

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract	III
1	Zielsetzung und Aufgabestellung	1
1.1	Deterministische 3D-Neutronenkinetik für unterkritische quellgetriebenen Systeme mit komplexer Geometrie und Modellierung von Spallationsquellen.....	2
1.2	Reaktorphysik flüssigmetallgekühlter Systeme	2
1.3	Reaktorphysik gasgekühlter Hochtemperaturreaktoren.....	3
1.4	Thermohydraulik schneller flüssigmetallgekühlter Systeme	3
1.5	Thermohydraulik gasgekühlter Hochtemperaturreaktoren.....	4
1.6	Weiterverfolgung des superkritischen LWR und anderer Generation- IV-Konzepte sowie Small Modular Reactors	4
1.7	Beteiligung an den EU-Projekten ESNII+ und MAXSIMA.....	5
2	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
2.1	Ausgangssituation und Stand von Wissenschaft und Technik bei Be- ginn des Vorhabens.....	7
2.1.1	Reaktorphysik und gekoppelte Rechenmodelle für quellgetriebene unterkritische Systeme.....	7
2.1.2	Reaktorphysik, Thermohydraulik und gekoppelte Rechenmodelle für V/HTR.....	8
2.1.3	Fluiddynamische Modellierung von Flüssigmetall-gekühlten Reaktoren mit System- und CFD-Codes	9
3	AP 1: Neutronenkinetik quellgetriebener unterkritischer Systeme mit komplexen Geometrien	11
3.1	AP 1.1: 3D-Neutronenkinetik mit vereinfachtem Transportansatz mit externen lokalisierten Quellen auf unstrukturierten Gittern.....	11
3.1.1	Weiterentwicklung von PARCS zur Simulation von Transienten mit zeitabhängigen externen Neutronenquellverteilungen	11
3.1.2	Berechnung der axialen Leistungsverschiebung in PARCS	14

3.1.3	Erweiterung von PARCS zu Prozessierung von NEMTAB-Wirkungsquerschnittsbibliotheken.....	15
3.2	AP 1.2: Auswertung existierender Rechenprogramme für flüssigmetallgekühlte unterkritische Systeme.....	17
3.3	AP 1.3: Auswertung von Ansätzen zur Modellierung von Spallationsquellen für deterministische Neutronenkinetikprogramme.....	18
3.3.1	Spallationsprozesse und Rechenprogramme.....	18
3.3.2	Berechnung einer Spallationsneutronen-Quellverteilung mit MCNPX.....	20
3.4	AP 1.4: Verifikation anhand von Testfällen und Benchmarks	22
3.4.1	OECD/NEA-Benchmark zu einem beschleunigergetriebenen Brenner für minore Aktiniden.....	22
3.4.2	Monte-Carlo-Modell und Erzeugung von Weniggruppen-Wirkungsquerschnittsdaten.....	23
3.4.3	Deterministische 3D-Kernberechnungen des stationären Zustands.....	28
3.4.4	Äquivalentes PARCS-Modell in hexagonaler Geometrie.....	30
3.4.5	Transientenrechnungen mit externer Neutronenquellverteilung	34
4	AP 2: Reaktorphysik flüssigmetallgekühlter Systeme.....	37
4.1	AP 2.1: Kopplung Reaktorphysik mit Thermohydraulik	37
4.2	AP 2.2: Reaktorphysikalische Modellierung thermo-struktureller Rückwirkungen	37
4.2.1	Radiale Ausdehnung der Kerngitterplatte	38
4.2.2	Axiale Ausdehnung von Brennstoff und Hüllrohr.....	48
4.2.3	Methode	48
4.2.4	Implementierung und Testrechnungen.....	51
4.2.5	Zusammenfassung	54
4.3	AP 2.3: Erstellung von Weniggruppen-Wirkungsquerschnitten	55
4.3.1	Medium Size Oxide Core der OECD/NEA-Taskforce on Sodium Fast Reactor Core Definitions.....	55
4.3.2	Medium Size Metallic Core der OECD/NEA-Taskforce on Sodium Fast Reactor Core Definitions.....	59
4.3.3	Der Kern der geplanten Anlage MYRRHA	64

4.4	AP 2.4 und 2.5: Erstellung von Kernmodellen kritischer und unterkritischer Systeme und Berechnung ausgewählter stationärer und transienter Probleme.....	68
4.4.1	Medium Size Oxide Core der OECD/NEA-Taskforce on Sodium Fast Reactor Core Definitions.....	68
4.4.2	Medium Size Metallic Core der OECD/NEA-Taskforce on Sodium Fast Reactor Core Definitions.....	70
4.4.3	Stationäre 3D-Kernberechnungen zu MYRRHA	76
4.4.4	Gekoppelte transiente 3D-Kernberechnungen zu MYRRHA	83
4.4.5	Äquivalente cartesische Modellierung hexagonaler Kernanordnungen	84
5	AP 3: Reaktorphysik gasgekühlter Hochtemperaturreaktoren.....	89
5.1	AP 3.1: Kopplung von TORT TD/ATTICA3D mit ATHLET zur Primärkreislaufsimulation von Kugelhaufen-V/HTR.....	89
5.2	AP 3.2: Erstellung konsistenter Weniggruppen-Wirkungsquerschnitte für den prismatischen V/HTR.....	93
5.2.1	Depletion Exercise des MHTGR-350MW-Benchmarks	93
5.2.2	DRAGON4-Modellierung	94
5.2.3	HELIOS-Modellierung in Verbindung mit Reactivity equivalent Physical Transform (RPT).....	96
5.3	AP 3.3: 3D-Kernberechnungen für prismatische V/HTR.....	102
5.3.1	Der MHTGR-350MW-Benchmark	102
5.3.2	Modell eines HTTR-Kerns.....	106
6	AP 4: Thermohydraulik flüssigmetallgekühlter Systeme.....	111
6.1	AP 4.1: Weitere Ertüchtigung des Codes ATHLET für die Simulation von Transienten in flüssigmetallgekühlten Reaktoren	111
6.1.1	Stoffwerte für flüssiges und dampfförmiges Natrium	112
6.1.2	Modellierung nichtkondensierender Gase.....	124
6.1.3	Wärmeübergangsmodell.....	126
6.1.4	Erste Testrechnungen	127
6.1.5	Zusammenfassung und weiteres Vorgehen	128

6.2	AP 4.2: Anwendung des CFD-Codes OpenFOAM zur Simulation einzelner Komponenten und spezieller Phänomene in flüssigmetallgekühlten Anlagen.....	129
6.2.1	Ausbau der OpenFOAM-Kompetenz	130
6.2.2	Simulation einzelner Komponenten und spezieller Phänomene in Flüssigmetall-gekühlten Anlagen mit OpenFOAM.....	143
6.3	AP 4.3: Bereitstellung einer gekoppelten Version ATHLET OpenFOAM für Sicherheitsanalysen vollständiger Reaktorsysteme	149
6.3.1	Architektur der Kopplung	150
6.3.2	Verifikation der Kopplungsimplementierung	164
6.3.3	Validierung der Kopplung.....	171
6.3.4	Zusammenfassung	183
6.4	AP 4.4: Erstellung von ATHLET-Modellen ausgewählter flüssigmetallgekühlter Systeme.....	183
6.4.1	ASTRID	184
6.4.2	MYRRHA.....	187
7	AP 5: Thermohydraulik gasgekühlter Hochtemperaturreaktoren	189
7.1	AP 5.1: Implementierung geeigneter Modelle zur Simulation des Reaktorkerns von V/HTR Reaktoren mit dem Systemcode ATHLET	189
7.1.1	Modellierung der prismatischen Brennelementblöcke	189
7.1.2	MHTGR-350-Simulation.....	192
7.1.3	Modellierung des HTR-10 mit ATHLET	194
7.2	AP 5.2: Entwicklung eines ATHLET-Kreislaufmodells	201
8	AP 6: Weiterverfolgung des superkritischen LWR und anderer Generation-IV-Konzepte sowie Small Modular Reactors	205
8.1	Verbesserung der Stoffwertberechnung in der Umgebung des kritischen Punktes in ATHLET	205
8.1.1	Pseudokritische Temperatur	206
8.1.2	Thermodynamische Stoffgrößen.....	209
8.1.3	Übergang zwischen unter- und überkritischem Stoffwertpaket.....	211
8.1.4	Grafische Darstellung der thermodynamischen Stoffwerte.....	211

8.1.5	Testrechnungen mit dem neuen Stoffwertpaket	219
8.2	Erweiterungen in ATHLET für flüssigmetallgekühlte Systeme	223
9	AP 7: Beteiligung an den EU-Projekten ESNII+ und MAXSIMA	225
9.1	Das EU-Projekt ESNII+	225
9.1.1	Neutronenphysikalische Modellierung des ASTRID-Kerns	225
9.1.2	Thermohydraulische Modellierung des Kerns und Primärsystems von ASTRID in ATHLET	234
9.1.3	Simulation des Unprotected Loss Of Flow (ULOF) in ASTRID mit ATHLET	239
9.1.4	Zeitliche Verläufe wichtiger Kenngrößen der ATHLET-Simulation der ULOF-Transiente	241
9.1.5	Anmerkungen zu den Besonderheiten der ATHLET-Simulation	243
9.2	Das EU-Projekt MAXSIMA	244
10	Zusammenfassung	253
	Literaturverzeichnis	259
	Abbildungsverzeichnis	269
	Tabellenverzeichnis	283