

FORSCHUNGSZENTRUM
ROSSENDORF e.V.

FZR

Archiv-Ex.:

FZR-46

Juni 1994

S. Mittag

**Recherche zu Gruppendatenbibliotheken
für die Anwendung
des Programmes DYN3D
auf Reaktoren vom Typ WWER**

Recherche zu Gruppendatenbibliotheken für die Anwendung des Programmes DYN3D auf Reaktoren vom Typ WWER

S. Mittag

Juni 1994

**Technischer Fachbericht
zum Vorhaben**

**"Weiterentwicklung und Verifikation eines dreidimensionalen Kernmodells
für Reaktoren vom Typ WWER und seine Ankopplung an den Störfallcode
ATHLET"**

Förderkennzeichen 150 0925

**Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Institut für Sicherheitsforschung
Postfach 510119, 01314 Dresden**

Kurzfassung

Für die Berechnung des Reaktorverhaltens mit Kernmodellen (wie DYN3D) werden sog. Weniggruppen-Neutronendaten benötigt. Es wird eine Übersicht zu entsprechenden Datenbibliotheken für die Spaltzonen von russischen WWER-Reaktoren aufgestellt. Die Informationen über verwendete Primärdaten und die Genauigkeit der Zellcodes für die Gruppendatengenerierung werden im wesentlichen in Tabellenform gegeben. Zur Beurteilung der Qualität der Daten werden Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Reaktorparametern zusammengestellt. Die verfügbaren Informationen ergeben keine signifikanten Qualitätsunterschiede zwischen den einzelnen Datenbibliotheken.

Abstract

So-called few-group neutron data have to be used as input data in core models (such as DYN3D) calculating the reactor behaviour. A survey is given of qualified data libraries for the reactor cores of Russian VVER. The information about primary data used in group data generation and the accuracy reached by the cell codes is compiled in tables. To assess the quality of the data, comparisons have been made between measured and calculated reactor parameters. The information available does not show significant differences concerning the quality of the data libraries.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie (Förderkennzeichen 150 0925) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Genauigkeitskriterien für WWER Kernmodelle	2
3. Vergleich existierender WWER-Gruppdatenbibliotheken	2
4. Schlußbemerkungen	9
5. Literatur	10

1. Einleitung

Das Programm DYN3D beinhaltet die Lösung der 2-Gruppen-Neutronendiffusionsgleichung mit dem Ziel der Berechnung von stationären und instationären 3-dimensionalen Neutronenfluß- und Leistungsdichteverteilungen in thermischen Reaktoren. Für die Lösung der Diffusionsgleichung wird eine nodale Entwicklungsmethode verwendet, die auf die hexagonale Brennelementstruktur von russischen WWER-Reaktoren zugeschnitten ist. Der Reaktorkern wird in hexagonale Prismen (Nodes) aufgeteilt. Zur Beschreibung der Neutronendiffusion benötigt man für jeden Node und beide Energiegruppen Diffusionskonstanten und Neutronenwirkungsquerschnitte. Diese sog. makroskopischen Gruppendaten müssen für die einzelnen Brennelementtypen homogenisiert vorliegen. Sie sind sowohl von der Materialstruktur als auch vom aktuellen Zustand des Brennelementes während des Reaktorbetriebes abhängig.

Die Erzeugung der makroskopischen Gruppendaten erfolgt über Zellrechnungen. Dabei wird von neutronenphysikalischen Primärdaten (Kerndaten) für die im Brennelement enthaltenen Nuklide ausgegangen; die Vielgruppendaten werden auf wenige Gruppen reduziert. Mit Hilfe von Feingitter-Diffusionsrechnungen bzw. Transportrechnungen, für die ein Brennelement in kleine Einheiten (Zellen) unterteilt wird, erhält man Neutronenflußverteilungen und Reaktionsraten. Diese dienen als Grundlage für sog. Zellabbrandrechnungen, welche die Kerndichten von abbrennbaren Spalt- bzw. Brutnukliden, Spaltprodukten und ggf. abbrennbaren Absorbern liefern. Auf der Grundlage dieser Daten berechnet man nun die makroskopischen Gruppendaten für interessierende Abbrandzustände. Die erhaltenen Gruppendaten werden bei Bedarf für verschiedene Brennelementzonen bzw. das ganze Brennelement homogenisiert. In einem Datenfile, einer Gruppendatenbibliothek, werden die für verschiedene Brennstoffanreicherungen, Abbrandzustände, Brennstofftemperaturen, Moderatorichten bzw. -temperaturen sowie Borsäurekonzentrationen berechneten Gruppendaten als Datensätze gespeichert. Meist werden die Daten nach den genannten Größen parametrisiert.

Bevor die für WWER verfügbaren Datenbibliotheken vorgestellt werden, wird ein kurzer Überblick über die Genauigkeitsanforderungen an Kernmodellrechnungen gegeben.

2. Genauigkeitskriterien für WWER Kernmodelle

Im Rahmen des AER¹ werden folgende Empfehlungen an die Genauigkeit von WWER-Kernberechnungen gegeben /12/:

- a) Kritische Borkonzentration
 - bei heißer Nulleistung ± 50 ppm
 - Regelstäbe gezogen ± 75 ppm
 - bei Nennleistung (gemittelt über Zyklus) ± 50 ppm
- b) Differentielle Borwirksamkeit - relative Abweichung
(Bor-Reaktivitätskoeffizient) ± 15 %
- c) Regelstabwirksamkeit - relative Abweichung
 - individuelle Gruppe ± 15 %
 - Summe der Gruppen ± 10 %
- d) Isothermischer Temperaturkoeffizient $\pm 0.36 \cdot 10^{-2} \text{ \%} / ^\circ\text{C}$
(Änderung der Reaktivität bezogen auf die Änderung von Brennstoff- und Moderatortemperatur, wobei Brennstoff und Moderator stets die gleiche Temperatur haben)
- e) Leistungsdichteverteilung - relative Abweichung ± 10 %
(bei Nennleistung)

Die Genauigkeit der Reaktorberechnung hängt sowohl vom Kernmodell als auch von der verwendeten Gruppendatenbibliothek ab.

3. Vergleich existierender WWER-Gruppendatenbibliotheken

Zur Datenversorgung des Kernmodells DYN3D werden bisher MAGRU-Bibliotheken der KAB AG Berlin /1/ genutzt, welche parametrisierte Gruppendaten für den WWER-440 und den WWER-1000/Prototyp enthalten. Bezüglich der bisherigen Verifikation von DYN3D + MAGRU sei auf den technischen Fachbericht /13/ verwiesen.

Die osteuropäischen Länder, in denen WWER-Reaktoren betrieben werden, arbeiten in der Regel mit Gruppendaten, die mit dem russischen Code KASSETA /2/ erzeugt wurden. Außerdem gibt es in einigen AER-Mitgliedsländern Aktivitäten zur Berechnung von Gruppendaten mit anderen Programmen.

¹ AER: Atomic Energy Research, Vereinigung von Instituten aus: Bulgarien, Tschechische Republik, Finnland, Deutschland, Ungarn, Rußland, Slowakische Republik, Polen.

Im folgenden werden publizierte Informationen /3/, /5/ - /10/ über die in den AER-Teilnehmerländern verwendeten Gruppendatenbibliotheken für WWER zusammengefaßt und verglichen.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über vorhandene Datenbibliotheken und Informationen zur Gruppendatenerzeugung.

	Škoda Plzeň	KFKI Budapest	KAB Berlin	EGP Prag
Zell-Code zur Datenerzeugung	WIMS-D4 (WIMS-TRACA)	KARATE-1000	NESSEL-4	KASSETA
Name(n) der Bibliothek(en)	MILDA MAGDA-3	RE-5	MAGRU LIB-4CC	KAZETY-440 KAZETY-1000
für Reaktortyp	WWER-440 WWER-1000	WWER-1000	WWER-440 WWER-1000	WWER-440 WWER-1000
verwendete Kerndatenbasis	ENDF/B-III-V	ENDF/B-IV	ENDF/B-IV/V BNAB-78	ABBN (?)
Zahl der Neutronengruppen				
schnell	14	35	12	2
epithermisch	13		12	12
thermisch	42	35	10	49
Gruppenzahl in generierter Bibliothek	4 und 2	2	4 und 2	4 und 2

Tabelle 1: Übersicht über Gruppendatenbibliotheken (AER).

Für die Berechnung der finnischen WWER-440 werden Gruppendaten verwendet, die mit dem Programm CASMO erzeugt wurden /14/. Uns sind jedoch keine detaillierten Informationen über diese Daten bekannt (vgl. /3/).

Alle in der ersten Zeile der Tabelle 1 genannten Programme zur Gruppendatenerzeugung arbeiten mit der Superzellenmethode (eindimensionale Transportrechnungen).

Für die Erzeugung der homogenisierten Daten für die WWER-1000-Brennelemente, speziell zur Behandlung von Absorberstäben und Zwischenräumen zwischen Brennelementen, können Škoda, KFKI und EGP zusätzlich 2-dimensionale hexagonale Diffusionsrechnungen (Methode der endlichen Differenzen) anwenden. Das Programm WIMS erlaubt Škoda eine genauere Behandlung von räumlichen Inhomogenitäten mit Hilfe von 2-dimensionalen Transportrechnungen, die anderen genannten Zell-Codes besitzen diese Option nicht.

Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über die Ergebnisse der Validierung der verwendeten Zell-Codes (nach /3/).

	Škoda Plzeň	KFKI Budapest	KAB Berlin	EGP Prag
Numerische Benchmarks	NB1-NB4: 0.4% Maeder-Wydler: regulär 0.2% mit Gd-Abs.1.5%	NB1-NB5: <1.55% PNL 31-35: <0.55%	<0.4%	
Kritische Experimente	ohne Abs. 0.3% mit Gd 1.0%	ohne Abs.<1.4%	Hexag. Gitter: ohne Abs. 0.3% mit Abs. 5% Quadr. Gitter: ohne Abs. 0.4%	keine Angaben

Tabelle 2: Abweichungen der berechneten k_{eff} -Werte von Werten aus numerischen Benchmarks und kritischen Experimenten.

	Škoda Plzeň	KFKI Budapest	KAB Berlin	EGP Prag
Nuklide, Abweichungen von Referenzwerten	Maeder-Wydler, ohne Absorber: U-235 1 % Pu-239 1 % Pu-240 2.5% mit Gd-Stäben: U-235 3 % Pu-239 1 % Pu-240 2.5%	Yankee, U-235 -2.5 % U-236 +2.0 % U-238 -0.12% Pu-239 -1.4 % Pu-240 +7,4 % Pu-241 -9.6 % Pu-242 -13.6 %	Exp. /4/ U-235 +1 % U-236 +2 % U-238 0 % Pu-239 -2.5 % Pu-240 -5 % Pu-241 -3 % Pu-242 +2 %	keine Angaben

Tabelle 3: Genauigkeit der Berechnung der Nuklidkonzentration.

In den o. g. Bibliotheken von Škoda, KFKI und KAB liegt die Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte und Diffusionskonstanten von Abbrand, Borsäurekonzentration, Brennstofftemperatur und Kühlmitteldichte (bzw. -temperatur) in parametrisierter Form vor.

Im Falle der Bibliothek des EGP Prag steht das Hilfsprogramm LIBAPR /5/ zur Verfügung, das ausgehend von Basisdaten, für vorgegebene Abbrandzustände die Parametrisierung nach den drei letztgenannten Größen realisiert.

Die Tabellen 4 und 5 zeigen die Gültigkeitsbereiche für die einzelnen Parameter.

WWER-440	Škoda Plzeň	KFKI Budapest	KAB Berlin /6/	EGP Prag /5/
Borsäure (g/kg)	0 ... 6	keine WWER-440 Bibliothek erzeugt	0 ... 7	0 ... 12
Brennstofftemperatur (K)	658 ... 1223		533 ... 900	473 ... 976
Kühlmitteldichte (g/cm ³)			0.69 ... 0.79	0.64 ... 0.87
Kühlmitteltemperatur (K)	543 ... 573			

Tabelle 4: Parametergültigkeitsbereiche für WWER-440-Bibliotheken.

WWER-1000	Škoda Plzeň	KFKI Budapest	KAB Berlin	EGP Prag /5/
Borsäure (g/kg)	0 ... 8	0 ... 7	nicht bekannt	0 ... 12
Brennstofftemperatur (K)	578 ... 1422	600 ... 1500		473 ... 1300
Kühlmitteldichte (g/cm ³)		0.55 ... 0.76		0.63 ... 0.87
Kühlmitteltemperatur (K)	553 ... 603			

Tabelle 5: Parametergültigkeitsbereiche für WWER-1000-Bibliotheken.

Im folgenden werden Ergebnisse von Spaltzonen-Berechnungen gezeigt, in denen die betreffenden Datenbibliotheken verwendet wurden. Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe verschiedener 2-Gruppen-Diffusionsprogramme /3/. In den Tabellen 6 bis 8 sind die Abweichungen der berechneten von gemessenen Werten aufgelistet.

	Škoda Plzeň	KFKI Budapest	KAB Berlin
a)	< 50 ppm		< 100 ppm
b)	< 3 - 7 %		< 5 - 8 %
c)			< 2 %
d)	< 3.8 ppm/K		< 12 %

Tabelle 6: Vergleich mit gemessenen Werten bei heißer Nulleistung (HZP).

- a) alle Regelstäbe gezogen; kritische Borkonzentration, Abweichungen in ppm,
- b) Wirksamkeit der einzelnen Regelgruppen, Abweichungen in %, c) Totale Wirksamkeit der Regelgruppen, Abweichungen in %, d) Isothermischer Temperaturkoeffizient, Abweichung in ppm/K bzw. relative Abweichung in %.

	Škoda Plzeň	KFKI Budapest	KAB Berlin
a)	max. 8% (10 % an einz. BE)	5 %	< 5% (8 % an einz. BE)
b)	max 7 % (10 % an einz. BE)	5%	< 3 %

Tabelle 7: Vergleich der berechneten mittleren Leistungsdichten im Brennelement mit Meßwerten (Abweichungen in %).

- a) Brennelemente an der Peripherie,
- b) Brennelemente im Inneren der Spaltzone.

	Škoda Plzeň	KFKI Budapest	KAB Berlin
a)	< 40 ppm	30 ppm	100 ppm
b)	< 14 ppm 4 FPD (WWER-440)		< 100 ppm

Tabelle 8: Vergleich der Reaktivitäten.

- a) Borkonzentration bei voller Leistung (HFP, BOC),
Abweichungen in ppm,
- b) Reaktivität am Ende des Zyklus in ppm (bzw. Abweichung
der Kampagnendauer in effektiven Tagen [FPD]).

Erste Tests der WWER-440 Datenbibliothek von EGP Prag liegen in /10/ vor. Hier wurden die Gruppendaten bereits speziell für das Programm DYN3D aufbereitet und die Ergebnisse mit vorliegenden Meßwerten verglichen. Die Messungen erfolgten an einem WWER-440 des KKW Dukovany, Tschechische Republik (Spaltzone mit frischen Brennelementen, Nulleistung, Kühlmitteltemperaturen: 200°C und 260°C). Außerdem wurden entsprechende Vergleichsrechnungen mit dem russischen Code BIPR-5 /11/ durchgeführt, welcher in vielen osteuropäischen Kernkraftwerken standardmäßig genutzt wird.

Die Tabellen 9 bis 12 zeigen die prozentualen Abweichungen berechneter Größen von Meßwerten.

	Meßwerte	Rel. Fehler der Meßwerte (%)	Abweichung BIPR	Abweichung DYN3D
Kritische Borsäurekonzentr.	(6.00 ... 8.07) g/kg		< 0.31 g/kg (< 55 ppm Bor)	< 0.21 g/kg (< 38 ppm Bor)
Borsäurewirksamkeit	(-1.84 ... -2.04) %/(g/kg)	11.4 -18.4	< 10.2 % rel . Abweichung	< 8.3 % rel. Abweichung

Tabelle 9: Vergleich von Borsäurekonzentration und -wirksamkeit.
Der Vergleich erfolgte bei verschiedenen Moderatortemperaturen und Regelgruppenpositionen, die angegebenen Abweichungen stellen Maximalwerte (absolute Beträge) dar.

Regelgruppen H Ausgangspos. - Endpositionen (cm)	Meßwerte integr. Regelgruppen- wirksamkeit (%)	Rel. Fehler der Meßwerte (%)	Rel. Abweichung BIPR (%)	Rel. Abwei- chung DYN3D (%)
H6: 0 - 235 H5: 200 - 250	1.77	6.8	+6.2	-7.9
H6: 0 - 235 H5: 0 - 250 H4: 200 - 250	2.32	6.9	+3.9	-6.3
H6: 0 -235 H5: 0 - 250 H4: 55 - 250	4.04	6.9	+4.2	-7.7

Tabelle 10: Vergleich von integralen Regelgruppenwirksamkeiten bei einer Moderatortemperatur von 267°C.

Regelgruppe	Meßwerte diff. Gruppenwirk- samkeit (%/cm)*10 ⁻²	Rel. Fehler der Meßwerte (%)	Rel. Abweichung BIPR (%)	Rel. Abwei- chung DYN3D (%)
Gruppe Nr. 6	1.24	7.3	+25.8	+4.0
Gruppe Nr. 5	0.40	7.5	-10.0	-7.5
Gruppe Nr. 4	1.68	7.1	+9.5	-8.9

Tabelle 11: Maxima der differentiellen Regelgruppenwirksamkeiten bei einer Moderatortemperatur von 257°C.

Regelgruppen	Meßwerte Grup- penwirksamkeit (%)	Rel. Fehler der Meßwerte (%)	Rel. Abweichung BIPR (%)	Rel. Abwei- chung DYN3D (%)
Nr. 6	1.52	15.1	+6.6	-2.6
Nr. 6 + 5	1.82	14.8	+20.9	+6.0
Nr. 6 + 5 + 4	3.86	15.0	+22.5	-0.3
Nr. 6+5+4+3+2+1	11.58	15.0	+2.1	-12.1

Tabelle 12 : Integrale Regelgruppenwirksamkeit - Stabfallmethode
Moderatortemperatur (255 - 259) °C, Borsäurekonzentration 8.04 g/kg,
Ausgangsposition der 6. Gruppe: (208.5 - 213.0) cm.

Ein Vergleich der letzten Spalten der Tabellen 9 - 12 zeigt, daß die in Abschnitt 2 gegebenen Genauigkeitskriterien von DYN3D/KASSETA(EGP) im wesentlichen erfüllt werden. Auch die maximale Abweichung des berechneten isothermischen Temperaturkoeffizienten vom Meßwert liegt mit $0.15 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} / 10\text{ } ^\circ\text{C}$ unter dem zulässigen Maximalwert.

4. Schlußbemerkungen

Aus den Vergleichen des vorigen Abschnittes ergibt sich, daß die betrachteten Datenbibliotheken sich in ihrer Genauigkeit nicht wesentlich unterscheiden. Die insgesamt etwas besseren Ergebnisse für die Daten von Škoda Plzeň kann man damit erklären, daß bei ihrer Erzeugung mit dem Programm WIMS 2-dimensionale Transportrechnungen für die genauere Behandlung von Inhomogenitäten durchgeführt wurden.

Weitere Aussagen über die Qualität der Gruppendatenbibliotheken sind mit der Auswertung der Lösungen des vom KKW Paks vorgeschlagenen AER-Benchmark-Problems /15/ zu erwarten. In dieser Aufgabenstellung bilden das Beladungsschema sowie die Abbrand- und Samariumverteilung am Ende des 3. Zyklus für einen WWER-440 (Block 2) des KKW Paks den Ausgangspunkt der Rechnung. Weiterhin sind die Umladungsschemata und die Operationsgeschichte für die anschließenden vier Zyklen gegeben. Zu berechnen sind die Abbrandverteilungen und kritischen Borsäurekonzentrationen sowie verschiedene integrale und differentielle Regelstabwirksamkeiten am Beginn und Ende des 7. Zyklus. Die Regelstabwirksamkeiten sollen mit den entsprechenden Meßwerten aus Paks verglichen werden. Das Forschungszentrum Rossendorf wird sich unter Nutzung der Abbrandoption von DYN3D und der MAGRU-Datenbibliothek an der Lösung dieses Benchmarkproblems beteiligen.

Der Vergleich gemessener und berechneter Werte von kritischer Borsäurekonzentration, Regelgruppenwirksamkeit, Temperaturkoeffizienten und 3-dimensionaler Leistungsdichteverteilung in der Spaltzone ist hinsichtlich der Qualität der Gruppendaten nur bedingt aussagekräftig, da für die Berechnung dieser Größen von den Autoren unterschiedliche Neutronendiffusionsprogramme verwendet und verschiedene Annahmen für die Behandlung der Randzonen gemacht wurden. Entsprechende Berechnungen mit einem einzigen Neutronendiffusionsprogramm (z. B. DYN3D) bei Verwendung unterschiedlicher Gruppendaten könnten hier mehr Klarheit bringen.

Die Datenbibliotheken von Škoda Plzeň, KFKI Budapest und KAB Berlin (WWER-1000/Serientyp) sind nur kommerziell verfügbar. Die Bibliotheken von EGP Prag (WWER-440 und WWER-1000/Serientyp) werden dem Forschungszentrum Rossendorf im Austausch gegen das Programm DYN3D kostenlos zur Nutzung zur Verfügung gestellt.

5. Literatur

- /1/ Agthe G., H.-J. Kretzschmar: Kernenergie 33 (1990) S. 165.
- /2/ Sidorenko V. D., S. P. Averyanova: Das Programm KASSETA zur Berechnung der neutronenphysikalischen Charakteristika von LWR-Brennelementen, IAE Kurtschatow Moskau 1989 (in Russisch).
- /2/ Maráczy C., P. Mikoláš, I. Tinka, J. Švarný, S. Thomas: Answers to the Questionnaire for Evaluation of VVER Reactor Core Computational Systems, (few group data processing and its validation), Proceedings of the third Symposium of AER, Piešťany 1993, p.597.
- /4/ Hermann A., W. Möller: Kernenergie 29 (1986) S. 255.
- /5/ Tinka I.: WWER Diffusion Data Libraries prepared by the KASSETA Code, Proceedings of the third Symposium of AER, Piešťany 1993, p. 41.
- /6/ Agthe G.: Beschreibung einer Bibliothek neutronenphysikalischer Weniggruppensdaten zur Berechnung des Betriebsverhaltens von WWER-440, VEB Kombinat KAB Berlin, NI-7, Berlin 1988.
- /7/ Krýsl V., P. Mikoláš: Few-group Data Library MAGDA-3CH for VVER-440 Reactor, Proceedings of the third Symposium of AER, Piešťany 1993, p. 49.
- /8/ Švarný J.: "HOMOGS" Methodology in Preparation VVER Few Group Libraries, Proceedings of the third Symposium of AER, Piešťany 1993, p. 67.
- /9/ Hegyi Gy. et al.: Calculation of Few-group Constants with the KARATE Multicell Code, Contribution to the Meeting of the AER Working Group A and B held in Plzeň 10-14 May 1993.
- /10/ Tinka I.: Critical Start-up Parameters of the WWER-440 Core Calculated by DYN-3D Code, Proceedings of the third Symposium of AER, Piešťany 1993, p. 105.
- /11/ Pertrunin D. u. a.: BIPR-5 - Ein Programm zur Berechnung dreidimensionaler Verteilungen der Leistungsdichte und des Abbrandes (in russ.), Preprint IAE-2518, Moskau 1975.
- /12/ Švarný J.: Information on Working Group A Activities, Appendix 2, Proceedings of the third Symposium of AER, Piešťany 1993, p. 12.
- /13/ Grundmann U., U.Rohde: Verifikation des 3-dimensionalen Kernmodells DYN3D/M2, Technischer Fachbericht, FZ Rossendorf, April 1994.
- /14/ Kaloinen E.: New Version of the HEXBU-3D Code, Proceedings of the second Symposium of AER, Paks 1992, p. 9.

/15/ Korpás Zs. et al.: Solution of AER Benchmark Problem for Calculation of Control Rod Worth of VVER-440 Reactor, Proceedings of the second Symposium of AER, Paks 1992, p. 293.