

3.3

Der Einfluss nuklearer Datenevaluierungen auf stationäre Ganzkernrechnungen

→ Nukleare Daten werden hauptsächlich durch die Nachrechnung von kritischen Experimenten validiert. Da es sich bei den meisten dieser Systeme um kompakte Anordnungen bei Raumtemperatur handelt, sind sie nicht unbedingt repräsentativ für Leistungsreaktoren unter Betriebsbedingungen. Die GRS hat verschiedene, auf JEFF, ENDF/B und JENDL basierende, nukleare Datenevaluierungen unter Verwendung des »Monte Carlo«-Rechenverfahrens für große DWR- und WWER-Reaktorkernanordnungen mit UO_2 - und MOX-Brennstoff angewendet. Die Übereinstimmung zwischen den sich ergebenden Multiplikationsfaktoren ist angemessen; es hat sich jedoch gezeigt, dass die Wahl der nuklearen Datenbasis einen signifikanten Einfluss auf die radiale Leistungsverteilung haben kann. In den ungünstigsten Fällen führt dies zu Unterschieden in den Brennelementleistungen von über 10%. Einflüsse dieser Art können bei Berechnungen für kompakte kritische Anordnungen normalerweise nicht beobachtet werden, was am Vergleich von berechneten Stableistungsverteilungen für ein kritisches Experiment gezeigt wird.



Dr. Winfried Zwermann

Status nuklearer Datenevaluierungen

Aktualisierung und Verbesserung bestehender Datenbibliotheken. Die evaluierten nuklearen Daten werden ständig verbessert. Während der letzten Jahre wurde die europäische Bibliothek von JEF-2.2 auf JEFF-3.1, die amerikanische Bibliothek von ENDF/B-VI auf ENDF/B-VII und die japanische Bibliothek von JENDL-3.2 auf JENDL-3.3/AC-2008 aktualisiert, mit dem Ziel, die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen für Integraleexperimente zu erhöhen. Daneben werden in zunehmendem Maße Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. In diesem Zuge werden zum einen die Kovarianzdaten verbessert, welche die Unsicherheiten der nuklearen Querschnittsdaten beschreiben, und zum anderen die Berechnungsmethoden erweitert, die diese Kovarianzdaten nutzen.

Validierung der Daten mittels integraler Experimente. Für die Validierung der nuklearen Datenbibliotheken wird eine große Anzahl integraler Experimente mit allen Arten von Spalt- und Moderatormaterialien sowie einem weiten Bereich von Spektralverhältnissen verwendet. Eine Sammlung von Beschreibungen solcher Experimente ist im »International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments« enthalten. Die große Mehrheit dieser Validierungsberechnungen bezieht sich auf Multiplikationsfaktoren, obwohl andere gemessene Größen wie Spaltratenverteilungen und Reaktivitätskoeffizienten zunehmend berücksichtigt werden. Entsprechende Experimente hierzu sind im »International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments« beschrieben. Fast alle betrachteten Systeme sind kompakte Anordnungen bei Raumtemperatur. Bei Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen auf der Grundlage von Kovarianzdaten, wie sie z. B. mit dem TSUNAMI-Code aus dem SCALE-Code-System durchgeführt werden, werden ebenfalls in erster Linie die Multiplikationsfaktoren kritischer Anordnungen betrachtet. Solche kompakten kritischen Systeme bei niedrigen Temperaturen sind nicht unbedingt repräsentativ für Leistungsreaktoren unter Betriebsbedingungen.

Kritische Anordnung und Ganzkernberechnungen

Untersuchung der Unterschiede in den Multiplikationsfaktoren und Leistungsverteilungen. Die GRS hat die Unterschiede in den Multiplikationsfaktoren und Leistungsverteilungen einer kritischen Anordnung sowie in für große Reaktorkerne typischen Anordnungen untersucht, die aufgrund der Verwendung von verschiedenen nu-

klearen Datenbibliotheken entstehen. Zu diesem Zweck wurde der MCNP-5-Code verwendet, da die »Monte Carlo«-Berechnungsmethode mit nuklearen Daten kontinuierlicher Energie derzeit die höchste Genauigkeit bei der Neutronentransportberechnung bietet – und dies ohne Beschränkungen hinsichtlich der geometrischen Modellierung und ohne vorherige Spektralberechnungen zur Wirkungsquerschnittsaufbereitung. Daher ist diese Methode am besten geeignet, um die Einflüsse von nuklearen Daten aufzuzeigen.

Ein kritisches Experiment und zwei Ganzkernanordnungen. Für ein kritisches Benchmark-Experiment und zwei Ganzkernanordnungen, die kürzlich Gegenstand von internationalen OECD/NEA-Vergleichsrechnungen waren, werden Berechnungen mit verschiedenen nuklearen Datenevaluationen durchgeführt. Dabei handelt es sich zum einen um das »Benchmark on the VENUS Plutonium Recycling Experiments – Configuration 7« und zum anderen um die stationären Zustände des »PWR MOX/ UO_2 Core Transient Benchmark« sowie um das »VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark«. Die VENUS-7-Kerne sind quadratische Gitter mit je circa 900 Brennstäben bei Raumtemperatur. Der Kern der Anordnung 7/1 ist annähernd zylindrisch mit einem Radius von 22 cm. Er besteht aus einem inneren MOX-Bereich und einem äußeren UO_2 -Bereich und wird von Leichtwasser moderiert und reflektiert. Die aktive Höhe der Brennstäbe beträgt 50 cm. Die Ganzkernanordnungen beschreiben gemischte Kerne mit einer MOX-Beladung von circa 30%. Der DWR-Kern vom Westinghouse-Typ besteht aus 193 quadratischen Brennelementen mit 17x17 Stabzellen, und der WWR-Kern aus 163 hexagonalen Brennelementen mit 331 Stab-

3.3 Der Einfluss nuklearer Datenevaluierungen auf stationäre Ganzkernrechnungen

<u>U 4.2%</u> (CR-D) 35.0	<u>U 4.2%</u> 0.15	<u>U 4.2%</u> (CR-A) 22.5	<u>U 4.5%</u> 0.15	<u>U 4.5%</u> (CR-SD) 37.5	M 4.3% 17.5	<u>U 4.5%</u> (CR-C) 0.15	<u>U 4.2%</u> 32.5
<u>U 4.2%</u> 0.15	<u>U 4.2%</u> 17.5	<u>U 4.5%</u> 32.5	M 4.0% 22.5	<u>U 4.2%</u> 0.15	<u>U 4.2%</u> (CR-SB) 32.5	M 4.0% 0.15	<u>U 4.5%</u> 17.5
<u>U 4.2%</u> (CR-A) 22.5	<u>U 4.5%</u> 32.5	<u>U 4.2%</u> (CR-C) 22.5	<u>U 4.2%</u> 0.15	<u>U 4.2%</u> 22.5	M 4.3% 17.5	<u>U 4.5%</u> (CR-B) 0.15	M 4.3% 35.0
<u>U 4.5%</u> 0.15	M 4.0% 22.5	<u>U 4.2%</u> 0.15	M 4.0% 37.5	<u>U 4.2%</u> 0.15	<u>U 4.5%</u> (CR-SC) 20.0	M 4.3% 0.15	<u>U 4.5%</u> 20.0
<u>U 4.5%</u> (CR-SD) 37.5	<u>U 4.2%</u> 0.15	<u>U 4.2%</u> 22.5	<u>U 4.2%</u> 0.15	<u>U 4.2%</u> (CR-D) 37.5	<u>U 4.5%</u> 0.15	<u>U 4.2%</u> (CR-SA) 17.5	
M 4.3% 17.5	<u>U 4.2%</u> (CR-SB) 32.5	M 4.3% 17.5	<u>U 4.5%</u> (CR-SC) 20.0	<u>U 4.5%</u> 0.15	M 4.3% 0.15	<u>U 4.5%</u> 32.5	
<u>U 4.5%</u> (CR-C) 0.15	M 4.0% 0.15	<u>U 4.5%</u> (CR-B) 0.15	M 4.3% 0.15	<u>U 4.2%</u> (CR-SA) 17.5	<u>U 4.5%</u> 32.5	Assembly Type CR Position Burnup [GWd/t]	
<u>U 4.2%</u> 32.5	<u>U 4.5%</u> 17.5	M 4.3% 0.15	<u>U 4.5%</u> 20.0				

UOX assembly
MOX assembly

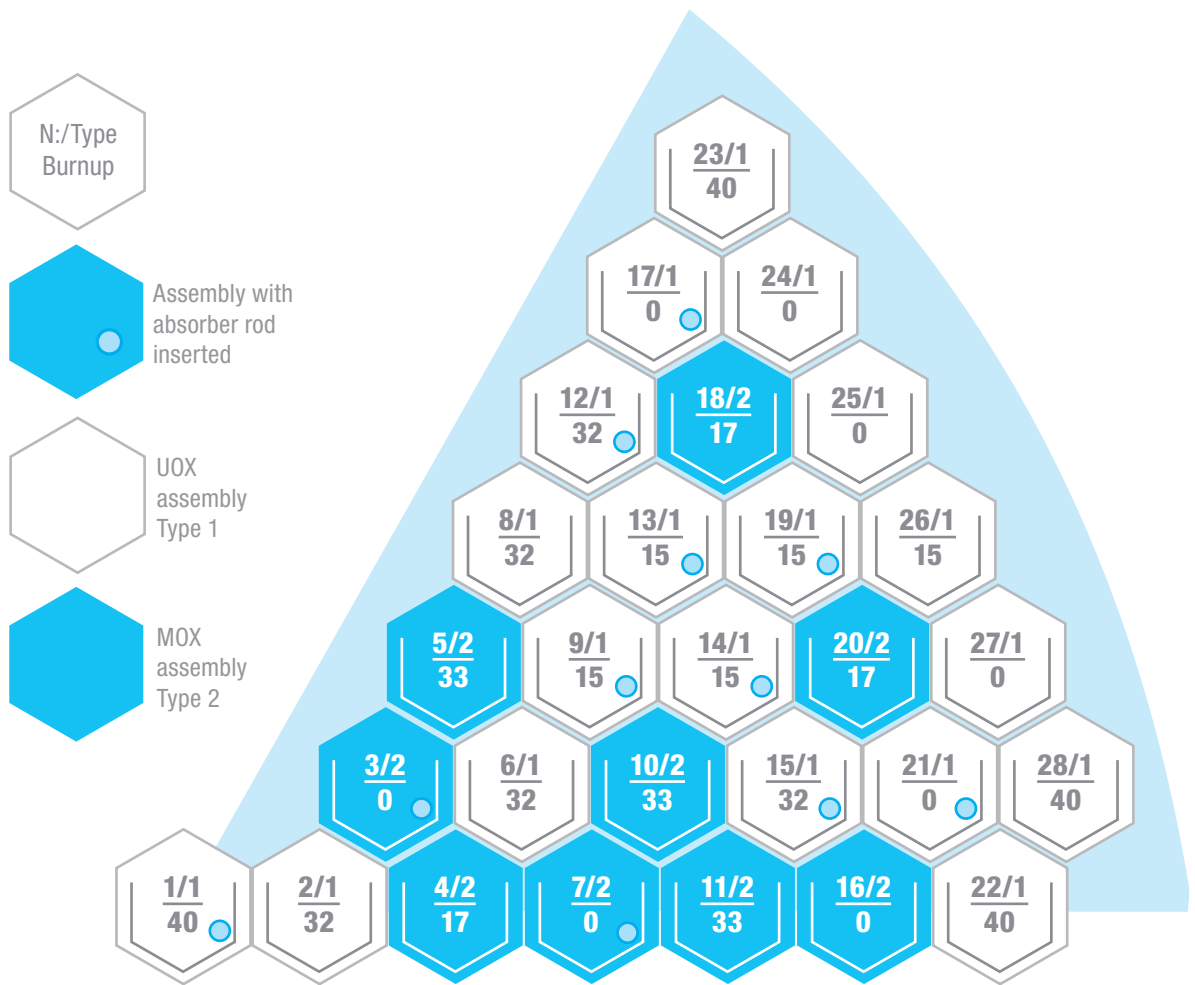


GANZKERNANORDNUNGEN

Bild 29
Kernauslegung für den »PWR MOX/UO2 Core Transient Benchmark« mit blau dargestellten MOX-Brennelementen

zellen. Beide Kerne setzen sich aus verschiedenen UO₂- und MOX-Brennelementtypen mit verschiedenen Abbrandzuständen von bis zu ca. 40 GWd/t Schwermetall zusammen. Die frischen Brennelemente enthalten abbrennbare Absorber. Für beide Kernauslegungen enthält der MOX-Brennstoff einen hohen Anteil an ²³⁹Pu in der Isotopenzusammensetzung (s. Bild 29–30 »GANZKERNANORDNUNGEN«).

Verwendete Datenbibliotheken. Für die Untersuchungen wurden JEF/JEFF-, ENDF/B- und JENDL-Daten verwendet, um den Einfluss eines breiten Spektrums von modernen evaluierten Datenbibliotheken abzudecken. Der Vergleich umfasst JEF-2.2 und JEFF-3.1, ENDF/B-VII.0, JENDL-3.2 und JENDL3.3/AC-2008. Für die VENUS-7-Anordnung beträgt die Streubreite der mit



GANZKERNANORDNUNGEN

Bild 30

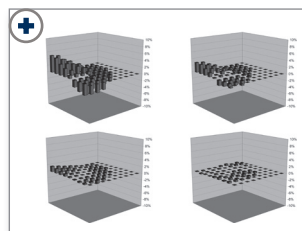
Kernausslegung für den »VVER-1000 MOX Core Computational Benchmark«, mit blau dargestellten MOX-Brennelementen und durch Punkte markierten Steuerstabpositionen

diesen Daten berechneten Multiplikationsfaktoren circa 400 pcm. Bei Differenzen von insgesamt weniger als 1% sind die entsprechenden Stableistungsverteilungen praktisch identisch.

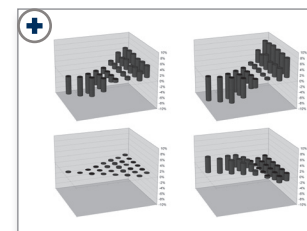
Angemessene Übereinstimmung der Multiplikationsfaktoren. Für die Vergleiche von mit unterschiedlichen nuklearen Daten erzielten Ganzkernergebnissen wurde für den DWR der heiße, unkontrollierte Nulllastzustand und für den WWER der heiße, kontrollierte Nulllastzustand gewählt, da sich die Differenzen der berechneten Leistungsverteilungen für diese beiden Zustände als am größten erwiesen. Obwohl ein vollständig kontrollierter Kern mit einem Multiplikationsfaktor größer als 1,0 – wie es im WWER-Zustand der Fall ist – für einen Reaktor im Betriebszustand

untypisch ist, hat dies z. B. für Störfallsituationen im Falle einer Deborierungstransiente eine gewisse Bedeutung. Die größten Differenzen der unter Verwendung dieser Daten erhaltenen Multiplikationsfaktoren betragen circa 400–500 pcm. Dies erscheint im Hinblick auf die Anzahl der verschiedenen verwendeten nuklearen Datenevaluierungen angemessen und entspricht derselben Größenordnung wie die aus den Berechnungen für kritische Anordnungen resultierenden Differenzen.

Großer Einfluss der nuklearen Datenbasis auf die radiale Leistungsverteilung. Bei den radialen Leistungsverteilungen werden allerdings beträchtliche Differenzen beobachtet. Für den unkontrollierten Zustand des DWR-Kerns wurde eine Schiefelage des Verhältnisses der mit den verschiedenen nuklearen Datenbibliotheken erhaltenen Verteilungen von der Kernmitte zum Rand mit einem Maximalwert von circa 5 % festgestellt. Vergleicht man die Ergebnisse, die mit allen verwendeten nuklearen Datenevaluierungen ermittelt wurden, dann sind die Unterschiede zwischen JEFF-3.1 und den älteren JEF-2.2- und JENDL-3.2-Daten größer als im Vergleich zu den neuesten ENDF/B-VII.0- und JENDL-3.3/AC-2008-Daten. Ein Grund dafür ist die Tatsache, dass in den neueren Daten erhebliche Änderungen in den Einfang- und Spaltaten für ^{235}U vorgenommen wurden. So wurde z. B. das Resonanzintegral für den Einfang von ^{235}U im Vergleich zu älteren Evaluierungen um 5–6% erhöht. Betrachtet man die Kernbeladung, lässt sich erkennen, dass im DWR-Kern die MOX-Brennelemente im Mittel näher an der Peripherie liegen, was zu einer leichten Verschiebung der ^{235}U -Verteilung zur Mitte des Kerns hin führt. Es geht jedoch auch ein geringerer Einfluss von den ^{239}Pu - und ^{238}U -Daten aus. Noch größere Unterschiede in den Leistungsverteilungen werden für den kontrollierten, borfreien Zustand des WWER-1000-Kerns beobachtet. Allerdings ist hier die Schiefelage im Verhältnis von JEF-2.2 zu



31 ERGEBNISSE
Unkontrollierter Zustand des
»PWR MOX/VO₂ Core Transient
Benchmark«



32 ERGEBNISSE
Kontrollierter Zustand des
»WWER-1000 MOX Core
Computational Benchmark«



VERGLEICH: LEISTUNGSVERTEILUNGEN

Bild 31–32
Relative Unterschiede der radialen Brennelementleistungsverteilungen, berechnet mit JEF-2.2 (oben links), JENDL-3.2 (oben rechts), ENDF/B-VII.0 (unten links) und JENDL-3.3/AC-2008 (unten rechts) im Vergleich zu den Ergebnissen aus den JEFF 3.1-Daten

JEFF-3.1 von der Kernmitte zur Peripherie hin im Vergleich zum DWR umgekehrt. Ein Grund für dieses Verhalten ist, dass im WWER-Kern die VO₂-Brennstäbe im Durchschnitt näher am Kernrand liegen. Im Zustand mit eingefahrenen Absorberstäben werden die meisten der vom Kernrand entfernt liegenden VO₂-Brennelemente kontrolliert, wodurch die effektive ^{235}U -Verteilung noch stärker zur Peripherie hin verschoben wird (s. **Bild 31–32** »VERGLEICH: LEISTUNGSVERTEILUNGEN«).

Zusammenfassung und Ausblick

Multiplikationsfaktoren und Leistungsverteilungen mit verschiedenen nuklearen Daten. Die GRS hat den Monte-Carlo-Code MCNP-5 mit nuklearen Daten kontinuierlicher Energie auf der Grundlage von JEF-2.2, JEFF-3.1, ENDF/B-VII.0, JENDL-3.2 und JENDL-3.3/AC-2008 zur Abschätzung des Einflusses von Unterschieden in den Evaluierungen auf die Multiplikationsfaktoren und Leistungsverteilungen von großen Leistungsreaktoren unter Betriebsbedingungen angewendet. Die Berechnungen wurden für zwei zweidimensionale UO_2/MOX -Ganzkernmodelle durchgeführt, die unter Federführung der OECD/NEA für Benchmark-Berechnungen verwendet wurden.

Ergebnisse für die Multiplikationsfaktoren. Während die ermittelten Multiplikationsfaktoren angemessene Übereinstimmung mit Differenzen von höchstens 400–500 pcm aufwiesen, wurde in einigen Fällen ein signifikanter Effekt für die radialen Leistungsverteilungen beobachtet. Dieser Effekt ist spezifisch für gemischte Kerne mit UO_2 und MOX mit einer großen Menge spaltbaren Plutoniums in der Isotopenzusammensetzung und wird bei großen Reaktorkernen deutlich.

Ergebnisse für die Brennelementleistungen. Die Unterschiede zwischen den Brennelementleistungen, die mit den verschiedenen Evaluierungen berechnet wurden, erreichten 5 % für einen unkontrollierten und über 10 % für einen kontrollierten, borfreien Zustand. Einen wichtigen Beitrag zu den Abweichungen für diese Fälle leisten die Unterschiede in den ^{235}U -Querschnitten der verschiedenen Evaluierungen. Einflüsse dieser Art

können normalerweise nicht in Berechnungen kompakter, kritischer Anordnungen beobachtet werden, die hauptsächlich als Validierungsbasis für nukleare Daten dienen. So wurde zum Beispiel bei den mit MCNP unter Verwendung von JEF-2.2 und JEFF-3.1 berechneten Stabileistungsverteilungen praktisch kein Unterschied für die kritischen UO_2/MOX -Anordnungen der VENUS-7-Reihe beobachtet.

Rückschlüsse und Weiterentwicklung. Dies legt nahe, dass für große Leistungsreaktorkerne typische Benchmark-Probleme und, soweit wie möglich, Betriebsmessungen zur Validierung der Daten-Bibliotheken berücksichtigt werden sollten. Darüber hinaus wäre es von Vorteil, Rechenmethoden zur Untersuchung des Einflusses von Unsicherheiten nuklearer Daten auf lokale Größen wie Leistungsverteilungen zur Verfügung zu haben, um für Reaktorkernberechnungen routinemäßige Unsicherheitsanalysen durchführen zu können. Zu diesem Zweck entwickelt die GRS derzeit Erweiterungen zu ihrem statistischen Unsicherheits- und Sensitivitäts-Programmsystem SUSA, um nukleare Kovarianzdaten verarbeiten zu können. ■

