiert, sicherer Zustand ohne dieses erreichbar• Evaluierung der Aktivierung und Kontamination von bestrahlten Einrichtungen und Proben vor dem Experiment• Erfassung der Aktivität aller eingebrachten Materialien, Proben, Vorrichtungen etc.

3.2.4 Frankreich

Elements of Nuclear Safety Research Reactors /IRS 19/

In Kapitel 7.5 „Experimental devices and research reactor-specific equipment“ des genannten Dokuments, wird auf die Anforderungen an Experimente eingegangen. Experimentelle Geräte und Einrichtungen und deren Wechselwirkungen mit dem Reaktorkern sollen aus sicherheitstechnischer Sicht für alle Betriebsbedingungen einschließlich Störfall- und Unfallbedingungen analysiert werden. Das Reaktorschutzsystem soll in der Lage sein, jeglichen Reaktivitätsanstieg im Kern, der durch eine unbeabsichtigte Bewegung verursacht werden könnte (z. B. unkontrolliertes Zurückziehen aus dem Kern), zu steuern. Bei einfachen Bestrahlungsgeräten kann dies durch eine Auslegungsgrenze für den Reaktivitätsbeitrag des betreffenden Geräts oder der jeweiligen Komponente erreicht werden. In solchen Fällen ist der Grenzwert auch in den technischen Betriebspezifikationen enthalten. Für größere Geräte, deren Reaktivitätsbeitrag nicht ausreichend begrenzt werden kann, sind Konstruktionsbestimmungen erforderlich, um ein unkontrolliertes Zurückziehen (Verriegelungs- oder Niederhaltevorrichtungen) zu verhindern oder zu begrenzen. Bei Experimentierlanzen (Loops) sollen andere Risiken aufgrund der Verwendung von unter Druck stehenden Flüssigkeiten (z. B. zur

Darstellung der Bedingungen von Druckwasserreaktoren), geschmolzenen Materialien oder reaktiven Elementen wie Natrium berücksichtigt werden. Für Testaufbauten können Demonstrationstests erforderlich sein, um die Auswirkungen des Bestrahlungsrings auf die nahegelegenen Brennelemente bewerten zu können. Für heiße und kalte Quellen, die flüssigen Wasserstoff oder Deuterium sowie Graphit enthalten, soll das Risiko einer Explosion durch geeignete Barrieren und Management der spezifischen Parameter (z. B. Gasdruck, Temperatur) verhindert werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Alterung der in den experimentellen Einrichtungen verwendeten Materialien. Durch den Neutronenfluss verändern sich die mechanischen Eigenschaften der Materialien, dies gilt besonders für die Endstücke der Strahlrohre (Fingerhüte), die sich permanent in der Nähe des Kerns befinden. Diese sollen einem Austausch unterliegen. Experimentelle Einrichtungen und Geräte unterliegen periodischen Sicherheitsüberprüfungen.

Kapitel 3.4.4 „The graded approach“ behandelt die Vielfalt von Forschungsreaktoren in Bezug auf das Design, technische Eigenschaften, Funktionsweise, Nutzung etc. und die damit verbundene Vielfalt an Risiken, die zur Entwicklung eines gestaffelten Ansatzes für Sicherheitsanforderungen geführt hat. Hierbei sollen für jeden Forschungsreaktor die Auslegungsmaßnahmen, die Anwendung des Grundsatzes „Defense in Depth“, der Detaillierungsgrad der Sicherheitsanalysen, Überprüfungen aller Art, Dokumentation, Aktivitäten und Verfahren zur Umsetzung der Sicherheitsanforderungen und die für die Sicherheit bestimmten Ressourcen und Sicherheitsüberwachung im Verhältnis zu den potenziellen Gefahren, die von diesem Reaktor ausgehen, stehen. Beispielweise sollen die Ressourcen für Notfallpläne in einem angemessenen Verhältnis zur Robustheit und Rückhaltekapazität des Reaktorgebäudes sowie zu den in Unfallsituationen angenommenen radioaktiven Freisetzungen und deren radiologischen Auswirkungen stehen. Das heißt, mit dem abgestuften Ansatz soll sichergestellt werden, dass die Sicherheitsvorkehrungen im Verhältnis zur Bedeutung der von ihnen angesprochenen Sicherheitsprobleme stehen.

Basierend auf dem SSG-22 kann der abgestufte Ansatz auf Folgendes angewendet werden:

- Detaillierungsgrad der Verfahren und Betriebsanweisungen
- Genehmigung von Dokumenten oder Genehmigung von Änderungen an Einrichtungen/Experimenten
- Schulungsprogramme
- behördliche und andere Inspektionsprogramme
- Managementsystem (Sicherheit, Qualität)
- Notfallvorsorge
- Häufigkeit der Wartung, Gerätekalibrierung usw.

In Frankreich ist die Anwendung des abgestuften Ansatzes seit Februar 2012 in den nationalen Vorschriften verankert. In dieser Verordnung wird der abgestufte Ansatz insbesondere für die Anzahl und Wirksamkeit von Begrenzungsbarrieren, die Qualifizierung der Hauptkomponenten der Anlage und die Häufigkeit von Notfallübungen unterstrichen. In Tab. 3.7 sind die Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte in französischen Forschungsreaktoren zusammengefasst.

Tab. 3.7 Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach französischen Leitlinien /IRS 19/

Experimentelle Einrichtungen/Geräte	Anforderungen
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitstechnische Analyse von Wechselwirkungen mit Reaktor • Reaktivitätseinträge durch Reaktorschutzsystem steuerbar • Neutronen-Wechselwirkung • Periodische Sicherheitsüberprüfungen

Tab. 3.7 Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach französischen Leitlinien /IRS 19/ (Fortsetzung)

Experimentelle Einrichtungen/Geräte	Anforderungen
Bestrahlungseinrichtungen (klein)	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegungsgrenze für den Reaktivitätsbeitrag
Bestrahlungseinrichtungen (groß)	<ul style="list-style-type: none"> • Konstruktionsbestimmungen (Verriegelungs- oder Niederhaltevorrichtungen) für Begrenzung Reaktivitätsbeitrag
Experimentierlanzen (Loops)	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung der Risiken von unter Druck stehenden Flüssigkeiten, geschmolzenen Materialien, reaktiven Elementen
Testaufbauten	<ul style="list-style-type: none"> • Demonstrationstests
Heiße/kalte Quellen	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse Explosionsrisiko • Barrieren • Management spezifische Parameter (Druck, T)
Strahlrohre (Fingerhutrohre)	<ul style="list-style-type: none"> • regelmäßiger Austausch (Materialalterung durch Neutronen) • Barrieren

3.2.5 Australien

Regulatory Guide – Constructions of an item important to safety (REG-RC-SUP-254A v1.2) /ARP 18/, Regulatory Assessment Criteria for the Design of new Controlled Facilities and Modifications to Existing Facilities (RG-5) /ARP 01/

Der australische Leitfaden „Regulatory Guide REG-RC-SUP-254A v1.2“ /ARP 18/ beschreibt die Klassifizierung (gemäß IAEA-Anforderungen) von Systemen, Strukturen und Komponenten unter Berücksichtigung ihrer Sicherheitsfunktionen. Entsprechend den Vorgaben in /ARP 1/ wird seitens der Aufsichtsbehörde erwartet, dass für Experimentiereinrichtungen eine Klassifizierung vorgenommen werden. Dabei sind die Kontrolle der Reaktivität, die Wärmeabfuhr aus dem Reaktor, der Einschluss von radioaktivem Material; die Abschirmung gegen Strahlung und die Kontrolle/Begrenzung radioaktiver Freisetzungen für alle Anlagenzustände sicherzustellen. Aufgrund der Sicherheitsbedeutung der Funktion der Systeme, Strukturen und Komponenten (SSK) in Bezug zu den Folgen eines Ausfalls dieser SSK werden die in Tab. 3.8 wiedergegebenen drei Sicherheitskategorien zugeordnet.

Tab. 3.8 Beziehung zwischen der Funktion von SSK bei der Analyse auslösender Ereignisse und der Sicherheitskategorie /ARP 18/

Functions credited in the safety assessment	Severity of the consequences if the function is not performed		
	High	Medium	Low
Functions to reach a controlled state after anticipated operational occurrences	Safety category 1	Safety Category 2	Safety Category 3
Functions to reach a controlled state after design basis accidents	Safety category 1	Safety category 2	Safety Category 3
Functions to reach and maintain a safe state	Safety category 2	Safety category 3	Safety Category 3
Functions for the mitigation of consequences of design extension conditions ⁴	Safety category 2 or 3	Not categorised*	Not categorised*

* Medium or low severity consequences are not expected to occur in the event of non-response of a dedicated function for the mitigation of design extension conditions

NOTE: The categorisation of safety functions should not take account of any redundancy, diversity or independence within the design as these aspects relate to the structures, systems and components that deliver the safety functions.

⁴ Accidents conditions that are not considered for design basis accidents, but that are considered in the design process of the facility in accordance with best estimate methodology, and for which releases of radioactive material are kept within acceptable limits. Design extension conditions could include severe accident conditions.

Des Weiteren sollen die SSK in Sicherheitsklassen eingeteilt werden: Sicherheitsklasse 1, wenn der Ausfall zu Folgen von hoher Schwere führen würde, Sicherheitsklasse 2, wenn der Ausfall mittelschwere Folgen mit sich bringen würde und Sicherheitsklasse 3 bei geringen Folgen. Die Konstruktionsbestimmungen für die SSK werden damit klassifiziert, da die Bedeutung der postulierten Fehler die Sicherheitsklassen vollständig definiert, ohne dass eine detaillierte Analyse der zugehörigen Sicherheitskategorie notwendig ist.

Der australische Leitfaden „Regulatory Guideline RG-5“ /ARP 01/ enthält Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte. Experimentelle Einrichtungen und Geräte können durch ihr Vorhandensein und ihren Gebrauch Rückwirkungen auf den Reaktor haben und das Risiko für den Eintritt von Ereignissen oder Unfällen erhöhen. Sie können direkt oder indirekt Gefahren verursachen, die den sicheren Betrieb der Anlage gefährden.

Deshalb sollen folgende Punkte für experimentelle Einrichtungen und Geräte berücksichtigt werden:

- Grundsätzlich sollen experimentelle Einrichtungen und Geräte, die radioaktive Materialien enthalten (z. B. Strahlrohre), so entworfen sein, dass die Strahlenexposition durch eine angemessene Anordnung und Abschirmung minimiert wird.
- Die experimentellen Einrichtungen und Geräte sollen anhand einer Sicherheitsanalyse kategorisiert werden.
- Das Versagen einer experimentellen Einrichtung bzw. eines Gerätes, einschließlich solcher, die die Gefahr eines auslösenden Anlagenereignisses durch ihren nachfolgenden Ausfall und die Auswirkung auf die Ereignissequenz erhöhen, berücksichtigt werden, ebenso wie menschliche Fehlhandlungen.
- Designänderungen an experimentellen Einrichtungen und Geräten sollen nach vorgegebenen Verfahren für die Überprüfung, Genehmigung und Installation vorgenommen werden, wobei die Änderungen zu Sicherheits- und Prüfungszwecken aufgezeichnet werden.
- Weiterhin sollen die Auswirkungen aufgrund von Änderungen der Beladung von experimentellen Einrichtungen (z. B. Ausmaß der Bestrahlung) berücksichtigt werden.
- Bestrahlte Flüssigkeiten sollen gesäubert und aufbereitet werden.
- Die Reaktion von experimentellen Einrichtungen und Geräten auf Anlagentransiente soll Berücksichtigung finden und umgekehrt ist die Reaktion der Anlage auf Transienten, die durch experimentelle Einrichtungen und Geräte hervorgerufen werden, in gleichem Maß zu berücksichtigen.
- Des Weiteren soll eine Ausrüstung zur Überwachung von experimentellen Einrichtungen/Geräten und den damit verbundenen Umgebungsbedingungen (z. B. Strahlenbelastung) vorhanden sein, sowie zur Entfernung von experimentellen Einrichtungen und Geräten.

Experimentelle Einrichtungen und Geräte können sich auf die Reaktivität auswirken. Daher sorgt ein Reaktivitätskontrollsystem auch bei deren Betrieb dafür, dass positive Reaktivitätszunahmen den Toleranzbereich nicht überschreiten und der Forschungsreaktor in jedem Betriebszustand in den Zustand unterkritisch versetzt und dort gehalten werden

kann. Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte in australischen Forschungsreaktoren sind in Tab. 3.9 zusammengefasst.

Tab. 3.9 Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach australischen Leitlinien /ARP 18/ und /ARP 01/

Anforderungen an experimentelle Einrichtungen/Geräte
<ul style="list-style-type: none">• Kategorisierung anhand Sicherheitsanalyse• Berücksichtigung der Auswirkung des Versagens• Berücksichtigung der Auswirkung von Designänderungen• Rückwirkung von Kernbrennstoffänderungen• Berücksichtigung von Transienten-Auswirkungen (sowohl durch Anlage als auch durch experimentelle Einrichtungen/Geräte ausgelöst)• Überwachung von relevanten Parametern• Minimierung der Strahlenexposition (Barrieren)

3.3 Fazit

Die Auswertung der internationalen regulatorischen Herangehensweisen bezüglich der Anforderungen und Bestimmungen an Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren hat gezeigt, dass der Inhalt dieser Dokumente in vielen Punkten Gemeinsamkeiten aufweist. So sind der Erhalt der Sicherheit des Reaktors in allen Betriebszuständen ebenso wie der Einschluss von radioaktiven Materialien bzw. die Beschränkung der Strahlenexposition für das Betriebspersonal, die Bevölkerung und die Umwelt durch geeignete Auslegung und Anordnung der experimentellen Einrichtungen und Geräte oberste Prämisse. Auch der sichere Umgang mit positiven Reaktivitätseffekten, die durch die Experimentiereinrichtungen hervorgerufen werden können, wird in allen analysierten Dokumenten thematisiert ebenso wie die (zusätzlichen) Anforderungen an das Reaktorschutzsystem. Grundsätzlich sollen experimentelle Einrichtungen und Geräte so ausgelegt werden, dass die Inanspruchnahme des Reaktorschutzsystems vermieden oder minimiert wird und nur in Fällen, in denen Gefahr für den Reaktor besteht (z. B. Überschreitung von Toleranzwerten), soll der Reaktor automatisch abgeschaltet werden.

Ein weiterer Punkt, der in mehreren Leitfäden, wie dem Australischen, dem Niederländischen und dem Russischen, behandelt wird, ist die Einteilung von experimentellen Einrichtungen und Geräten in Sicherheitsklassen und -systeme. Die Einteilung der einzelnen Experimentiereinrichtungen in Sicherheitskategorien und -klassen ist dabei ein Schritt, das Ausmaß einer Fehlfunktion oder eines Ausfalls und dessen Auswirkungen

bzw. Rückwirkungen auf den Reaktor einzuordnen und diesem somit eine sicherheitstechnische Bedeutung zuzuweisen.

Weiterhin enthalten die niederländischen, französischen und australischen Leitfäden die Forderung von Sicherheitsanalysen für die experimentellen Einrichtungen und Geräte und die Betrachtung von Wechselwirkungen mit dem Reaktor selbst aber auch mit anderen experimentellen Einrichtungen, Geräten und Neutronen sowie deren potenzielle Auswirkungen. Generell sind die meisten der hier ausgewerteten Herangehensweisen sehr allgemein gehalten und variieren ausschließlich in ihrem Umfang. Nur der niederländische und französische Leitfaden enthalten explizite Anforderungen für einzelne experimentelle Einrichtungen, Geräte oder Teile von diesen und im technische Report No. 455 der IAEA sind ebenfalls Beispiele aus verschiedenen Anlagen für entsprechende Anforderungen. Gleichzeitig ist der französische Leitfaden der Einzige, der einen gestaffelten Ansatz (graded approach) für Begrenzungsbarrieren, die Qualifizierung von Komponenten und Notfallübungen enthält. Die in den ausgewerteten Dokumenten aufgeführten Beispiele und Anforderungen können für die nachfolgenden Arbeiten genutzt werden, um die Klassifizierung der sicherheitstechnischen Bedeutung zu bestimmen und einzuordnen, insbesondere wenn hier auf einzelne experimentelle Einrichtungen eingegangen wurde. Allerdings werden hierbei nicht einzelne Bestandteile experimenteller Einrichtungen betrachtet (z. B. Strahlrohrnasen), sondern die Einrichtungen und Geräte als Gesamtes.

4 Klassifizierung der Experimentiereinrichtungen

Forschungsreaktoren verfügen über eine Vielzahl von unterschiedlichen experimentellen Einrichtungen und Geräten, deren Anordnung und Aufbau zu Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Experimentiereinrichtungen führen kann, die aber auch den Reaktor selbst beeinflussen können. Neben diesen Wechselwirkungen können mögliche Versagensarten ebenso dazu beitragen, die Sicherheit und den sicheren Betrieb des Forschungsreaktors negativ zu beeinflussen. Das Ziel der hier dargestellten Arbeiten war es, eine Methodik zu erarbeiten, anhand derer die unterschiedlichen Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung kategorisiert werden können, um so die möglichen Auswirkungen auf die Sicherheit der Reaktoren evaluieren und einordnen zu können.

Maßgebend für die Kategorisierung von Experimentiereinrichtungen sind die übergeordneten Schutzziele des Forschungsreaktors, Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der Brennelemente und Begrenzung der Freisetzung von radioaktiven Stoffen (Erhalt der Barrieren) sowie die Einhaltung von Vorgaben des Strahlenschutzes. Mit Hilfe dieser Kategorisierung der unterschiedlichen Experimentiereinrichtungen werden die Sicherheitsauswirkungen bestimmt, welche als Folge einer Fehlbedienung, Fehlfunktion oder des Versagens der jeweils betrachteten Experimentiereinrichtung auftreten können. Um ein solches Kategorisierungssystem zu erstellen, wurden die Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte untersucht. Nachfolgend sind die wesentlichen Anforderungen an Experimentiereinrichtungen, die sich aus der Auswertung verschiedener internationaler als auch nationaler regulatorischer Vorgaben im vorhergehenden Abschnitt ergeben, nochmals zusammengefasst und aufgelistet:

- Sicherheitstechnische Klassifizierung von Experimentiereinrichtungen analog zu der Klassifizierung der Reaktorsysteme
- Auslegung der Experimentiereinrichtungen entsprechend der sicherheitstechnischen Klassifizierung
- Berücksichtigung (bei der Auslegung und dem Betrieb) von
 - Neutronen-Wechselwirkungen
 - Transienten-Auswirkungen (sowohl durch die Anlage als auch durch experimentelle Einrichtungen/Geräte ausgelöst)
 - physikalischen Bedingungen und Verhalten von Komponenten
 - chemischen Bedingungen und Verhalten von Bauteilen

- Wärmeerzeugung durch Experimente und thermische Eigenschaften von Bauteilen
- mechanischen und thermischen Beanspruchungen und Verhalten von Bauteilen
- Inanspruchnahme des Reaktorschutzsystems minimieren oder ausschließen
- Sicherer Betriebszustand der Experimentiereinrichtung ohne Aktivierung des Reaktorschutzsystems
- Tolerierbare positive Reaktivitätseffekte
- Einschluss radioaktiver Substanzen
- Einhaltung und Minimierung von Dosisgrenzen bei Strahlenexposition
- Überwachung relevanter Parameter

Diese Anforderungen werden als Anhaltspunkte genutzt, um eine sicherheitstechnische Einordnung der einzelnen experimentellen Einrichtungen und Geräte zu erarbeiten. Die Experimentiereinrichtungen werden in Sicherheitskategorien eingeteilt, angelehnt an die in internationalen Leitfäden und Richtlinien beschriebene Vorgehensweise. Die Einteilung richtet sich nach dem Schweregrad der Folgen, welche eine Fehlfunktion, Fehlfunktion oder ein Versagen der betrachteten experimentellen Einrichtung oder des Gerätes, auf die Einhaltung und Aufrechterhaltung der Kontrolle der Reaktivität, der Kühlung der Brennelemente und der Begrenzung der Freisetzung von radioaktiven Stoffen (Erhalt der Barrieren) und damit auf die Sicherheit des Reaktors in allen Betriebs- und Unfallzuständen hätte. Hierbei wird der ungünstigste Anlagenzustand unterstellt und gleichzeitig angenommen, dass kein aktives Sicherheitssystem zur Verfügung steht und auch keine administrativen Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

4.1 Methodik zur Klassifizierung von Experimentiereinrichtung

Die Sicherheitskategorie bewertet übergeordnet die Auswirkungen auf die Schutzziele und die Sicherheitsbedeutung, die der Ausfall oder das Versagen der jeweiligen Experimentiereinrichtung haben. Basierend auf dem IAEA Safety Guide SSG-24 /IAE 22/ werden für die folgenden Betrachtungen vier Sicherheitskategorien in Abhängigkeit der Folgeschwere für die Schutzziele unterschieden.

Die sicherheitstechnische Signifikanz („effect on safety“) im IAEA Safety Guide SSG-24 wird wie folgt beschrieben:

„Major effect on safety: experiments or modifications that could affect the design function or the ability of structures, systems or components to perform their intended safety function as described in the safety analysis; that are beyond the licence conditions or beyond the existing (i.e. approved) safety analysis; or that could introduce hazards that have not been previously addressed.

Significant effect on safety: experiments or modifications that are within the approved licence conditions and safety analysis; that necessitate a change of the operational limits and conditions but not of the remaining chapters of the safety analysis report; that could significantly reduce the margin to criticality; or that necessitate a change of the operating procedures. Recommendations on operational limits and conditions for research reactors are provided in SSG-83 [6].

Minor effect on safety: experiments or modifications that are within the approved licence conditions, safety analysis and operational limits and conditions; that still have significant safety margins and no effect on the safety system settings; and that do not necessitate a change in the operating procedures.

No effect on safety: experiments or modifications that present no hazard and have no impact on safety.“

Alle experimentellen Einrichtungen und Geräte, die der Kategorie 1 („No effect on safety“) zugeordnet werden, haben keinen Einfluss auf die Sicherheit und Schutzziele des Reaktors.

Die Kategorie 2 („Minor effect on safety“) wird vergeben, wenn das Versagen keine signifikanten Auswirkungen auf den sicheren Betrieb, die Reaktivität, die Strahlenexposition und andere Experimentiereinrichtungen hat. Die sicherheitstechnische Bedeutung für den Forschungsreaktor ist gering.

Experimentelle Einrichtungen und Geräte, die der nächstniedrigeren Kategorie 3 („Significant effect on safety“) zugeordnet werden, können bedeutende Auswirkungen auf die Sicherheit des Forschungsreaktors und dessen Schutzziele haben. Diese Experimentiereinrichtungen können bei einem Ausfall/Versagen die Beeinträchtigung betrieblicher

Parameter und radiologische Folgen innerhalb der akzeptierten Grenzen mit sich bringen. Ein sicherer Zustand für den Reaktor ist ohne Aktivierung des Reaktorschutzsystems beziehungsweise ohne eine manuelle oder automatische Reaktorschnellabschaltung möglich.

Experimentiereinrichtungen, die der höchsten Kategorie 4 („Major effect on safety“) zugeordnet werden, können erhebliche Auswirkungen auf die Sicherheit und den sicheren Betrieb des Reaktors haben. Der Ausfall oder das Versagen dieser experimentellen Einrichtungen und Geräte hat einen direkten Einfluss auf den Erhalt der Reaktorsicherheit, den Einschluss von radiologischen Substanzen und die Reaktivität. Das Versagen einer solchen Experimentiereinrichtung bringt potenzielle radiologische Folgen mit sich, die die zulässigen Auslegungs- und Toleranzwerte überschreiten, die Kühlkapazität des Reaktors erheblich verringern oder im schlimmsten Fall vollständig ausfallen lassen und zu potenziellen Reaktivitätsänderungen außerhalb des Toleranzbereiches führen. In diesem Fall stellt die experimentelle Einrichtung/Gerät eine Gefahr für den Reaktor und das Betriebspersonal dar und eine Reaktorleistungsreduzierung oder -abschaltung ist notwendig. Das Schutz- und Kontrollsystem dieser experimentellen Einrichtungen und Geräte ist unter Umständen an die Reaktorschutzsysteme angebunden, um im Notfall eine manuelle oder sogar automatische Reaktorschnellabschaltung einzuleiten.

4.2 Klassifizierung in Sicherheitskategorien

Für die Erarbeitung der Klassifizierung in Sicherheitskategorien, werden nachfolgend die Auswirkungen von Ausfällen/Versagen der unterschiedlichen Experimentiereinrichtungen oder von Fehlbedienungen derselben separat für die drei Schutzziele analysiert. Bei dem Ausfall/Versagen wird von dem ungünstigsten Betriebszustand der Anlage ausgegangen und es wird weiterhin unterstellt, dass kein aktives Sicherheitssystem zur Verfügung steht und gleichzeitig keine administrativen Gegenmaßnahmen ergriffen werden. In den untersuchten Forschungsreaktoren stellen entsprechende Sicherheitssysteme und Überwachungsmaßnahmen sicher, dass ein Ausfall/Versagen von Experimentiereinrichtungen keine oder nur begrenzte sicherheitstechnische Auswirkungen für den Reaktor hat. Die nachfolgend aufgeführten Schadensszenarien sind daher als hypothetisch anzusehen. Des Weiteren liegt der folgenden Betrachtung der potenziellen Schadensszenarien und der möglichen Rückwirkungen auf den Reaktor die im Abschnitt 2 vorliegende Übersicht über Experimentiereinrichtungen in Schwimmbadreaktoren zugrunde.

In der folgenden Tabelle Tab. 4.1 ist eine Übersicht über die verschiedenen Experimentiereinrichtungen und deren potenziellen (hypothetischen) Schadensszenarien oder Störungen sowie die Rückwirkungen auf den Reaktor wiedergegeben.

Tab. 4.1 Potenzielle (hypothetische) Schadensszenarien von experimentellen Einrichtungen und Geräten und Rückwirkungen auf den Reaktor

Experimentiereinrichtung	Potenzielle (hypothetische) Schadensszenarien/ Störungen	Rückwirkung auf Reaktor
Strahlrohre	<ul style="list-style-type: none"> • Lecks (innerhalb/außerhalb Reaktorbecken) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktivitätsänderungen (Volllaufen Strahlrohre) • Kühlmittelverlust
Kalte Quelle	<ul style="list-style-type: none"> • Lecks (z. B. Gas, Kühlmittel) • Versagen innerhalb kalter Quelle • Reaktivitätsänderungen (Inbetrieb-/Außerbetriebnahme) • Ausfall Kälteanlage • Wasserstoff- oder Deuterium-Explosion 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktivitätsänderung • Kühlmittelverlust (begrenzt) • Verlust der Kontrolle der Reaktivität durch Explosionsrisiko
Heiße Quelle	<ul style="list-style-type: none"> • Lecks (innerhalb Reaktorbecken) • Reaktivitätsänderungen (Inbetrieb-/Außerbetriebnahme) • Eindringen von H₂O, D₂O oder Luft und Kontakt mit heißen Oberflächen, • Wasserdampf-Explosion 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktivitätsänderung • Kühlmittelverlust (begrenzt) • Wärmeeintrag in das Kühlmittel • Verlust der Kontrolle der Reaktivität durch Explosionsrisiko
Bestrahlungsanlagen und Dotierungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Lecks (innerhalb Reaktorbecken) • Reaktivitätsänderungen durch Proben • Platzen von Proben 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktivitätsänderung • Kühlmittelverlust (begrenzt)
Konverteranlage	<ul style="list-style-type: none"> • Störung in der Kühlung, • Reaktivitätsänderungen (Inbetrieb-/Außerbetriebnahme) • Lecks 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktivitätsänderung • Beeinträchtigung der Kühlung durch Wärmeeintrag im Modertank/Reaktorbecken • Kühlmittelverlust

Tab. 4.1 Potenzielle (hypothetische) Schadensszenarien von experimentellen Einrichtungen und Geräten und Rückwirkungen auf den Reaktor (Fortsetzung)

Experimentier-einrichtung	Potenzielle (hypothetische) Schadensszenarien/ Störungen	Rückwirkung auf Reaktor
Thermische Säule	<ul style="list-style-type: none"> • Lecks 	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlmittelverlust

4.2.1 Kontrolle der Reaktivität

Bei der Kontrolle der Reaktivität wird untersucht, welche Kriterien, wie zum Beispiel Einbauort und Aufbau, einen Einfluss auf die Reaktivität des Reaktors ausüben und wie groß dieser ist. Hinsichtlich des Einbauortes und des Aufbaus sollen die experimentellen Einrichtungen und Geräte, und damit deren technische Einrichtungen, grundsätzlich so konzipiert und eingebaut sein, dass sie neben anderen Experimentiereinrichtungen und Reaktoreinbauten ihre Funktion erfüllen und nur tolerierbare Störungen, wie zum Beispiel eine lokale Reduzierung des Flusses, Leistungsexkursionen, Schatteneffekte und Änderungen der Kühlbedingungen, hervorrufen.

Experimentelle Einrichtungen und Geräte, die im Kern oder in unmittelbarer Kernnähe eingebaut sind, können nicht nur im Fall ihres Versagens direkte oder schwerwiegende Auswirkungen auf den Kern und damit auf die Reaktivität und den Betrieb des Reaktors haben, sondern auch bei einer ungünstigen Durchführung von Experimenten. Zum einen können die verwendeten Materialien aufgrund von Neutronenabsorptions-, Reflexions- und Moderationseigenschaften Effekte auf die Reaktivität haben, zum anderen kann das Be- und Entladen der Experimentiereinrichtungen, bewegliche Teile und das Versagen von Proben die Reaktivität beeinflussen. Beispielsweise kann das Versagen von Strahlrohrnasen, die als eine Barriere gegen D₂O-Verlust fungieren, und die damit einhergehende Auffüllung der Strahlrohrinnenräume mit D₂O Reaktivitätsänderungen hervorrufen.

Aber auch der bestimmungsgemäße Betrieb von experimentellen Einrichtungen kann durch ihre Nähe zum Kern Auswirkungen auf die Einhaltung der Reaktivität haben. So können kalte und heiße Quellen (z. B. H₂, D₂, Graphit) und der Einsatz von Neutronenkonverter-Platten Änderungen des Neutronenspektrums hervorrufen, die wiederum Folgen für die Reaktivität haben, dies gilt auch für das Einbringen oder die falsche Positionierung von Probenmaterial mit einer höheren Reaktivität als spezifiziert. Somit ist bei

der Bestimmung des Einbauortes die Erfassung der Aktivität aller verwendeten Werkstoffe und Vorrichtungen für den sicheren Betrieb des Reaktors notwendig. Ebenso sind Festlegungen für die eingebrachten Proben bei Experimenten notwendig, um den sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Für die Klassifizierung bezüglich des Schutzzieles „Kontrolle der Reaktivität“ werden die folgenden vier Sicherheitskategorien angewandt:

1. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, welches keinen Einfluss auf die Reaktivitätsänderung hat
2. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, das sich durch geringe Reaktivitätsänderungen auszeichnet, die ohne irgendwelche Maßnahmen von der Anlage aufgenommen werden
3. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, das sich durch Reaktivitätsänderungen auszeichnet, die sicher (innerhalb tolerierbarer Grenzen) handhabbar sind
4. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, das sich durch schwerwiegende Auswirkungen auf die Einhaltung der Reaktivität auszeichnet und eventuell eine Reaktorschnellabschaltung erfordert

Alle experimentellen Einrichtungen und Geräte, deren Versagen sich durch eine (schwerwiegende) oder mehrere der zuvor aufgeführten Auswirkungen auf die Einhaltung der Reaktivität auswirkt und eventuell mit einer (automatischen) Reaktorabschaltung einhergeht, sollten in die Kategorie 4 eingeordnet werden. Hierzu zählen zum Beispiel Strahlrohre, wenn diese bei Lecks vollständig gefüllt werden könnten, aber auch Proben in Experimentiereinrichtungen, wenn diese zu übermäßigen Reaktivitätsänderungen und infolgedessen zu RESA führen können. Kalte und heiße Quelle würden ebenfalls in diese Kategorie eingeordnet, wenn das Explosionsrisiko für diese experimentellen Einrichtungen und Geräte nicht ausgeschlossen werden kann. Ist die Reaktivitätsänderung sicher (innerhalb tolerierbarer Grenzen) und ohne (automatische) Einschaltung des Reaktorschutzsystems aufzunehmen, wird die Kategorie 3 vergeben. Wenn keine Auswirkung auf die Reaktivität besteht, wird die Kategorie 1 vergeben und in den verbleibenden Fällen die Kategorie 2 (z. B. Versagen der äußeren Wandung einer doppelwandigen Konstruktion und Füllen mit Kühlmittel). Die generische Klassifizierung der Experimentiereinrichtungen zu diesem Schutzziel ist in Tab. 4.2 wiedergegeben.

4.2.2 Kühlung der Brennelemente

Ein weiteres Schutzziel, welches erhalten bleiben muss, ist der Erhalt der Kühlung des Reaktorkerns. Dies betrifft Experimente, welche im Normalbetrieb zusätzliche Wärme in die Brennelemente oder das Kühlmedium einbringen können und die Kühlleistung nicht überfordern dürfen. Ein Beispiel hierfür ist eine Konverterplatte, welche zusätzliche Wärme freisetzt und deswegen im Allgemeinen über einen eigenständigen Kühlkreislauf verfügt. Ebenso sind hier Kühlmittelverluste zu betrachten, die durch Schäden an experimentellen Einrichtungen verursacht werden können.

Für die Klassifizierung bezüglich des Schutzzieles „Kühlung der Brennelemente“ werden die folgenden vier Sicherheitskategorien angewandt:

1. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, welches zu keiner Beeinträchtigung der Kühlung oder zusätzlichem Wärmeeintrag führt
2. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, das sich durch Beeinträchtigungen der Kühlung oder zusätzlichem Wärmeeintrag auszeichnet, die sicher (innerhalb tolerierbarer Grenzen) und ohne (automatische) Einschaltung des Reaktorschutzsystems handhabbar sind
3. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, das sich durch schwerwiegende Beeinträchtigungen auf die Kühlung auszeichnet und eventuell eine Reaktorschnellabschaltung erfordert
4. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, welches zu Schäden am Kern oder einer Kernschmelze führt

Einen erheblichen Wärmeeintrag in das Kühlmittel und damit eine schwerwiegende Beeinträchtigung der Kühlung stellt der Ausfall der separaten Kühlung der Konverterplatte dar, weswegen hier eine Einstufung in die Kategorie 3 vorgenommen wird. Dieselbe Einstufung wird vorgenommen, wenn z. B. Lecks an Strahlrohren auftreten, die zu einem Kühlmittelverlust außerhalb des Reaktorbeckens führen. Im Unterschied dazu sind Lecks an z. B. Rohrpostanlagen begrenzt und der Kühlmittelverlust ist limitiert, weswegen hier eine Einstufung in die Kategorie 2 erfolgt.

Für den Fall, dass das Explosionsrisiko für eine heiße oder kalte Quelle nicht ausgeschlossen werden kann, wird für diese experimentellen Einrichtungen und Geräte eine Einstufung in die Kategorie vorgenommen, da hierbei anzunehmen ist, dass Schäden

am Kern entstehen. Die generische Klassifizierung der Experimentiereinrichtungen zu diesem Schutzziel ist in Tab. 4.2 wiedergegeben.

4.2.3 Einschluss von radioaktiven Stoffen (Erhalt der Barrieren)

Das letzte Schutzziel, der Einschluss von radiologischen Substanzen, d. h. die Aufrechterhaltung von Barrieren, darf ebenfalls nicht durch Ausfall/Versagen experimenteller Einrichtungen und Geräte gefährdet werden. Auch hier können Kriterien wie Einbauort, Aufbau, physikalische und chemische sowie mechanische und thermische Beanspruchung der experimentellen Einrichtungen im Fall eines Ausfalls/Versagens negative Auswirkungen haben.

Für die Klassifizierung bezüglich des Schutzzieles „Einschluss radioaktiver Stoffe“ werden die folgenden vier Sicherheitskategorien angewandt:

1. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, welches zu keiner Freisetzung innerhalb oder außerhalb der Anlage führt
2. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, welches zu einer Freisetzung innerhalb der Anlage, aber unterhalb vorgegebener Richtwerte führt
3. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, welches zu einer Freisetzung innerhalb der Anlage führt, aber vorgegebene Richtwerte überschreiten kann
4. Versagen von experimentellen Einrichtungen und Geräten, welches zu einer Freisetzung außerhalb der Anlage führt

Das Versagen von Barrieren, kann zu Lecks und zum Verlust von Schwer- oder Leichtwasser oder zu Stäuben bzw. Gasfreisetzungen führen. Unter Umständen kommt es hierbei nur zu einem geringen Austrag von radiologischen Substanzen innerhalb der Reaktorräume und unterhalb vorgegebener Richtwerte, was eine Einstufung in die Kategorie 2 zur Folge hat. Schwerwiegendere Lecks, zum Beispiel an Kompensator-, Futter- und Schalrohren sowie Dichtungen, können zum Eindringen und Verlust von Kühlmittel außerhalb des Reaktorbeckens führen, was zu einer potenziellen Kontaminierung und Bestrahlung des Betriebspersonals führen kann, weswegen hier die Einstufung in die Kategorie 3 für den Fall einer Verschleppung vorgenommen wird. Die gleiche Einstufung erfolgt bezüglich des Platzens von bestrahlten Proben unter den ungünstigsten Umständen und für die zugehörigen experimentellen Einrichtungen und Geräte.

Besonders gefährlich für die Aufrechterhaltung des Einschlusses von radioaktiven Substanzen, aber ebenso für den sicheren Betrieb des Reaktors, ist das Versagen von druck- und gasführenden experimentellen Einrichtungen sowie von experimentellen Einrichtungen mit flüssigem Wasserstoff/Deuterium, da hier die Gefahr einer Gasexplosion bestehen kann, beziehungsweise es zu Wasserstoff(Deuterium)-Sauerstoff-Reaktionen oder Explosionen kommen kann. Da es hierbei zu einer Freisetzung außerhalb der Anlage kommen kann, erfolgt für diesen Fall eine Einstufung in die Kategorie 4. Gleiches gilt für die heiße Quelle, wenn das Risiko einer Dampfexplosion nicht ausgeschlossen werden kann. Die generische Klassifizierung der Experimentiereinrichtungen zu diesem Schutzziel ist in Tab. 4.2 wiedergegeben.

4.2.4 Sicherheitskategorien experimenteller Einrichtungen

Folgende Herangehensweise wurde bei der Klassifizierung der sicherheitstechnischen Bedeutung der Funktion der einzelnen experimentellen Einrichtungen und Geräte und daraus resultierend der übergeordneten sicherheitstechnischen Bedeutung der jeweiligen Experimentiereinrichtung angewandt. Der Einfluss von Einrichtungen und Geräten in Kernnähe, mit direkten Auswirkungen auf die Reaktivität, den Kühlmitteldurchfluss, die Kühlmitteltemperatur oder den Kühlmitteldruck, deren Versagen zu einer Überschreitung von Toleranzwerten führt, die zu Änderungen in der Leistungsentwicklung, einer Schnellabschaltung des Reaktors, Schäden am Kern oder einer Freisetzung außerhalb der Anlage führen, werden in die Kategorie 4 eingestuft. Ein Beispiel hierfür sind die kalte und heiße Quelle, wenn das Explosionsrisiko nicht ausgeschlossen werden kann. Hierbei muss davon ausgegangen werden, dass weder die Kontrolle der Reaktivität oder die Kühlung der Brennelemente noch die Rückhaltung radioaktiver Stoffe gewährleistet werden kann.

Bei der Beeinträchtigung der Kühlung durch Kühlmittelverluste wurde zwischen Lecks unterschieden, die innerhalb des Reaktorbeckens liegen, begrenzt sind und bei denen experimentelle Einrichtungen und Geräte mit Kühlmittel volllaufen und Lecks mit einem Kühlmittelverlust außerhalb des Reaktorbeckens, die prinzipiell nicht begrenzt sind.

Die Tab. 4.2 gibt die Sicherheitsklassifizierung für verschiedene experimentelle Einrichtungen und Geräte für die verschiedenen Schutzziele wieder. In einigen Fällen wurden gesonderte Betrachtungen bei der Klassifizierung einbezogen, um Sonderfälle zu unterscheiden: Explosionsrisiko, Probenhandhabung, Lecks innerhalb des Reaktorbeckens (begrenzt) oder außerhalb des Reaktorbeckens (unbegrenzt).

Tab. 4.2 Generische Klassifizierung der potenziellen sicherheitstechnischen Bedeutung von Experimentiereinrichtungen

Die Einstufung in die Kategorie 4 für kalte oder heiße Quellen betrachtet hier das hypothetische Ereignis einer Wasserstoff- bzw. Dampfexplosion – dagegen werden in den betrachteten Experimentiereinrichtungen in der Regel entsprechende Vorsorgemaßnahmen getroffen. Bei den Ereignisabläufen werden keine administrativen Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen berücksichtigt.

Experimentier-einrichtung	Reaktivität	Kühlung	Einschluss
Kalte Quellen	Versagen der äußeren Wandung der doppelwandigen Konstruktion -> Kategorie 2 wenn Explosionsgefahr nicht ausgeschlossen wurde -> Kategorie 4	Versagen einer Wandung der doppelwandigen Konstruktion, kein zusätzlicher Wärmeeintrag und begrenzter Kühlmittelverlust -> Kategorie 1 wenn Explosionsgefahr nicht ausgeschlossen wurde -> Kategorie 4	Versagen einer Wandung der doppelwandigen Konstruktion -> Kategorie 1 wenn Explosionsgefahr nicht ausgeschlossen wurde -> Kategorie 4
Heiße Quellen	Versagen der äußeren Wandung der doppelwandigen Konstruktion -> Kategorie 2 wenn Explosionsgefahr nicht ausgeschlossen wurde -> Kategorie 4	Versagen einer Wandung der doppelwandigen Konstruktion, zusätzlicher Wärmeeintrag und begrenzter Kühlmittelverlust -> Kategorie 2 wenn Explosionsgefahr nicht ausgeschlossen wurde -> Kategorie 4	Versagen einer Wandung der doppelwandigen Konstruktion -> Kategorie 1 wenn Explosionsgefahr nicht ausgeschlossen wurde -> Kategorie 4
Strahlrohre	Leck und vollständiges Füllen mit Kühlmittel -> Kategorie 4	Leck und Füllen mit Kühlmittel, begrenzter Kühlmittelverlust -> Kategorie 2 Leck mit Kühlmittelverlust außerhalb Reaktorbecken -> Kategorie 3	Leck mit Kühlmittelverlust außerhalb Reaktorbecken -> Kategorie 3

Tab. 4.2 Generische Klassifizierung der potenziellen sicherheitstechnischen Bedeutung von Experimentiereinrichtungen (Fortsetzung)

Bei den Ereignisabläufen werden keine administrativen Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen berücksichtigt.

Experimentier-einrichtung	Reaktivität	Kühlung	Einschluss
Rohrpostanlagen	Leck und Füllen mit Kühlmittel -> Kategorie 2 Fehler bei Probenhandhabung (ungünstigste Probe mit maximal möglicher Reaktivitätsänderung) -> Kategorie 4	Leck und Füllen mit Kühlmittel, begrenzter Kühlmittelverlust -> Kategorie 2	Beschädigung gekapselter Proben -> Kategorie 3
Konverterplatte	Keine Reaktivitätsrückwirkung -> Kategorie 1	Versagen der Kühlung, zusätzlicher Wärmeeintrag -> Kategorie 3 Leck mit Kühlmittelverlust außerhalb Reaktorbecken -> Kategorie 3	Versagen der Kühlung -> Kategorie 1 Leck mit Kühlmittelverlust außerhalb Reaktorbecken -> Kategorie 3
Bestrahlungsanlagen/Dotierungsanlage	Leck und Füllen mit Kühlmittel -> Kategorie 2 Fehler bei Probenhandhabung (ungünstigste Probe mit maximal möglicher Reaktivitätsänderung) -> Kategorie 4	Leck und Füllen mit Kühlmittel, begrenzter Kühlmittelverlust -> Kategorie 2	Beschädigung gekapselter Proben -> Kategorie 3
Thermische Säule	keine Reaktivitätsrückwirkung -> Kategorie 1	Leck mit Kühlmittelverlust außerhalb Reaktorbecken -> Kategorie 3	Leck mit Kühlmittelverlust außerhalb Reaktorbecken -> Kategorie 3

Abweichend von der generischen Klassifizierung der experimentellen Einrichtungen und Geräte kann sich für die in den Anlagen eingebauten experimentellen Einrichtungen eine anlagenspezifische Klassifizierung ergeben. Für bestehenden Anlagen wurde eine Klassifizierung bei der Auslegung der Experimentiereinrichtungen vorgenommen und wenn notwendig können entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, so dass das tatsächliche Risikopotential auf Grund von Versagen von Experimentiereinrichtungen oder Fehlbedienungen noch geringer ausfallen kann. Dies kann durch technische Maßnahmen bei der Auslegung als auch durch Überwachungsmaßnahmen, Schutzeinrichtungen und administrative Maßnahmen beim Betrieb der Experimentiereinrichtungen realisiert werden.

So wird für druckführende oder H_2/D_2 -führende Komponenten der kalten Quelle in der Regel eine doppelwandige Konstruktion verwendet, um Lecks und das Risiko einer Wasserstoff- / Deuteriumexplosion zu minimieren bzw. auszuschließen. Ebenfalls zur Risikominimierung und um Lecks frühzeitig zu erkennen, können kalte Quellen mit Lecküberwachungen ausgestattet werden, die im Anforderungsfall zur Schließung von Sicherheitsventilen führen. Zusätzlich können Druckmessungen durch redundante Sensoren erfolgen, die über eine zwei von drei Steuerungslogik eine RESA-Anforderung auslösen können.

In vergleichbarer Weise kann die heiße Quelle konstruiert sein (doppelwandige Konstruktion) und Betriebsparameter können entsprechend überwacht werden, um hier das Risiko einer Dampfexplosion zu minimieren bzw. auszuschließen. Ebenso kann die heiße Quelle über ein an das Reaktorschutzsystem angebundenes Schutz- und Kontrollsystem verfügen, um eine manuelle oder automatische Reaktorleistungsreduzierung oder -abschaltung (RESA) zu gewährleisten.

Des Weiteren werden experimentelle Einrichtungen, deren Versagen oder Integritätsverlust zu einer Freisetzung von radioaktiven Substanzen führen kann, in der Regel nach dem Mehrfach-Barrieren-Prinzip konstruiert und mit Detektoren zur Überwachung der sicherheitsrelevanten Parameter (z. B. Druck, Temperatur) ausgestattet.

Der Barrierenerhalt ist auch bei Strahlrohren und Rohrpostanlagen essenziell, um Lecks und den Austrag von radioaktiven Substanzen zu vermeiden, gerade auch im Bereich von Durchführungen, zum Beispiel aus dem Moderator tank hinaus. Als äußerer Abschluss der Strahlrohreinheiten – zweite Barriere gegen Beckenwasserverlust – sind in

der Regel Blenden eingebaut, wodurch Auswirkungen innerhalb der akzeptierten Grenzen und Auslegungsniveaus bleiben.

5 Untersuchung von Rückkopplungseffekten ausgewählter Experimentiereinrichtungen

Die Folgen von Störfallverläufen und deren Auswirkungen auf die Sicherheit der Anlage wurden für ausgewählte Experimentiereinrichtungen untersucht, wodurch ein Abgleich mit der vorgenommenen Klassifizierung ermöglicht wurde. Neben der Betrachtung neutronen-physikalischer Rückwirkungen auf den Reaktorkern wurden auch thermohydraulische Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde das generische ATHLET-Modell eines Forschungsreaktors, das im Rahmen eines früheren Vorhabens der GRS entwickelt wurde und im Bericht GRS-561 /KOP 20/ beschrieben wird, verwendet. Auf diese Weise konnten sicherheitstechnische Auswirkungen durch das Zuführen von Reaktivität auf die gesamte Anlage betrachtet werden.

Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse der Modellierungen zu diesen Störfällen wiedergegeben.

5.1 Kalte Quelle

Der Störfall „Volllaufen der kalten Quelle“ wurde thermohydraulisch mit ATHLET 3.3 näher untersucht. Dieser Störfall ist ein Reaktivitätsstörfall. Nach dem Auftreten eines Lecks in der evakuierten kalten Quelle füllt sich diese mit schwerem Wasser aus dem umliegenden Reflektortank. Die Eigenschaften des schweren Wassers als gutem Neutronenreflektor führen zu einem Reaktivitätsanstieg im Kern.

Für die Implementierung des Störfalles in den generischen Analysesimulator wurden Anpassungen vorgenommen, um die Reaktivitätszufuhr zu beschreiben. In der durchgeführten Modellierung dienten die ersten 500 s der Rechnung der Stabilisierung der Gleichgewichtsbedingungen. Danach wurde die Reaktivität innerhalb von 10 s bis zum maximalen Reaktivitätseintrag von 0,4 % linear erhöht. Dies entspricht einer konservativen Abschätzung der Dauer des Flutungsvorgangs in vergleichbaren Experimentiereinrichtungen. Der Verlauf der Reaktivitätszufuhr durch das einströmende schwere Wasser ist in Abb. 5.1 dargestellt.

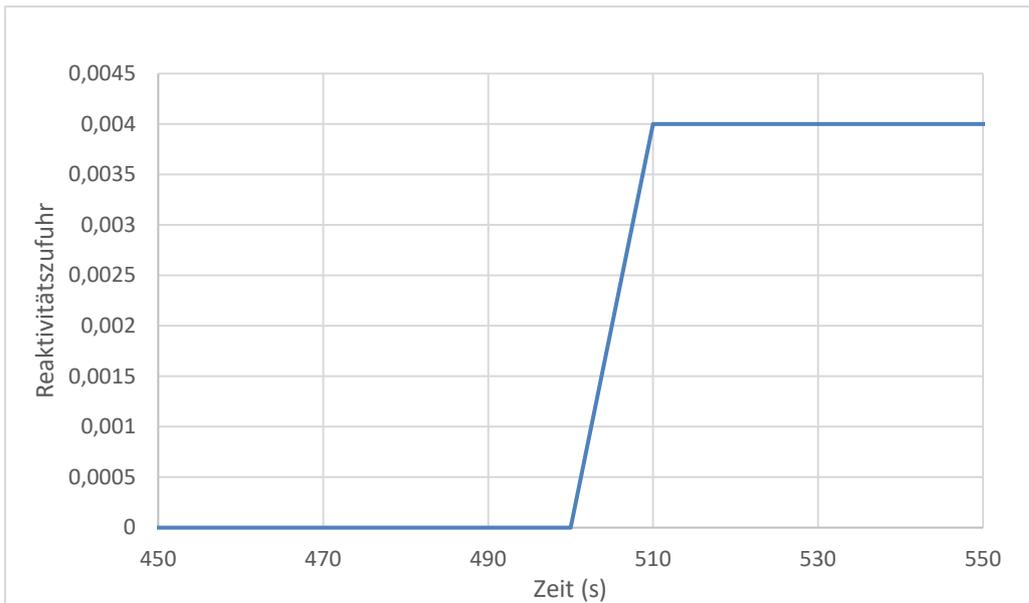


Abb. 5.1 Reaktivitätszufuhr durch das Volllaufen der kalten Quelle

Die eingebrachte Reaktivität führt zu einem Leistungsanstieg auf über 122,5 % der nominalen Leistung, wie in Abb. 5.2 zu sehen ist.

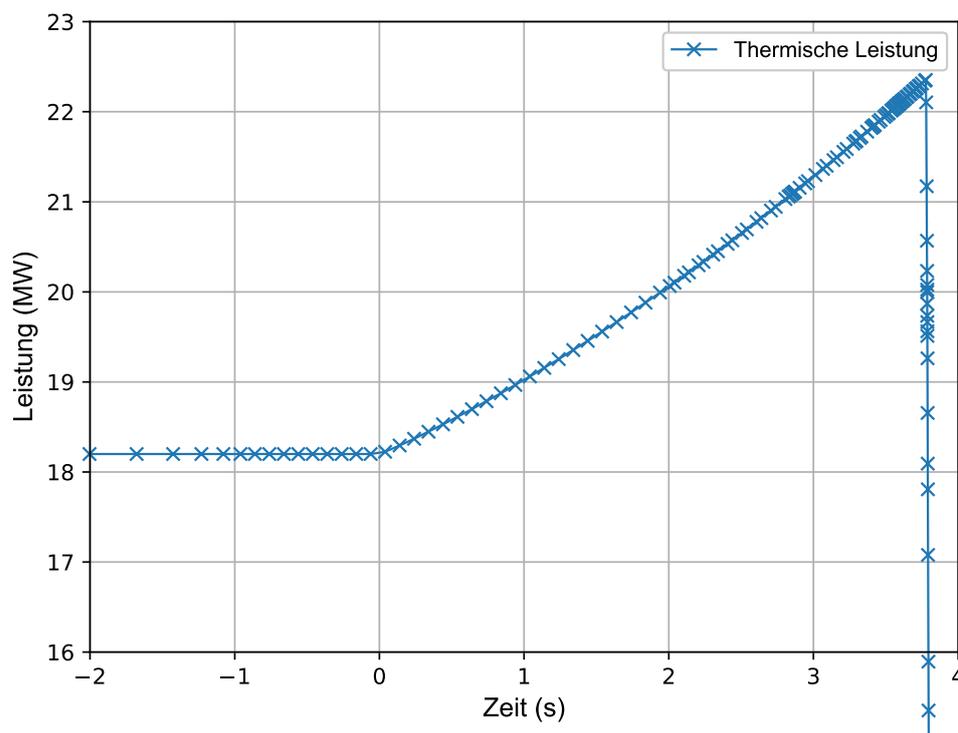


Abb. 5.2 Leistungsanstieg aufgrund der eingebrachten Reaktivität

Die erhöhte Reaktorleistung führt zu höheren Temperaturen im Kern, wie in Abb. 5.3 dargestellt.

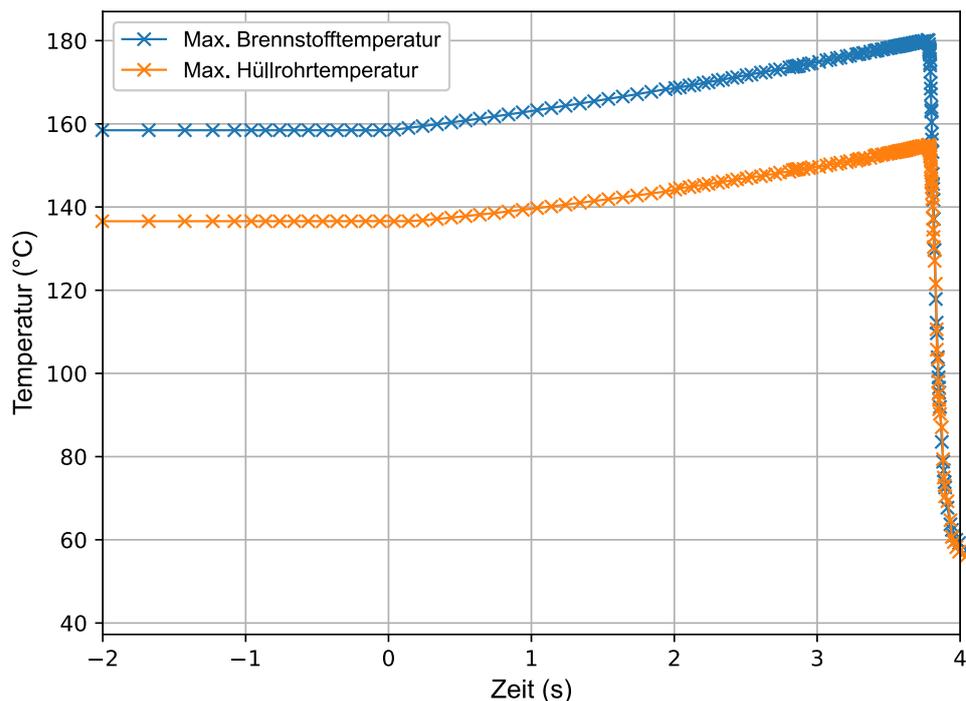


Abb. 5.3 Temperaturanstieg im Kern

Die Brennstofftemperatur im Kern steigt im Verlauf des Störfalls bis maximal 180°C an. Im heißen Kanal verdampft ein kleiner Teil des Kühlmittels und im heißesten Knoten ergibt sich im Maximum ein Dampfanteil von 0,05 %. Der Dampfanteil im gesamten Kern bleibt allerdings sehr gering, da dies nur im Heißkanal¹ von den 113 modellierten Kanäle auftritt. Im normalen Kanal entsteht kein Dampf bzw. sind die dortigen Dampfmenge vernachlässigbar.

Der kleinste Wert bezüglich der minimalen Sicherheit gegen das Auftreten von Blasensieden (DNBR – Departure from Nucleate Boiling Ratio) tritt im Verlauf des Störfalls im Heißkanal auf und liegt bei 1,3², siehe Abb. 5.4.

¹ Einzelner Kühlkanal in der Modellierung mit den ungünstigsten Abweichungen in der Konstruktion (kleinerer Kühlkanal) und der Fertigung (höhere Leistung durch höheren Brennstoffgehalt)

² Ab einen bestimmten Wärmefluss, der als "kritischer Wärmefluss" bezeichnet wird, kann der erzeugte Dampf eine isolierende Schicht auf der heißen Oberfläche bilden, was wiederum den Wärmeübergangskoeffizienten verschlechtert. Das DNBR beschreibt dieses Phänomen in einer Kennzahl. Das DNBR ergibt sich aus dem Quotienten des kritischen Wärmeflusses und dem lokalem Wärmefluss an einem Ort. Ist der Quotient ≤ 1 kann es unmittelbar nach der Phase des Blasensiedens zu einer Filmbildung kommen und der Wärmeübergangskoeffizienten z.B. zwischen Hüllrohr und Kühlmittel deutlich verschlechtert werden. Der aktuelle Wärmefluss muss folglich immer kleiner als der kritische Wärmefluss sein und somit $\text{DNBR} > 1$.

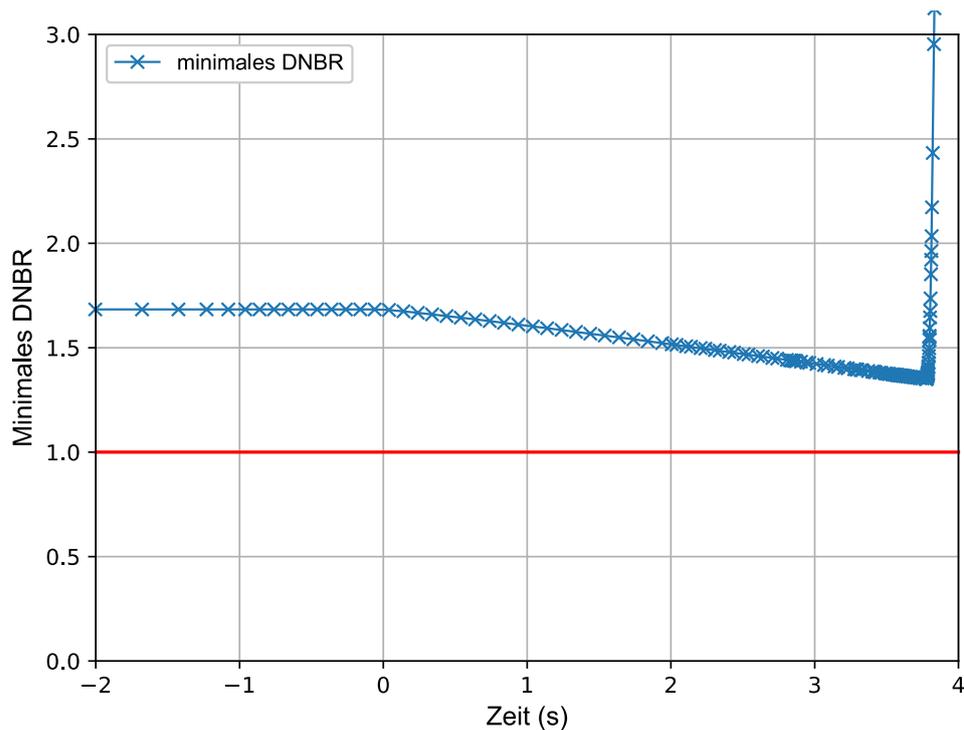


Abb. 5.4 Minimales DNBR im Heißkanal

Im Verlauf des simulierten Störfalls wird durch den Leistungsanstieg auslegungsgemäß eine RESA durch den Reaktorschutz ausgelöst. Der Anstieg der Temperaturen im Kern bleibt dabei weit unterhalb kritischer Temperaturen, die die Kernintegrität gefährden könnten (z. B. Schmelztemperaturen von Hüllrohr und Brennstoff). Nur lokal nimmt der Dampfanteil im Kern auf einen sehr kleinen Wert von 0,05 % zu, wobei auch für diesen Heißkanal des Kerns die Sicherheit gegen Blasensieden mit einem kleinsten DNBR-Wert von 1,3 während des Störfallverlaufs eingehalten wird.

5.2 Leck im reaktivitätswirksamsten Strahlrohr

Ein weiteres Ereignis mit Reaktivitätsrückwirkung im Zusammenhang mit den experimentellen Einrichtungen eines Forschungsreaktors stellt ein Leck in einem der Strahlrohre dar. Der unterstellte Fall, bei dem durch ein Leck in einem der Strahlrohre flüssiges D₂O in das Innere des Strahlrohres gelangt, wurde thermohydraulisch näher untersucht. Das Modell des generischen Analysesimulators hat zwölf radial angeordnete

Strahlrohre. Für die thermohydraulischen Rechnungen wurde ATHLET verwendet und ein Leck im Strahlrohr mit der höchsten Reaktivitätsrückwirkung unterstellt.

Die Eigenschaften des schweren Wassers als gutem Neutronenreflektor führen zu einem Reaktivitätsanstieg im Kern.

Für die Implementierung des Störfalles in den generischen Analysesimulator wurden ebenso wie bei dem Störfall des vorherigen Abschnitts Anpassungen vorgenommen, um die Reaktivitätszufuhr zu beschreiben. Die ersten 500 s der Rechnung werden ebenfalls zur Stabilisierung der Gleichgewichtsbedingungen verwendet. Im Anschluss wird die Reaktivitätsrückwirkung des einströmenden schweren Wassers, die als zeitlich linear angenommen wird, innerhalb von 10 s bis auf die maximale Rückwirkung von 0,2 % erhöht. Dieser Wert entspricht im angenommenen Fall einer Abschätzung, wie sie in einem vergleichbaren Referenzforschungsreaktor vorgenommen wurde.

In einer weiteren Betrachtung wurde die Reaktivitätsrückwirkung für jedes Strahlrohr mit Hilfe des Monte-Carlo-Rechenprogramms Serpent bestimmt. Tab. 5.1 zeigt die mit Serpent bestimmten Multiplikationsfaktoren und die daraus resultierenden Reaktivitätsdifferenzen und deren Fehler, in Bezug auf den Normalbetrieb, für jedes mögliche Ereignis. Die ermittelte maximale Reaktivitätsrückwirkung von 0,298 % durch die Flutung eines Strahlrohres wurden in einer weiteren Simulation mit ATHLET berücksichtigt.

Tab. 5.1 Ermittelte Reaktivitätswerte der Serpent-Simulation

k_{eff} – effektiver Neutronenmultiplikationsfaktor; ρ Reaktivität; Diff. Reaktivitätseintrag

Geflutetes Strahlrohr	k_{eff}	ρ/pcm	Diff./pcm
Keins	$1,00142 \pm 0,00036$	$141,80 \pm 35,90$	---
1	$1,00336 \pm 0,00036$	$334,87 \pm 35,76$	$193,08 \pm 0,14$
2	$1,00146 \pm 0,00035$	$145,79 \pm 34,90$	$3,99 \pm 0,86$
3	$1,00199 \pm 0,00036$	$198,60 \pm 35,86$	$56,81 \pm 0,96$
4	$1,00238 \pm 0,00035$	$237,43 \pm 34,83$	$95,64 \pm 1,02$
5	$1,00266 \pm 0,00035$	$265,29 \pm 34,81$	$123,50 \pm 0,02$
6	$1,00198 \pm 0,00036$	$197,61 \pm 35,86$	$55,81 \pm 1,04$
7	$1,00364 \pm 0,00035$	$362,68 \pm 34,75$	$220,88 \pm 1,11$
8	$1,00442 \pm 0,00035$	$440,05 \pm 34,69$	$298,26 \pm 0,05$
9	$1,00206 \pm 0,00035$	$205,58 \pm 34,86$	$63,78 \pm 0,16$
10	$1,00195 \pm 0,00036$	$194,62 \pm 35,86$	$52,82 \pm 1,00$
11	$1,00119 \pm 0,00036$	$118,86 \pm 35,91$	$-22,94 \pm 0,05$
12	$1,00110 \pm 0,00035$	$109,88 \pm 34,92$	$-31,92 \pm 0,99$
Alle mit D ₂ O	$1,01099 \pm 0,00121$	$1087,05 \pm 118,38$	$945,25 \pm 83,46$
Alle mit H ₂ O	$0,99863 \pm 0,00035$	$-136,49 \pm 35,10$	$-278,28 \pm 83,29$

Die thermohydraulischen Rechnungen wurden mit ATHLET 3.3, die Rechnungen zur Neutronenkinetik mit Serpent 2.1.32 durchgeführt.

Für die Ergebnisdarstellung wurde analog zu dem im vorigen Abschnitt betrachteten Störfall die Zeitachse ebenfalls um 500 s verschoben, so dass der Ereignisbeginn auf den Zeitpunkt 0 fällt. Abb. 5.5 zeigt den in ATHELT modellierten Reaktivitätseintrag infolge der Flutung des reaktivitätswirksamsten Strahlrohrs. Die erste Rechnung (R1) wurde mit einer Reaktivitätszufuhr von 0,2 % pro 10 s und die zweite Rechnung (R2) mit einer Reaktivitätszufuhr entsprechend dem in Serpent bestimmten Maximalwert durchgeführt. Nachfolgend werden im Wechsel Diagramme zu relevanten Größen der Rechnungen diskutiert.

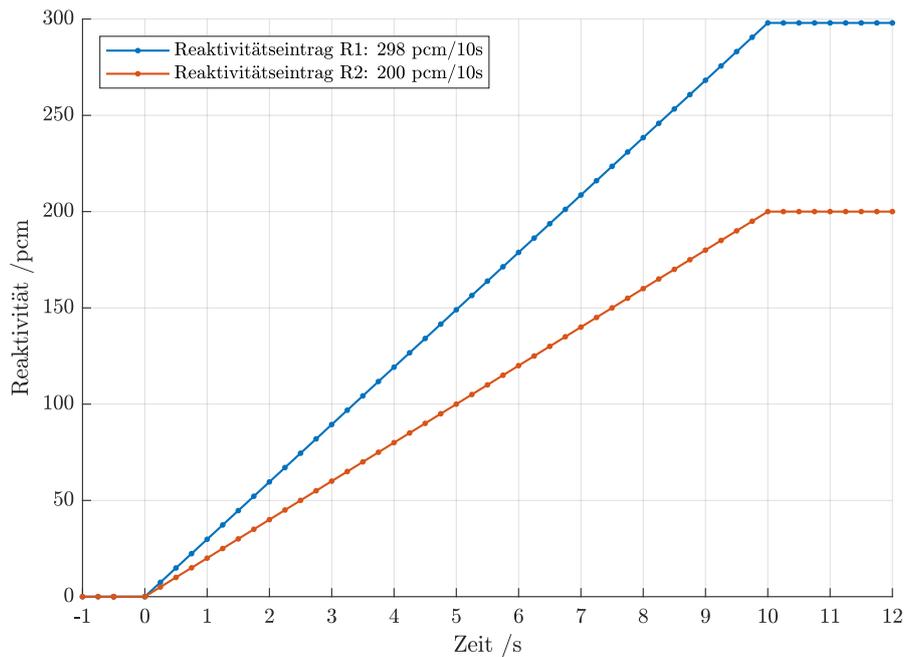


Abb. 5.5 Modellierter linearer Reaktivitätseintrag mit Maximalwerten aus dem Sicherheitsbericht und dem Rechenergebnis aus Serpent

Durch den Anstieg der Leistung auf bis zu 22,1 MW (R1: 22,0 MW, R2: 22,1 MW; Abb. 5.6 und Abb. 5.7) wird in beiden Fällen eine RESA (nach R1: 5,9 s, R2: 4,2 s) ausgelöst und mit einer Verzögerung von 0,5 s (nach R1: 6,4 s, R2: 4,7 s) wirksam. In beiden Fällen ist die Wirksamkeit der RESA unter anderem durch den Abfall des effektiven Neutronenmultiplikationsfaktors k_{eff} zu erkennen. Im Vergleich der beiden Rechnungen wird die RESA in Rechnung 2 ca. 2,1 s früher ausgelöst als in Rechnung 1. In beiden Rechnungen wird der Störfall beherrscht. Die thermische Leistung steigt bis zur RESA, ähnlich wie die zugeführte Reaktivität, an und sinkt nach der RESA auf die Nachzerfallsleistung ab.

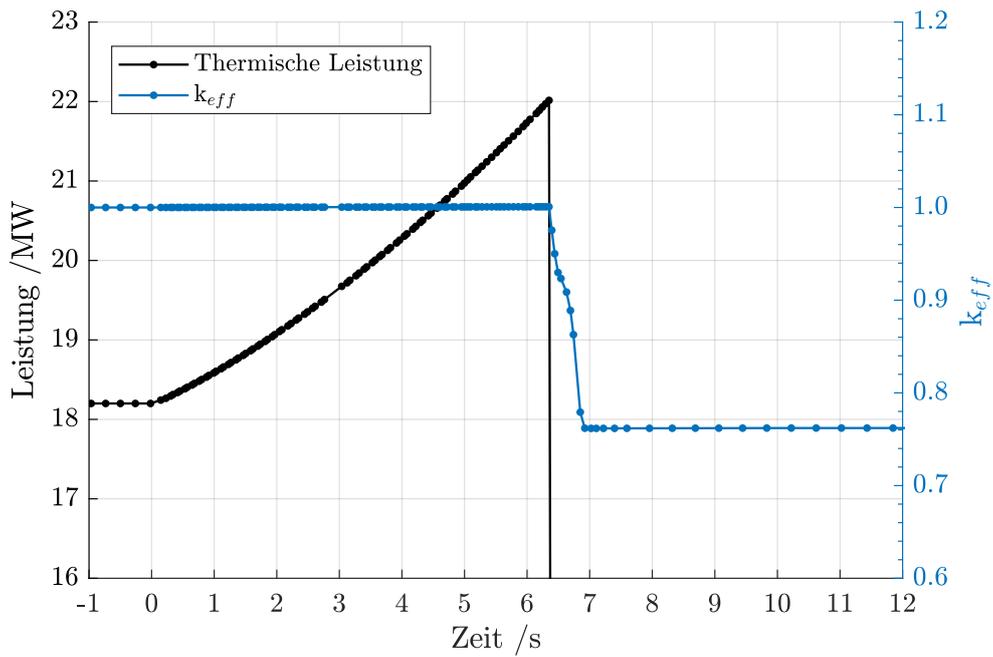


Abb. 5.6 Verlauf der thermischen Leistung und des Multiplikationsfaktors k_{eff} für R1

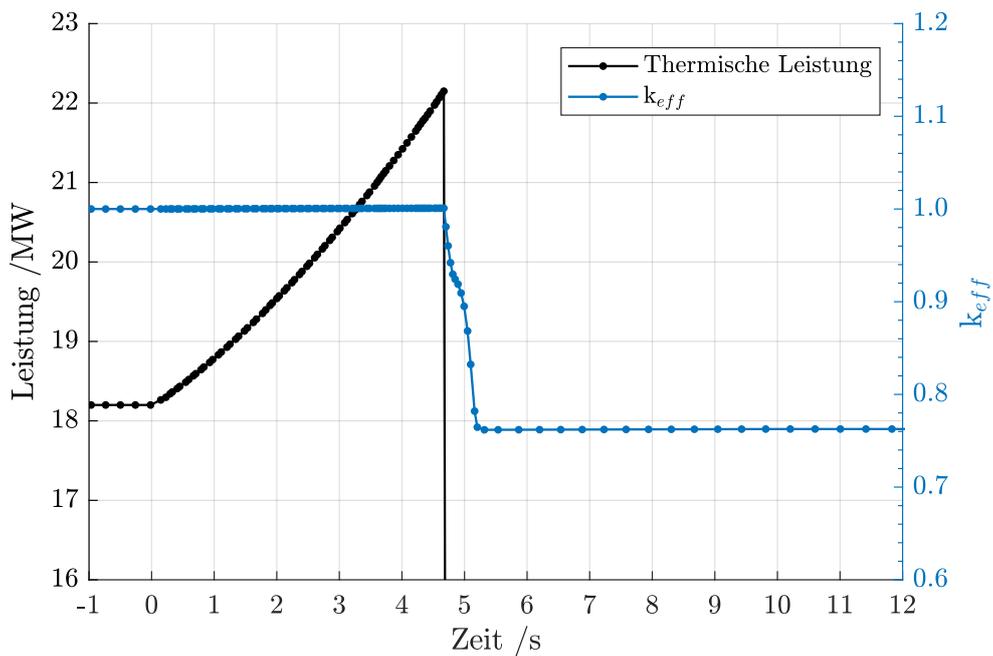


Abb. 5.7 Verlauf der thermischen Leistung und des Multiplikationsfaktors k_{eff} für R2

Durch die Zunahme der Reaktorleistung steigt die Temperatur der Brennstoffplattenummantelung und die des Brennstoffs selbst an (siehe Abb. 5.8 und Abb. 5.9). Im Brennstoff steigt die Temperatur in beiden Rechnungen auf ca. 180 °C (R1: 178,5 °C, R2: 179,2 °C), die Ummantelung der Brennstoffplatten erreicht eine Temperatur von ca. 154 °C (R1: 153,2 °C R2: 153,8 °C). Beide Temperaturen sind in Rechnung 2 etwas

höher als in Rechnung 1, da hier auch die Reaktorspitzenleistung etwas höher ist. Zu einer Verdampfung des Kühlmittels kommt es in beiden Rechnungen nicht.

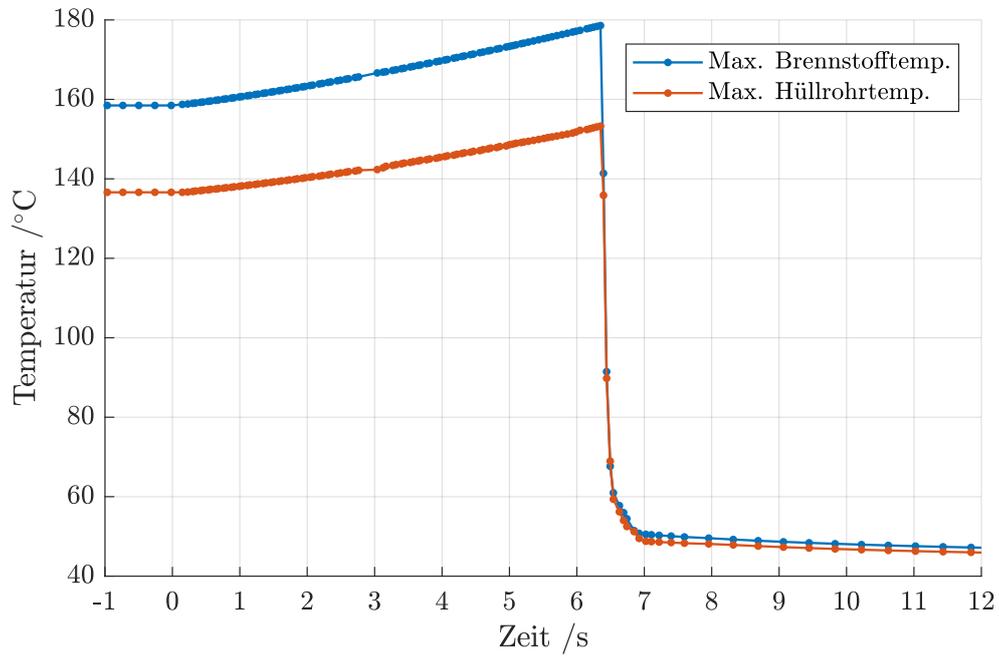


Abb. 5.8 Temperaturverlauf der maximalen Hüllrohr- und Brennstofftemperatur im Kern für R1

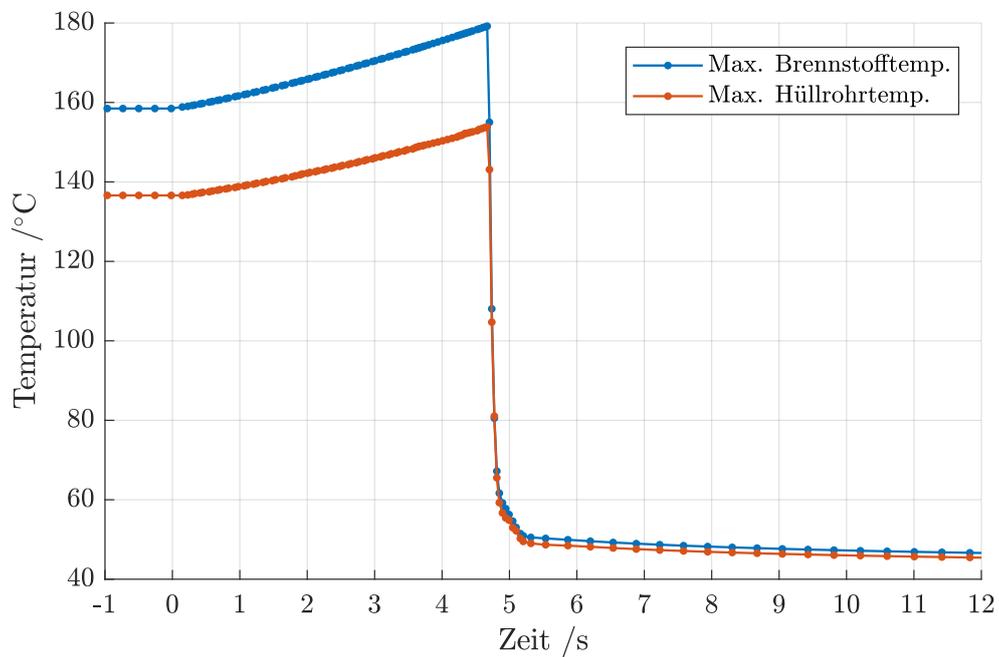


Abb. 5.9 Temperaturverlauf der maximalen Hüllrohr- und Brennstofftemperatur im Kern für R2

Der kleinste Wert für die minimale Sicherheit gegen das Auftreten von Blasensieden (DNBR) ergibt sich im Heißkanal und liegt für Rechnung 1 bei 1,37 und für Rechnung 2 bei 1,36. Das DNBR beider Rechnungen ist in Abb. 5.10 aufgetragen.

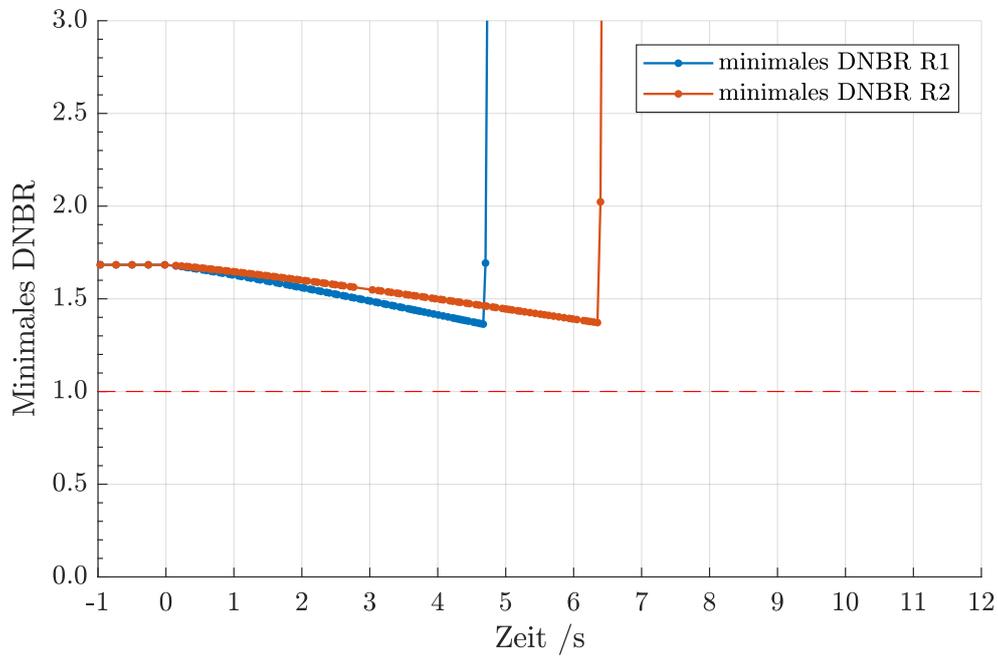


Abb. 5.10 Minimales DNBR für beide Rechnungen

Im Verlauf des simulierten Störfalls wird durch den Leistungsanstieg ebenso wie in dem Störfall des vorhergehenden Abschnitts auslegungsgemäß eine RESA durch den Reaktorschutz ausgelöst. Der Anstieg der Temperaturen im Kern bleibt dabei ebenfalls weit unterhalb kritischer Temperaturen. Ebenso wird auch für diesen Fall die Sicherheit gegen Blasensieden mit kleinsten DNBR-Werten von 1,37 bzw. 1,36 für beide Rechnungen während des Störfallverlaufs eingehalten.

6 Zusammenfassung

Die Analyse der regulatorischen Herangehensweisen bezüglich der Anforderungen an Experimentiereinrichtungen in Forschungsreaktoren zeigt, dass hierbei viele Gemeinsamkeiten vorliegen. Diese betreffen insbesondere den Erhalt der Sicherheit des Reaktors in allen Betriebszuständen sowie den Einschluss von radioaktiven Materialien durch geeignete Auslegung und Anordnung der experimentellen Einrichtungen und Geräte. In einigen Leitfäden, wie dem niederländischen, dem australischen und dem russischen Leitfaden ist eine Einteilung von experimentellen Einrichtungen und Geräten in Sicherheitsklassen und Sicherheitssysteme vorgesehen. Ebenso soll nach den regulatorischen Anforderungen der verschiedenen Länder der sichere Umgang mit positiven Reaktivitätseffekten, die durch die Experimentiereinrichtungen hervorgerufen werden können, immer mitberücksichtigt werden und die Inanspruchnahme des jeweiligen Reaktorschutzsystems auf Grund von Wechselwirkungen der Experimentiersysteme mit dem Reaktor soll vermieden oder minimiert werden. Explizite Anforderungen an einzelne experimentelle Einrichtungen oder Teile von diesen für verschiedene in Betrieb befindliche Anlagen sind im technischen Report No. 455 der IAEA und für niederländische und französische Forschungsreaktoren im nationalen Regelwerk wiedergegeben.

Ausgehend von dem IAEA Safety Guide SSG-24, der für experimentelle Einrichtungen und Geräte vier Sicherheitskategorien in Abhängigkeit von der Sicherheitssignifikanz unterscheidet, wurde in diesem Vorhaben eine Klassifizierung für Experimentiereinrichtungen vorgenommen. Hierzu wurden für die jeweiligen Schutzziele – Einhaltung und Aufrechterhaltung der Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der Brennelemente und Begrenzung der Freisetzung von radioaktiven Stoffen (Erhalt der Barrieren) – je vier eigene Sicherheitskategorien definiert, um mögliche Folgen aus Versagen, Fehlbedienung oder Betrieb bezogen auf die Einhaltung der Schutzziele zuzuordnen und somit die Sicherheitssignifikanz zu bestimmen. Die sicherheitstechnische Kategorisierung konnte auf Grundlage eines Überblicks über Experimentiereinrichtungen in deutschen (BER II, FRM II, FRMZ) und ausländischen Forschungsreaktoren vorgenommen werden, in dem u. a. die Einbauorte der Experimentiereinrichtungen – Abstand bzw. Nähe zum Reaktorkern – sowie mögliche Versagensszenarien und deren Rückwirkung auf den Reaktor und die Anlage erfasst wurden.

Die so erstellte generische Klassifizierung experimenteller Einrichtungen und Geräte gibt die Sicherheitssignifikanz dieser Einrichtungen wieder. Erhebliche Auswirkungen auf die Einhaltung aller Schutzziele, d. h. eine Einordnung in die höchste Kategorie für alle

Schutzziele, haben demnach die kalte Quelle und die heiße Quelle, wenn hierbei das Explosionsrisiko nicht ausgeschlossen werden kann, was in den untersuchten Anlagen durch entsprechende Maßnahmen minimiert bzw. ausgeschlossen wurde. Erhebliche Auswirkungen auf die Einhaltung des Schutzziels „Kontrolle der Reaktivität“ können ebenfalls Lecks an Strahlrohren (vollständiges Füllen mit Kühlmittel) oder die Handhabung von Proben (ungünstigste Reaktivitätsänderungen) haben, welche zu einem Ansprechen des Reaktorschutzsystems führen. Bedeutende Auswirkungen auf die Einhaltung der Schutzziele „Kühlung der Brennelemente“ und „Einschluss von radioaktiven Stoffen“, d. h. eine Einordnung in die nächstniedrigere Kategorie, haben im Wesentlichen experimentelle Einrichtungen und Geräte, an denen Lecks mit einem Kühlmittelverlust außerhalb des Reaktorbeckens auftreten können, wodurch es neben dem Kühlmittelverlust auch zu einer Verschleppung innerhalb der Anlage kommen kann.

Die oben beschriebenen sicherheitstechnischen Implikationen wurden bei der Auslegung der Experimentiereinrichtungen in untersuchten Anlagen bereits berücksichtigt und es wurden entsprechende Vorkehrungen getroffen, so dass das tatsächliche Risikopotential auf Grund von Versagen von Experimentiereinrichtungen oder Fehlbedienungen wesentlich geringer ist. Dies wurde sowohl durch technische Maßnahmen bei der Auslegung als auch durch Überwachungsmaßnahmen, Schutzeinrichtungen und administrative Maßnahmen beim Betrieb der Experimentiereinrichtungen umgesetzt.

Die Folgen von Störfallverläufen und deren Auswirkungen auf die Anlagensicherheit wurden für zwei ausgewählte Einrichtungen des generischen ATHLET-Modells eines Referenzforschungsreaktors (kalte Quelle und Strahlrohre) für zwei Störfälle („Volllaufen der kalten Quelle“ und „Leck im reaktivitätswirksamsten Strahlrohr“) untersucht, wodurch auch ein Abgleich mit der vorgenommenen Klassifizierung ermöglicht wurde. Hierzu wurden Anpassungen an dem vorhandenen generischen Modell vorgenommen und es erfolgten neben der Betrachtung neutronen-physikalischer Rückwirkungen auf den Reaktorkern auch thermohydraulische Untersuchungen. Im Verlauf der simulierten Störfälle kam es in beiden betrachteten Störfallverläufen auf Grund des Leistungsanstiegs auslegungsgemäß zur Auslösung einer RESA durch den Reaktorschutz und der Anstieg der Temperaturen im Kern blieb weit unterhalb kritischer Temperaturen.

Literaturverzeichnis

- /ANV 15/ Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS) (Hrsg.): Safety Guidelines, Guidelines on the Safe Design and Operation of Nuclear Reactors. 8. Oktober 2015.
- /ARP 01/ Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (Hrsg.): Regulatory assessment criteria for the design of new controlled facilities and modifications to existing facilities, Regulatory Guideline RG-5. RB-STD-43-00 Rev 1: Australien, Oktober 2001.
- /ARP 18/ Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (Hrsg.): Regulatory Guide - Construction of an item important for safety. REG-RC-SUP-254A v1.2, Dezember 2018.
- /ENG 09/ Englert, M.: Neutronenphysikalische Simulationsrechnungen zur Proliferationsresistenz nuklearer Technologien, zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Dissertation. Dissertation, Fachbereich Physik, Technische Universität Darmstadt: Darmstadt, 2009.
- /FED 16/ Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (Hrsg.): Federal Rules and Regulations in the Area of Atomic Energy use „Nuclear Safety Rules for Critical Test Stands“ (NP-008-16). No. 348, 23. August 2016.
- /FED 17/ Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (Hrsg.): Federal Rules and Regulations in the Area of Atomic Energy use „Requirements for Contents of Safety Analysis Reports for Nuclear Research Installations“ (NP-049-17). No. 528, 5. Dezember 2017.
- /GOB 00/ Gobrecht, K., Gutmiedl, E., Scheuer, A.: Status Report on the Cold Neutron Source of the Garching Neutron Research Facility FRM-II, 15th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources; November 6-9, 2000; Tsukuba, Japan. 2000.

- /GOU 21/ Goumnerov, H., Mateos Canals, I., Rademacher, R.: Bewertungsmethoden für Umrüstungsstrategien bei Forschungsreaktoren von hochangereicherten (HEU) auf niederangereicherten (LEU) Brennstoff, Fachlicher Bericht zum AP 3 des Vorhabens 4718R01321. Hrsg.: GRS gGmbH, März 2021.
- /GRS 21/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: ATHLET 3.3, Input Data Description, GRS-P-1/ Vol.1, Rev. 9. Hrsg.: GRS gGmbH, November 2021.
- /IAE 07/ IAEA (Hrsg.): Utilization related design features of research reactors: A Compendium. Technical reports series, Bd. 455, STI DOC 10 455, 606 S., ISBN 92-0-112206-3, International Atomic Energy Agency: Wien, 2007.
- /IAE 12/ IAEA (Hrsg.): Safety in the Utilization and Modification of Research Reactors, Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series No. SSG-24: Wien, 2012.
- /IAE 22/ IAEA (Hrsg.): Safety in the Utilization and Modification of Research Reactors, Specific Safety Guide, Rev. 1. IAEA Safety Standards Series No. SSG-24: Wien, 2022.
- /IRS 19/ Couturier, J., Yéhia, H. A., Grolleau, E.: Elements of nuclear safety - Research reactors. Hrsg.: IRSN, Science and Technology Series, DOI 10.1051/978-2-7598-2356-7, 2019.
- /KOP 20/ Koppers, V., Cuesta Morales, A., Gärner, F.: Forschungskonzept für die Entwicklung eines generischen Analysesimulators für einen Forschungsreaktor. Hrsg.: GRS gGmbH, GRS-561, März 2020.
- /LEP 15/ Leppänen, J.: Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, User's Manual. 18. Juni 2015.

- /PIC 21/ Pichlmaier, A., Backs, A., Jeschke, F., Link, P., Reiter, C., Revay, Z., Röhrmoser, A., Schätzlein, R., Schillinger, B., Schulz, M., Sebold, S., Stieghorst, C., Neuwirth, T., Wirtz, A.: CARBON-14, COLD SOURCE, CYCLE OF FUEL AND THE CORONA PANDEMIC - FRM II OPERATOR'S CHALLENGES IN THE YEARS 2020/21. In: European Nuclear Society (Hrsg.): European Research Reactor Conference RRFM 2021. Helsinki, Finnland, 13. - 17. März 2016, 2021.
- /SNR 12/ State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine (Hrsg.): General provisions on subcritical nuclear facility safety, Approved Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, No. 56, Registered with the Ministry of Justice of Ukraine, April 27, 2012 under No. 640/20953. 12. März 2012.
- /TUM 07/ Technische Universität München (Hrsg.): ANNUAL REPORT 2006, Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II). 2007.
- /WEN 20/ Western European Nuclear Regulators Association (WENRA) WGRR (Hrsg.): WENRA Safety Reference Levels for Existing Research Reactors, Report. 2020.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 5.1	Reaktivitätszufuhr durch das Volllaufen der kalten Quelle.....	46
Abb. 5.2	Leistungsanstieg aufgrund der eingebrachten Reaktivität.....	46
Abb. 5.3	Temperaturanstieg im Kern	47
Abb. 5.4	Minimales DNBR im Heißkanal.....	48
Abb. 5.5	Modellierter linearer Reaktivitätseintrag mit Maximalwerten aus dem Sicherheitsbericht und dem Rechenergebnis aus Serpent.....	51
Abb. 5.6	Verlauf der thermischen Leistung und des Multiplikationsfaktors k_{eff} für R1.....	52
Abb. 5.7	Verlauf der thermischen Leistung und des Multiplikationsfaktors k_{eff} für R2.....	52
Abb. 5.8	Temperaturverlauf der maximalen Hüllrohr- und Brennstofftemperatur im Kern für R1	53
Abb. 5.9	Temperaturverlauf der maximalen Hüllrohr- und Brennstofftemperatur im Kern für R2	53
Abb. 5.10	Minimales DNBR für beide Rechnungen.....	54

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Forschungsreaktoren, die wesentlichen Experimentiereinrichtungen und deren Einbauort	3
Tab. 3.1	Hinweise zur Umsetzung von Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach IAEA SSG-24 /IAE 12/	15
Tab. 3.2	Beispiele für Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach IAEA Technical Reports Series No. 455 /IAE 07/.....	16
Tab. 3.3	Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach WENRA /WEN 20/	17
Tab. 3.4	Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach ukrainischen Leitlinien /SNR 12/	19
Tab. 3.5	Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach russischen Leitlinien /FED 17/.....	21
Tab. 3.6	Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach den niederländischen Leitlinien /ANV 15/.....	23
Tab. 3.7	Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach französischen Leitlinien /IRS 19/	25
Tab. 3.8	Beziehung zwischen der Funktion von SSK bei der Analyse auslösender Ereignisse und der Sicherheitskategorie /ARP 18/.....	27
Tab. 3.9	Anforderungen an experimentelle Einrichtungen und Geräte nach australischen Leitlinien /ARP 18/ und /ARP 01/	29
Tab. 4.1	Potenzielle (hypothetische) Schadensszenarien von experimentellen Einrichtungen und Geräten und Rückwirkungen auf den Reaktor	35
Tab. 4.2	Generische Klassifizierung der potenziellen sicherheitstechnischen Bedeutung von Experimentiereinrichtungen.....	41
Tab. 5.1	Ermittelte Reaktivitätswerte der Serpent-Simulation	50

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de