

Technische Universität München
Lehrstuhl für Reaktordynamik und Reaktorsicherheit

Methoden zur Optimierung der Kernausslegung von Druckwasserreaktoren mit reduziertem Borsäureeinsatz

Angel Papukchiev

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. phil., Dr.-Ing. E. h. A. Birkhofer, i. R.

2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat., Dr. rer. nat. habil. W. Petry

Die Dissertation wurde am 01.08.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 26.02.2008 angenommen.

Methoden zur Optimierung der Kernausslegung von Druckwasserreaktoren mit reduziertem Borsäureeinsatz

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	15
2	Vergleichende Auswertung von Forschungen im Ausland	19
2.1	Frankreich	19
2.2	Israel	23
2.3	Südkorea	25
2.4	USA	29
2.5	Zusammenfassung	29
3	Grundsätzliche Möglichkeiten von Alternativstrategien	31
3.1	Gadolinium	31
3.2	Erbium	32
3.3	Bor	32
3.4	Zusammenfassung	33
4	Erzeugung von Zwei-Gruppen-Diffusionsparametern mit dem Zellcode HELIOS und Untersuchungen zum Einfluss wesentlicher Auslegungsparameter auf den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf}	34
4.1	Einleitung	34
4.2	HELIOS System	34
4.3	Entwicklung eines 16x16 BE-Modells für HELIOS	36
4.4	Entwicklung der INTERFACE Schnittstelle	37
4.5	Verifikation der Zellrechnungen	38
4.6	Einfluss wesentlicher Auslegungsparameter auf den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf}	40

4.6.1	Einfluss der Absorberverteilung im Brennelement	41
4.6.2	Einfluss der Absorberstabzahl	43
4.6.3	Einfluss der Absorberkonzentration	46
4.6.4	Einfluss der Urananreicherung	47
4.6.5	Einfluss der Stabpositionierung	49
4.7	Zusammenfassung	51
5	Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz	52
5.1	Brennelementauslegung	53
5.2	Orientierende Reaktivitätsbilanz	55
5.3	Erweiterung und Optimierung der orientierenden Reaktivitätsberechnungen für DWR mit reduziertem Borsäureeinsatz	57
5.4	Vergleichsrechnungen und Ergebnisse	60
5.5	Ermittlung Erfolg versprechender Brennstoffkombinationen und Auslegung erster DWR Kerne mit reduziertem Borsäureeinsatz	64
5.6	Iteratives 3D Diffusionsverfahren	67
5.6.1	3D Optimierung der Leistungsdichteverteilung am Zyklusbeginn	68
5.6.2	3D Optimierung der Leistungsdichteverteilung am Zyklusende	69
5.6.3	Untersuchung der Leistungsdichteverteilung während des gesamten Zyklus	69
5.6.4	Berechnung der Zyklusdauer	69
5.6.5	Berechnung der kritischen Borkonzentration am Zyklusbeginn	70
5.6.6	Erhöhung des Absorbergehalts	70
5.7	Entwicklung eines Software Tools zur Automatisierung wesentlicher Kernauslegungsprozesse	70
5.8	Randbedingungen für die Kernauslegung eines borarmen DWR	73
5.9	Zusammenfassung	74
6	Wesentliche Erkenntnisse und Auslegung von Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz	76
6.1	Brennstoff	77
6.2	Abbrandverteilung	77

6.3	Anordnung der Brennelemente im Kern	78
6.4	Brennstoffkonzept mit einer zeitlichen Verschiebung der Gd-Ausbrandpunkte	83
6.5	DWR Kernkonfigurationen mit reduziertem Borsäureeinsatz	85
6.5.1	Kritische Borkonzentration	86
6.5.2	Brennelementtypen	87
6.5.3	Kernkonfigurationen	88
6.5.4	Leistungsdichteverteilung und maximale Leistungsspitze	90
6.5.5	Zyklusdauer und Entwicklung des k_{eff} im Laufe des Zyklus	95
6.5.6	Abbrandverteilung und Entladeabbrand	96
6.5.7	Steuerstabwirksamkeit	98
6.5.8	Berechnung des DNB-Verhältnisses	99
6.5.9	Wesentliche Auslegungsparameter der borarmen Kerne	99
6.6	Ableitung der äquivalenten Punktkinetik	100
6.6.1	Kühlmitteldichtekoeffizient und Dichterückwirkung	101
6.6.2	Brennstofftemperaturkoeffizient und Brennstoffrückwirkung	105
6.7	Zusammenfassung	106
7	Modellierung der DWR Anlage in ATHLET	107
7.1	Primärkreis	107
7.2	Sekundärkreis und Balance-Of-Plant Modell	109
7.3	Wesentliche Parameter der DWR Anlage im Nennbetrieb	109
8	Untersuchungen zum Einfluss der Borreduzierung auf die DWR Sicherheit	111
8.1	Einfluss der Borreduzierung auf das Kernverhalten bei ATWS-Ereignissen	111
8.1.1	Anfangs- und Randbedingungen	112
8.1.2	Transientenablauf	112
8.1.3	Auswertung der erzielten Ergebnisse	117
8.1.4	Zusammenfassung	119
8.2	Einfluss der Borreduzierung auf das Kernverhalten bei Deborierungsstörfällen	120

8.2.1	Anfangs- und Randbedingungen	121
8.2.2	Störfallablauf	121
8.2.3	Auswertung der erzielten Ergebnisse	128
8.2.4	Zusammenfassung	130
8.3	Einfluss der Borreduzierung auf die Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen	131
8.3.1	Auslegungsüberschreitende Ereignisse und anlageninterne Notfallmaßnahmen	131
8.3.2	Anfangs- und Randbedingungen	132
8.3.3	Störfallablauf ohne präventive Notfallmaßnahmen	133
8.3.4	Störfallablauf mit präventiven Notfallmaßnahmen	134
8.3.5	Auswertung der erzielten Ergebnisse	134
8.3.6	Weitere Untersuchungen zur Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes	139
8.3.7	Zusammenfassung	140
9	Bewertung der Alternativstrategien und Vergleich mit Standard-DWR	141
9.1	Borreduzierung	141
9.2	Brennelement- und Kernauslegung	142
9.3	Zyklusdauer	142
9.4	Urananreicherung	144
9.5	Entladeabbrand	144
9.6	Inhärente Sicherheit	145
9.7	Nachteile der untersuchten Absorber	146
9.8	Schlussfolgerungen	147
	Literaturverzeichnis	150
	Abkürzungen	155
	ANHANG A: Struktur des Brennelementdatensatzes	158
	ANHANG B: Leistungsdichteverteilung in Gd- und Er-Brennelementen	161

ANHANG C: Wesentliche Prinzipien der DWR Auslegung	163
ANHANG D: Leistungsdichteverteilung in den Brennelementen der borarmen Kerne	164
ANHANG E: Weitere Abbildungen zum ATWS-Speisewasserausfall	165
ANHANG F: Weitere Abbildungen zur Deborierung	166
ANHANG G: Weitere Abbildungen zu auslegungsüberschreitenden Ereignissen	168

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Reaktordynamik und Reaktorsicherheit der Technischen Universität München. Meinen besonderen Dank möchte ich dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. E.h. A. Birkhofer aussprechen, der die Anregung zu dieser Arbeit und die Voraussetzungen für eine Forschungsarbeit auf interdisziplinärem Gebiet geschaffen hat. Ebenfalls herzlich danken möchte ich dem Dipl.-Phys. Herrn A. Schaefer für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie für die engagierte Leitung des Forschungsprojekts und nicht zuletzt für die wissenschaftlichen Diskussionen.

Für die Übernahme des Koreferats und das entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr. rer. nat. habil. W. Petry.

Ein großes Dankeschön gebührt auch Herrn Dr. S. Langenbuch, Herrn Dr. K. Velkov, Herrn Dr. G. Höppner und Herrn Dr. R. Kirmse, die mich mit Ihrer langjährigen und umfangreichen Erfahrung auf den Gebieten Reaktorphysik und Thermohydraulik unterstützt haben. Ferner möchte ich mich auch bei Herrn Dr. W. Zwermann, Herrn G. Lerchl, Herrn Dr. H. Austregesilo, Herrn Dr. Z. Jakubowski und weiteren GRS Mitarbeitern bedanken, die wichtige Beiträge zur Realisierung dieser Arbeit geliefert haben.

Von großer Bedeutung war auch die Unterstützung von Seiten der Industrie und Sachverständigen-Organisationen. An dieser Stelle möchte ich die Experten von E.ON Kernkraft, AREVA NP und TÜV Süd erwähnen, die mir mit wertvollen Ideen und praxisorientierten Informationen geholfen haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Kollegen am Institut – Yubo Liu, Markus Baier, Sebastian Hanigk, Alexander Kerner, Michael Mayer sowie bei unseren Sekretärinnen für die gute Zusammenarbeit und das kollegiale Arbeitsklima.

Ein sehr großer Dank geht natürlich an meinen Bruder und meine Eltern für ihren Glauben an mich und ihre Unterstützung.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Vorhabens erzielt.

Zusammenfassung

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist eine Untersuchung der grundsätzlichen Möglichkeiten, durch Alternativstrategien der Reaktivitätssteuerung und -regelung mit reduziertem Boreinsatz bei existierenden deutschen Druckwasserreaktoren (DWR) sicherheitstechnische Verbesserungen zu erreichen. Der Schwerpunkt wurde auf Verbesserungen bei Deborierungsstörfällen und beim präventiven anlageninternen Notfallschutz gelegt.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden zwei optimierte Kernkonfigurationen entwickelt, die eine 50% bzw. 30% Reduktion des Borgehalts im Primärkühlmittel ermöglichen. Weiterhin wurde mit Hilfe von Simulationen bei verschiedenen Störfällen der Einfluss der Borreduzierung auf das Kernverhalten untersucht.

Um dies zu ermöglichen, wurden zunächst ausländische Arbeiten aus Frankreich, USA, Korea und Israel zur Reduzierung bzw. Eliminierung von Bor im DWR ausgewertet. Die in den Studien vorgeschlagenen Konzepte zielen auf eine vollständige Eliminierung des Bors im Kühlmittel, wobei eine grundsätzliche Neugestaltung der Regelungssysteme verfolgt wird. Für die Kompensation der Überschussreaktivität wurde fast in allen Arbeiten der Einsatz von Gd vorgeschlagen. Der Absorber wurde in den verschiedenen Studien entweder als mit dem Brennstoff vermischt oder in separaten Absorberstäben betrachtet. Schwierigkeiten ergaben sich meist bei der Abflachung der Leistungsdichteverteilung sowie bei der Minimierung der Leistungsspitzen im Kern. Für die Abschaltung der borfreien DWR Konzepte wurden neue Regelungssysteme vorgeschlagen, die auf einer erhöhten Steuerstabanzahl sowie neuen Steuerstabmaterialien basieren.

In einem weiteren Schritt wurden typische abbrennbare Absorber heutiger LWR untersucht. Auf der Grundlage dieser Analysen wurden Gadolinium (Gd) und Erbium (Er) als aussichtsreichste Absorber für die Ziele dieser Arbeit identifiziert. Die Vorteile von Gd sind ein großer Absorptionswirkungsquerschnitt der Isotope ^{157}Gd und ^{155}Gd für thermische Neutronen (254.000 und 61.000 barn) und eine kleine restliche Absorption von den schwachabsorbierenden ^{154}Gd , ^{156}Gd , ^{158}Gd , und ^{160}Gd . Obwohl das Er eine kleinere Absorptionsfähigkeit bietet, ermöglicht es eine flachere Leistungsdichteverteilung im Brennelement (BE) und im Kern.

Mit dem Zellcode HELIOS wurden insgesamt über 130 Uran-, Gd- und Er-Brennelemente ausgelegt und ihre Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter erzeugt. Mit dem entwickelten Software Tool INTERFACE wurde ein direkter Einsatz der Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter im 3D Kernmodell QUABOX/CUBBOX ermöglicht. Es wurden Untersuchungen zur Auswirkung wesentlicher Auslegungsparameter auf die bedeutendsten reaktorphysikalischen Größen durchgeführt. Dabei wurde die Zahl der Absorberstäbe, ihre Positionierung im BE, die Absorberkonzentration sowie die Anreicherung der Uranstäbe variiert. Zusätzlich wurde auch der Einfluss der Absorber-Selbstabschirmung auf k_{inf} analysiert. Die durchgeführten Zellrechnungen haben gezeigt, dass bei gleichem Absorbergehalt das Gd eine deutlich stärkere Neutronenabsorption im Vergleich mit Er bietet. Die verbesserten Absorptionseigenschaften sind beim frischen Brennstoff besonders stark ausgeprägt. Dies führt zu einer kleineren Überschussreaktivität und letztendlich einer niedrigeren Borkonzentration. Ferner kann der Ausbrandpunkt des Absorbers mit einer Variation des Absorbergehalts gezielt beeinflusst werden. Das Er brennt deutlich langsamer aus und hat ein unterschiedliches Abbrandverhalten im Vergleich mit Gd. Darüber hinaus ist die Selbstabschirmung von untergeordneter Bedeutung für BE-Konfigurationen mit diesem Absorber. Mit Hilfe von Er_2O_3 konnte aber eine flachere Leistungsdichteverteilung im BE erzielt werden.

Die Auswahl eines geeigneten Brennstoffs für die DWR-Kernauslegung ist eine komplexe Aufgabe. Die Bestimmung der Brennstoffzusammensetzung jeder Nachladung heutiger DWR Kerne basiert hauptsächlich auf die Informationen über den restlichen BE-Inventar im Kern (Brennstofftyp und Abbrand von etwa 3/4 aller BE) und die festgelegten betrieblichen und sicherheitsrelevanten Parameter für den nächsten Zyklus wie z.B. Zyklusdauer, maximale Stableistung und DNB-Verhältnis. In diesem Fall muss der Brennstoff von etwa 1/4 aller BE mit Hilfe physikalischer Berechnungen festgestellt werden. Da für die Ziele dieser Arbeit einen neuen Gleichgewichtskern ausgelegt werden musste, fehlten die oben beschriebenen Informationen. Die Hauptproblematik bestand darin, eine geeignete Brennstoffkombination mit entsprechender Anordnung aller 193 BE zu ermitteln. Allein aufgrund der Positionierung der BE einer einzelnen Brennstoffkombination mit Berücksichtigung der Abbrandverteilung sind 37.249 (193x193) verschiedene Kernkonfigurationen möglich. Wird auch die Anordnung der Brennstäbe im BE variiert, ergeben sich 2.074.620.304 Beladungen. Die Anzahl der Brennstoffkombinationen ist wesentlich größer, da in diesem Fall mehrere Parameter wie Brennstoffanreicherung, Absorberstabzahl und Absorberkonzentration berücksichtigt werden müssen. Daraus resultiert eine

ungeheuerliche Anzahl von möglichen Kernkonfigurationen. Mit einer ausgewählten Brennstoffkombination und BE-Anordnung ist es aber trotzdem am Anfang nicht klar, ob unerwünschte Reaktivitätsanstiege im Laufe des Zyklus auftreten werden, ob die sicherheitstechnischen Randbedingungen erfüllt werden können oder ob überhaupt Kritikalität erreicht wird. Mit der zusätzlichen Anforderung für eine niedrige Borkonzentration am Zyklusbeginn erhöht sich die Komplexität der Aufgabe wesentlich.

Unter diesen Bedingungen ist das Optimierungsproblem für eine borarme DWR Kernkonfiguration numerisch nicht lösbar, wenn die Anzahl der Kernkonfigurationen nicht reduziert wird. Dazu wurde eine neue systematische Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz entwickelt. Sie basiert auf folgenden drei wesentlichen, eng mit einander verbundenen Schritten:

- Brennelementauslegung
- Orientierende Reaktivitätsbilanz
- Iteratives 3D Diffusionsverfahren

Für ihre Implementierung wurden zunächst mehrere vorbereitende Untersuchungen durchgeführt. Ein breites Spektrum von 16x16 BE-Konfigurationen wurde ausgelegt und mit dem Zellcode HELIOS ihre Wirkungsquerschnitte erzeugt. Dabei wurde der Einfluss der wesentlichen BE-Auslegungsparameter auf k_{inf} analysiert und auf dieser Basis ein Brennstoffraster erstellt. Mit dessen Hilfe konnte die Variation der wesentlichen BE-Auslegungsparameter wie die Anzahl der Absorberstäbe, Absorberkonzentration und die Anreicherung der Uranstäbe begrenzt und schließlich die möglichen Brennstoffzusammensetzungen für die borarmen DWR Kerne vermindert werden.

Mit Hilfe der orientierenden Reaktivitätsbilanz wurde die Anzahl der Brennstoffkombinationen systematisch reduziert. Das Konzept beruht auf einer

abbrandabhängigen, schrittweisen Berechnung des mittleren Neutronenmultiplikationsfaktors k_{inf} jeder definierten Brennstoffkombination. Mit geeigneten Algorithmen konnten borarme Brennstoffkombinationen für einen 4-Batch¹ DWR Kern generiert und solche mit einer kleinen Überschussreaktivität am Zyklusbeginn identifiziert werden. Mit dem entwickelten Software Tool REBA wurde das gesamte Konzept automatisiert und Erfolg versprechende Gd- und Er-Brennstoffkombinationen ermittelt. Auf deren Basis und einer „Checkerboard“-Anordnung der BE im Kern wurden vorläufige borarme Belademuster-Schätzungen zusammengestellt und erste 3D Simulationen mit dem Kernmodell QUABOX/CUBBOX durchgeführt.

In einem weiteren Schritt musste auch die Anzahl der möglichen Kernkonfigurationen begrenzt und später zwei optimierte borarme Kerne ermittelt werden. Für das Ziel wurde das iterative 3D Diffusionsverfahren entwickelt und implementiert, das auf einer schrittweisen Optimierung des borarmen Kerns unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung der wesentlichen reaktorphysikalischen Parameter wie Neutronenmultiplikationsfaktor, Leistungsdichteverteilung im Kern, Zyklusdauer sowie Abbrand basiert. Nach jedem erfolgreichen Schritt werden die erzielten Ergebnisse analysiert und die Konformität der berechneten physikalischen Parameter mit den definierten Auslegungskriterien überprüft. Das Optimierungskonzept besteht aus mehreren wesentlichen Maßnahmen wie neue BE-Anordnung, Variation der Brennstoffanreicherung, Änderung der Absorberkonzentration und/oder der Absorberstabzahl, neue prozentuelle Aufteilung der Brennstoffe im Kern oder Ersetzen eines Brennstofftyps. Die Durchführung dieser Maßnahmen beruht auf einer methodischen Vorgehensweise - jeder der oben beschriebenen Optimierungsmaßnahmen wird eine bestimmte Priorität zugeordnet, die von dem konkreten Schritt des Diffusionsverfahrens abhängig ist. Sollten z.B. unzulässige Leistungsspitzen am Zyklusbeginn auftreten, haben dann die Änderung der Absorberkonzentration/Absorberstabzahl eine übergeordnete und die Variation der globalen Brennstoffanreicherung untergeordnete Priorität. Umgekehrt, bei zu kurzer

¹ Mit dem Begriff „Batch“ bezeichnet man alle BE, die gleiche Verweilzeiten im Reaktorkern haben.

Zyklusdauer wird mit höchster Priorität die globale Anreicherung des Brennstoffs variiert.

Trotz umfangreicher Optimierung, ergaben sich im Laufe des Zyklus unzulässige Leistungsspitzen bei den Gd-Kernen. Um dies zu überwinden wurde ein neues Gd-Brennstoffkonzept mit einer zeitlichen Verschiebung des Gd-Ausbrandpunkts vorgeschlagen. Die Grundidee besteht darin, BE mit unterschiedlichen Gd-Ausbrandpunkten zu kombinieren, um das Auftreten unerwünschter Leistungsspitzen während des Zyklus zu vermeiden. Nach zahlreichen Analysen wurde festgestellt, dass die Leistungsspitzen nur dann in den vorgeschriebenen Grenzen gehalten werden können, wenn das Gd in den verschiedenen Brennstofftypen zu unterschiedlichen Zeiten während des Zyklus ausbrennt. Dabei spielt die Kombination von Brennstoffen mit niedrigen und hohen Gd-Konzentration eine übergeordnete Rolle für die Optimierung der Leistungsdichteverteilung im Kern.

Mit der neuen Methodik wurden zwei optimierte Kernkonfigurationen mit reduziertem Borsäureeinsatz ausgelegt. Für die Kompensation der Überschussreaktivität des Gd-Kerns sind nur 518 ppm Bor am Zyklusbeginn erforderlich. Die zweite Kernkonfiguration wurde mit Hilfe von Er-Brennstoff ausgelegt und die kritische Borkonzentration liegt bei 805 ppm. Die neuen Kerne bieten eine 50% bzw. 30% Reduzierung des Borgehalts im Kühlmittel im Vergleich zur heutigen DWR Praxis. Um die potentiellen Sicherheitsverbesserungen zu analysieren, wurde das Verhalten der neuen Kerne bei Anticipated Transients Without Scram (ATWS), Deborierung und auslegungsüberschreitenden Ereignissen untersucht. Dabei wurden Vergleichsanalysen für drei Kernkonfigurationen durchgeführt: die zwei neuen borarmen Kernkonfigurationen und die Konfiguration eines Standard-DWR.

Die ATWS Speisewasserausfall-Rechnungen haben gezeigt, dass diese Transiente mit allen Kernkonfigurationen beherrscht werden konnte. Der Primärdruck wurde dank der großen Kapazitäten der Sicherheitsventile in den vorgeschriebenen Grenzen gehalten. Trotzdem ergaben sich bei den Simulationen Unterschiede aufgrund der verschiedenen Rückwirkungseigenschaften. Die Leistung der DWR Kernkonfigurationen mit reduziertem Borsäureeinsatz wurde im kritischen Zeitfenster 0-100 s schneller reduziert und dies führte zu kleineren späteren Druckspitzen. Ferner wurde auch die durch die Druckhalter (DH) - Ventile abgeblasene Primärkühlmittelmenge um einen Faktor vier kleiner als beim Standard-DWR. Dies hat

eine wichtige sicherheitstechnische Bedeutung, da die Kapazität des Abblasebehälters etwa 1.200 kg beträgt [KWU-1983].

Bei der Deborierung wurde aufgrund der RESA sowie der intensiven Aufborierung des Primärkreises keine Rekritikalität erreicht. In allen Simulationen blieben die berechneten minimalen Borkonzentrationen am Kerneintritt höher als die Anfangsborkonzentrationen. Dennoch ergaben sich aufgrund der niedrigeren Anfangsborkonzentrationen und der schnelleren Aufborierung des Primärkühlmittels größere Sicherheitsabstände zur Rekritikalität in den Rechnungen mit den borarmen Konfigurationen. Die Analysen zeigten eine um $\Delta\rho = -1.0\%$ (Er-Konfiguration) und $\Delta\rho = -2.5\%$ (Gd-Konfiguration) verminderte Reaktivität im Vergleich mit der Standard-Konfiguration. Die sicherheitstechnische Bedeutung dieser zusätzlichen Reaktivität ist nicht klein, da $\Delta\rho = -2.5\%$ etwa der Reaktivität von 30% aller komplett im Kern eingefahrenen Steuerstäbe entsprechen.

Weiterhin wurden auslegungsüberschreitende Ereignisse mit kleinem Leck und einem unterstellten kompletten Ausfall der Notkühlssysteme simuliert. Die Rechnungen haben gezeigt, dass ohne Notfallmaßnahmen mit einer Überschreitung der maximalen zulässigen Brennstabhüllrohrtemperatur zu rechnen ist. Um dies zu vermeiden, wurden präventive Notfallmaßnahmen mit einer Einspeisung von borfreiem Wasser simuliert. In allen untersuchten Szenarien blieb die maximale Hüllrohrtemperatur in der Gd-, Er- und Standard-Konfiguration unter 1200 °C. Darüber hinaus ergaben sich erhöhte Sicherheitsmargen zur Rekritikalität für die borarmen Kernkonfigurationen im Vergleich mit der Standard-Konfiguration. Diese wurde nach 31 min, die Er- nach 56 min und die Gd-Konfiguration erst nach 106 min kritisch. Diese und weitere Untersuchungen haben die verbesserte inhärente Sicherheit und die erhöhte Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes der Kerne mit reduziertem Borsäureeinsatz bestätigt.

Aufgrund der durchgeführten Analysen und Bewertungen erscheint die Gd-Alternativstrategie am aussichtsreichsten für eine reale industrielle Realisation. Allerdings sind hier gewisse Nachteile bzgl. der Kernauslegung zu berücksichtigen: große Leistungsspitzen und die schwierige Optimierung der Leistungsdichteverteilung gehören zu den Schwächen dieser Kernkonfiguration. Beim Er-Kern wird eine flachere Leistungsdichteverteilung mit einer um 59 Volllasttage (VLT) kürzeren Zyklusdauer im Vergleich mit dem Standard-DWR erkauft. Klarer Vorteil beider Alternativstrategien im Vergleich mit dem Standard-DWR sind die kleinere Borkonzentration und die

verstärkten Rückwirkungseigenschaften, die zu einer verbesserten inhärenten Sicherheit geführt haben. Es muss aber erwähnt werden, dass die ersten Druckspitzen bei dem ATWS-Speisewasserausfall aufgrund der großen Kapazitäten der Sicherheitsventile in allen drei Simulationen etwa gleich waren. Bei der Deborierung ergaben sich in den Rechnungen mit den borarmen Kernen zwar größere Sicherheitsmargen, aber in allen drei Fällen war eine Rekritikalität aufgrund der Reaktorschnellabschaltung (RESA) und der intensiven Aufborierung des Kühlmittels ausgeschlossen. Bei dem anlageninternen Notfallschutz konnten mit den beiden Alternativstrategien Verbesserungen erreicht werden, jedoch darf es nicht vergessen werden, dass die erwartete Häufigkeit solcher extremer auslegungsüberschreitender Ereignisse sehr gering ist ($<2,5 \cdot 10^{-7}$).

Der Sinn eines Einsatzes borarmer DWR Kerne ist dementsprechend differenziert zu sehen. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Untersuchungen können hier naturgemäß nur grundsätzliche Fragenstellungen klären, auf denen weiterführende detaillierte Analysen aufbauen könnten. Relevante Fragestellungen sind das Verhalten solcher Kernkonfigurationen bei Unterkühlungstransienten, die Auswirkung des Absorbergehalts auf die Brennstoffeigenschaften sowie eine gesonderte Entsorgung von Gd- und Er-Brennelementen. Ein weiteres Untersuchungspotenzial besteht in der vollständigen Automatisierung des iterativen 3D Diffusionsverfahrens, sowie bei der Erstellung einer gemeinsamen Kommunikationsschnittstelle zwischen den einzelnen Schritten der entwickelten Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR mit reduziertem Borsäureeinsatz.

1 Einleitung

Im Kühlmittel des Primärsystems von Druckwasserreaktoren (DWR) ist Borsäure (H_3BO_3) gelöst. Diese dient zur Gewährleistung der Unterkritikalität im abgeschalteten und kalten Zustand des Reaktors, zur Abbrandkompensation und zur mittel- und langfristigen Regelung der Reaktorleistung. Borsäure wird ferner in diversitären Abschaltssystemen eingesetzt.

Die Verwendung von Bor im DWR hat auch sicherheitstechnische Nachteile:

– **Deborierungsstörfälle**

Durch externe oder interne Ursachen kann im Kühlmittel des Primärkreislaufs eine Verminderung der Konzentration von Bor auftreten, die zu einer Erhöhung der Reaktivität und potentiell zu Reaktivitätsereignissen führen kann.

– **Anlageninterner Notfallschutz**

Um die Unterkritikalität bei Kühlmittelverluststörfällen und auslegungsüberschreitenden Ereignissen im DWR zu gewährleisten, kann fehlendes Kühlmittel nicht einfach durch Wasser ersetzt werden, wie dies beispielsweise bei Siedewasserreaktoren (SWR) möglich ist. Dies schränkt die Flexibilität des präventiven anlageninternen Notfallschutzes beim DWR ein.

Eine Eliminierung bzw. Verringerung der Borsäure im Kühlmittel könnte hier sicherheitstechnische Vorteile bewirken. In diesem Zusammenhang werden in der Literatur vor allem drei Ansätze diskutiert:

1. Reduzierung der Borkonzentration im Vergleich zur gegenwärtigen Praxis
2. Beschränkung der Borverwendung auf Störfälle
3. Ein gänzlich borfreier DWR

Bisherige Überlegungen befassten sich fast ausschließlich mit neuen DWR-Konzepten.

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Untersuchung der Voraussetzungen und der grundsätzlichen Möglichkeiten, durch Alternativstrategien der Reaktivitätssteuerung und -regelung mit reduziertem Boreinsatz bei existierenden

deutschen DWR sicherheitstechnische Verbesserungen zu erreichen. Der Schwerpunkt wird auf Verbesserungen bei Deborierungsstörfällen und beim präventiven anlageninternen Notfallschutz gelegt.

Zur Umsetzung der Ziele des Vorhabens wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

– **Vergleichende Auswertung von Forschungen im Ausland**

Die Ergebnisse von ausländischen Forschungsvorhaben zum Thema Bor-Reduzierung und Bor-Eliminierung werden in Kap 2 ausgewertet, um die erarbeiteten Lösungsansätze und Methoden auf ihre Nutzbarkeit für die Ziele dieses Vorhabens zu überprüfen. Die meisten ausländischen Vorschläge und Konzepte zielen auf eine vollständige Eliminierung des Bors im Kühlmittel, wobei eine Neugestaltung der Regelungssysteme verfolgt wird.

– **Grundsätzliche Möglichkeiten von Alternativstrategien**

In Kap 3 werden grundsätzliche Alternativen zu den heutigen Boreinsatzstrategien für bestehende DWR untersucht, die eine Reduzierung der Bor-Konzentration ermöglichen. Schwerpunkt liegt bei Alternativen mit Einsatz von abbrennbaren Festabsorbieren, die sich bei Neubeladung des Reaktorkerns realisieren ließen. Als aussichtsreichste werden Alternativstrategien mit Einsatz von Gadolinium und Erbium identifiziert.

– **Brennelementauslegung und Erzeugung von Zwei-Gruppen-Diffusionsparametern**

Die Entwicklung eines BE-Modells für den Zellcode HELIOS, die Verifikation der erzielten Ergebnisse sowie die zahlreichen Untersuchungen zum Einfluss wesentlicher Auslegungsparameter auf den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf} werden in Kap. 4 beschrieben. Die Untersuchungen zeigen, dass die Absorberstabzahl, die Absorberkonzentration und die Urananreicherung einen signifikanten Einfluss auf k_{inf} haben. Die Zellrechnungen mit Er haben gezeigt, dass dieser Absorber im Vergleich mit Gd kleinere Absorptionsfähigkeit und ein grundsätzlich langsames Abbrandverhalten hat.

– **Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz**

In Kap. 5 wird eine neue Methodik vorgestellt, die in dieser Arbeit zur Auslegung borarmer DWR Kerne entwickelt wurde. Sie basiert auf drei wesentlichen, eng miteinander verbundenen Schritten – BE-Auslegung, orientierende Reaktivitätsbilanz, und 3D Diffusionsverfahren. Mit der neuen Methodik und mit der Hilfe der

Programme QUABOX/CUBBOX, POWEROPT und CONVERGE wurden unter Berücksichtigung bestimmter Auslegungsrandbedingungen zwei optimierte borarme Kernkonfigurationen ausgelegt (Kap. 6). Die Kernauslegung erster Kernkonfiguration basiert auf fortschrittlicher Gd-Brennstoffstrategie mit einer zeitlichen Verschiebung des Gd-Ausbrandpunkts. In der zweiten Kernkonfiguration wurde Er-Brennstoff eingesetzt. Die beiden bieten eine 50% bzw. 30% Reduzierung des Borgehalts im Kühlmittel im Vergleich mit der heutigen DWR Kernkonfigurationen.

– **Modellierung der DWR Anlage in ATHLET**

Um das Verhalten und die potentiellen sicherheitstechnischen Vorteile der neuen Kerne in verschiedenen Transienten sowie Störfällen zu untersuchen wurden ATHLET Eingabedaten auf der Basis eines von der GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit) entwickelten und validierten Simulator-Datensatzes vorbereitet. Die Modellierung des Primär- sowie Sekundärkreises der DWR Anlage wird in Kap. 7 dargestellt.

– **Untersuchungen zum Einfluss der Borreduzierung auf die DWR Sicherheit**

Für die identifizierten Alternativstrategien mit Gd und Er wird in Kap. 8 mit Hilfe von Störfallsimulationen untersucht, in wieweit sie hinsichtlich des Ausschlusses bzw. der Beherrschung von Deborierungsstörfällen Vorteile bieten und in wieweit sie geeignet sind, die Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes zu erhöhen. Dazu wurden Simulationen inhärenter Deborierung und auslegungsüberschreitender Ereignisabläufe durchgeführt. Weiterhin wurde der Einfluss der Borreduzierung auf das Kernverhalten bei einem ATWS-Speisewasserausfall untersucht. Alle Vergleichsanalysen wurden für drei Kernkonfigurationen durchgeführt: die zwei borarme Kernkonfigurationen und die Kernkonfiguration eines Standard-DWR. Die durchgeführten Simulationen ergaben verbesserte inhärente Sicherheit und eine erhöhte Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes der borarmen Kernkonfigurationen im Vergleich mit der Standard-Kernkonfiguration.

– **Bewertung der Alternativstrategien**

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen werden im abschließenden Kap. 9 die Vor- und Nachteile der optimierten Er- und Gd-Konfigurationen aufgezeigt und analysiert. Mit dem Gd-Kern konnte insgesamt die größte Reduktion des Borgehalts im Kühlmittel unter Berücksichtigung gültiger DWR Akzeptanzkriterien erreicht werden. Der Hauptvorteil der Er-Konfiguration ist dass

im Vergleich zu der Gd- und Standard-Konfiguration eine flachere Leistungsdichteverteilung im Kern erzielt werden kann. Durch den Einsatz abbrennbarer Neutronenabsorbern wird die Zyklusdauer negativ beeinflusst. Dieser Effekt ist bei der Er-Konfiguration besonders stark ausgeprägt.

2 Vergleichende Auswertung von Forschungen im Ausland

2.1 Frankreich

In den letzten Jahren wurden in Frankreich mehrere Untersuchungen von dem französischen Commissariat á l' Energie Atomique (CEA) zu einer Reduzierung bzw. einer vollständigen Eliminierung des Bors im DWR Primärkühlmittel durchgeführt. Für einen französischen standardmäßigen 900-MW DWR wurden drei grundsätzliche Borstrategien zur Borreduzierung/Boreliminierung diskutiert:

Strategie 1: Reduzierung des Borgehalts im Primärkreis (Bor nur im kalten Zustand)

Strategie 2: Boreinsatz nur in Störfallsituationen

Strategie 3: Vollständige Boreliminierung

Alle drei Borstrategien zielten auf eine vollständige Eliminierung des Bors im Leistungsbetrieb. Die durchgeführten Arbeiten sowie die wesentlichen Ergebnisse wurden in drei wissenschaftlichen Artikeln veröffentlicht [Fiorini et al., 1999], [Thomet, P, 1999], [Deffain et al., 1999].

In der ersten Veröffentlichung wurden die Ziele der Analysen, die Ergebnisse anderer Untersuchungen zur Borreduzierung bzw. Boreliminierung und die damit verbundenen Sicherheitsaspekte für bestehende und zukünftige Reaktoren diskutiert. Als wesentliche Vorteile der Borreduzierung/Boreliminierung wurden die verbesserte Sicherheit sowie das vereinfachte Anlagendesign identifiziert.

Ferner wurden die drei Strategien den verschiedenen Ebenen des Mehrstufenkonzeptes gegenübergestellt. Im Hinblick auf eine Verhinderung von Betriebsstörungen ist die Eliminierung von Deborierungsstörfällen, die kleineren Korrosion und Auftretswahrscheinlichkeit von Kühlmittelverluststörfällen vorteilhaft. Mit einem borfreien DWR sollte auch die Beherrschung von Dampferzeugerheizrohrstörfällen einfacher im Vergleich mit dem Standard-DWR sein, da in diesem Fall die Dampferzeuger-Ventile (DE-Ventile) direkt im Sicherheitsbehälter (SHB) geöffnet werden könnten. Dadurch wird ein SHB-Bypass vermieden. Im Hinblick

auf die Verhinderung von Störfällen wurde der stärker negative Moderator­temperaturkoeffizient erwähnt, der bei Störfällen mit einer Kühlmitteltemperaturerhöhung im Kern wichtige Rolle spielt. Bei der Begrenzung der Auswirkungen von auslegungs­überschreitenden Störfällen wurde die Möglichkeit zur Kernkühlung mit borfreiem Wasser als vorteilhaft identifiziert. Der wesentliche Nachteil des neuen Konzepts besteht in der komplizierte Reaktivitätsregelung und -steuerung.

Die durchgeführten Analysen haben gezeigt, dass die Strategie 3 (borfreier DWR) die größten Vorteile bezüglich einer verbesserten Sicherheit sowie einer Anlagenvereinfachung bietet. Aus diesem Grund wurde sie als aussichtsreichste identifiziert und weiter verfolgt.

BE- und Kernauslegung des borfreien DWR

Um die Auslegung des borfreien DWR Kerns zu ermöglichen, wurde ein neues 19x19 BE mit 56 Führungsrohren ausgelegt. Bei einer standardmäßigen Hüllrohrmaterialdicke wurde der Pellet-Durchmesser verkleinert und das Moderator/Brennstoff-Verhältnis erhöht (mehrere Führungsrohre), wobei die radialen und axialen Abmessungen des BE unverändert blieben. Die physikalischen Berechnungen zeigten eine um 15% kleinere lineare Stabileistung im Vergleich mit dem Standard-BE. Die Überschussreaktivität sollte mit Hilfe fortschrittlicher Absorberstrategien im Laufe des Zyklus gesteuert werden. Dafür wurden in den BE Brennstäbe mit zwei verschiedenen Gd-Konzentrationen eingesetzt – Brennstäbe mit hohem Gd-Gehalt (14% Gd_2O_3 in 20 Brennstäben) und kleinem Gd-Gehalt (5% Gd_2O_3 in 16 Brennstäben). Darüber hinaus wurde auch eine axiale Staffelung des Absorbers vorgesehen um die Leistungsspitzen weiter abzusenken. Der borfreie 900 MW_e DWR Kern bestand aus 157 BE (4.5% mittlere ^{235}U -Anreicherung) und 77 Steuerelementen. Mit dieser Konfiguration und einer 3-Batch Beladestrategie sollten die frischen BE am Ende des 1. Zyklus 16 GWd/tU erreichen.

Reaktivitätsregelung des borfreien DWR

Für die Reaktivitätssteuerung des borfreien DWR wurden zwei verschiedene Steuerelementtypen vorgesehen. Laständerungen und eine heiße Abschaltung des Reaktors sollten mit Hilfe von 49 Hafnium-Stuerelementen jeweils mit 32 Steuerstäben gewährleistet werden. Diese Steuerelemente haben einen vergrößerten Durchmesser und absorbieren um etwa 30% stärker als die konventionellen Ag-In-Cd

Stäbe. Die kalte Abschaltung des borfreien DWR erfolgt mit 28 Steuerelementen aus hochangereichertem B_4C (^{10}B bis zu 90%). Es muss aber erwähnt werden, dass die beschriebene Regelung nicht redundant ist und keine der beiden Systeme in der Lage ist eine Unterkeritikalität im Nicht-Leistungsbetrieb zu gewährleisten. Weiterhin beträgt die Wirksamkeit des Stuck-Rods in einem kalten Zustand bis zu 30% der negativen Reaktivität des gesamten Abschaltsystems.

Ferner führt die beschriebene inhomogene Reaktorregelung zu einer ungleichmäßigen Leistungsdichteverteilung und hohen lokalen Leistungsspitzen im Kern. Aus diesem Grund wurden in der französischen Studie mehrere Regelungskonzepte untersucht, die auf einer homogenen Reaktivitätssteuerung beruhen. In einem ersten Versuch wurde die mittlere Kühlmitteltemperatur als Regelungsparameter betrachtet, da sie einen Einfluss auf den gesamten Kern hat. Aufgrund des stark negativen Moderator Temperaturkoeffizienten des borfreien DWR sollte die Reaktorleistung in einem bestimmten Bereich (30%-100% Nennleistung) ohne Steuerstäbe und nur mit Hilfe der mittleren Kühlmitteltemperatur automatisch an die Sekundärseite angepasst werden. Die Analysen haben gezeigt, dass dieses System für die existierenden U-Rohr Dampferzeuger (DE) nicht geeignet ist, da der Sekundärdruck zwischen 57 bar (Nennleistung) und 107 bar (0% Leistung) variieren wird. Solche Variationen würden unzulässige Belastungen im Sekundärkreis verursachen.

In einem weiteren Schritt wurden die Regelungen der borfreien Reaktorkonzepte „The Safe Integral Reaktor“ (SIR, Großbritannien), „JAERI Passive Safety Reactor“ (JPSR, Japan) und „The Process Inherent Ultimate Safety“ (PIUS, ABB) Reaktor kurz untersucht. Ihre Reaktorregelung beruht auf den stark negativen Moderator Temperaturkoeffizienten und ist ähnlich der oben beschriebenen Regelungsmethode. Diese Anlagen haben aber deutlich kleinere thermische Leistungen im Vergleich mit dem französischen 900 MWe DWR.

In der CEA Studie wurden weitere Methoden zur homogenen Reaktivitätssteuerung und -regelung untersucht - Kombination von speziellen Steuerstabsfahrweisen und einer Variation der mittleren Kühlmitteltemperatur, variabler Kühlmitteldurchsatz im Primärkreis usw. Mit keiner der untersuchten Regelungsmethoden konnten die Leistungsspitzen in den vorgeschriebenen Grenzen eingehalten werden.

Reaktivitätsstörfälle

Aufgrund der erhöhten Steuerstabwirksamkeit des borfreien DWR musste auch das Kernverhalten in bestimmten Reaktivitätsstörfällen untersucht werden. Deswegen wurden folgende Reaktivitätsstörfälle mit dem Neutronenkinetikcode CRONOS2 und dem Thermohydraulikcode FLICA3 simuliert: Steuerstabausfahren bei 100% Nennleistung mit blockierter RESA und Steuerstabauswurf. Die Analysen zeigen, dass im ersten Fall 44 s nach dem Störfallbeginn im oberen Teil des Kerns das minimale DNB-Verhältnis erreicht wird. Um dies zu vermeiden ist eine Schnellabschaltung absolut notwendig.

In dem Steuerstabauswurfstörfall wurde ein prompter Reaktivitätsanstieg simuliert. In der Simulation erreicht die Brennstofftemperatur im Zentrum des Pellets schnell die Schmelzgrenze von 2675 °C, wobei die mittlere Pellettemperatur von 2000 °C nicht überschritten wurde. Die Analysen zeigen, dass mehr als 15% des Brennstoffs ist geschmolzen, dennoch wurde kein Brennstoff ins Kühlmittel dispergiert.

Als Schlussfolgerung wurde festgehalten, dass das Ziel der Studie bzgl. der Regelung des borfreien Reaktors nicht erreicht werden konnte. Grund dafür sind die ungleichmäßige Leistungsdichteverteilung und schließlich die unzulässigen Leistungsspitzen des borfreien DWR, die mit den untersuchten Regelungssystemen nicht kontrolliert werden können. Diese Nachteile könnten nur mit einer Reduzierung der thermischen Leistung des Reaktors vermieden werden.

Bewertung und Überprüfung der erarbeiteten Lösungsansätze für die Ziele dieses Vorhabens

Für die Kompensation der Überschussreaktivität des borfreien DWR wurde ein verstärkter Einsatz von Gd vorgeschlagen. Dabei sollen Brennstäbe mit hoher (14%) und mit kleiner Gd-Konzentration (5%) in den BE positioniert werden. Die beiden Absorber haben unterschiedliches Ausbrandverhalten und sorgen für die Reaktivitätskompensation in der ersten bzw. zweiten Hälfte des Zyklus. Solche Strategien könnten für die Verbesserung der Leistungsdichteverteilung eines borarmen DWR von Bedeutung sein. Für die Ziele des Vorhabens wäre der Einsatz von verschiedenen Brennelementtypen mit unterschiedlichen Absorberkonzentrationen (BE mit hoher und mit kleiner Absorberkonzentration) ebenfalls denkbar. Die typischen Gd-Konzentrationen in bestehenden DWR BE liegen im Bereich 5-8% Gd₂O₃. Nach dem

Ausbrand der stark neutronenabsorbierenden Gd-Isotope verbleiben Isotope mit deutlich niedrigeren, aber nicht vernachlässigbaren Absorptionswirkungsquerschnitten und führen zu einer unerwünschten Reaktivitätsbindung [Meinl und Rizvi, 1999]. Eine industrielle Erfahrung mit Gd-Konzentrationen im Bereich 14% Gd_2O_3 ist derzeit nicht vorhanden. Es muss auch erwähnt werden, dass durch die Beimischung von Gd_2O_3 die Brennstoffschmelztemperatur mit etwa 50 °C pro % Gd_2O_3 absinkt.

Für die Regelung des borfreien Reaktors wurde ein verstärktes Regelungssystem vorgeschlagen. Es beruht auf einer erhöhten Steuerstabzahl sowie neuen Steuerstabmaterialien. Ein Austausch bestehender Steuerstäbe in den deutschen DWR wäre ohne einen großen technischen und finanziellen Aufwand nicht möglich. Weiterhin ist die große Steuerstabwirksamkeit in bestimmten Reaktivitätsstörfällen nachteilig und hat auch einen negativen Einfluss auf die Leistungsdichteverteilung im Kern.

Die untersuchten Möglichkeiten zur homogenen Leistungsregelung mit einer Variation der mittleren Kühlmitteltemperatur waren nicht erfolgreich, da der Einsatz der Steuerstäbe unvermeidlich war. Darüber hinaus wäre eine solche Selbstregelung mit den bestehenden U-Rohr DE nicht möglich. Die Auslegung bestehender deutscher DWR-Anlagen beruht auf einer konstanten mittleren Kühlmitteltemperatur im oberen und unteren Leistungsbereich. Der Vorteil dieser Auslegung besteht in einem geringen Kühlmittelaustausch zwischen dem Druckhalter (DH) und dem heißen Strang. Dadurch werden große Abweichungen vom nominalen DH-Füllstand vermieden und dies ist für eine schnellere Reaktion des DH bei Druckänderungen vorteilhaft.

2.2 Israel

Eine weitere Untersuchung zur Boreliminierung in DWR wurde im Nuclear Engineering Department der Ben-Gurion University of the Negev durchgeführt [Galperin et al., 1986]. Als wesentliche Vorteile des borfreien Anlagendesigns werden die kleinere Kapital- und Betriebskosten sowie der negative Moderatortemperaturkoeffizient erwähnt. Übergeordnetes Ziel der Studie ist eine Reaktivitätsregelung des borfreien DWR mit bestehender Brennelementgeometrie. Aus diesem Grund wurde für die Analysen ein 2776 MW_{th} 3-Loop Westinghouse DWR als Referenzanlage ausgewählt.

Für die Kompensation der Überschussreaktivität wurde von den israelischen Wissenschaftlern Gd_2O_3 vorgeschlagen. Zwei grundsätzliche Möglichkeiten zum

Einsatz von Gd wurden analysiert: Gd in separaten Stäben und im Brennstoff integriert. Die erzielten Ergebnisse zeigten, dass eine maximale Flexibilität mit separaten Gd-Stäben erreicht werden kann. Die abbrennbaren Absorber wurden in den frischen BE positioniert, wobei drei verschiedene Brennelementkonfigurationen mit je 12 Gd-Stäben und unterschiedlichen Urananreicherungen (2.9%, 3.25% und 3.3%) ausgelegt wurden. Der Gd-Stab enthielt keinen Brennstoff und ist den früher in den deutschen DWR eingesetzten Borsilitkatstäben ähnlich.

Die Gd-Ausbrandrate konnte durch eine Variation der Wasserspalte im Gd-Stab gezielt beeinflusst werden. Nach dem Zyklusende (ZE) können die Absorberstäbe entfernt und dadurch wird im nächsten Zyklus die unerwünschte Absorption der Isotope mit kleinen Absorptionswirkungsquerschnitten vermieden werden.

In einem weiteren Schritt wurde die Kernkonfiguration des borfreien Reaktors näher untersucht, wobei ein 3-Batch Beladeschema ausgewählt wurde. Da die Gd-Stäbe in den Führungsrohren der frischen BE waren, konnten in diese BE keine Steuerstäbe eingefahren werden. Damit wurden die möglichen Anordnungen der BE im borfreien Kern eingeschränkt. Weitere wesentliche Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen sind:

- Die frischen BE sollen weder am Kernrand noch im Kernzentrum eingesetzt werden
- Die BE mit der höchsten Reaktivität sind die BE im 2. Zyklus; deswegen sollen diese am Kernrand positioniert werden

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurde die 3-Batch Kernkonfiguration vorbereitet. Die durchgeführten Abbrandrechnungen haben gezeigt, dass die k_{eff} -Kurve unterschiedlich im Vergleich mit der k_{eff} -Kurve eines Standard-DWR Kerns ist. Beim borfreien DWR konnten im Laufe des Zyklus k_{eff} -Anstiege beobachtet werden. Dieses Verhalten ist eng mit der steigenden Reaktivität der BE in ihrem ersten Zyklus verbunden.

Die Analysen zeigen, dass mit dem vorgeschlagenen Kernauslegungskonzept eine flache Leistungsdichteverteilung im Laufe des Zyklus erzielt werden kann. Die größten Leistungsspitzen treten am Zyklusbeginn auf, dennoch werden aber die Grenzwerte nicht überschritten. Darüber hinaus hat der borfreie DWR bei gleicher

Brennstoffanreicherung eine größere Zyklusdauer im Vergleich mit dem Westinghouse DWR.

In der Zusammenfassung wurde festgehalten, dass die Regelung eines borfreien DWR mit Einsatz von abbrennbarem Absorber in separaten Absorberstäben möglich ist. Die Erfüllung bestehender Sicherheits- und Akzeptanzkriterien sowie die Abschaltung des Reaktors sollten aber mit zusätzlichen Untersuchungen bestätigt werden.

Bewertung und Überprüfung der erarbeiteten Lösungsansätze für die Ziele dieses Vorhabens

Die Studie wurde von den israelischen Wissenschaftlern im Jahr 1986 durchgeführt. Zu dieser Zeit war vielleicht die Entfernung von den Absorberstäben am Ende des Zyklus üblich. Früher wurden in Deutschland auch separate Borsilikatstäbe verwendet. Sie werden seit dem Einsatz des $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Gemisches nicht mehr in DWR BE verwendet. Als Gründe für den Übergang vom Borglas auf Gd_2O_3 wurden von Kraftwerk Union (KWU) die große Borglas-Absorbermenge (gesonderte Entsorgung) und die parasitäre Absorption der verbleibenden Strukturmaterialien angeführt. Um die letzte zu vermeiden sollten laut des in dieser Studie vorgeschlagenen Konzepts die Gd-Stäbe entfernt werden. Dies ist mit kostenaufwendigen Manipulationen in heißen Zellen verbunden. Aus diesen Gründen und weil in Deutschland seit langem keine Strategien mit separaten Absorberstäben mehr verfolgt werden, ist für die Ziele dieser Arbeit das vorgeschlagene Reaktivitätsregelungskonzept von untergeordneter Bedeutung. Darüber hinaus ist im Hinblick auf den heutigen Trend zu einer maximalen Brennstoffausnutzung und hohen Abbränden eine Einschränkung möglicher Beladestrategien durch den Einsatz von separaten Absorberstäben kaum denkbar.

Es ist zweifelhaft, ob mit dem borfreien DWR eine größere Zyklusdauer im Vergleich mit dem Referenzreaktor erreicht wird. Bei gleicher Brennstoffanreicherung und einem deutlich höheren Absorbergehalt mit unvermeidlicher Restabsorption am Zyklusende konnte der neue DWR um etwa 35 Volllasttage (VLT) länger gefahren werden. Darüber hinaus wurde keine Lösung für die Abschaltung des Reaktors vorgeschlagen.

2.3 Südkorea

Eine Studie zur Auslegung eines borfreien 600 MW_e DWR wurde an der Kyunghee Universität in Südkorea durchgeführt [Kim et al., 1998]. Als Referenzreaktor wurde der

Westinghouse AP-600 ausgewählt. Die übergeordneten Ziele der Studie waren eine Untersuchung der Machbarkeit eines borfreien 600 MW_e Kerns mit bestehender DWR Technologie unter Berücksichtigung heutiger Sicherheitskriterien. Die Zyklusdauer sollte nicht kürzer als 18 Monate sein und die Leistungsspitzen dürften die Werte vom AP-600 nicht überschreiten.

Die Forschungsarbeiten haben mit einer Untersuchung verschiedener Einsatzmöglichkeiten von abbrennbaren Absorbern in den kommerziellen DWR begonnen. Die Analysen zeigten, dass Brennelementkonfigurationen mit separaten Absorberstäben als ungeeignet erscheinen, da die Anzahl der Absorberstäbe durch die Anzahl der Führungsrohre begrenzt ist. Ferner kann die definierte Zyklusdauer nur mit Hilfe einer großen Überschussreaktivität am Zyklusbeginn erreicht werden. Für ihre Kompensation ist auch eine signifikante Absorbermenge im Kern erforderlich. Aus diesem Grund wurde eine Strategie mit vermischem im Brennstoff Gd₂O₃ ausgewählt. Für die Auslegung des borfreien DWR wurden folgende zusätzliche Randbedingungen definiert:

- Die Überschussreaktivität soll möglichst klein sein (zwischen 1% und 3%)
- Die Gd-Konzentration darf nicht größer als 12% sein

Um eine Erfolg versprechende Brennstoffkombination für die Kernkonfiguration des koreanischen borfreien DWR festzulegen, wurden mehrere Reaktivitätsbilanzrechnungen anhand einer vereinfachten Methode durchgeführt. Damit konnten Brennelementtypen für den Batch 2. und 3. identifiziert werden. Die Brennstoffzusammensetzung für Batch 1. wurde intuitiv bestimmt. Weiterhin wurden alle Gd-Stäbe in drei axiale Zonen mit unterschiedlichen Absorberkonzentrationen unterteilt, um eine flachere Leistungsdichteverteilung im Kern zu erreichen. Mit dieser Strategie konnte aber das axiale Offset in der vorgeschriebenen Grenze nicht gehalten werden. Deswegen wurde ein anderes Konzept vorgeschlagen. Es beruht auf BE mit verschiedenen Absorberstabtypen, die unterschiedliche Gd-Konzentrationen in den verschiedenen axialen Zonen haben. Mit diesem Konzept wurden bessere Ergebnisse erzielt; dennoch war die Variation des axialen Offset zu groß. Als endgültige Lösung wurde eine Kombination der beiden Strategien vorgeschlagen. Die erste sollte für die BE-Auslegung des Batch 2. und 3. und die zweite für Batch 1. implementiert werden. Ein Teil der Überschussreaktivität wurde mit Hilfe bestimmter Steuerstabbänke kompensiert.

Um einen genügend großen Sicherheitsabstand zur Rekritikalität im abgeschalteten Zustand zu gewährleisten, wurden neue Steuerstabmaterialien verwendet. Das übliche Ag-In-Cd wurde mit Borkarbid (B_4C) ersetzt, trotzdem war der Sicherheitsabstand zur Rekritikalität im kalten Zustand nur etwa $\Delta\rho = 1.5\%$. Aus diesem Grund war eine zusätzliche Anreicherung des Materials an ^{10}B (bis zu 50%) notwendig.

Bewertung und Überprüfung der erarbeiteten Lösungsansätze für die Ziele dieses Vorhabens

Die vorgeschlagenen Lösungsansätze sind für die Zeile des Vorhabens nur teilweise von Bedeutung. Eine axiale Unterteilung des Absorbers ist in den bestehenden DWR zwar nicht üblich, könnte aber bei der Auslegung des borarmen DWR Kerns verwendet werden. Unterschiedliche axiale Urananreicherungen sowie verschiedene Gd-Konzentrationen sind ein Bestandteil der heutigen SWR-Kernauslegung.

Die in der koreanischen Studie vorgeschlagene Kernkonfiguration besteht aus drei Batches, wobei die BE der ersten mit einer Absorberstrategie und die BE der restlichen zwei mit anderer Absorberstrategie ausgelegt wurden. Es stellt sich die Frage, wie sieht der nächste Zyklus aus - die ehemaligen frischen BE (die von einem anderen Typ als die BE im zweiten und dritten Batch sind) werden dann in ihrem 2. Zyklus sein. Dadurch ergibt sich aber eine andere Kernkonfiguration bei der der Einsatz von Bor notwendig sein könnte. Darüber hinaus würden sich auch andere Zyklusdauer, Abschaltreaktivität usw. ergeben.

Ein Abschaltssystem mit B_4C Stäben ist für die Ziele des Vorhabens von untergeordneter Bedeutung, da ein kompletter Austausch bestehender Ag-In-Cd Stäbe zu aufwendig wäre.

Eine weitere Studie zur Boreliminierung wurde ebenfalls in Südkorea durchgeführt [Kim, 2000]. Es wurde ein neues Konzept zur Kompensation der Überschussreaktivität dargestellt, das auf einer Kombination von Uran-Pu Brennstoff und separaten Absorberstäben beruht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das ^{238}Pu einen größeren Absorptionswirkungsquerschnitt im Vergleich mit ^{238}U besitzt, deswegen könnte eine U-Pu Mischung für die Kompensation der Überschussreaktivität vorteilhaft sein. Diese Regelungsstrategie wurde anhand einer Auslegung zweier borfreien Kernen (600 MW_e und 1300 MW_e) überprüft.

Als Prototyp für den borfreien 600 MWe Reaktor wurde wieder ein Westinghouse AP-600 gewählt. Für die Auslegung wurden standardmäßige 17x17 BE mit einem ^{238}Pu Brennstoff verwendet. Die Konzentration des ^{238}Pu Isotops wurde variiert (0.5-1.1%), um eine bessere axiale Leistungsdichteverteilung im Kern zu erzielen. Zusätzlich wurden 16 separate Absorberstäbe mit $\text{B}_4\text{C-Al}_2\text{O}_3$ in den Führungsrohren positioniert. Die Kernkonfiguration bestand aus drei Batches und die Zykluslänge betrug 18-Monate. Mit der beschriebenen Auslegung konnte eine Kompensation der Überschussreaktivität am Zyklusbeginn erreicht und schnelle Reaktivitätsänderungen im Laufe des Zyklus vermieden werden. Die durchgeführten Rechnungen haben gezeigt, dass die Leistungsspitzen die vorgeschriebenen Grenzen nicht überschritten haben. Darüber hinaus wurde die Anzahl der Führungsrohren von 24 auf 28 erhöht, um eine Abschaltung des Reaktors zu ermöglichen. Dafür werden B_4C und Ag-In-Cd Steuerstäbe verwendet. Die ersten haben eine erhöhte Wirksamkeit und sorgen für die kalte Abschaltung des Reaktors, während die zweiten für die Leistungsregelung benutzt werden.

Das neue Konzept zur Kompensation der Überschussreaktivität wurde auch für einen 1300 MWe borfreien DWR Kern überprüft. Als Basis wurde der neue „Korean Next Generation Reactor“ (KNGR) benutzt, dessen Kernausslegung mit standardmäßigen ABB-CE 16x16 BE realisiert worden ist. Für die Ziele der Untersuchung wurde das Gitter auf 17x17 mit 28 Führungsrohren modifiziert, um eine größere Flexibilität der Absorberstabpositionierung sowie eine Verstärkung des Abschaltsystems zu ermöglichen. Die Analysen zeigen, dass auch mit dem großen Kern die wesentlichen Sicherheitskriterien eingehalten werden konnten.

Bewertung und Überprüfung der erarbeiteten Lösungsansätze für die Ziele dieses Vorhabens

Das vorgeschlagene Regelungssystem ist für die Ziele dieses Vorhabens nicht relevant, da das Konzept zur Kompensation der Überschussreaktivität auf einem ganz neuen Brennstoff beruht. Die Beimischung von ^{238}Pu mit dem Uranbrennstoff ist mit mehreren Fragen über einen neuen ^{238}Pu -Brennstoffzyklus, Isotopenseparation, Fertigungsverfahren und Kosten verbunden. In einigen Quellen wird über einen Preis von mehreren Tausend \$/Gramm ^{238}Pu berichtet [AEI-1996]. Angenommen, dass der ^{238}Pu -Anteil im neuen borfreien Kern nur 1% der gesamte Brennstoffmasse (1.000.000 g) wäre, würde dies Brennstoffkosten von mehreren Milliarden \$ entsprechen.

2.4 USA

Eine Studie zur Eliminierung des Bors in den DWR Reaktoren wurde im Jahr 1989 vom amerikanischen Electric Power Research Institute (EPRI) und Combustion Engineering durchgeführt. Leider kann im Internet nur eine kurze Beschreibung der Ziele und der durchgeführten Arbeiten gefunden werden [EPRI-1989]. Die wesentlichen Motivationen für den borfreien DWR waren eine Verringerung der Korrosion und der radioaktiven Abfallmenge. Zur Identifizierung der Reaktivitätsregelungsstrategien wurden Untersuchungen zu innovativen Brennelementgittern und zum Einsatz von abbrennbaren Absorbern durchgeführt. Zusätzlich wurden Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsanalysen für einen 18-Monate Zyklus gemacht.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass ein borfreier DWR mit der bestehenden DWR-Technologie machbar ist. Eine Gitteränderung ist für die Auslegung des borfreien DWR nicht unbedingt notwendig. Mit den existierenden abbrennbaren Absorbern konnte die Überschussreaktivität für einen 18-Monate Zyklus kompensiert werden. Für die Abschaltung des Reaktors wurde eine verdoppelte Anzahl der existierenden Steuerstäbe vorgesehen.

Die Schlussfolgerungen der Studie bestehen darin, dass der borfreie DWR einen vereinfachten Betrieb bietet und im Hinblick auf die Reaktorsicherheit neutral oder besser im Vergleich mit dem konventionellen DWR ist. Darüber hinaus existieren gewisse Einschränkungen bei der Kernauslegung, die bei kleineren Reaktorkernen vermieden werden könnten.

2.5 Zusammenfassung

Es wurden ausländische Arbeiten aus Frankreich, USA, Korea und Israel zur Möglichkeit zur Reduzierung bzw. Eliminierung von Bor im DWR ausgewertet. Die in den Studien vorgeschlagenen Konzepte zielen auf eine vollständige Eliminierung des Bors im Kühlmittel, wobei eine grundsätzliche Neugestaltung der Regelungssysteme verfolgt wird. Für die Kompensation der Überschussreaktivität wurde fast in allen Arbeiten der Einsatz von Gd vorgeschlagen. Dieser Absorber zeichnet sich mit einem großen Absorptionswirkungsquerschnitt für thermische Neutronen und wird in den bestehenden LWR eingesetzt. In den verschiedenen Studien wurde Gd entweder als vermischt mit dem Brennstoff oder in separaten Absorberstäben betrachtet. Schwierigkeiten ergaben sich meist bei der Abflachung der Leistungsdichteverteilung

und der Minimierung der Leistungsspitzen im Kern. Für die Abschaltung wurden neue Regelungssysteme vorgeschlagen, die auf einer erhöhten Steuerstabanzahl sowie neuen Steuerstabmaterialien basieren.

3 Grundsätzliche Möglichkeiten von Alternativstrategien

Zur Kompensation eines Teils der Überschussreaktivität im Kern und zur Begrenzung der erforderlichen kritischen Borkonzentration am Zyklusbeginn werden in den heutigen DWR abbrennbare Absorber verwendet. Eine kleinere Borkonzentration führt zu einem negativeren Moderator Temperaturkoeffizient und dadurch zu verbesserten Rückwirkungseigenschaften des DWR. Weiterhin ist es möglich durch eine geeignete Anordnung der BE mit abbrennbaren Absorbern die Leistungsdichteverteilung im Kern zu optimieren.

Die abbrennbaren Absorber sind Materialien mit einem großen Neutronenabsorptionswirkungsquerschnitt, welche im Laufe des Zyklus in Materialien mit einem sehr kleinen Absorptionswirkungsquerschnitt umgewandelt werden. Typische Absorber in den heutigen LWR sind Gd_2O_3 , Er_2O_3 sowie verschiedene Bor-Zusammensetzungen. Gd_2O_3 wird hauptsächlich in den deutschen LWR eingesetzt und beide werden in den USA verwendet. Die folgenden Abschnitte beschreiben kurz den Einsatz bestehender abbrennbarer Absorber.

3.1 Gadolinium

Im Brennstoff integrierter Gd-Absorber wird seit vielen Jahren in den SIEMENS DWR verwendet. Das Gd wird als Gd_2O_3 Mischung eingesetzt, die homogen mit dem Uranbrennstoff in bestimmten BE vermischt wird. Die Positionierung der Gd-Brennstäbe, die Absorberkonzentration sowie der Absorbergehalt werden so ausgewählt, dass sich eine flache Leistungsdichteverteilung im gesamten Kern ergibt. Die typischen heutigen Gd_2O_3 -Konzentrationen liegen im Bereich 5-8% [Schlieck et al., 2000].

Das natürliche Gd besteht aus sieben Isotopen mit den folgenden Anteilen:

^{152}Gd (0.20%), ^{154}Gd (2.2%), ^{155}Gd (14.8%), ^{156}Gd (20.5%), ^{157}Gd (15.7%),

^{158}Gd (24.8%), ^{160}Gd (21.9%)

Die stabilen Isotope ^{155}Gd und ^{157}Gd haben sehr große Absorptionswirkungsquerschnitte für thermische Neutronen – 61.000 und 254.000 barn. Die Isotope ^{154}Gd und ^{156}Gd haben einen deutlich niedrigeren Absorptionswirkungsquerschnitt für thermische und epithermische Neutronen und führen zu einer nachhaltigen und unerwünschten Reaktivitätsbindung am Zyklusende [Meinl und Rizvi, 1999].

3.2 Erbium

Erbium wurde bei der Kernausslegung modularer Hochtemperaturreaktoren sowie der System-80 DWR-Konzepte eingesetzt. In letzter Zeit wird der abbrennbare Absorber auch in den RBMK Reaktoren verwendet [Bubelis et al., 1999, 2003]. Darüber hinaus existieren auch Studien von russischen Wissenschaftlern zum Einsatz von Er in bestehenden VVER Reaktoren. Er_2O_3 wurde bereits in einigen amerikanischen DWR Anlagen eingesetzt, die mit sehr langen Zyklen (18-Monate-Zyklus und 24-Monate-Zyklus) gefahren werden [Jonsson und Gunn, 1995].

Der Absorptionswirkungsquerschnitt von Er ist im Vergleich mit dem von Gd deutlich kleiner. Erbium ermöglicht eine flachere Leistungsdichteverteilung im Kern und ist für die Auslegung längerer Zyklen besonders geeignet [Vesterlund und Junkrans, 1998]. Das natürliche Er besteht aus folgenden stabilen Isotopen:

^{162}Er (0.14%), ^{164}Er (1.6%), ^{166}Er (33.6%), ^{167}Er (23%), ^{168}Er (26.8%), ^{170}Er (14.9%)

^{167}Er hat den größten Absorptionswirkungsquerschnitt (660 barn) für thermische Neutronen im Vergleich mit den anderen Isotopen. Die Isotope ^{162}Er , ^{164}Er , ^{166}Er und ^{168}Er führen zu einer größeren Reaktivitätsbindung am Zyklusende [Zhiven, 2003]. Darüber hinaus zerfallen die ^{163}Er - und ^{165}Er -Isotope in ^{163}Ho und ^{165}Ho und diese haben auch einen großen Absorptionswirkungsquerschnitt.

3.3 Bor

In den amerikanischen DWR Anlagen werden häufig Bor-Zusammensetzungen als abbrennbarer Absorber in separaten Stäben eingesetzt. Westinghouse hat zwei wesentliche Absorberstabkonstruktionen entwickelt: Pyrex Burnable Absorber Assemblies (BAA) und Wet Annular Burnable Absorbers (WABA). In den ersten wird

Borsilikatglas (B_2O_3 - SiO_2 mit 12.5% B_2O_3) als Absorbermaterial verwendet. Die WABA-Stäbe sind ähnlich den BAAs, enthalten aber $Al_2O_3 - B_4C$ (14% B_4C) Pellets und haben eine zentrale wassergefüllte Region [ORNL-2000]. Eine weitere Absorberstrategie mit Einsatz vom Bor ist die Beschichtung der Brennstoffpellets mit ZrB_2 [Secker und Erwin, 1990].

3.4 Zusammenfassung

Es wurden typische abbrennbare Absorber heutiger LWR untersucht und deren Einsatz im DWR Brennstoff dargestellt. Auf der Grundlage dieser Analysen werden Gd und Er als aussichtsreichste Absorber für die Ziele dieser Arbeit identifiziert: Gd ist mit seinem großen Absorptionswirkungsquerschnitt besonders interessant; obwohl das Er eine kleinere Absorptionsfähigkeit bietet, ermöglicht es eine flachere Leistungsdichteverteilung im Kern. Die Untersuchungen zeigen, dass die Kernausslegung durch den Einsatz von BE mit separaten Absorberstäben negativ beeinflusst wird, weil diese auf Steuerelementpositionen nicht eingesetzt werden können. Da in Deutschland Strategien mit separaten Absorberstäben seit langem nicht mehr verfolgt werden, werden die identifizierten Absorbermaterialien in den nachstehenden BE-Rechnungen als UO_2 - Gd_2O_3 und UO_2 - Er_2O_3 Mischungen simuliert.

4 Erzeugung von Zwei-Gruppen-Diffusionsparametern mit dem Zellcode HELIOS und Untersuchungen zum Einfluss wesentlicher Auslegungsparameter auf den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf}

4.1 Einleitung

In der heutigen Methodik für Nuklearberechnungen stellen die Brennelementberechnungen den Übergang von den Multigruppendedatenbibliotheken zu den Kernberechnungen dar. Sie dienen zur Reaktivitäts- und Nuklidinventarberechnung sowie zur Bereitstellung von Zwei-Gruppen-Diffusionsparametern für 3D Diffusionsrechnungen [GRS-2005]. Die modernen kommerziellen Zellprogramme wie z.B. CASMO, HELIOS berechnen für eine gegebene Materialverteilung im BE zwei-dimensionale Neutronenflußverteilungen für eine große Anzahl von Energiegruppen. Dabei wird angenommen, dass ein unendlich ausgedehntes periodisches Gitter von Brenn- und Absorberstäben (mit entsprechenden Führungsrohrstrukturen) entsteht. Bei vorgegebenen Abbrandschritten werden die Wirkungsquerschnitte kondensiert und über das BE gemittelt. Die erzeugten Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter werden letztlich als Eingabedaten der 3D Diffusionscodes wie QUABOX/CUBBOX, SIMULATE-4, PRESTO und PARCS verwendet [FZR-2002].

4.2 HELIOS System

Das System HELIOS ist ein kommerzielles Zell- und Abbrandprogrammsystem, das von Studsvik Scandpower zur Berechnung von Weniggruppen-Daten für Reaktor-Brennelemente entwickelt wurde. HELIOS besteht aus drei verschiedenen Codes – AURORA, HELIOS und ZENITH. Die Programme greifen auf eine gemeinsame Datenbank (HERMES) zu und erfüllen unterschiedliche Aufgaben im Rahmen der Erzeugung der Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter.

Der Code AURORA ist der Eingabe-Prozessor des HELIOS Systems. Die Daten werden gelesen und nach einer Konsistenzprüfung in der HERMES Datenbank gespeichert. HELIOS löst die Mehrgruppen-Neutronen- bzw. Gamma-Transport-

Gleichung in ihrer integralen Form. Die HELIOS Kerndatenbibliothek besteht aus Daten für 47 Neutronengruppen und 18 Gammagruppen. In speziellen Fällen wird auch eine detaillierte Datenbibliothek für 190 Neutronen-Gruppen und 48 Gammagruppen verwendet. Diese Bibliotheken basieren vorrangig und nicht ausschließlich auf der Bibliothek ENDF/B-VI. Die Berechnung erfolgt unter der idealistischen Annahme, dass das betreffende Nuklid in einer sehr kleinen Konzentration im Material vorliegt. Alle Raumelemente werden durch eine Stromkopplung miteinander gekoppelt. Der Neutronenstrom, der durch ein Segment der Raumelementgrenze tritt, wird als räumlich konstant angenommen. Der Halbraum für die Neutronenrichtung wird in eine Anzahl von Sektoren unterteilt, in denen die Winkelabhängigkeit als konstant angenommen wird. Die beschriebene Näherung ist zur Berechnung von Zwei-Gruppen-Parameter für BE in unendlich periodischer Ausdehnung ausreichend [GRS-2005].

Die Programme ORION und ZENITH ermöglichen Visualisierung der Eingabedaten bzw. Post-Prozessing der erzeugten Ergebnisse. Abbildung 4-1 zeigt das AURORA-HELIOS-ZENITH-ORION Diagramm.

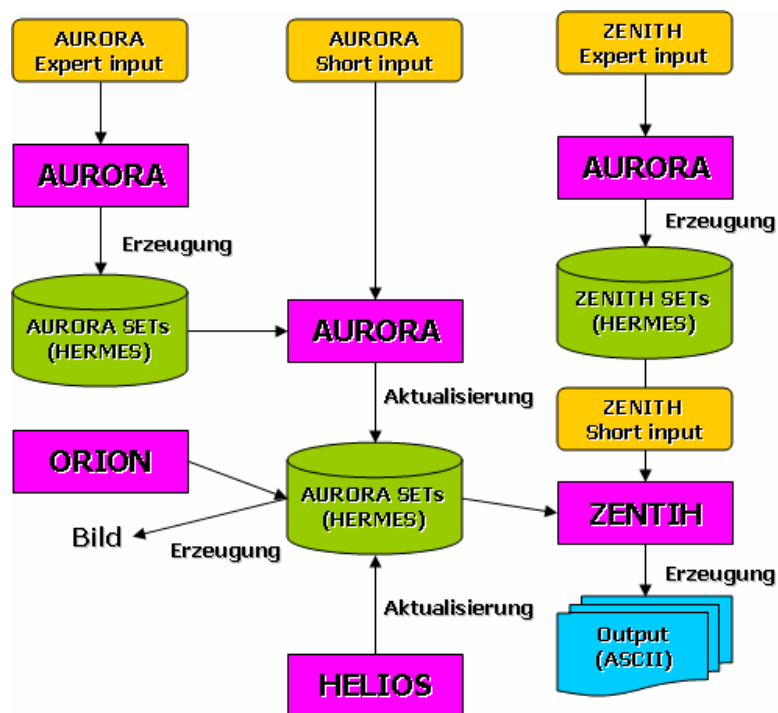


Abbildung 4-1: AURORA-HELIOS-ZENITH-ORION Diagramm

4.3 Entwicklung eines 16x16 BE-Modells für HELIOS

Um ein BE-Modell entwickeln zu können wurden mit dem Code HELIOS vier verschiedene Zelltypen vorbereitet – Uran-Zelle, Uran-Absorber-Zelle, Steuerstab-Zelle und Detektor-Zelle. Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 zeigen die einzelnen Zellen, visualisiert mit dem Programm ORION.

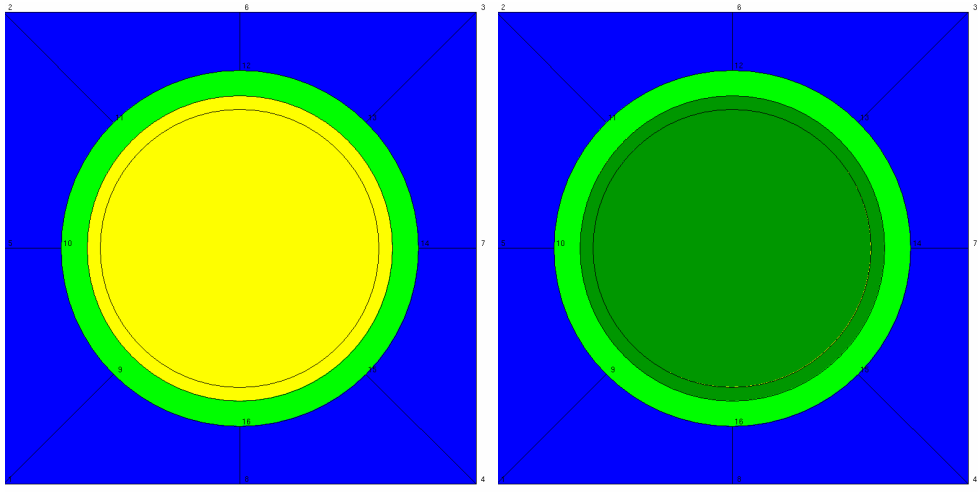


Abbildung 4-2: Uran-Zelle und Uran-Absorber-Zelle

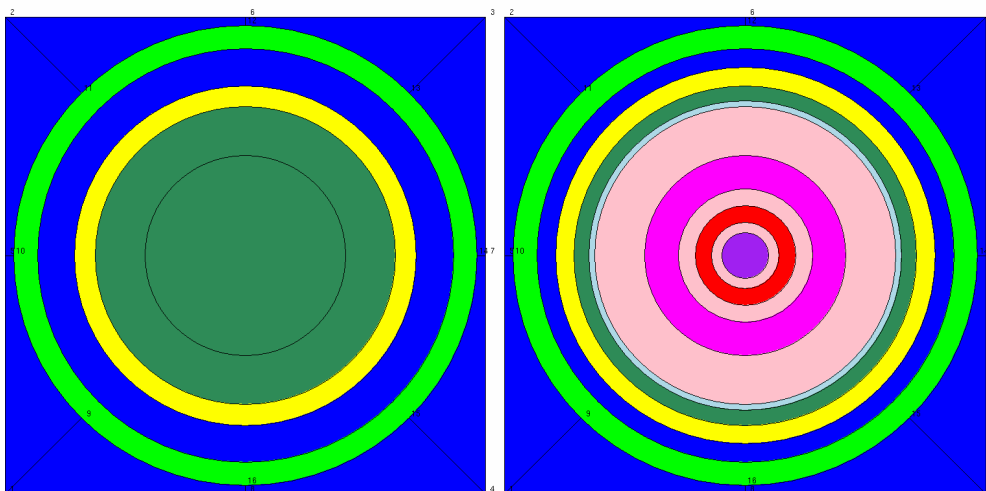


Abbildung 4-3: Steuerstab-Zelle (mit Steuerstab) und Detektor-Zelle (mit Detektor)

Das ganze BE wird mit einer Kopplung einzelner Zellen sowie der Wasserspalten abgebildet. Da das BE symmetrisch aufgebaut ist, wurde in den HELIOS Eingabedaten nur ein Viertel modelliert. Für die Modellierung wurde das obere linke Viertel eines 16x16 BE ausgewählt (Abbildung 4-4). Es besteht aus insgesamt 64 Zellen (59

Brennstabzellen, 4 Steuerstab-Zellen und eine Detektor-Zelle), die in acht gekoppelten Zellreihen angeordnet werden. Ein Bild des gesamten BE würde sich ergeben, wenn dieses Viertel um seine untere rechte Ecke drei Mal rechtsläufig gedreht wird.

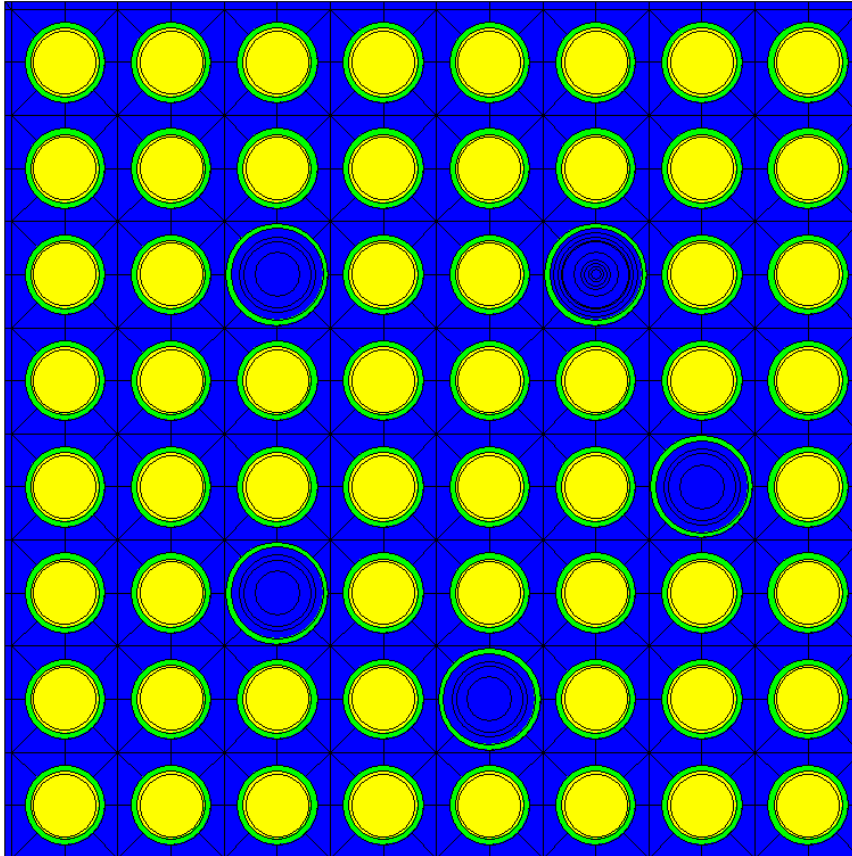


Abbildung 4-4: HELIOS Modell eines 16x16 BE (Viertel)

4.4 Entwicklung der INTERFACE Schnittstelle

Um die Auswertung, Verifikation und Einsatz der mit HELIOS erzeugten Daten in QUABOX/CUBBOX zu ermöglichen, war eine zusätzliche Schnittstelle zwischen ZENITH und dem 3D Diffusionsprogramm notwendig. Darüber hinaus sollten für detaillierte Ergebnisuntersuchungen mit einer Variation der wesentlichen physikalischen Parameter wie Abbrand, Moderatorichte, Borkonzentration, Brennstofftemperatur usw. die Wirkungsquerschnitte in eine geeignete Form umgewandelt werden. Um alle diese Schritte durchführen zu können und zu automatisieren, wurde mit der Programmiersprache FORTRAN die Schnittstelle INTERFACE entwickelt. INTERFACE führt mehrere Schritte durch: zuerst werden mit einer Schleife alle ZENITH Ausgabedaten gelesen und geprüft; in einem weiteren

Schritt werden die benötigten Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter D_1 , D_2 , $SIGA_1$, $SIGA_2$, $SIGR_1$, $SIGnF_1$, $SIGnF_2$, $SIGXE$ und NXE extrahiert und in entsprechenden Datenfeldern gespeichert. In dieser Form sind die Diffusionsparameter nur vom Abbrand und der Moderatorichte abhängig. Um neutronenphysikalische Rechnungen durchführen zu können, müssen auch zusätzliche Entwicklungskoeffizienten erzeugt werden, die den Einfluss weiterer Parameter wie der Brennstofftemperatur, Borkonzentration usw. beschreiben. Üblicherweise werden diese Koeffizienten mit einem zusätzlichen Programm (TABGEN) erzeugt, das eine Strukturierung der Wirkungsquerschnittsdaten in tabellarischer Form und eine Generierung aller Entwicklungskoeffizienten ermöglicht. Da TABGEN nicht zu Verfügung stand, war eine Weiterentwicklung von INTERFACE notwendig. Für das Ziel wurden mit zusätzlichen Algorithmen mehrere mathematische Gleichungen zur Berechnung einzelner Koeffizienten programmiert. Sämtliche Daten werden in eine geeignete Form für GENLIB² und QUABOX/CUBBOX umgewandelt. Der mit dem INTERFACE erstellte Brennelementdatensatz enthält die kompletten Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter für die berechnete Brennelementkonfiguration und kann direkt für die makroskopische Wirkungsquerschnittsbibliothek von QUABOX/CUBBOX eingesetzt werden. Dadurch wurden auch die Analyse der Ergebnisse und die Durchführung einer Zellrechnungsverifikation mit QUABOX/CUBBOX ermöglicht. Die Struktur des Brennelementdatensatzes, eine kurze Beschreibung des Interpolationsprogramms GENLIB sowie Informationen über die Anwendung der Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter in QUABOX/CUBBOX sind in Anhang A angegeben.

4.5 Verifikation der Zellrechnungen

Das übergeordnete Ziel der Verifikation der Zellrechnungen war eine Erstellung zweier verifizierter HELIOS Eingabedaten (BE ohne und mit Absorber), die später für die Variationsrechnungen mit verschiedenen Absorberstabkonfigurationen verwendet werden können. Für das Ziel wurden die bestehenden HELIOS Eingabedaten

² GENLIB ist eine QUABOX/CUBBOX Subroutine zur Interpolation der nuklearen Wirkungsquerschnitte

modifiziert und erweitert. Es wurden u. a. zahlreiche neue Materialien modelliert, zusätzliche Moderator- und Brennstofftemperaturen sowie entsprechende Temperaturverteilungen definiert. Insgesamt wurden in den HELIOS Eingabedaten 24 Reaktorzustände beschrieben und 72 Verzweigungspunkte programmiert. Um eine Berücksichtigung der Gd-Selbstabschirmung zu ermöglichen, wurde die $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ Mischung mit sechs Ringzonen aufgeteilt.

Zur Verifikation dieser Eingabedaten wurden Zellrechnungen mit den neuen Eingabedaten durchgeführt und die Ergebnisse mit den Ergebnissen eines deutschen Energieversorgungsunternehmens (EVU), verglichen. Diese Ergebnisse wurden ebenfalls mit HELIOS erzeugt, jedoch mit einer älteren Version (HELIOS 1.7). Darüber hinaus sind auch die mikroskopischen Wirkungsquerschnittsbibliotheken, unterschiedlich. HELIOS 1.7 basiert auf einer 45-Gruppenbibliothek während HELIOS 1.8 eine 47-Gruppenbibliothek verwendet. Die Analysen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den mit den neuen Eingaben erzeugten Ergebnissen und den EVU-Ergebnissen. Abbildung 4-5 zeigt den k_{inf} -Vergleich für das Brennelement mit Absorber.

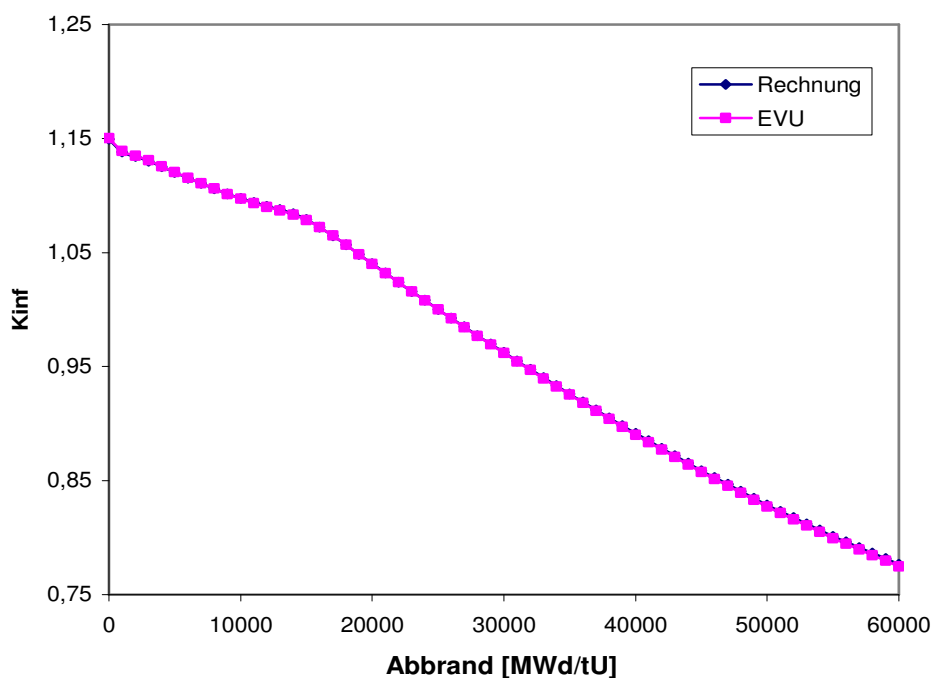


Abbildung 4-5: Vergleich der k_{inf} für ein Gd-Brennelement bei Moderator-dichte 0.712 g/cm^3 , Brennstofftemperatur 650 °C, Bor 1100 ppm

Da die Wirkungsquerschnitte letztendlich für einen Einsatz in der makroskopischen Bibliothek des QUABOX/CUBBOX vorgesehen waren, wurde eine zusätzliche

Verifikation mit Hilfe des 3D Kernmodells durchgeführt. Dafür wurde eine modifizierte makroskopische Wirkungsquerschnittsbibliothek erzeugt, in der die Daten aller Gd-Brennelemente mit den berechneten Daten ersetzt wurden. Auf diese Weise wurden in der simulierten Kernkonfiguration eines Standard-DWR 56 Gd-Brennelemente (etwa 29% aller BE im Kern) mit den berechneten gleichen Gd-Brennelementen „ausgetauscht“. In einem nächsten Schritt wurden zahlreiche stationäre Diffusionsrechnungen mit der originalen und mit der modifizierten Bibliothek durchgeführt. Tabelle 4-1 zeigt k_{eff} Werte für verschiedene Reaktorzustände und die aufgetretenen Abweichungen.

Tabelle 4-1: k_{eff} -Werte für repräsentative Zustände und aufgetretene Abweichungen

Leistung	Xe	Dichte	Tbr	Bor	Keff	Keff	Abweichung
W/cm3		g/cm3	K	ppm	orig. Bibl.	mod. Bibl.	pcm
1.0E-05	Equil.	0,790	453	1070	1,02927	1,02874	53
91,448	Equil.	0,616	990	1000	0,98831	0,98830	1
91,448	Equil.	0,650	830	600	1,03091	1,03067	24
91,448	Equil.	0,670	800	400	1,05412	1,05380	32
91,448	Equil.	0,690	900	1200	0,99120	0,99111	9
91,448	Equil.	0,712	840	1139	1,00124	1,00107	17
91,448	Equil.	0,712	940	1139	0,99865	0,99858	7
91,448	Equil.	0,750	630	1070	1,01854	1,01816	38
91,448	Equil.	0,800	480	700	1,06711	1,06651	60

Auch die stationären 3D Vergleichsrechnungen ergaben eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Diffusionsrechnungen mit der modifizierten und der originalen Bibliothek. Die mit dem GENLIB und QUABOX/CUBBOX durchgeführten Vergleichsanalysen ergaben plausible Ergebnisse und zeigten, dass mit den vorbereiteten HELIOS Eingabedaten 2D und 3D Berechnungen mit sehr guter Genauigkeit durchgeführt werden können. Aus diesem Grund wurden sie als Basis für alle nachstehenden Zellrechnungen verwendet.

4.6 Einfluss wesentlicher Auslegungsparameter auf den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf}

Mehrere grundlegende Parameter müssen bei der Auslegung von BE mit abbrennbaren Absorbern betrachtet werden. Die wesentlichen sind die Absorberkonzentration, die Zahl der Absorberstäbe, deren Positionierung im BE, sowie die Brennstoffanreicherung des Gd-Brennstoffs. Um ihre Auswirkung auf den Neutronenmultiplikationsfaktor festzustellen, wurden einzelne Untersuchungen zum

Einfluss dieser Parameter durchgeführt. Die mit Gd und Er erzielten Ergebnisse wurden verglichen. Alle Untersuchungen wurden bei Moderatorichte 0.720 g/cm^3 , Brennstofftemperatur $840 \text{ }^\circ\text{C}$ und Borkonzentration 1100 ppm durchgeführt. Diese Werte entsprechen dem Nennbetrieb-Reaktorzustand.

4.6.1 Einfluss der Absorberverteilung im Brennelement

Um den Einfluss der Absorberverteilung im BE auf das k_{inf} -Verhalten zu untersuchen, wurden mehrere Zellrechnungen mit Gd und Er durchgeführt. Dafür wurden zwei BE-Konfigurationen ausgelegt: BE-Konfiguration mit 8 Stäben und 7% Absorbkonzentration und BE-Konfiguration mit 16 Stäben und 3.5% Absorbkonzentration. Der Absorbergehalt ist in den beiden Konfigurationen gleich und auch üblich für die derzeitigen DWR BE. Abbildung 4-6 zeigt die erzielten mit Gd und Er Ergebnisse.

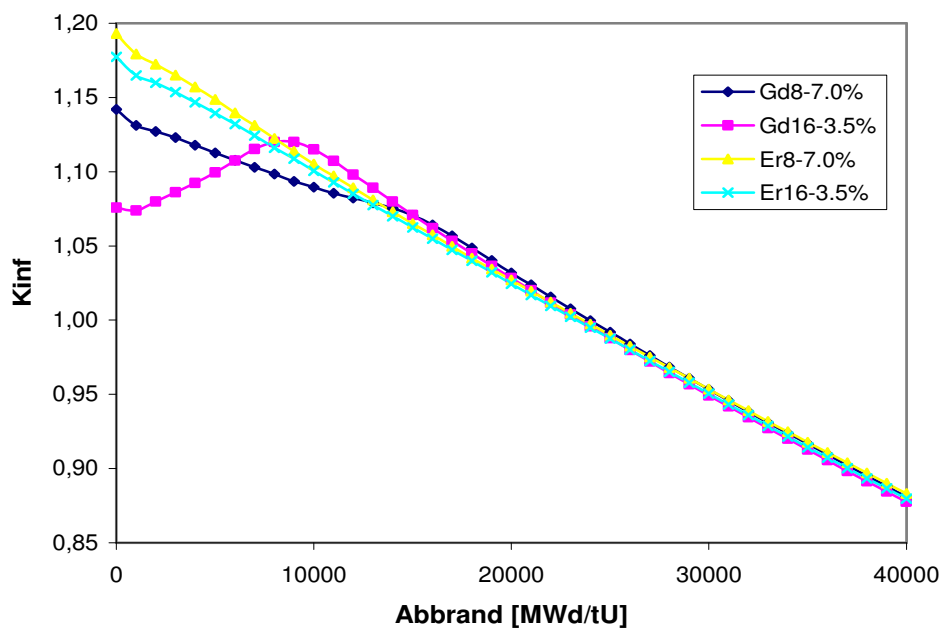


Abbildung 4-6: Einfluss der Absorberverteilung in BE bei üblichem Absorbergehalt

Obwohl die Absorbmenge in den untersuchten BE-Konfigurationen gleich ist, ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Absorber sowie deren Verteilung im BE wesentliche Unterschiede. Die Ergebnisse zeigen, dass die Absorberverteilung im BE beim Gd einen deutlich stärkeren Einfluss als beim Er hat. Die höhere Gd-Konzentration ist mit einem stärkeren Selbstabschirmungseffekt verbunden, weil in diesem Fall nur die äußere Schicht des Absorbers dem Neutronenfluss ausgesetzt

wird. Die Absorptionen finden überwiegend dort statt und nur wenige Neutronen erreichen die innere Materialzone. Mit der Zeit wird das Gd in den äußeren Schichten zu einem nicht absorbierenden Material umgewandelt. Erst dann erreichen die Neutronen die inneren Brennstoffschichten, wo jetzt die meisten Absorptionen stattfinden. Aus diesem Grund brennt das Gd in Konfigurationen mit einer hohen Konzentration deutlich langsamer ab. Das Gd in der Konfiguration mit 7% Gd_2O_3 brennt erst bei etwa 15.000 MWd/tU aus, und schon bei 9.000 MWd/tU in der Konfiguration mit 3,5% Gd_2O_3 . Bei kleineren Gd-Konzentrationen findet die Neutronenabsorption über den ganzen Querschnitt statt. Die Verteilung von Gd in kleineren Konzentrationen bewirkt eine intensivere Neutronenabsorption, die im ganzen Gd_2O_3 Material stattfindet und damit ist eine bessere Kompensation der Überschussreaktivität möglich. Aus diesem Grund ist bei 0 MWd/tU Δk_{inf} der beiden BE-Konfigurationen (7% und 3,5% Gd_2O_3) 6630 pcm.

Der Gd-Selbstabschirmungseffekt ist bei hohem Absorbergehalt noch stärker ausgeprägt (Abbildung 4-7). Der k_{inf} -Unterschied ist in diesem Fall $\Delta k_{inf} = 18984$ pcm.

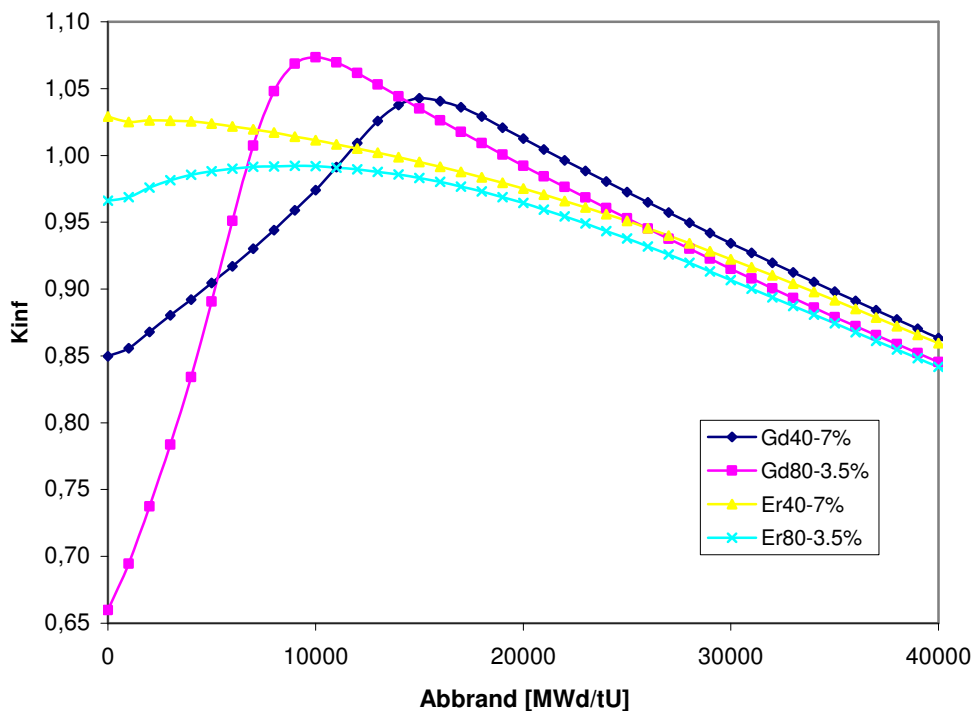


Abbildung 4-7: Einfluss der Absorberverteilung in BE mit hohem Absorbergehalt

Der Einfluss der Absorberverteilung im Er-Brennelement ist bei kleineren Absorberrmengen von untergeordneter Bedeutung. Der k_{inf} -Unterschied ist nur $\Delta k_{inf} = 1580$ pcm. Erst bei hohen Er-Gehältern im BE ist es möglich ein unterschiedliches

Abbrandverhalten zu beobachten. Darüber hinaus besitzt das BE mit 80 Er-Stäben bei 0 MWd/tU einen um 6291 pcm kleineren Neutronenmultiplikationsfaktor im Vergleich mit der 40-Stab-Konfiguration.

Die durchgeführten Analysen zeigen, dass der Einfluss der Absorberverteilung im BE auf das k_{inf} -Verhalten von BE mit Gd deutlich größer als bei BE mit Er ist. Der Selbstabschirmungseffekt ist für Gd-Brennelementkonfigurationen bereits bei kleineren und für das Er erst bei deutlich höheren Absorbermengen bemerkbar. Die Analysen zeigen, dass mit einer Gd-Aufteilung in mehreren Stäben mit kleiner Konzentration eine kleinere Selbstabschirmung und dadurch eine bessere Kompensation der Überschussreaktivität erreicht werden könnten.

4.6.2 Einfluss der Absorberstabzahl

Um den Einfluss der Absorber-Stubzahl auf k_{inf} zu untersuchen, wurden Eingabedaten für BE-Konfigurationen mit 7% Gd_2O_3 bzw. Er_2O_3 in 8, 12, 16, 20 und 24 Stäben vorbereitet. Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 zeigen die erzielten Ergebnisse.

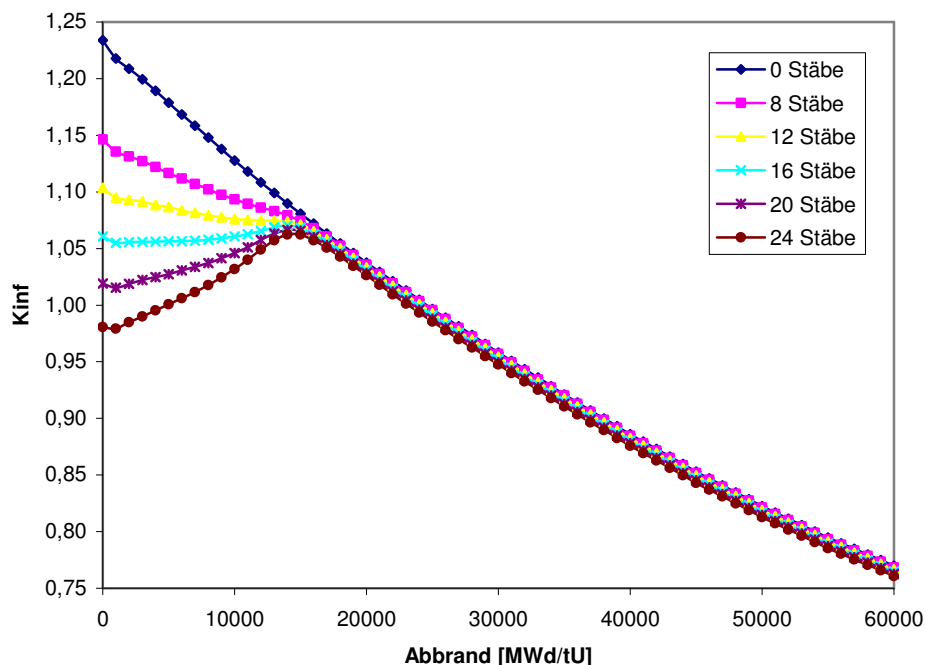


Abbildung 4-8: 16x16 BE mit 7% Gd_2O_3 in 8, 12, 16, 20 und 24 Gd-Stäben

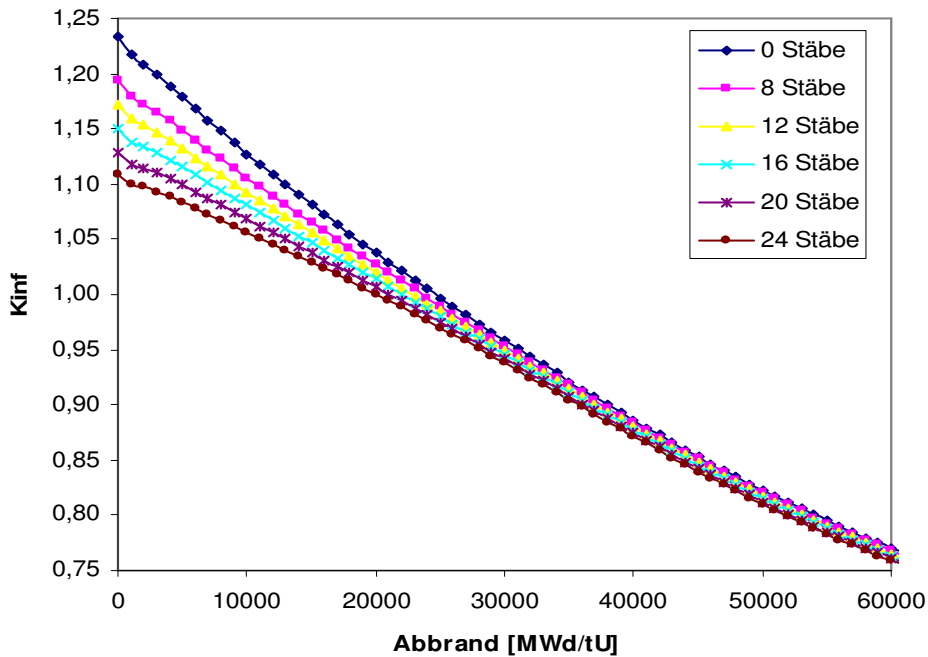


Abbildung 4-9: 16x16 BE mit 7% Er_2O_3 in 8, 12, 16, 20 und 24 Er-Stäben

Folgende Beobachtungen können gemacht werden:

- Bei 0 MWd/tU ist der Neutronenmultiplikationsfaktor umgekehrt proportional zu der Absorberstabzahl und diese Abhängigkeit ist fast linear. Das Gd absorbiert aufgrund seines größeren Absorptionswirkungsquerschnitts um etwa Faktor zwei stärker als Er. Die Gd-Konfiguration mit 8 Stäben ermöglicht etwa die gleiche Kompensation der Überschussreaktivität wie die Er-Konfiguration mit 16 Stäben.
- Im Gegensatz zum Er wird das k_{inf} -Abbrandverhalten von der Gd-Stubanzahl stark beeinflusst. Der Gd-Ausbrandpunkt für alle untersuchten Konfigurationen liegt bei etwa 15.000 MWd/tU. Das Er brennt eindeutig langsamer aus und es fehlt ein stark ausgeprägter Ausbrandpunkt.

- Die Gd-Stabanzahl hat einen Einfluss auf die Leistungsdichteverteilung innerhalb des BE. Mehrere Absorberstäbe bedeuten eine stärkere Inhomogenität und schließlich auch eine ungleichmäßigere Leistungsdichteverteilung im BE. Abbildung 4-10 zeigt die maximale Leistungsspitze innerhalb des BE für gleiche Gd- und Er-Konfigurationen mit 7% Absorbergehalt³.

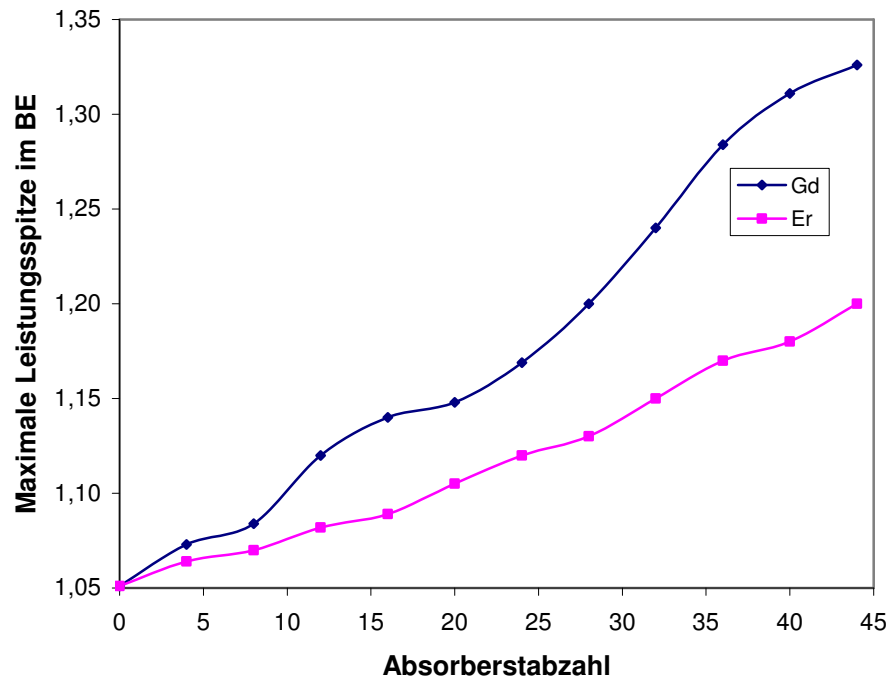


Abbildung 4-10: Leistungsspitze innerhalb des BE für Konfigurationen mit unterschiedlicher Absorberstabzahl

Brennelemente mit mehr als 28 Gd-Stäben erscheinen für die Auslegung eines DWR Kerns ungünstig zu sein, da die Leistungsspitzen zu hoch sind.

³ Die Absorberstäbe wurden gleichmäßig positioniert. Eine Spezielle Optimierung der Stabpositionierung wurde nicht durchgeführt.

4.6.3 Einfluss der Absorberkonzentration

Um den Einfluss der Absorber-Konzentration auf das Abbrandverhalten von k_{inf} zu untersuchen, wurden Zellrechnungen mit einer Variation der Absorberkonzentration durchgeführt. Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 zeigen die k_{inf} -Kurven für BE mit 3%, 6%, 9% und 12% Absorberkonzentration.

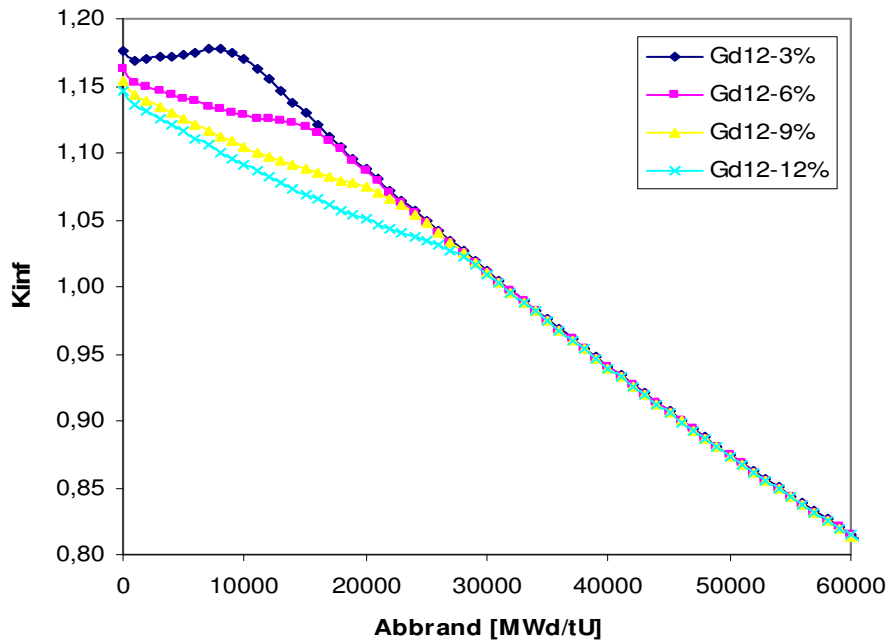


Abbildung 4-11: Einfluss der Gd-Konzentration auf k_{inf}

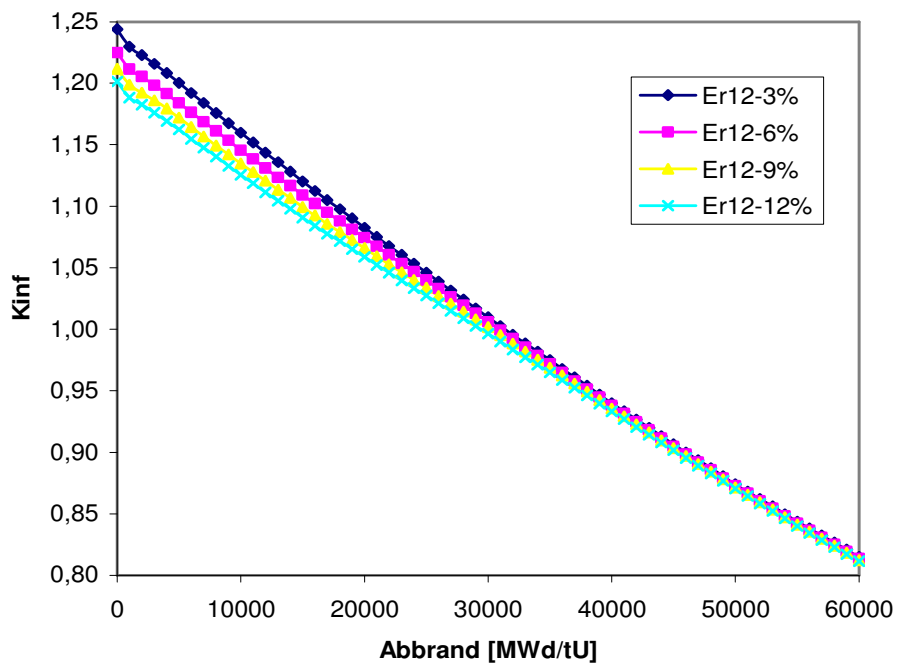


Abbildung 4-12: Einfluss der Er-Konzentration auf k_{inf}

Folgende Beobachtungen sind ersichtlich:

- Der Verlauf der k_{inf} -Kurven ist für die verschiedenen Gd-Brennelementkonfigurationen sehr unterschiedlich. Bei der Brennelementkonfiguration mit 3% Gd_2O_3 brennt das Gift bei etwa 8.500 MWd/tU aus und erst bei 28.000 MWd/tU für die Konfiguration mit 12%. Eine höhere Konzentration verursacht einen langsameren Abbrand des Absorbers und eine niedrigere Konzentration beschleunigt diesen Prozess. Diese Abhängigkeit ist dem Selbstabschirmungseffekt zuzuschreiben. Im Gegensatz zum Gd, hat die Er-Konzentration kaum bemerkbaren Einfluss auf seine Ausbrandrate.
- Der Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf} wird bei 0 MWd/tU von der Gd-Konzentration nicht so stark beeinflusst wie von der Gd-Stabzahl. Ein Übergang von 3% auf 6% Gd_2O_3 verkleinert den k_{inf} um 1420 pcm und eine Vervierfachung der Konzentration (3%-12%) – nur um 2960 pcm. Doppelt so hohe Absorberkonzentration bringt weniger negative Reaktivität bei den frischen BE als eine Verdopplung der Absorberstabanzahl. Für den Fall mit Er (3%, 6%, 9%, 12%) ergeben sich k_{inf} -Unterschiede in der Höhe von 1890 und 4250 pcm, d.h. bei einer steigenden Absorberkonzentration absorbiert das Er stärker im Vergleich mit Gd.
- Der k_{inf} -Unterschied zwischen 9% und 12% Gd_2O_3 ist nur 650 pcm, d.h. die negative Reaktivitätszufuhr pro % Gd_2O_3 sinkt mit der steigenden Konzentration. Dieser Zusammenhang ist auch für das Er gültig. Gd- und Er-Konzentrationen über 12% Gd_2O_3 erscheinen für die Ziele dieses Vorhabens von einer untergeordneten Bedeutung zu sein. Grund dafür ist die immer kleinere Absorptionsfähigkeit mit der steigenden Konzentration. Bei einer weiteren Erhöhung der Absorberkonzentration wird schnell eine Sättigungskonzentration erreicht und eine weitere Absenkung des k_{inf} wird unmöglich.

4.6.4 Einfluss der Urananreicherung

Einen wesentlichen Einfluss auf den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf} hat die Urananreicherung der absorberfreien Stäbe. Vier Brennelementkonfigurationen, jeweils mit 7% Gd bzw. Er in 12 Stäben wurden berechnet. Dabei wurde die Anreicherung der

absorberfreien Stäbe auf 2.0, 3.0, 4.0 und 5.0% gesetzt. Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 stellen die erzeugten Ergebnisse dar.

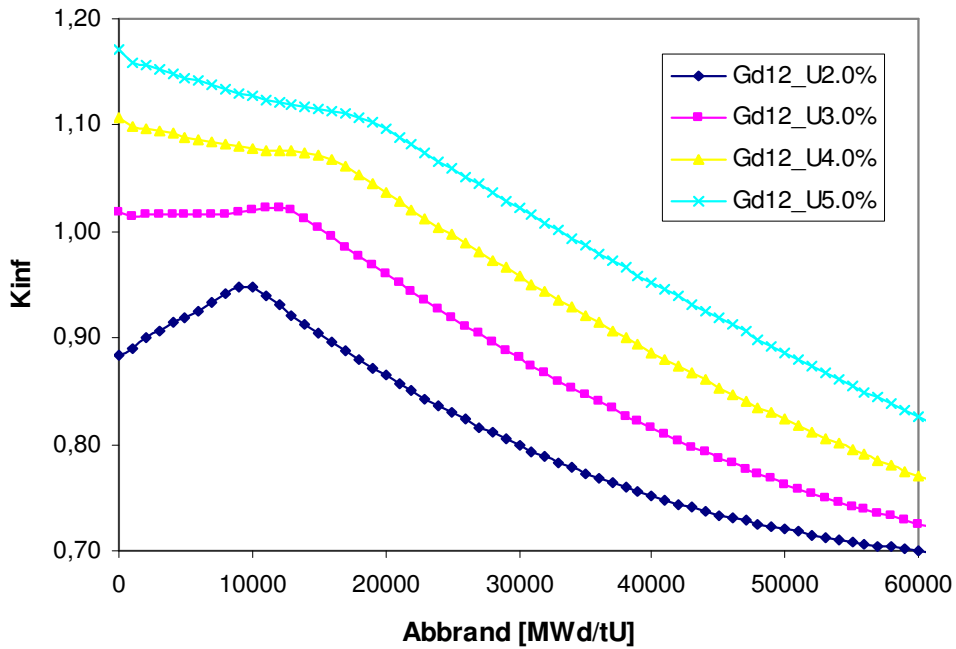


Abbildung 4-13: Einfluss der Urananreicherung der Gd-freien Stäbe auf k_{inf}

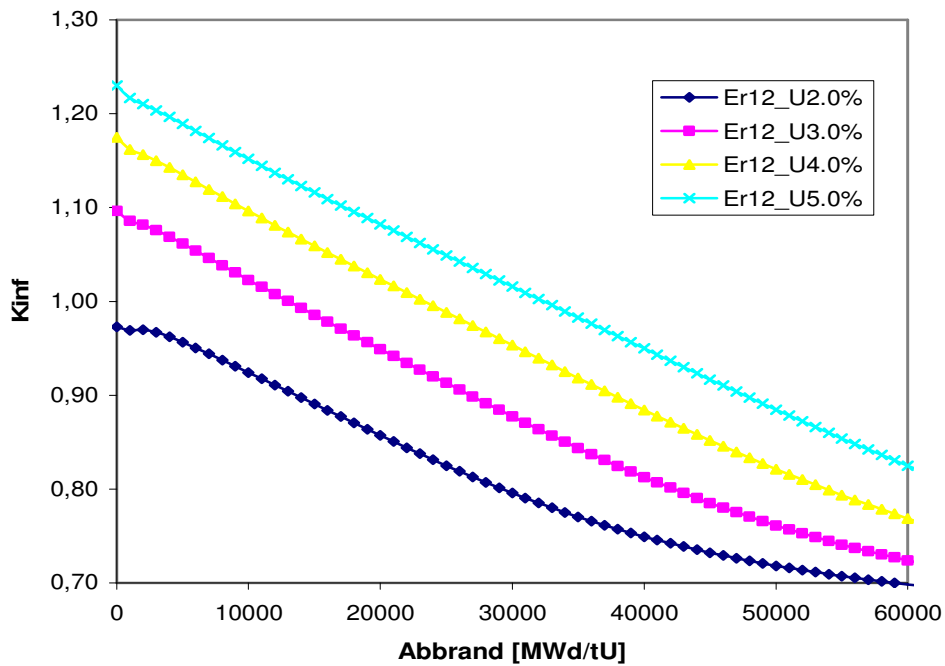


Abbildung 4-14: Einfluss der Urananreicherung der Er-freien Stäbe auf k_{inf}

Folgende Beobachtungen sind ersichtlich:

- Die Anreicherung der Gd-freien Stäbe hat einen signifikanten Einfluss auf k_{inf} . Grund dafür ist das Verhältnis Uranstäbe/Gd-Stäbe (224/12).
- Je niedriger die Anreicherung der Gd-freien Stäbe ist, desto stärker ist der Einfluss der Gd_2O_3 Mischung auf k_{inf} bei 0 MWd/tU. Der k_{inf} -Unterschied zwischen den Brennelementkonfigurationen mit 5.0 und 4.0% bei 0 MWd/tU ist 6300 pcm und zwischen 3.0 und 2.0% – 13498 pcm. Dieser Effekt kann auch bei Er beobachtet werden.
- Die ^{235}U -Anreicherung beeinflusst auch das Ausbrandpunkt des Gd - ein höherer ^{235}U -Gehalt führt zu einem langsameren Gd-Ausbrand und umgekehrt, ein kleinerer Gehalt – zu schnellerem Gd-Ausbrand. Dies kann beim Er nicht beobachtet werden, da dieser Absorber keinen ausgeprägten Ausbrandpunkt besitzt.
- Es besteht eine fast lineare Abhängigkeit zwischen der Anreicherung und dem Gd-Ausbrandpunkt. 1% ^{235}U verschiebt den Zeitpunkt des Absorberausbrands um etwa 2.000 – 3.000 MWd/tU.

4.6.5 Einfluss der Stabpositionierung

Ein weiterer Parameter, der bei der Brennelementauslegung berücksichtigt werden muss, ist die Positionierung der Absorberstäbe im BE-Gitter. Generell ist der Brennelementdesigner frei, beliebige Konfigurationen auszulegen. Es gibt aber eine Einschränkung, die berücksichtigt werden muss. Ein Gd-Stab darf nicht auf eine Position gestellt werden, die unmittelbar neben einem Führungsrohr ist und gleichzeitig auf derselben Reihe oder Spalte liegt. Falls der Steuerstab in den Kern eingefahren wird, wird die lokale Neutronenabsorption in diesem Bereich intensiviert. Dadurch ergibt sich eine ungleichmäßigere Leistungsdichteverteilung im BE und es können unerlaubte Leistungsspitzen entstehen. Weiterhin wird auch die Wirksamkeit des Steuerstabs verringert. Ferner ist es wichtig, Absorberstäbe möglichst symmetrisch zu verteilen. Sie sollen weder ganz am Rande noch im Zentrum des BE angeordnet werden. Durch eine symmetrische Positionierung der Absorberstäbe im Brennelementgitter wird eine flachere Leistungsdichteverteilung erreicht.

Um den Einfluss der Stabpositionierung zu untersuchen, wurden vier verschiedene Brennelementkonfigurationen (12 Stäben) mit Gd und Er berechnet und analysiert. Die Konfigurationen 1 und 3 haben eine gleichmäßige und die Konfigurationen 2 und 4 eine ungleichmäßige Absorberstabverteilung. Die HELIOS Modelle dieser BE sowie die Leistungsdichtemappen mit Gd und Er stehen in Anhang B. Abbildung 4-15 zeigt die k_{inf} -Kurven für die Gd- und Er-Konfigurationen.

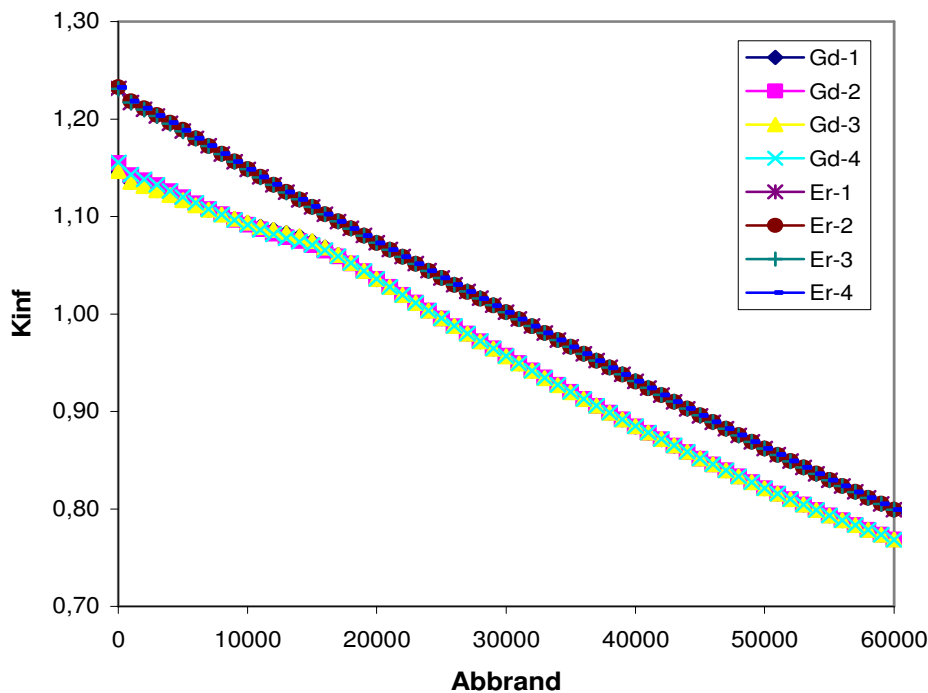


Abbildung 4-15: Einfluss der Absorberstabposition auf k_{inf}

Die mit HELIOS erzielten Ergebnisse zeigen folgendes:

- Die Stabpositionierung hat einen kleinen Einfluss auf k_{inf} und den Ausbrandpunkt des Gd. Darüber hinaus ist der Neutronenmultiplikationsfaktor von der Position der Er-Stäbe kaum abhängig.
- Die Konfigurationen mit Gd haben höhere maximale Leistungsspitzen als die Konfigurationen mit Er.
- Die Position der maximalen Leistungsspitze hängt stark von der Absorberstabanordnung und der Führungsrohrposition ab. Da in der Nähe der Führungsrohre eine bessere Moderation stattfindet, erzielen oft dort die Brennstäbe eine höhere Leistung.

4.7 Zusammenfassung

Es wurden HELIOS Eingabedaten für zwei BE entwickelt – BE mit und ohne Absorber. In den Simulationen wurde der Gd- bzw. Er-Absorber als homogen mit dem Brennstoff vermischt betrachtet. Da das DWR BE symmetrisch aufgebaut ist, wurde in HELIOS Eingabedaten nur einen Viertelkern modelliert. Um die Ergebnisse auswerten zu können und die erzeugten Wirkungsquerschnitte und schließlich k_{inf} gegen den Abbrand darzustellen, wurde die Schnittstelle INTERFACE programmiert. Ferner wurde eine Verifikation der Zellrechnungen durchgeführt. Die Vergleichsrechnungen ergaben eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und verifizierten Daten. Insgesamt wurden mit dem Zellcode HELIOS über 130 Uran- Gd- und Er-BE ausgelegt und entsprechende Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter erzeugt. Ein großer Teil davon wurde speziell für die Untersuchungen zur Auswirkung wesentlicher physikalischer Auslegungsparameter auf die bedeutendsten reaktorphysikalischen Größen vorbereitet. Dabei wurde die Zahl der Absorberstäbe, deren Positionierung im BE, die Absorberkonzentration sowie die Anreicherung der Uranstäbe variiert. Weiterhin wurde der Einfluss der Selbstabschirmung auf k_{inf} explizit analysiert. Die wesentlichen Unterschiede zwischen Gd und Er sind eine deutlich kleinere Absorptionsfähigkeit des Er aufgrund seines kleineren Absorptionswirkungsquerschnitts, langsamer Ausbrand und unterschiedliches Abbrandverhalten, sowie eine untergeordnete Bedeutung der Selbstabschirmung für BE-Konfigurationen mit diesem Absorber. Das Gd absorbiert bei gleichem Absorber-Gehalt stärker als Er. Dieser Effekt ist beim frischen Brennstoff besonders stark ausgeprägt und führt zu einer kleineren Überschussreaktivität, die letztendlich eine niedrigere Borkonzentration bedeutet. Ferner kann der Zeitpunkt seines Ausbrands mit einer Änderung der Absorberkonzentration beeinflusst werden. Im Vergleich zu Gd, ermöglicht der Einsatz von Er_2O_3 eine flachere Leistungsdichteverteilung und dadurch kleinere Leistungsspitzen innerhalb des BE.

5 Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz

Die DWR Kernauslegung ist eine komplexe Aufgabe, die aus mehreren wesentlichen Schritten besteht. Zunächst sind zur Berechnung reaktorphysikalischer Größen für Kernreaktoren nukleare Wirkungsquerschnitte erforderlich, welche die Reaktionen von Neutronen mit Atomkernen (Spaltstoffe, Strukturmaterialien, Absorber, Moderator usw.) beschreiben. Sie werden in mikroskopischen Wirkungsquerschnittsbibliotheken bereitgestellt und sind wesentliche Eingaben der Brennelementauslegungs-codes. Mit ihrer Hilfe werden Reaktivitäts- sowie Nuklidinventarberechnungen durchgeführt und letztlich Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter für Kernberechnungen bereitgestellt. Diese werden mit 3D Kernmodellen wie z.B. QUABOX/CUBBOX, SIMULATE und PRESTO durch die Lösung der Neutronendiffusionsgleichung mit zwei Energiegruppen durchgeführt. Dabei werden die Neutronenfluss- und Leistungsdichteverteilung im Kern berechnet. Ferner werden gekoppelte Thermohydraulik-Neutronenkinetik Codes verwendet, um Transienten und Störfälle realistischer zu simulieren.

Für die industrielle Auslegung eines heutigen DWR Kerns wird in einem ersten Schritt eine Schätzung des Belademusters zusammengestellt. Die im Kern verbleibenden BE des vorangegangenen Zyklus ergänzt um BE, die aus früheren Zyklen zum Wiedereinsatz kommen sollen, bilden zusammen mit den frischen Nachladeelementen das Brennelementinventar. Bei der ersten Schätzung eines Belademusters orientiert sich der Einsatzplaner an Beladeplänen früherer Zyklen mit vergleichbaren Randbedingungen wie Zyklusdauer, Leistungsspitzen usw. [Becker et al., 2001]. In diesem Fall muss der Brennstoff von etwa 1/4 aller BE mit Hilfe physikalischer Berechnungen festgestellt werden. Da für die Ziele dieser Arbeit einen neuen Gleichgewichtskern ausgelegt werden musste, fehlten die oben beschriebenen Informationen. Die Hauptproblematik bestand darin, eine geeignete Brennstoffkombination mit entsprechender Anordnung aller 193 BE zu ermitteln. Allein aufgrund der Positionierung der BE einer einzelnen Brennstoffkombination mit Berücksichtigung der Abbrandverteilung sind 37.249 (193x193) verschiedene Kernkonfigurationen möglich. Wird auch die Anordnung der Brennstäbe im BE variiert, ergeben sich 2.074.620.304 Beladungen. Die Anzahl der Brennstoffkombinationen ist wesentlich größer, da in diesem Fall mehrere Parameter wie Brennstoffanreicherung, Absorberstabzahl und Absorberkonzentration berücksichtigt werden müssen. Daraus

resultiert eine ungeheuerliche Anzahl von möglichen Kernkonfigurationen. Mit einer ausgewählten Brennstoffkombination und BE-Anordnung ist es aber trotzdem am Anfang nicht klar, ob unerwünschte Reaktivitätsanstiege im Laufe des Zyklus auftreten werden, ob die sicherheitstechnischen Randbedingungen erfüllt werden können oder ob überhaupt Kritikalität erreicht wird. Mit der zusätzlichen Anforderung für eine niedrige Borkonzentration am Zyklusbeginn erhöht sich die Komplexität der Aufgabe wesentlich.

Unter diesen Bedingungen ist das Optimierungsproblem für eine borarme DWR Kernkonfiguration numerisch nicht lösbar, wenn die Anzahl der Kernkonfigurationen nicht reduziert wird. Dazu wurde eine neue systematische Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz entwickelt. Sie basiert auf folgenden drei wesentlichen, eng mit einander verbundenen Schritten:

- Brennelementauslegung
- Orientierende Reaktivitätsbilanz
- Iteratives 3D Diffusionsverfahren

Diese Schritte werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

5.1 Brennelementauslegung

Ein breites Spektrum von 16x16 BE-Konfigurationen wurde vorbereitet und ihre Wirkungsquerschnitte erzeugt. Bei der Brennelementauslegung wurden wesentliche Parameter wie z.B. Absorberstabzahl, Absorberkonzentration, Stabpositionierung sowie die Anreicherung der absorberfreien Stäbe variiert. Um die möglichen Brennstoffzusammensetzungen für die DWR Kerne mit reduziertem Borsäureeinsatz zu begrenzen, wurde ein Brennstoffraster erstellt, das die Grenzwerte wesentlicher BE-Auslegungsparameter enthält (Tabelle 5-1). Diese Zahlen wurden auf der Basis der durchgeführten Zelluntersuchungen und Analysen mit HELIOS ermittelt.

Tabelle 5-1: Variation der wesentlichen BE-Auslegungsparameter

Auslegungsparameter	BE mit Gd ₂ O ₃		BE mit Er ₂ O ₃	
	min.	max.	min.	max.
Anzahl der Absorberstäbe	4	28	4	28
Absorberkonzentration [%]	3	9	3	9
²³⁵ U – Anreicherung, Uranstäbe [%]	2.2	5.0	2.2	4.8
²³⁵ U – Anreicherung, Absorberstäbe [%]	2.6	2.6	2.6	2.6
Absorberstabposition	nicht variiert		nicht variiert	
Axiale Profilierung	keine		keine	

Es wurden BE mit bis zu 28 Absorberstäben ausgelegt, da die früher durchgeführten Analysen zeigten, dass die maximale Leistungsspitze innerhalb des BE mit der steigenden Stabzahl zunimmt.

Die Absorberkonzentration wurde im Bereich 3 - 9% variiert. Kleinere Konzentrationen als 3% sind für die Ziele dieses Vorhabens von einer untergeordneten Bedeutung, da mit ihrer Hilfe eine erhebliche Absenkung der Borkonzentration im Primärkühlmittel nicht möglich ist. Dennoch könnten BE mit kleinen Konzentrationen in Kombination mit anderen Brennstofftypen im Kern eingesetzt werden, um das Abbrandverhalten von k_{eff} gezielt zu beeinflussen. Bei solchen BE-Konfigurationen brennt der Absorber aufgrund der kleineren Selbstabschirmung deutlich schneller aus.

Als obere Konzentrationsgrenze wurde 9% gewählt. Derzeit liegt für diesen Gd-Gehalt eine Genehmigung vor und der Einsatz ist in den nächsten Jahren bei einer Anlage vorgesehen. Noch höhere Absorber-Konzentrationen, z.B. 12 %, sind im Augenblick eher als akademisch zu betrachten [AREVA-2004]. Darüber hinaus haben auch die bisherigen Untersuchungen gezeigt, dass eine Erhöhung der Konzentration über 9% eine sehr geringe Verkleinerung des k_{inf} bei 0 MWd/tU verursacht. Die hohen Absorberkonzentrationen sind auch mit einigen Nachteilen verbunden. Diese werden näher in Kap. 9 analysiert.

Ferner wurde die ²³⁵U-Anreicherung aller BE im Bereich 2.0 - 5.0% variiert. Die Urananreicherung der Absorberstäbe wurde aufgrund der sinkenden Brennstofftemperatur immer auf 2.6% gesetzt. Um unnötige Leistungsdichtebegrenzungen in der Einsatzplanung zu vermeiden, ist es üblich, bei höheren Absorberkonzentrationen (z.B. 7-9 %) die ²³⁵U Anreicherung in den

absorberhaltigen Pellets niedriger zu wählen als in den Uran-Pellets. Damit ist über die gesamte Einsatzzeit sichergestellt, dass die lokale Leistung in den absorberhaltigen Pellets deutlich niedriger ist. Derzeit ist die ^{235}U -Anreicherung der Gd-haltigen Stäbe max. 70 % der Anreicherung der Gd-freien Stäbe, d.h. bei einem BE mit 4.2% Anreicherung ist eine maximale ^{235}U -Anreicherung der Gd-Stäbe von 2.94% zulässig.

Die Stabpositionierung der Absorberstäbe wurde zunächst nicht variiert, da ihr Einfluss auf das k_{inf} -Verhalten von einer untergeordneten Bedeutung ist. Eine Optimierung der Absorberstabpositionierung wurde nur für die BE der endgültigen borarmen Kernkonfigurationen durchgeführt, um die maximale lineare Stableistung im Kern zu verringern.

5.2 Orientierende Reaktivitätsbilanz

Die Auswahl eines geeigneten Brennstoffs für die Auslegung des borarmen DWR Kerns ist eine komplexe Aufgabe. Da die Informationen über die Geschichte des Kerns (BE aus früheren Zyklen) fehlen ist es am Anfang nicht einfach diesen zu bestimmen. Darüber hinaus ist mit der ausgewählten Brennstoffkombination überhaupt nicht klar ob Kritikalität erreicht wird, ob unerwünschte Reaktivitätsanstiege im Laufe des Zyklus auftreten würden oder ob die sicherheitstechnischen Randbedingungen erfüllt werden können. Mit der zusätzlichen Anforderung für eine niedrige Borkonzentration am Zyklusbeginn wird diese Aufgabe noch schwieriger. Um diese Schwierigkeit zu überwinden und den ganzen Kernauslegungsprozess zu vereinfachen, wurde ein neues Konzept entwickelt, das auf einer abbrandabhängigen schrittweisen Berechnung des mittleren Neutronenmultiplikationsfaktors k_{inf} einer Brennstoffkombination beruht. Mit Hilfe von vorangehenden orientierenden Reaktivitätsuntersuchungen soll eine Erfolg versprechende Brennstoffkombination für den borarmen DWR Kern identifiziert und diese als Basis für die Diffusionsberechnungen benutzt werden.

Zunächst wurden mit Hilfe der mit HELIOS erzeugten Zwei-Gruppen-Diffusionsparametern die abbrandabhängigen k_{inf} -Kurven zahlreicher BE vorbereitet. Bei deren Erzeugung wurden die wesentlichen reaktorphysikalischen Parameter wie z.B. Moderatorichte, Brennstofftemperatur usw. auf ihre Referenzwerte für den Reaktorzustand Vollast heiß gesetzt. Um den Boreinfluss zu eliminieren, wurde die Borkonzentration auf 0 ppm gesetzt.

Am Anfang wurde eine einfache Brennstoffkombination von nur zwei BE (Uranbrennelement mit 2.6% ²³⁵U-Anreicherung und Gd-Brennelement mit 32 Gd-Stäben) untersucht. Als eine erste Näherung kann der Neutronenmultiplikationsfaktor dieser Brennstoffkombination als Mittelwert der beiden k_{inf} für jeden Abbrandschritt nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$k_{inf}^{mittel} (BUR) = (k_{inf}^{uran} (BUR) + k_{inf}^{Gd} (BUR))/2$$

Abbildung 5-1 zeigt die k_{inf} -Kurven der untersuchten BE.

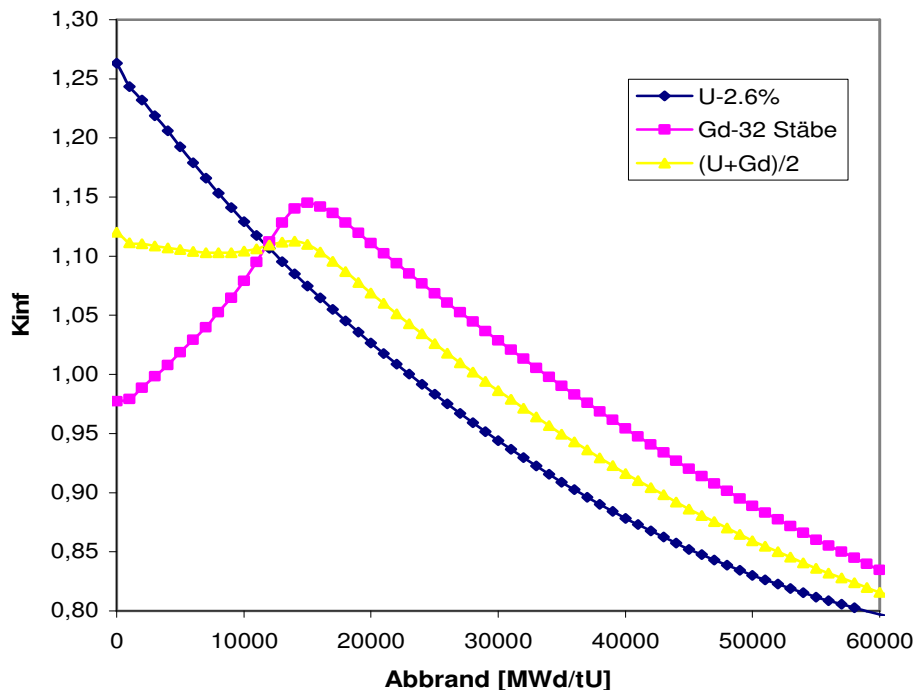


Abbildung 5-1: k_{inf} -Kurven der BE der untersuchten Brennstoffkombination

Mit einer einfachen Mittelung kann diese Gleichung für eine beliebige Anzahl von Brennelementtypen weiterentwickelt werden:

$$k_{inf}^{mittel} (BUR) = (k_{inf}^{typ1} (BUR) + k_{inf}^{typ2} (BUR) + k_{inf}^{typ3} (BUR) + \dots + k_{inf}^{typn} (BUR)) / n$$

wobei n die Anzahl der verschiedenen Brennstofftypen ist.

Eine ähnliche Methode zur orientierenden Reaktivitätsbilanz wurde in [Kim, 1998] für einen borfreien 600 MW_e DWR vorgeschlagen. Sie wurde für die Bestimmung der Brennstoffe für Batch 2. und 3. verwendet. Batch 1. wurde sogar intuitiv ausgewählt.

Das Konzept der Reaktivitätsbilanz ist ein sehr vereinfachtes Vorgehen, da die Effekte der räumlichen Anordnung der BE nicht berücksichtigt werden können. Es darf auch nicht vergessen werden, dass die erzeugten k_{inf} -Kurven ein Ergebnis der 2D Zellrechnungen sind. Da diese für ein unendlich ausgedehntes Gitter durchgeführt worden sind, wird die Neutronenleckage auch hier nicht berücksichtigt.

5.3 Erweiterung und Optimierung der orientierenden Reaktivitätsberechnungen für DWR mit reduziertem Borsäureeinsatz

Für eine realistischere Berücksichtigung der tatsächlichen Auslegungsrandbedingungen musste dieses Konzept weiterentwickelt werden. Die BE, die sich in einem realen Kern befinden, bestehen nicht nur aus unterschiedlichen Brennstoffen sondern haben auch verschiedene Abbrände. Da die derzeitigen DWR Anlagen meist mit einer 4-Batch Beladestrategie gefahren werden, wurden auch für dieses Konzept vier theoretische Batches definiert. Die Analysen realer Kernkonfigurationen zeigen, dass der Abbrand der BE zu Beginn ihres 2. Zyklus zwischen 13.000 und 16.000 MWd/tU, des dritten zwischen 25.000 -30.000 MWd/tU und des vierten zwischen 40.000 und 44.000 MWd/tU liegt. Aus diesem Grund wurde angenommen, dass sich der Abbrand der BE in den vier verschiedenen Batches ungefähr mit 15.000 MWd/tU im Laufe eines Zyklus erhöht. Tabelle 5-2 zeigt die angenommenen mittleren Abbrandwerte für jedes Batch am Zyklusbeginn und Zyklusende.

Tabelle 5-2: Mittlere Abbrandwerte für die vier Batches

Batch	Zyklusbeginn	Zyklusende
1	0.000 MWd/tU	15.000 MWd/tU
2	15.000 MWd/tU	30.000 MWd/tU
3	30.000 MWd/tU	45.000 MWd/tU
4	45.000 MWd/tU	60.000 MWd/tU

Diese Abbrandaufteilung wird nun in der k_{inf} -Gleichung berücksichtigt:

$$k_{inf} = (k_1(BUR)*b_1 + k_2(BUR)*b_2 + k_3(BUR)*b_3 + k_4(BUR)*b_4)/193$$

wobei $k_i(BUR)$ der k_{inf} -Wert für das BE im Batch i mit dem Abbrand BUR ist, b_i die Anzahl der BE in diesem Batch und 193 die Anzahl aller BE in einem typischen deutschen 1300 MWe DWR Kern ist.

Dieses Konzept kann jetzt für eine beliebige Anzahl von Brennelementtypen und Batches weiterentwickelt werden. Für eine 4-Batch Kernkonfiguration mit 2 verschiedenen Brennelementtypen bekommt sie die folgende Form:

$$k_{inf} = (k_{11}(BUR)*b_{11} + k_{21}(BUR)*b_{21} + k_{12}(BUR)*b_{12} + k_{22}(BUR)*b_{22} + k_{13}(BUR)*b_{13} + \\ + k_{23}(BUR)*b_{23} + k_{14}(BUR)*b_{14} + k_{24}(BUR)*b_{24})/193$$

$$b_{11} + b_{21} + b_{12} + b_{22} + b_{13} + b_{23} + b_{14} + b_{24} = 193$$

Der erste Index zeigt den Brennelementtyp und der zweite den Batch in dem sich das BE befindet.

Um die k_{inf} -Gleichung schnell für beliebige Kernkonfigurationen zu lösen, wurde mit der Programmiersprache FORTRAN das Programm REBA (*REactivity BALance*) entwickelt. REBA berechnet den k_{inf} für ein 4-Batch Schema mit zwei Brennelementtypen (Typ 1 und Typ 2). Zunächst werden die k_{inf} -Kurven sowohl für Uranbrennelemente mit unterschiedlichen ^{235}U -Anreicherungen (Typ 1) auch für Gd-Brennelementkonfigurationen mit 8, 12, 16, 20, 24 und 28 Absorberbrennstäben (Typ 2) erzeugt und in entsprechenden Dateien gespeichert. Die Anzahl der BE der beiden Typen muss für jedes Batch der untersuchten Kernkonfiguration definiert werden. In einem ersten Schritt findet das Programm die k_{inf} -Werte für alle BE bei 0, 15.000, 30.000 und 45.000 MWd/tU (Zyklusbeginn). Nach der Berechnung und Abspeicherung des mittleren Neutronenmultiplikationsfaktors k_{inf} der untersuchten Brennstoffkombination wird der Abbrand um 1.000 MWd/tU erhöht (1.000, 16.000, 31.000 und 46.000 MWd/tU) und es wird wieder ein mittlerer k_{inf} -Wert berechnet. Auf diese Weise werden 15 Schritte mit je 1.000 MWd/tU gemacht, um die k_{inf} -Kurve der untersuchten Brennstoffkombination für den gesamten Zyklus zu ermitteln.

Ein Algorithmus mit 10 Schleifen zur schnellen Generierung verschiedener Brennelementkombinationen bzw. Kernkonfigurationen wurde entwickelt und in REBA integriert. Mit seiner Hilfe werden alle möglichen Kombinationen der vorgegebenen Brennstoffe generiert. Abbildung 5-2 zeigt den allgemeinen Algorithmus für zwei Reihen von Brennelementtypen – Uran und Gd.

Batches mit 48 und einen Batch mit 49 BE. Weiterhin muss die Zahl der BE der verschiedenen Typen in allen Batches gleich sein. Wenn der Kernkonfigurationsgenerator alle diese Kombinationen abgespielt hat, werden die Parameter sowie die Entwicklung der k_{inf} -Kurve im Laufe des Zyklus der Kernkonfiguration mit dem kleinsten k_{inf} am Zyklusbeginn gespeichert. Die wesentlichen Parameter der Kernkonfiguration – Brennstofftypen und deren Aufteilung in den verschiedenen Batches werden später für die Erstellung der Eingabedaten für den Diffusionscode QUABOX/CUBBOX benutzt.

Abbildung 5-3 zeigt das Schema des Programms REBA.

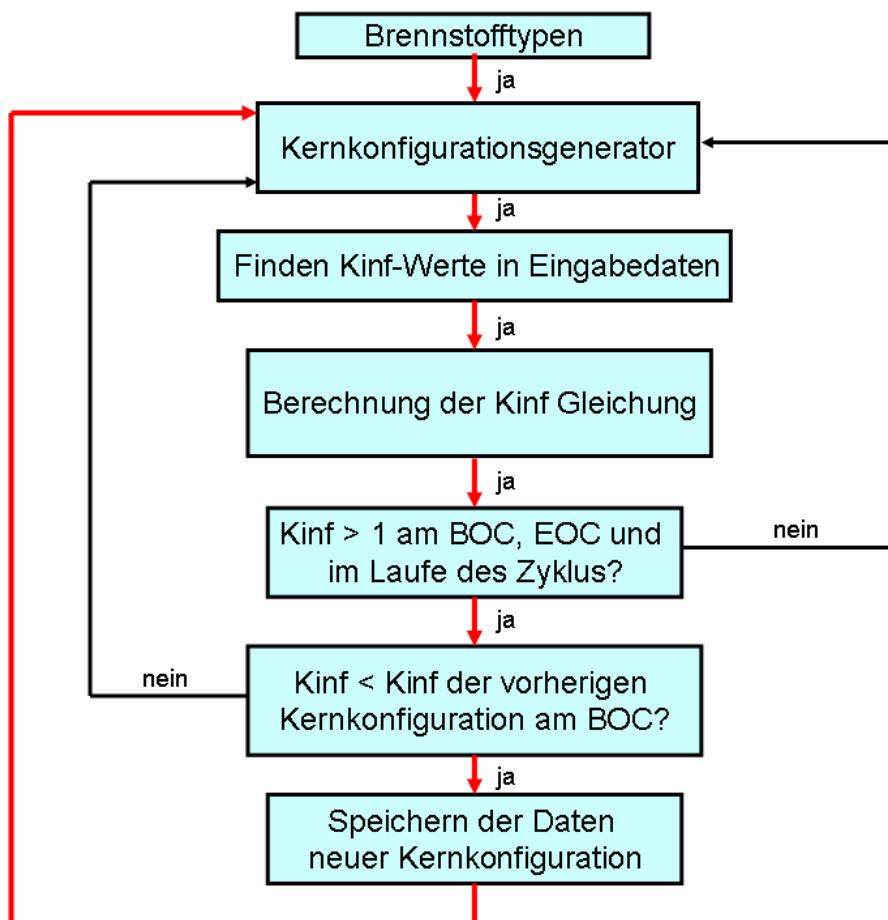


Abbildung 5-3: Schema des Programms REBA

5.4 Vergleichsrechnungen und Ergebnisse

Um die Eignung der beschriebenen Methode zur Abschätzung des k_{inf} -Verhaltens bestimmter Kernkonfigurationen zu bewerten, wurden Vergleichsrechnungen mit REBA und QUABOX/CUBBOX durchgeführt. Ein direkter Vergleich zwischen den

Neutronenmultiplikationsfaktoren k_{inf} und k_{eff} ist nicht korrekt, da diese Größen für unterschiedliche reaktorphysikalische Probleme verwendet werden. Auf diese Weise könnten aber die mit der vorgeschlagenen Näherung erzielten Ergebnisse geprüft werden.

Zunächst wurde eine sehr vereinfachte Kernkonfiguration modelliert, die nur aus Uranbrennelementen mit 3.95% ^{235}U -Anreicherung und einen konstanten Abbrand von 30.000 MWd/tU bestand. Mit Hilfe der Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter des Uranbrennstoffs wurde eine makroskopische Wirkungsquerschnittsbibliothek bereitgestellt und eine Kernkonfiguration in drei Dimensionen für QUABOX/CUBBOX vorbereitet. In einem weiteren Schritt wurde diese Kernkonfiguration modifiziert und die Hälfte aller Uranbrennelemente wurde durch Gd-Brennelemente ersetzt. Mit den beschriebenen Kernkonfigurationen wurden stationäre Rechnungen mit QUABOX/CUBBOX durchgeführt. Ein Vergleich der mit den beiden Verfahren erzielten Ergebnisse zeigt Tabelle 5-3.

Tabelle 5-3: Vergleich zwischen k_{inf} und k_{eff}

Kernkonfiguration	Abbrand	REBA, k_{inf}	Q/C, k_{eff}	Abweichung, pcm
Uran	alle BE mit 30.000 MWd/tU	0,9375	0,93110	985
Uran + Gd	alle BE mit 30.000 MWd/tU	0,9237	0,91385	640
Uran + Gd	alle BE mit 40.000 MWd/tU	0,8352	0,85625	2105

Um Vergleiche bei realistischeren Randbedingungen durchführen zu können, sollten auch die BE in den verschiedenen Batches mit unterschiedlichen Abbränden modelliert werden. Für das Ziel wurden Untersuchungen auf der Grundlage einer realen Kernkonfiguration durchgeführt. Die Abbrandprofile verschiedener BE wurden verglichen und analysiert. Die Untersuchungen zeigen, dass die axialen Profile von Uran- und Gd-BE in der Realität ähnlich sind. Deswegen wurden auf ihrer Basis vier repräsentative Abbrandprofile vorbereitet. Die BE in den verschiedenen Batches haben am Zyklusbeginn die folgenden mittleren Abbrände: 0 MWd/tU, 15.000 MWd/tU, 30.000 MWd/tU und 45.000 MWd/tU. Abbildung 5-4 stellt die vier verschiedenen Abbrandprofile dar.

In einem nächsten Schritt wurde eine Ganzkern-Abbrandrechnung mit dem Diffusionscode für den vorher untersuchten Urankern (alle BE mit 3.95% ^{235}U -Anreicherung) durchgeführt. Für dieses Ziel wurde der Eingabedatensatz entsprechend modifiziert, wobei als Zyklusdauer 300 VLT definiert wurde. Die genaue Brennelementanordnung im Kern wird in Abbildung 5-5 gezeigt.

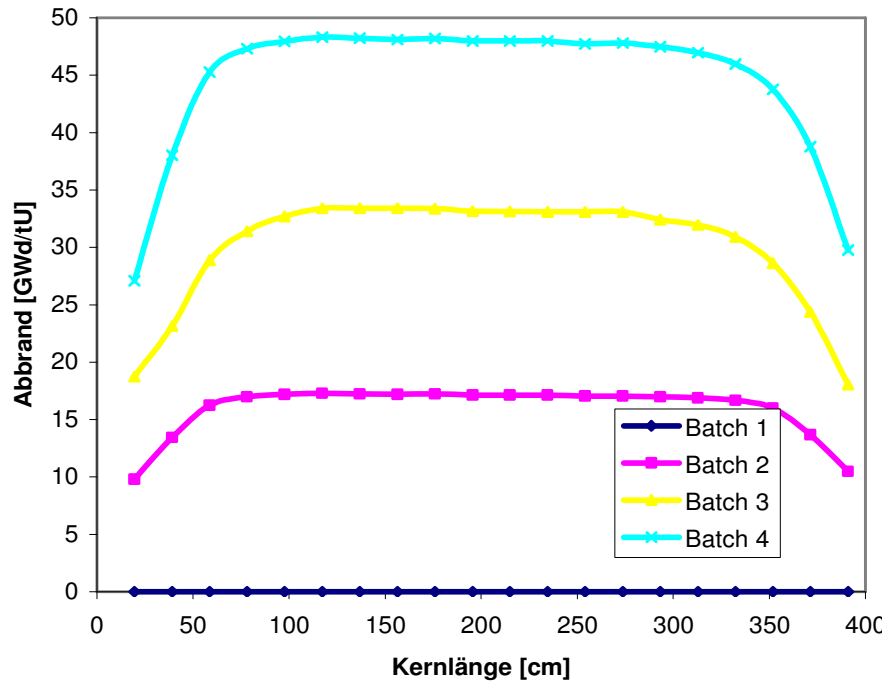


Abbildung 5-4: Abbrandprofile für die vier Batches

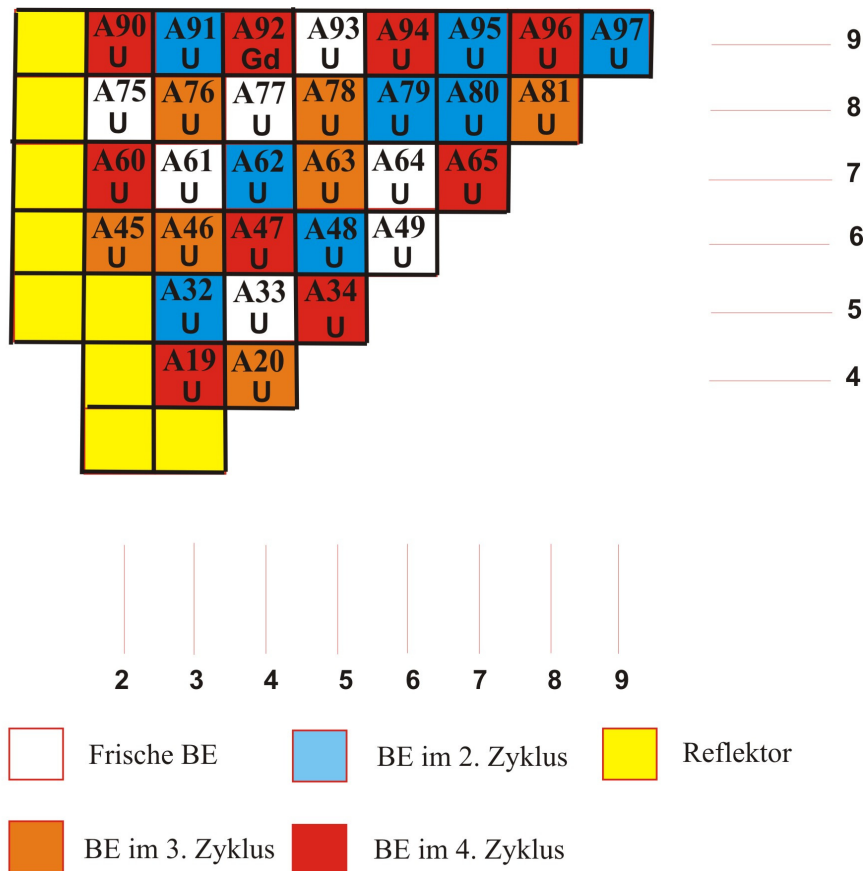


Abbildung 5-5: Anordnung der Uranbrennelemente in dem untersuchten Kern

Eine gute Übereinstimmung zwischen den mit den beiden Programmen erzielten Ergebnissen kann beobachtet werden. Von 0 bis 60 VLT nähern sich die beiden Kurven und die Unterschiede liegen im Bereich 180 - 480 pcm. Ab etwa 75 VLT unterschätzt REBA immer stärker den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} . Der größte Unterschied zwischen k_{inf} und k_{eff} tritt bei etwa 300 VLT auf und beträgt 1133 pcm (Abbildung 5-6).

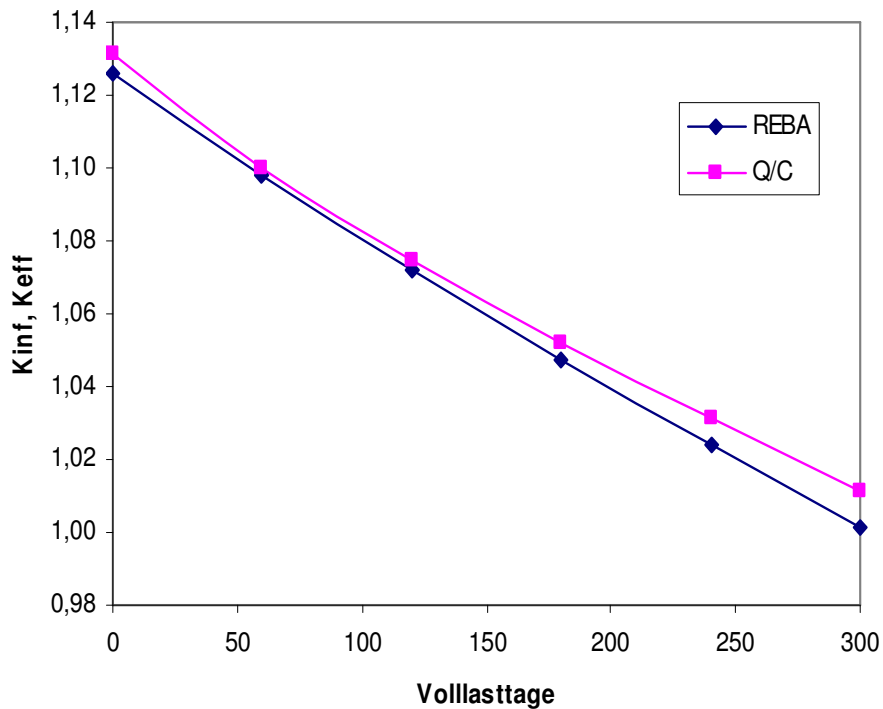


Abbildung 5-6: Vergleich zwischen k_{inf} und k_{eff}

Eine Abweichung von 1000 pcm ist für die industrielle Auslegung eines DWR nicht akzeptabel, da solche Unterschiede zu ungenauen Ergebnissen bei der Berechnung der kritischen Borkonzentration sowie der Zyklusdauer führen werden und dies den wirtschaftlichen Betrieb sowie die Revisionsplanung der DWR Anlagen beeinträchtigen kann. Solche Abweichungen sind aber für erste Orientierungsrechnungen zulässig. Mit der Reaktivitätsbilanz sollen Erfolg versprechende Brennstoffkombinationen für die Reduzierung der Überschussreaktivität bzw. der erforderlichen Borkonzentration im Primärkühlmittel identifiziert und untersucht werden.

5.5 Ermittlung Erfolg versprechender Brennstoffkombinationen und Auslegung erster DWR Kerne mit reduziertem Borsäureeinsatz

Es wurden zahlreiche Rechnungen und Untersuchungen mit dem Programm REBA durchgeführt. Orientierende Reaktivitätsbilanzen wurden sowohl für Uran-Gd-Kerne gemacht, auch für solche, die nur Gd-Brennelemente enthalten. Für REBA wurden die abbrandabhängigen k_{inf} -Kurven einer großen Brennstoffanzahl vorbereitet und mit ihrer Hilfe viele Kombinationen untersucht. Die erzielten Ergebnisse haben gezeigt, dass eine signifikante Reduktion der Überschussreaktivität am Zyklusbeginn nur durch einen Verzicht auf Uranbrennelemente ohne Absorber möglich ist. Darüber hinaus müssen Brennstoffe mit einem höheren Absorbergehalt verwendet werden.

Aufgrund der Untersuchungen mit dem Programm REBA wurde eine Erfolg versprechende Brennstoffkombination von zwei Brennstofftypen ermittelt – Gd12-9%-4.8⁴ (Typ 1) und Gd24-7%-3.0 (Typ 2). In dem borarmen Kern sollten 62,5% aller BE vom Typ 1 und die anderen 37,5% von Typ 2 sein. Auf Grundlage dieser Brennstoffzusammensetzung und einer „Checkerboard“-Kernkonfiguration wurden die QUABOX/CUBBOX-Eingabedaten einer ersten Gd-Kern mit reduziertem Borsäureeinsatz erstellt. Die radiale Leistungsdichteverteilung wurde am Zyklusbeginn optimiert und mit dem Diffusionscode wurde eine Abbrandrechnung durchgeführt. Abbildung 5-7 zeigt die genaue Anordnung der Gd-Brennelemente in einem 1/8 Kernsymmetriesektor. Mit T1 und T2 werden die beiden Brennelementtypen bezeichnet.

Ähnliche Untersuchungen wurden auch für Er durchgeführt. Die von dem Programm vorgeschlagene Brennstoffkombination bestand aus folgenden Brennelementtypen: Er28-7%-3.9 (87.5% aller BE) und Er28-9%-4.8 (12.5%). Mit dieser Brennstoffkombination wurden ebenfalls eine makroskopische Wirkungsquerschnittsbibliothek und eine 3D Kernkonfiguration vorbereitet.

⁴ Gd12-9%-4.8 bezeichnet ein 16x16 BE mit 12 Gd-Stäben mit jeweils 9% Gd₂O₃ und 4.8% ²³⁵U-Anreicherung der Uranstäbe

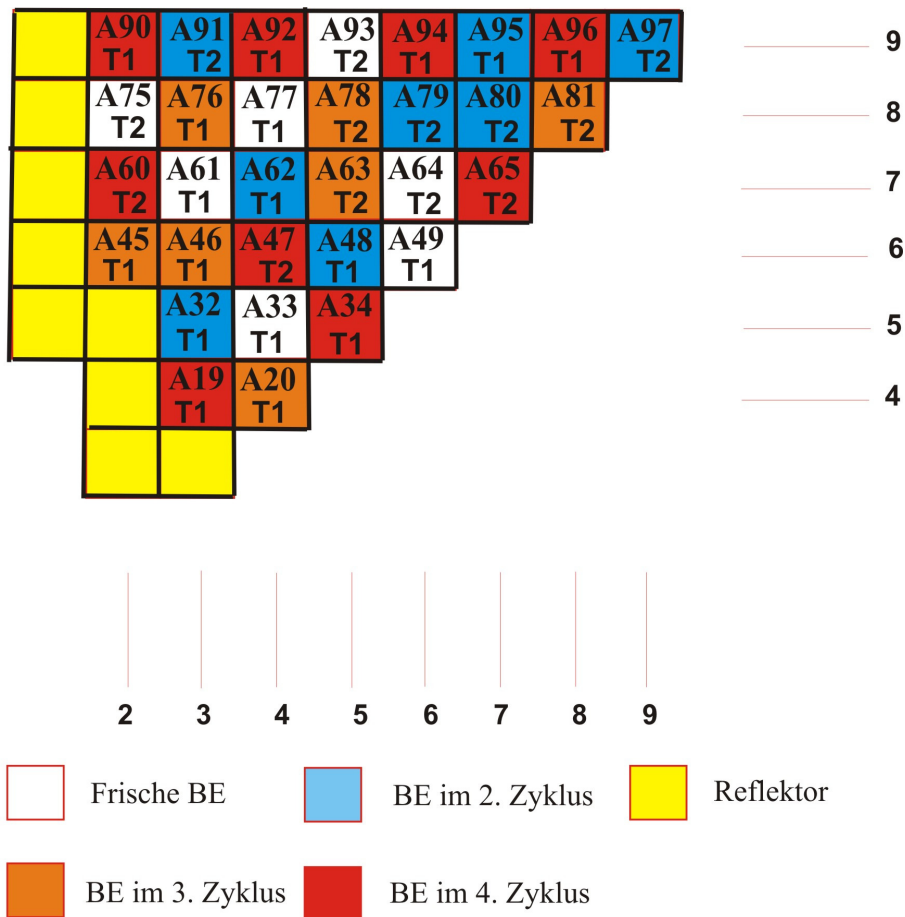


Abbildung 5-7: Kernkonfiguration mit der identifizierten Brennstoffkombination

Die Ergebnisse für die Gd-Konfiguration zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Neutronenmultiplikationsfaktoren am Zyklusbeginn und am Zyklusende (Abbildung 5-8). QUABOX/CUBBOX ermittelt für den Zyklusbeginn einen Neutronenmultiplikationsfaktor $k_{\text{eff}} = 1,05953$ und REBA - $k_{\text{inf}} = 1,05870$. Dadurch ergibt sich einen Unterschied von nur 83 pcm. Von 0 bis etwa 20 VLT ist die Übereinstimmung zwischen den beiden Kurven sehr gut. Ab diesem Zeitpunkt gehen sie bis zu 180 VLT auseinander, wo der maximale Unterschied von 1605 pcm auftritt. Ab 180 VLT nähern sich die beiden Kurven wieder an und am Zyklusende ist der die Differenz zwischen den beiden Neutronenmultiplikationsfaktoren nur 286 pcm.

Generell kann in dem Fall mit Er eine bessere Übereinstimmung zwischen den erzielten Ergebnissen beobachtet werden. Der größte Unterschied ergibt sich am Zyklusbeginn und beträgt 766 pcm. Mit dem steigenden Abbrand nähern sich k_{inf} und

k_{eff} an und am Zyklusende unterscheiden sich die beiden Neutronenmultiplikationsfaktoren nur um 260 pcm.

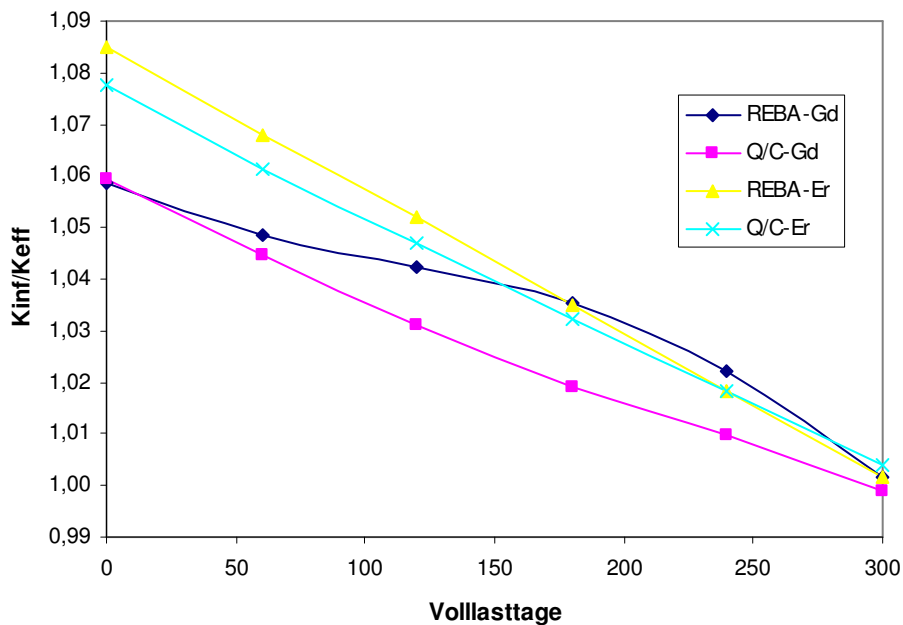


Abbildung 5-8: Vergleich zwischen k_{eff} und k_{inf} für die vorgeschlagene Kernkonfigurationen

Obwohl die Übereinstimmung am Zyklusbeginn und Zyklusende sehr gut ist, ist zu erwähnen, dass die Abweichungen zwischen 80 und 250 VLT relativ groß sind. In diesem Bereich überschätzt REBA den k_{eff} -Wert von QUABOX/CUBBOX. Mit REBA ist es nicht möglich, die Effekte der räumlichen Anordnung des Brennstoffs sowie die Leckage vom Reaktor zu berücksichtigen. Dies gilt aber auch für den Er-Kern. Ein wesentlicher Grund für die bessere Übereinstimmung in diesem Fall könnte die einfachere Physik sein, die mit dem Ausbrennen des Er-Brennstoffs verbunden ist. Die k_{inf} -Kurven aller Er-Brennelemente fallen mit dem steigenden Abbrand kontinuierlich und monoton ab. Für den Gd-Kern ist die Reaktivitätsbilanz deutlich komplexer, da ein Teil der BE eine steigende Reaktivität hat, während die der restlichen absinkt.

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass aufgrund der vereinfachten Methode, das Programm REBA nur zu orientierenden Reaktivitätsbilanzabschätzungen verwendet werden kann. Mit seiner Hilfe wurden zwei Erfolg versprechende Kombinationen (Gd und Er) und erste Kernkonfigurationen mit reduziertem Borsäureeinsatz ermittelt. Trotzdem ist es mit einer solchen Näherung nicht möglich, das genaue k_{eff} -Verhalten von Kernen mit hohem Absorbergehalt zu berechnen.

Darüber hinaus können die Leistungsdichteverteilung und die anderen Auslegungsparameter nicht berücksichtigt werden.

5.6 Iteratives 3D Diffusionsverfahren

Um die DWR Auslegung mit einer Berücksichtigung der wesentlichen reaktorphysikalischen Parameter wie Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} , Leistungsdichteverteilung im Kern sowie Abbrandentwicklung im Laufe des Zyklus zu ermöglichen, musste die Methodik zur Optimierung der Kernauslegung erweitert werden. Für das Ziel wurde ein neues iteratives 3D Verfahren entwickelt. Es basiert auf mehreren Prozessen die eng mit der Berechnung, Optimierung und der Analyse dieser Parameter verbunden sind (Abbildung 5-9).

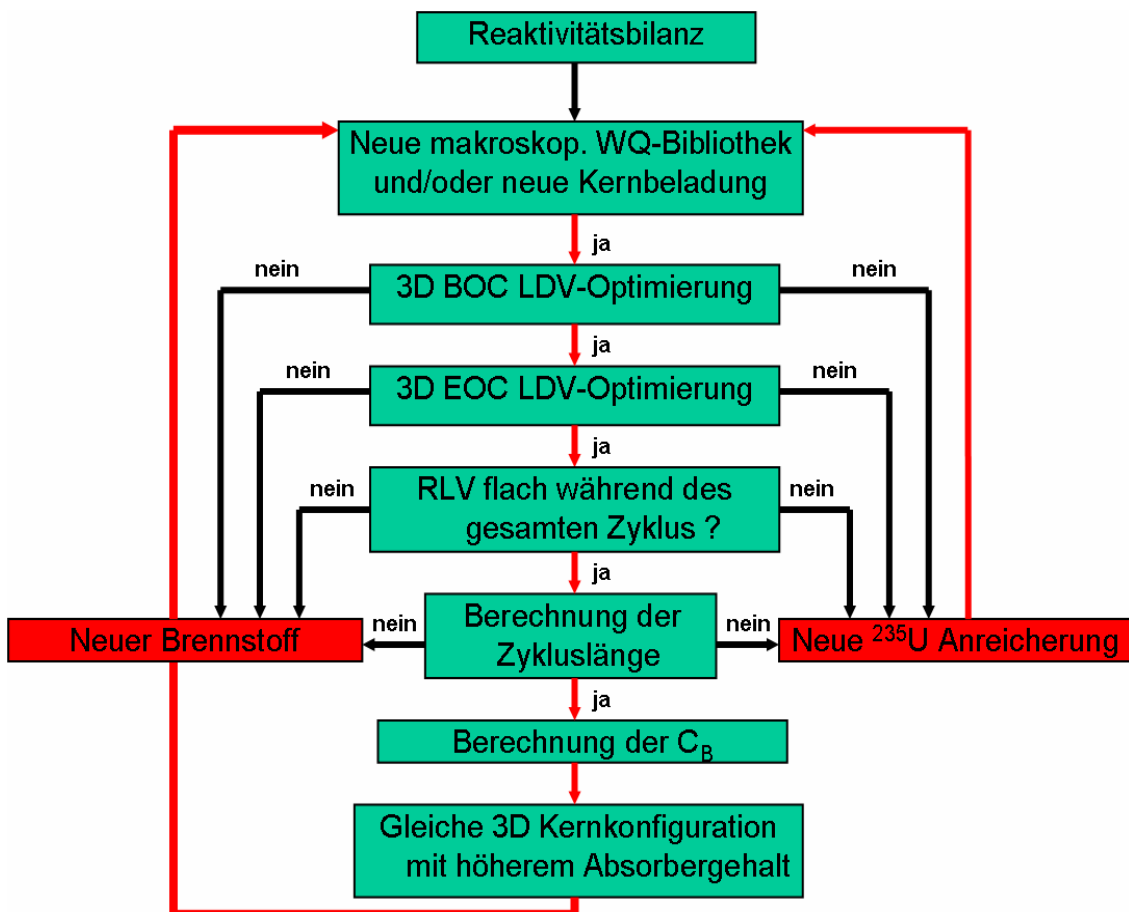


Abbildung 5-9: Iteratives 3D Diffusionsverfahren

Für die Durchführung dieser Prozesse sind sowohl stationäre als auch Abbrandrechnungen mit dem 3D Kernmodell QUABOX/CUBBOX notwendig. Ferner müssen die Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter verschiedener Brennstofftypen erzeugt

werden und mit ihrer Hilfe neue Wirkungsquerschnittsbibliotheken für die Diffusionsrechnungen erstellt werden. Nach jedem Schritt werden die erzielten Ergebnisse analysiert und die Konformität der berechneten Parameter mit den definierten Auslegungskriterien geprüft. Wenn diese nicht erfüllt werden können, muss eine neue Anordnung der BE gemacht oder ein neuer Brennstoff ausgelegt werden. Nach der Erfüllung aller Auslegungskriterien wird am Ende jedes erfolgreichen Zyklus der Absorbergehalt im Kern erhöht und danach werden die wesentlichen Auslegungsprozesse mit dem neuen Kern noch einmal durchgeführt. Mit jedem Zyklus sinkt aufgrund der größeren Absorbermenge die kritische Borkonzentration am Zyklusbeginn. Die verschiedenen Prozesse des iterativen 3D Diffusionsverfahrens werden durchgeführt bis eins der Auslegungskriterien nicht mehr erfüllt werden kann. Die optimierte Kernkonfiguration des letzten erfolgreichen Zyklus wird dann weiter untersucht und sicherheitsrelevante Parameter wie Abschaltreaktivität, DNB-Verhältnis, Steuerstabwirksamkeit usw. werden ermittelt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben kurz die einzelnen Prozesse des iterativen 3D Diffusionsverfahrens.

5.6.1 3D Optimierung der Leistungsdichteverteilung am Zyklusbeginn

Mit der von REBA identifizierten Brennstoffkombinationen wird eine 3D Kernkonfiguration für QUABOX/CUBBOX vorbereitet. Mit dem Code wird eine erste stationäre 3D Diffusionsrechnung durchgeführt um k_{eff} sowie die Leistungsdichteverteilung und die maximale Leistungsspitze am Zyklusbeginn zu berechnen. Nach entsprechenden Ergebnisanalysen wird u. a. geprüft, ob die Leistungsspitze in den vorgeschriebenen Grenzen liegt. Falls der Grenzwert überschritten wird, muss zuerst das BE mit der höchsten Leistung im Kern festgestellt werden. In einem weiteren Schritt wird die Leistungsdichteverteilung im Reaktorkern analysiert und die Regionen mit niedriger Leistung identifiziert. Das BE mit der maximalen Leistung wird dann mit einem BE aus solchen Regionen ersetzt. Auf diese Weise wird die Leistung in der höchstbelasteten Kernregion verkleinert und gleichzeitig in der anderen erhöht. Solche Optimierungen werden ausgeführt, bis sich im Kern eine flache Leistungsdichteverteilung einstellt und die Leistungsspitzen in den vorgeschriebenen Grenzen gehalten werden können. Falls sich die Leistungsdichteverteilung mit radialem Austausch der BE nicht optimieren lässt, muss

entweder die Urananreicherung der BE variiert oder ein ganz neuer Brennstoff eingesetzt werden.

5.6.2 3D Optimierung der Leistungsdichteverteilung am Zyklusende

Nach einer Abbrandrechnung mit QUABOX/CUBBOX wird auch eine Optimierung der Leistungsdichteverteilung im Kern für das Zyklusende durchgeführt.

5.6.3 Untersuchung der Leistungsdichteverteilung während des gesamten Zyklus

Flache Leistungsdichteverteilung am Zyklusbeginn und am Zyklusende bedeuten nicht automatisch eine flache Leistungsdichteverteilung während des gesamten Zyklus. Da die Optimierung am Zyklusende manchmal eine Verschlechterung der Leistungsdichteverteilung am Zyklusbeginn verursacht, muss am Zyklusbeginn die radiale Leistungsdichteverteilung der optimierten Kernkonfiguration wieder untersucht werden. Dafür wird eine detaillierte Abbrandrechnung mit dem 3D Diffusionscode QUABOX/CUBBOX durchgeführt. Anschließend wird geprüft, ob die Leistungsspitzen während des gesamten Zyklus in den vorgeschriebenen Grenzen bleiben.

5.6.4 Berechnung der Zyklusdauer

Mit der detaillierten Abbrandrechnung wird automatisch auch die Zyklusdauer ermittelt. Einfluss auf die Zyklusdauer haben Vorschriften für Prüf- und Wartungsintervalle sowie die Höhe der Stromersatzbeschaffungskosten, letztere auch auf die Revisionszeitpunkte. In jedem Fall kann nur eine Einbeziehung aller Rahmenbedingungen zu einer Festlegung der Zyklusdauer führen, die eine wirtschaftlich optimale Lösung darstellt. Die derzeitige mittlere Zyklusdauer eines deutschen 1300 MWe DWR, der mit 12-Monats-Zyklus betrieben wird, beträgt in der Regel 330 VLT [E.ON - 2005]. Ein kürzerer Zyklus ist unerwünscht, da die Wirtschaftlichkeit der Anlage negativ beeinflusst wird. Der längere Zyklus ist für den Betrieb auch nicht unbedingt vorteilhaft, da die höhere Urananreicherung mit höheren Brennstoffkosten verbunden ist. Weiterhin wird für die Kompensation der am Zyklusbeginn höheren Überschussreaktivität eine höhere Borkonzentration notwendig.

5.6.5 Berechnung der kritischen Borkonzentration am Zyklusbeginn

Falls die Leistungsspitzen- und Zyklusdauer-Randbedingungen erfüllt werden können, wird die kritische Borkonzentration am Zyklusbeginn berechnet. Die stationäre Rechnung wird für einen steuerstabfreien Kern bei Xe-Gleichgewicht durchgeführt.

5.6.6 Erhöhung des Absorbergehalts

Um die erforderliche Borkonzentration am Zyklusbeginn weiter abzusenken, wird am Ende des Auslegungszyklus versucht den Absorbergehalt zu erhöhen. Für das Ziel werden entweder die Absorberstabzahl und/oder die Absorberkonzentration in den einzelnen BE erhöht. Mit dem neuen Brennstoff und der bestehenden Kernkonfiguration wird eine stationäre 3D Rechnung durchgeführt für den ersten Schritt des nächsten Auslegungszyklus. Für die optimierte Kernkonfiguration des letzten erfolgreichen Zyklus werden zahlreiche stationäre Rechnungen und reaktorphysikalische Analysen zur Ermittlung der sicherheitsrelevanten Parameter wie Abschaltreaktivität, Abschaltreaktivität mit Stuck Rod, DNB-Verhältnis, Steuerstabwirksamkeit usw. durchgeführt. Wenn auch alle Sicherheitsanforderungen erfüllt werden, kann der ausgelegte Kern als ein endgültiger borarmer DWR Kern gelten.

5.7 Entwicklung eines Software Tools zur Automatisierung wesentlicher Kernauslegungsprozesse

Die Analysen zeigen, dass die Vorbereitung der QUABOX/CUBBOX Eingabedaten sehr zeitaufwendig im Vergleich mit der benötigten Rechenzeit ist. Für ein neues DWR Kernmodell wird zuerst eine makroskopische Wirkungsquerschnittsbibliothek vorbereitet. Darüber hinaus muss auch die Brennelementanordnung sowie die Abbrandverteilung im Kern entsprechend programmiert werden. Die von einem erfahrenen QUABOX/CUBBOX-Anwender benötigte Zeit für diese Aufgaben beträgt zwischen 10 und 80 min. Eine stationäre QUABOX/CUBBOX-Rechnung dauert mit einer Ganzkern-Modellierung zwischen 12 und 20 min in Abhängigkeit von der Anzahl der benötigten Iterationen (2.8 GHz Pentium 4 Prozessor). Darüber hinaus liegt die Zeit für eine Abbrandrechnung im Bereich 60 - 160 min in Abhängigkeit von den vordefinierten Abbrandschritten.

Da die heutigen DWR Kernkonfigurationen auf einer 1/4 oder 1/8 Sektorsymmetrie (Rotations- oder Spiegelsymmetrie) basieren, wurden zur Beschleunigung des iterativen 3D Diffusionsverfahrens die Eingabedaten eines Kernviertels vorbereitet. Abbildung 5-10 zeigt das untere linke Kernviertel eines DWR Kerns mit der entsprechenden Nummerierung einzelner BE.

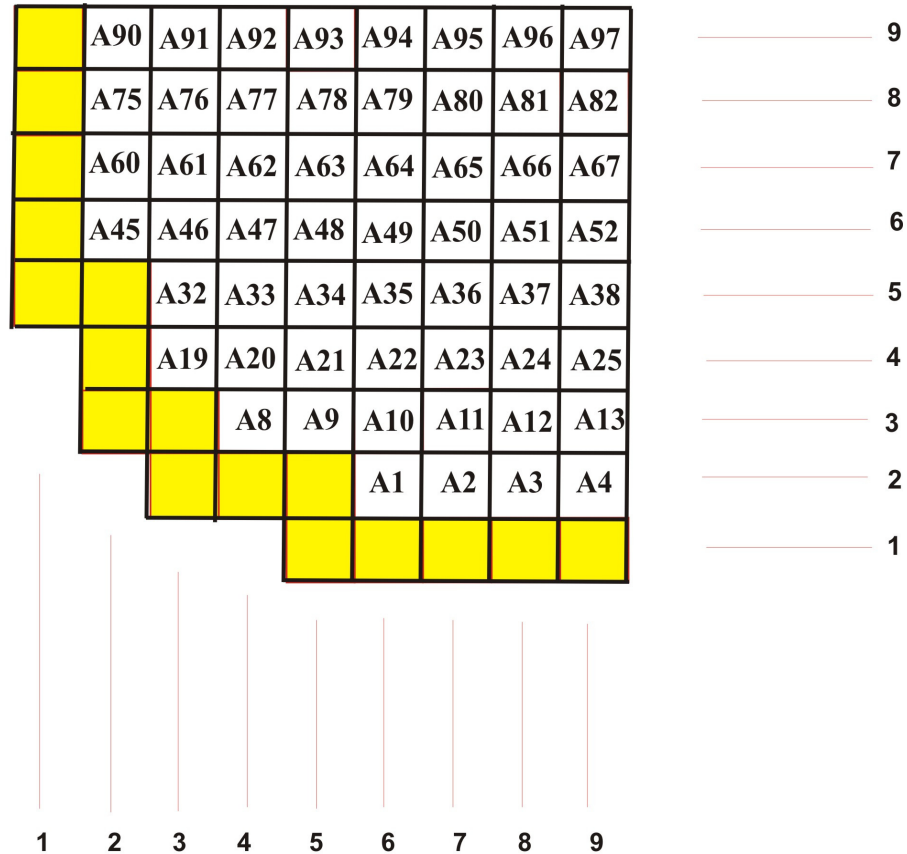


Abbildung 5-10: Unteres linkes Viertel eines 1300 MWe DWR Kerns

Im nächsten Schritt wurden zahlreiche stationäre Vergleichsrechnungen mit dem Viertelkern und mit dem vollständigen Kernmodell durchgeführt. Bei den wesentlichen reaktorphysikalischen Parametern ergaben sich keine Unterschiede. Auf diese Weise konnte die Rechenzeit um etwa den Faktor drei bis vier reduziert werden.

Da der größte Zeitaufwand immer noch bei der Erstellung des QUABOX/CUBBOX Datensatzes lag, wurde mit der Hilfe der Programmiersprache FORTRAN ein Software Tool (POWEROPT) entwickelt. Das Hauptziel war eine Automatisierung der QUABOX/CUBBOX Eingabedatenvorbereitung sowie der Auswertung der erzielten Ergebnisse.

POWEROPT wurde zunächst für einen 1/8 Kernsektor programmiert. Die Eingabedaten des Programms bestehen aus einem Beladeplan, in dem jedes BE in der untersuchten Kernkonfiguration mit einer zweistelligen Zahl dargestellt wird. Die erste zeigt den Brennelementtyp und die zweite – das Batch. Die Positionen einzelner BE werden mit Hilfe eines Koordinatensystems dargestellt. Auf diese Weise können vom Benutzer die wesentlichen Informationen jeder beliebigen Kernkonfiguration schnell und einfach definiert werden.

Das Programm wurde für zwei Brennelementtypen und vier Batches entwickelt. Abbildung 5-11 zeigt den Beladeplan einer typischen Kernkonfiguration. Als Beispiel wird angenommen, dass der Brennelementtyp 1 ein Uranbrennelement ist und Brennelementtyp 2 – Gd-Brennelement ist. Laut dieser Annahmen ist das BE mit X-Koordinate 4 und Y-Koordinate 7 ein Gd-Brennelement, das sich in seinem 2. Zyklus im Kern befindet.

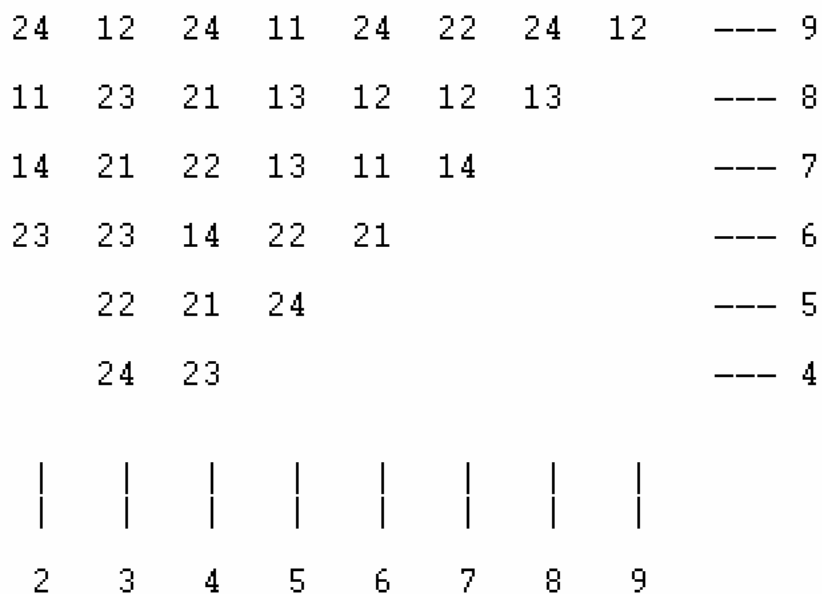


Abbildung 5-11: POWEROPT Beladeplan einer Kernkonfiguration mit zwei Brennelementtypen

Auf Grundlage dieses Beladeplans bereitet POWEROPT die Kernkonfiguration für QUABOX/CUBBOX. Das Programm erweitert den 1/8-Beladeplan auf 1/4-Kern unter Verwendung einer Spiegelsymmetrie. Das Programm erhält aus dem Beladeplan die Brennelementposition/Brennelementtyp-Informationen für jedes einzelne BE. Mit den beiden Parametern ist die Erstellung einer drei-dimensionalen Kernkonfiguration

möglich, weil keine axiale Aufteilung des Brennstoffs in verschiedenen axialen Zonen vorgesehen wurde. In einem weiteren Schritt wird der Abbrand nach der im Beladeplan definierten Verteilung zugeordnet. Die oben beschriebenen Daten werden in einem für QUABOX/CUBBOX geeigneten Format abgespeichert. Es muss beachtet werden, dass alle BE, die auf der X9 Achse und auf dem Diagonal (BE mit Koordinaten X4, Y4 bis BE mit Koordinaten X9,Y9) liegen, insgesamt vier mal im ganzen Kern auftreten. Ausnahme ist das BE A97, das sich im Kernzentrum befindet. Alle anderen BE des Beladeplans treten acht Mal im ganzen Kern auf. Zusätzlich bereitet POWEROPT auch die Abbrandverteilung und die Kernkonfiguration für einen ganzen Kern vor. Dabei wird eine Rotationssymmetrie benutzt, da sie auch vom Diffusionscode verwendet wird. Ein Ganzkern-Modell ermöglicht die Berechnung der Abschaltreaktivität mit Stuck Rod sowie unsymmetrischer Transienten und Störfälle.

Um die Auswertung der mit dem Diffusionscode erzielten Ergebnisse zu vereinfachen wurde ein Algorithmus mit mehreren Schleifen entwickelt und in POWEROPT integriert. Seine Aufgabe besteht darin, den effektiven Neutronenmultiplikationsfaktor und die maximale Leistungsspitze von jedem Abbrandschritt in einem benutzerfreundlichen Format abzuspeichern. Zusätzlich werden zwei 2D Kernmappen mit der relativen Leistungsdichteverteilung im Kern für Zyklusbeginn und Zyklusende erstellt.

In einem letzten Schritt wurde POWEROPT mit dem Code QUABOX/CUBBOX gekoppelt. Durch das Starten von POWEROPT wird nach dem Beladeplan der vollständige QUABOX/CUBBOX Eingabedatensatz der untersuchten Kernkonfiguration vorbereitet und anschließend der Diffusionscode gestartet. POWEROPT wartet bis die stationäre bzw. Abbrandrechnung durchgeführt wird und erstellt eine Datei mit den oben beschriebenen Parametern.

Mit Hilfe dieses Tools konnte das iterative 3D Diffusionsverfahren wesentlich beschleunigt werden. Die Aufgabe des Kernauslegers besteht darin, den Beladeplan für POWEROPT vorzubereiten und die erzielten Ergebnisse zu analysieren.

5.8 Randbedingungen für die Kernauslegung eines borarmen DWR

Die heutige DWR Kernauslegung beruht auf mehreren Prinzipien, deren Ziel die Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs ist. Unter Berücksichtigung dieser Prinzipien werden bestimmte Grenzwerte für die betriebs- und

sicherheitsrelevanten physikalischen Größen definiert. Die wesentlichen Prinzipien der heutigen DWR Auslegung sind in Anhang C beschrieben.

Laut der Zielsetzung dieser Arbeit muss der borarme Kern mit der bestehenden DWR Technologie ausgelegt werden. Aus diesem Grund sollten übliche DWR BE verwendet und eine Neugestaltung des Regelungssystems (Anzahl der Steuerstäbe, Positionierung, Konstruktion) vermieden werden.

Um die genauen Randbedingungen für die Kernauslegung des borarmen Kerns zu definieren, wurde ein Fachgespräch mit einem deutschen EVU durchgeführt [E.ON - 2005]. Bei der Diskussion ergab sich die Meinung, dass der neue Kern die wesentlichen Auslegungsrandbedingungen bestehender DWR Kerne erfüllen werden soll. Daher wurden folgende Randbedingungen für die Auslegung des borarmen Kerns festgelegt:

- Einsatz von 16x16 BE
- Maximale lokale Stableistung im Volllastzustand nicht größer als 460 W/cm
- DNB-Verhältnis im stationären Volllastzustand nicht kleiner als 2.07 (Westinghouse W-3 Korrelation)
- Negativer Kühlmitteltemperaturkoeffizient im gesamten Zyklus
- Reaktivitäts-Nettowirksamkeit der Steuerelemente bei Ausfall des wirksamsten Steuerelementes (Stuck-Rod Kriterium) größer als 4,2%
- 12-Monate Zyklus mit einer Zyklusdauer von mindestens 330 VLT
- Vier-Batch Beladestrategie

5.9 Zusammenfassung

Es wurde eine neue Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz entwickelt. Sie basiert auf drei wesentlichen, eng miteinander verbundenen Schritten – Brennelementauslegung, orientierende Reaktivitätsbilanz, und iteratives 3D Diffusionsverfahren. Für die Implementierung

wurde ein breites Spektrum von 16x16 BE-Konfigurationen vorbereitet und mit dem Zellcode HELIOS deren Wirkungsquerschnitte erzeugt. Dabei wurden wesentliche Parameter wie z.B. die Absorberstabzahl, Absorberkonzentration, Stabpositionierung sowie die Anreicherung der absorberfreien Stäbe variiert. Um die möglichen Brennstoffzusammensetzungen für die DWR Kerne mit reduziertem Borsäureeinsatz zu begrenzen, wurde ein Brennstoffraster mit Grenzwerten für die wesentlichen BE-Auslegungsparameter erstellt. Es wurde ein neues Konzept zur orientierenden Reaktivitätsbilanz entwickelt, das auf einer abbrandabhängigen, schrittweisen Berechnung des mittleren Neutronenmultiplikationsfaktors k_{inf} jeder beliebigen Brennstoffkombination beruht. Mit diesem Konzept und mit dem programmierten Software Tool REBA wurden Erfolg versprechende Gd- und Er-Brennstoffkombinationen ermittelt und erste 3D Kernkonfigurationen mit reduziertem Borsäureeinsatz ausgelegt. Um die DWR Auslegung mit einer Berücksichtigung wesentlicher reaktorphysikalischer Parameter wie Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} , Leistungsdichteverteilung im Kern sowie Abbrandentwicklung im Laufe des Zyklus zu ermöglichen, wurde ein iteratives 3D Verfahren vorgeschlagen. Es basiert auf mehreren Prozessen die eng mit der Berechnung, Optimierung und der Analyse wesentlicher reaktorphysikalischer Parameter verbunden sind. Um die Durchführung dieser zu beschleunigen wurde mit der Hilfe der Programmiersprache FORTRAN das Programm POWEROPT entwickelt. Es ermöglicht eine Automatisierung der QUABOX/CUBBOX Eingabedatenvorbereitung sowie der Auswertung der erzielten Ergebnisse. Ferner wurden auch die Randbedingungen für die Auslegung eines borarmen Kerns zusammengestellt.

6 Wesentliche Erkenntnisse und Auslegung von Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz

Die mit den Erfolg versprechenden Gd- und Er-Brennstoffkombinationen ausgelegten Kerne mit reduziertem Borsäureeinsatz (Kap. 5.5) wurden bzgl. der definierten Auslegungsrandbedingungen (Kap. 5.8) näher untersucht. Der berechnete Neutronenmultiplikationsfaktor für die Gd-Konfiguration war $k_{\text{eff}} = 1.05953$ und für die Er-Konfiguration $- 1.07744$, allerdings lagen die Zyklusdauer (295 und 315 VLT) unter den Anforderungen. Ferner konnte auch das Kriterium für die maximale lineare Stableistung nicht erfüllt werden. Wegen der verkürzten Zyklusdauer und unzulässigen Leistungsspitzen mussten diese Kernkonfigurationen bzgl. der erwähnten Randbedingungen verbessert werden. Die neue Anordnung der BE im Kern hat die radiale Leistungsdichteverteilung am Zyklusbeginn zwar abgeflacht, trotzdem ergaben sich nach der Gd-Abbrandrechnung im Laufe des Zyklus Leistungsspitzen, die über der vorgeschriebenen Grenze lagen. Aus diesen Gründen wurden neue Gd- und Er-Brennstoffe eingesetzt und dadurch entstanden neue Kernkonfigurationen mit neuen Brennstoffzusammensetzungen.

Auf diese Weise wurde eine große Anzahl von Gd- und Er-Kernkonfigurationen mit reduziertem Borsäureeinsatz untersucht und ihre Parameter optimiert. Das Optimierungskonzept besteht aus mehreren wesentlichen Maßnahmen wie z.B. neue BE-Anordnung im Kern, Variation der Brennstoffanreicherung, Änderung der Absorberkonzentration und/oder der Absorberstabzahl, neue prozentuelle Aufteilung der Brennstoffe im Kern oder ein komplettes Ersetzen eines Brennstofftyps. Die Durchführung dieser Maßnahmen beruht auf einer systematischen Vorgehensweise - jeder der oben beschriebenen Optimierungsmaßnahmen wird eine bestimmte Priorität zugeordnet, die von dem konkreten Schritt des Diffusionsverfahrens abhängig ist. Sollten z.B. unzulässige Leistungsspitzen am Zyklusbeginn auftreten, haben dann die Änderung der Absorberkonzentration/Absorberstabzahl eine übergeordnete und die Variation der globalen Brennstoffanreicherung untergeordnete Priorität. Umgekehrt, bei zu kurzer Zyklusdauer wird mit höchster Priorität die globale Anreicherung des Brennstoffs variiert.

Im Laufe der Untersuchungen zur Optimierung der Gd- und Er-Kernkonfigurationen wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen. Bei der Kernauslegung spielen nicht nur die

^{235}U -Anreicherung, die Absorberkonzentration und die Absorberstabanzahl, sondern auch die Abbrandverteilung und die Brennelementanordnung im Kern eine übergeordnete Rolle. Die folgenden Abschnitte beschreiben den Einfluss dieser Parameter auf die Kernauslegung eines Kerns mit reduziertem Borsäureeinsatz.

6.1 Brennstoff

Der Einfluss wesentlicher Brennelementauslegungsparameter wie z.B. ^{235}U -Anreicherung, Absorberstabzahl, Absorberkonzentration wurden bereits in Kap 4.6 auf Zellebene detailliert analysiert. Das Verhalten des Neutronenmultiplikationsfaktors k_{inf} sowie anderer physikalischer Größen wurde in einem unendlich ausgedehnten periodischen Gitter von Brenn- und Absorberstäben untersucht. Generell ist der Einfluss dieser Parameter auf den effektiven Neutronenmultiplikationsfaktor k_{eff} ähnlich. Mit einer Erhöhung der Absorberstabzahl oder der Absorberkonzentration sinkt die kritische Borkonzentration am Zyklusbeginn. Die höhere ^{235}U -Anreicherung im Kern führt zu einer höheren Überschussreaktivität aber gleichzeitig auch zu einer längeren Zyklusdauer.

Die Kernkonfiguration eines realen DWR besteht aus einer Kombination verschiedener Brennstoffe. In den heutigen Reaktoren werden manchmal mehr als 10 unterschiedliche Brennelementtypen im Kern eingesetzt. Dabei werden Uran-, Gd-, MOX-BE mit unterschiedlichen Anreicherungen verwendet. Im Gegensatz dazu werden die Kernkonfigurationen mancher fortschrittlicher DWR mit Hilfe von nur zwei Brennelementtypen realisiert.

6.2 Abbrandverteilung

Eine wesentliche Rolle bei der Kernauslegung spielt auch die Abbrandverteilung im Kern. Wie schon früher erwähnt, wurde für die Auslegung des borarmen DWR eine 4-Batch Beladestrategie ausgewählt. Deshalb wurden für die BE im 1., 2., 3. oder 4. Zyklus Abbrandprofile einer realen DWR Beladung verwendet.

Alternativen zum 4-Batch Schema wären eine 3-Batch oder eine 5-Batch Beladestrategie. In den Anfangszeiten der Kerntechnik wurden 3-Batch Beladestrategien verwendet und ein BE wurde nach ca. drei Jahren vom Kern entladen. Dieses Verfahren war mit der niedrigen ^{235}U -Anreicherung des Brennstoffs

(2.5 oder 3.0 %) verbunden. Mit solchen Beladestrategien wurden auch niedrigere Entladeabbrände erreicht.

Mehrere Batches bedeuten mehrere Möglichkeiten bei der Optimierung der Leistungsdichteverteilung. Bei einem 5-Batch Schema ist es z.B. möglich, neben einem frischen BE mit einer hohen Leistung, BE von Batch 3, 4 oder 5 zu positionieren. Mit einer 3-Batch Beladestrategie bliebe nur die Möglichkeit BE vom Batch 3 anzuordnen, da die anderen noch relativ hohe Reaktivität besitzen. Auf diese Weise lässt sich mit mehreren Batches eine bessere Lösung für eine flache Leistungsdichteverteilung im Kern finden. Dies bedeutet auch gleichzeitig eine größere Flexibilität des gesamten Optimierungsverfahrens.

6.3 Anordnung der Brennelemente im Kern

Die wesentlichen neutronenphysikalischen Parameter werden auch durch die Anordnung der BE im Kern beeinflusst. Diese werden nach einem speziellen Brennelementeinsatzplan positioniert, der eine möglichst günstige Leistungsdichteverteilung und einen hohen Entladenabbrand ermöglicht. In den heutigen Kernkonfigurationen werden oft BE von verschiedenen Batches nebeneinander positioniert um diese Kriterien erfüllen zu können. Frische BE werden neben BE im dritten oder vierten Zyklus angeordnet um die Leistungsspitzen zu minimieren. Es ist aber möglich neben einem frischen BE auch ein BE vom Batch 2 zu positionieren, falls dessen Brennstoff niedrig angereichert ist.

Ein weiterer Parameter, der bei der Anordnung der BE berücksichtigt werden muss, ist der Abstand des BE zum Kernzentrum. Je näher zum Kernzentrum sich ein BE befindet, desto stärker wird es aufgrund des höheren Neutronenflusses belastet. Aus diesem Grund ist es möglich, dass ein BE mit abbrennbarem Absorber vom 2. Batch im Kernzentrum eine höhere Leistung als ein frisches BE vom gleichen Typ am Kernrande erzeugt. Weiterhin muss auch die lokale Umgebung des BE berücksichtigt werden. Die Leistung eines frischen BE könnte z.B. reduziert werden, wenn seine Nachbarbrennelemente (die auf seiner X oder Y Achse liegen), im dritten oder vierten Zyklus sind und umgekehrt. Die durchgeführten Diffusionsrechnungen mit QUABOX/CUBBOX haben gezeigt, dass die Leistung im Wesentlichen durch die direkt an das untersuchte BE angrenzenden Nachbarbrennelemente beeinflusst wird.

Nachbarbrennelemente, die nur mit einer Kante an das betrachtete BE angrenzen haben einen deutlich kleineren Einfluss auf deren Leistung.

Mit einem hohen Absorbergehalt im DWR Kern ergibt sich ein noch komplexeres Bild. Die früheren Zelluntersuchungen und Analysen zeigten, dass bereits bei BE mit 16 Gd-Stäben und 7% Gd₂O₃ Konzentration mit einer k_{inf} -Erhöhung bei steigendem Abbrand zu rechnen ist. Solche BE-Konfigurationen besitzen am Ende des ersten oder zum Beginn des zweiten Zyklus eine höhere Reaktivität als am Zyklusbeginn. Deswegen ist es möglich frische BE näher zum Kernzentrum anzuordnen. Diese Strategie könnte aber gleichzeitig zu unzulässigen Leistungsspitzen am Zyklusende führen. Der starke Einfluss der Anordnung von BE mit einem hohen Gd-Gehalt wird mit einem Beispiel veranschaulicht. Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 zeigen zwei Kernkonfigurationen, die auf der Basis einer Brennstoffkombination mit zwei Brennelementtypen vorbereitet wurden (Gd24-9%-4.8 und Gd24-7%-3.0).

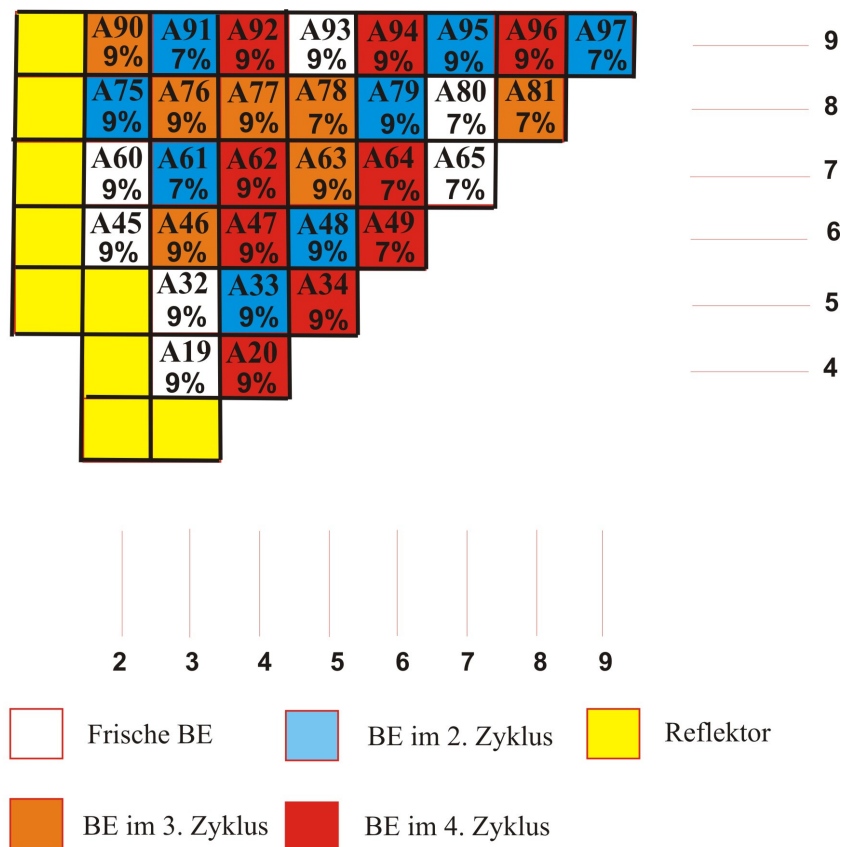


Abbildung 6-1: Kernkonfiguration mit einer optimierten Brennelementanordnung

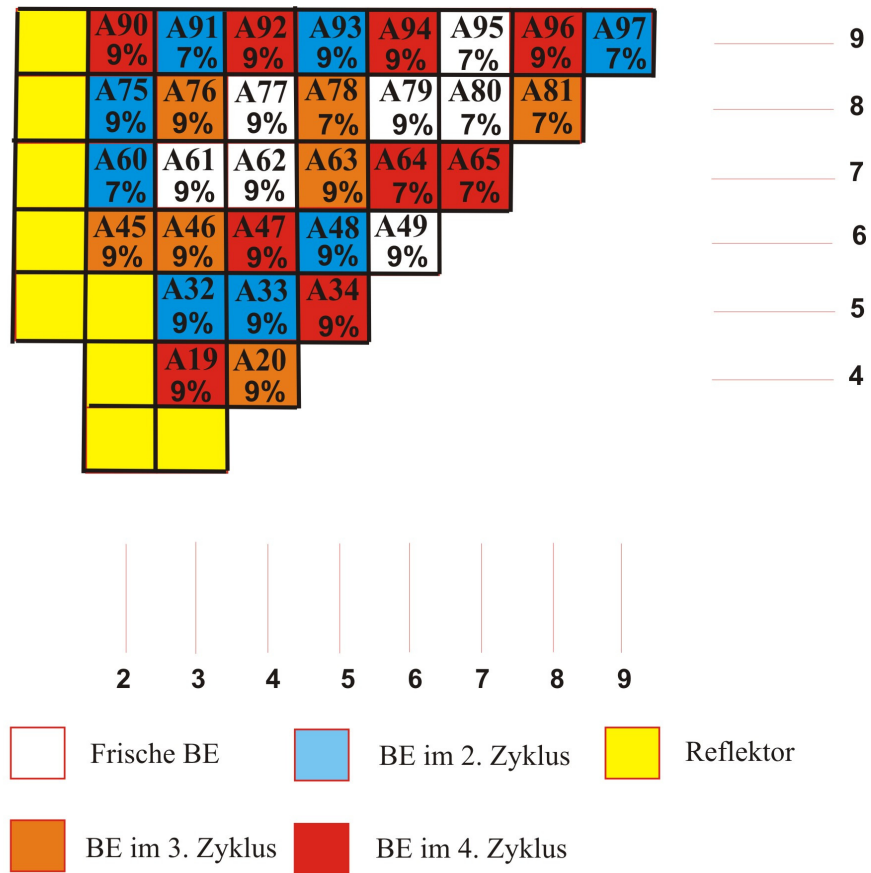


Abbildung 6-2: Kernkonfiguration ohne Optimierung der Brennelementanordnung

Die Brennelementanordnung der ersten Kernkonfiguration wurde nur für den Zyklusbeginn optimiert. Für die zweite Beladung wurde keine Optimierung durchgeführt. Die QUABOX/CUBBOX Abbrandrechnungen mit den beiden Kernkonfigurationen ermittelten unterschiedliche Ergebnisse für den k_{eff} , die maximale Stableistung sowie die Zyklusdauer. Der Δk_{eff} betrug am Zyklusbeginn 3466 pcm. Dies wird zu einer um 385 ppm höheren kritischen Borkonzentration der zweiten Konfiguration führen (Abbildung 6-3). Weiterhin ergibt sich bei dieser auch eine um 90 VLT längere Zyklusdauer.

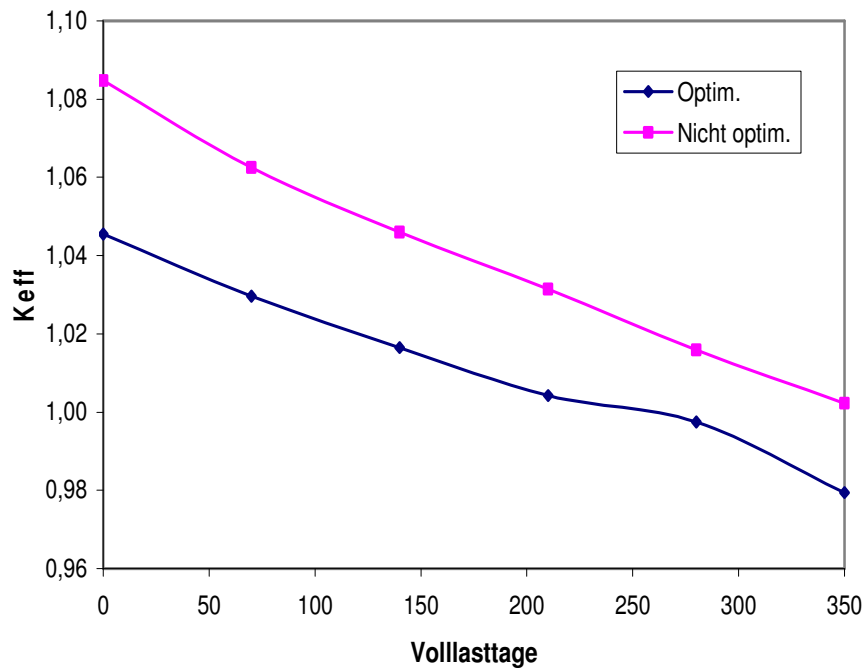


Abbildung 6-3: k_{eff} der optimierten und nicht optimierten Kernkonfigurationen

Es können auch signifikante Unterschiede bei den maximalen Stableistungen beobachtet werden. Aufgrund der Optimierung am Zyklusbeginn ergibt sich bei der ersten Konfiguration eine flachere Leistungsdichteverteilung. Es ist zu sehen, dass sie danach im Laufe des Zyklus ungleichmäßig wird. Nach etwa 350 VLT werden sogar lokale Stableistungen von 1126 W/cm erreicht (Abbildung 6-4). Diese Ergebnisse sind ein typisches Beispiel wie eine für den Zyklusbeginn optimierte Anordnung der BE mit hohem Gd-Gehalt sehr ungünstig am Zyklusende sein könnte. Das ist auch der Grund warum eine Leistungsdichteverteilungsoptimierung für Kerne mit viel Gd sehr aufwendig ist.

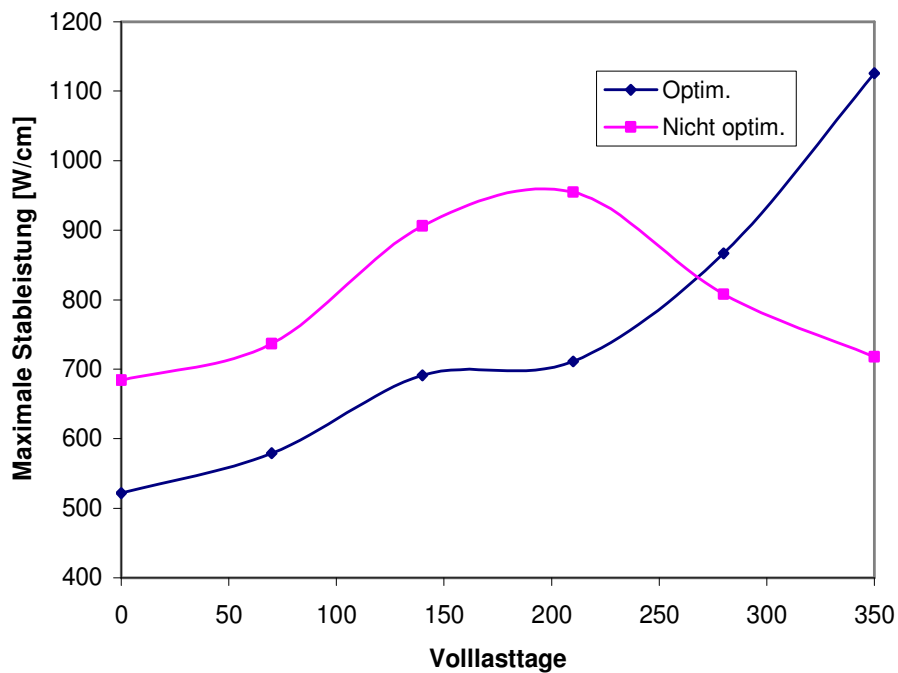


Abbildung 6-4: Maximale Stableistungen beider Kernkonfigurationen

Im Laufe der Untersuchungen zur Auslegung des borarmen Gd-Kerns konnten auch weitere interessante Effekte beobachtet werden. Bei manchen Kernkonfigurationen mit Gd-Brennelementen mit einem ähnlichen k_{inf} -Verhalten ist der effektive Neutronenmultiplikationsfaktor aufgrund eines gleichzeitigen Gd-Ausbrands in vielen BE im Laufe des Zyklus angestiegen. Dies ist für den Anlagenbetrieb unerwünscht, da in solchen Fällen Steuerstabbänke eingefahren werden sollen. Darüber hinaus treten zum Zeitpunkt des Reaktivitätsanstiegs auch sehr hohe Leistungsspitzen auf. Weitere negative Reaktivitätseffekte wurden bei DWR Kernen mit BE mit hoher Gd-Stubzahl und kleineren Absorberkonzentrationen beobachtet. Aufgrund der starken Absorption am Zyklusbeginn und der kleinen Selbstabschirmung, können diese frühzeitig unterkritisch und später wieder überkritisch werden. Abbildung 6-5 zeigt die k_{eff} -Kurven solcher Kerne.

Da das Abbrandverhalten von Er anders im Vergleich mit Gd ist, wurden die bereits beschriebenen Reaktivitätseffekte nicht beobachtet. Die k_{eff} -Kurven der Er-Kernkonfigurationen sind sehr flach und den k_{eff} -Kurven bestehender DWR ähnlich.

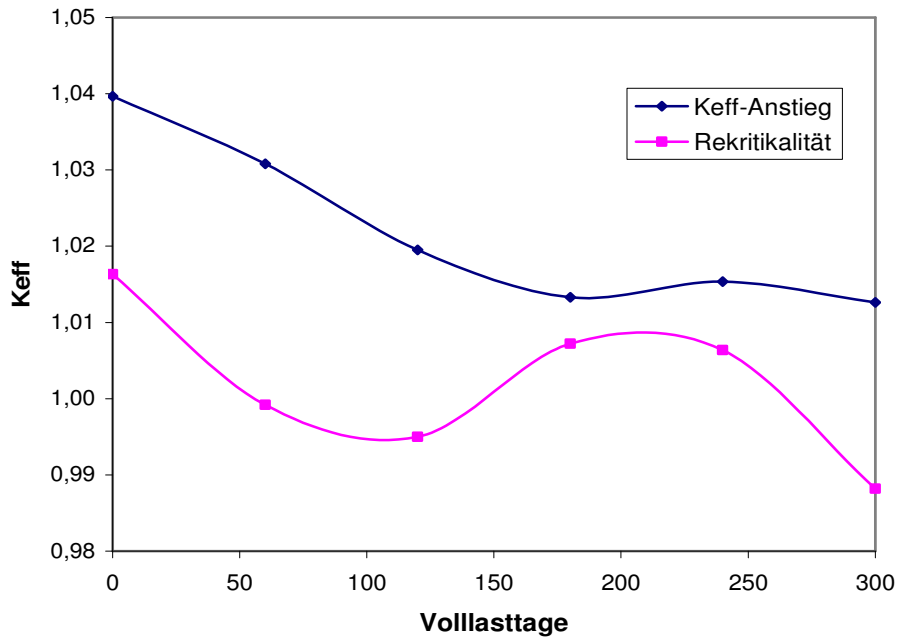


Abbildung 6-5: k_{eff} -Kurven von Kernen mit unerwünschten Reaktivitätseffekten

Mit Hilfe von POWEROPT und dem entwickelten 3D Diffusionsverfahren wurden zahlreiche borarme Kernkonfigurationen ausgelegt und analysiert. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Optimierung der Leistungsdichteverteilung im zweiten Teil und am Ende des Zyklus am schwierigsten ist. Grund dafür sind die maximalen lokalen Stableistungen, die beim Ausbrennen von Gd auftreten. Dies gilt insbesondere für DWR Kerne, die nur mit BE mit einem hohen Gd-Gehalt ausgelegt sind. In solchen Fällen besitzen alle frischen BE am Ende des ersten oder am Anfang des zweiten Zyklus ihre höchste Reaktivität. Einerseits wäre der Einsatz von Uranbrennelementen bei solchen Kernkonfigurationen sehr vorteilhaft, da ihre Reaktivität mit dem steigenden Abbrand gleichmäßig abnimmt. Andererseits wäre aber eine deutliche Reduktion der Borkonzentration im Kühlmittel nicht möglich. Ein weiteres Problem ist die gewünschte Zyklusdauer von 330 VLT. Eine niedrige Borkonzentration am Zyklusbeginn wird nur durch eine kleine Überschussreaktivität erreicht. Generell ergibt sich mit der kleineren Überschussreaktivität auch ein kürzerer Zyklus.

6.4 Brennstoffkonzept mit einer zeitlichen Verschiebung der Gd-Ausbrandpunkte

Um unzulässige Leistungsspitzen im Laufe des Zyklus zu vermeiden und eine ausreichende Zyklusdauer zu gewährleisten, wurde ein neues Brennstoffkonzept für

die Auslegung des borarmen Gd-DWR entwickelt. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem gleichzeitigen Anstieg der Reaktivität aller frischen BE eine flache Leistungsdichteverteilung im Laufe des Zyklus nicht erzielt werden kann. Um dies zu überwinden wurde ein neues Brennstoffkonzept mit einer zeitlichen Verschiebung des Gd-Ausbrandpunkts entwickelt. Die Grundidee besteht darin, BE mit unterschiedlichen Gd-Ausbrandpunkten zu kombinieren, um das Auftreten unerwünschter Leistungsspitzen in den verschiedenen Zyklusphasen zu vermeiden. Wie schon früher erwähnt, wäre eine Kombination von Gd- und Uranbrennelementen aufgrund des unterschiedlichen Abbrandverhaltens beider Brennstoffe vorteilhaft. In einem rechnerischen Versuch wurden statt Uran-, BE mit einem geringen Gd-Gehalt (z.B. 3% Gd_2O_3 in 4 Stäben) eingesetzt. Das Ziel war eine weitere Absenkung der kritischen Borkonzentration. Mit dem neuen Konzept traten keine unzulässigen Leistungsspitzen auf und die Borkonzentration am Zyklusbeginn war niedriger als bei derselben Konfiguration mit den Uranbrennelementen. Nach mehreren Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Leistungsspitzen nur dann in den vorgeschriebenen Grenzen gehalten werden können, wenn das Gd in den beiden Brennstoffen zu unterschiedlichen Zeiten während des Zyklus ausbrennt. Abbildung 6-6 zeigt zwei BE mit verschiedenen Gd-Ausbrandpunkten.

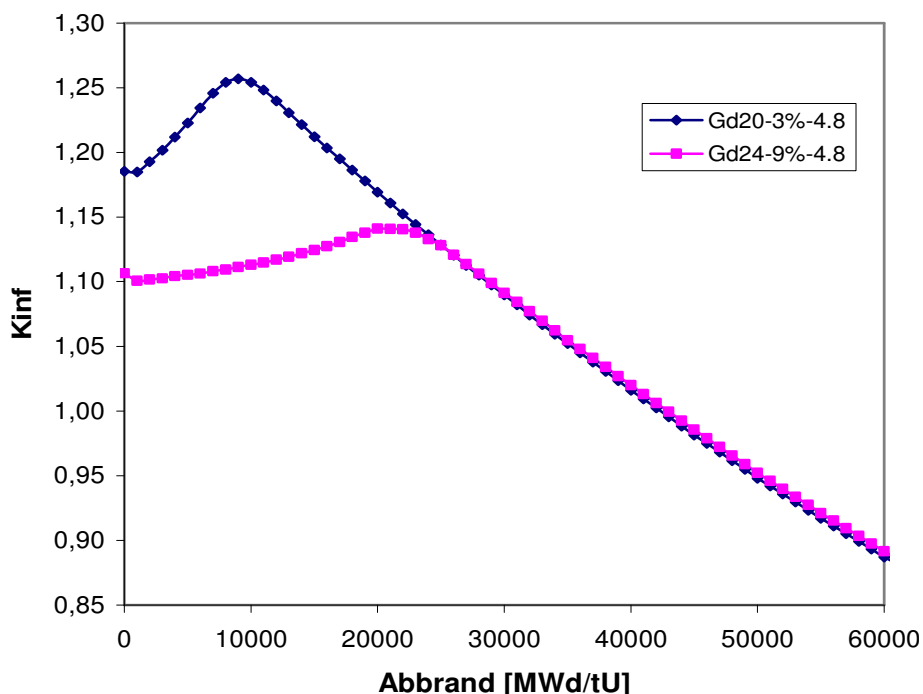


Abbildung 6-6: Brennstoffe mit unterschiedlichen Gd-Ausbrandpunkten

Im Kapitel 4.6 wurde das Gd-Abbrandverhalten in Abhängigkeit von den wesentlichen Brennelementauslegungsparametern wie Gd-Konzentration, Gd-Stabzahl usw. schon detailliert analysiert. Dank des Selbstabschirmungseffekts ist es mit einer Variation dieser Parameter möglich, den Ausbrandpunkt des Absorbers gezielt zu beeinflussen und einzustellen. Mit einer entsprechenden Gd-Konzentration sowie Gd-Stabzahl könnten BE mit unterschiedlichen Gd-Ausbrandpunkten ausgelegt werden. Die Untersuchungen mit dem Diffusionscode QUABOX/CUBBOX haben gezeigt, dass eine Kombination von zwei Brennstoffen mit einer niedrigen und einer hohen Gd-Konzentration für die Optimierung der Leistungsdichteverteilung im Kern sehr vorteilhaft ist. Aus diesem Grund wurden mit dem iterativen 3D Diffusionsverfahren überwiegend solche Kernkonfigurationen untersucht.

6.5 DWR Kernkonfigurationen mit reduziertem Borsäureeinsatz

Mit dem QUABOX/CUBBOX und dem neuen Konzept wurden zahlreiche Gd-Kernkonfigurationen mit 16x16 BE ausgelegt und analysiert. Die Rechnungen und die begleitenden Untersuchungen haben gezeigt, dass allein der Einsatz von BE mit unterschiedlichen Gd-Ausbrandpunkten keinen Erfolg garantieren kann. Um den gewünschten Effekt bei der Abflachung der Leistungsdichteverteilung zu bekommen müssen die BE auch entsprechend angeordnet werden. Es ist z.B. zu vermeiden, frische oder BE im 2. Zyklus mit gleicher Gd-Konzentration nebeneinander zu positionieren. Mit einer solchen Anordnung werden deren Neutronenmultiplikationsfaktoren k_{inf} mit ähnlicher Geschwindigkeit im Laufe des Zyklus ansteigen und dies wird unverzüglich zu unzulässigen Leistungsspitzen in dieser Kernregion führen. Weiterhin sollen auch die BE im 2. Zyklus nicht im Kernzentrum sondern am Kernrande positioniert werden. Auf diese Weise wird die Leistung in den Regionen mit einer stark ausgeprägten Neutronenleckage erhöht und gleichzeitig die Leistungsdichteverteilung im Kern abgeflacht.

Die kritische Borkonzentration derzeitiger DWR Anlagen die mit einem 12-Monats-Zyklus gefahren werden, liegt zu Beginn des Zyklus zwischen 1100 und 1250 ppm. Mit dem neuen Gd-Brennstoffkonzept und einer fortschrittlichen Kernkonfiguration wurde ein borarmer DWR Kern ausgelegt, der eine um etwa 50% niedrigere Borkonzentration im Vergleich mit der heutigen Praxis ermöglicht. Die für den Zyklusbeginn berechnete kritische Borkonzentration liegt bei 518 ppm, wobei die wesentlichen Auslegungsrandbedingungen erfüllt werden können.

Mit Hilfe von Er wurde eine weitere borarme DWR Kernkonfiguration ausgelegt. Aufgrund des deutlich kleineren Absorptionswirkungsquerschnitts konnte die Borkonzentration bis zu 805 ppm reduziert werden. Die Optimierung der Leistungsdichteverteilung mit Er war viel einfacher im Vergleich mit Gd. Für eine große Anzahl der untersuchten Konfigurationen mit einer am Zyklusbeginn flachen Leistungsdichteverteilung war eine Optimierung am Zyklusende nicht notwendig, da die maximale Leistungsspitze im Laufe des gesamten Zyklus abgesunken war. Die wesentlichen Parameter der borarmen Kerne sind in der Tabelle 6-2 dargestellt.

Mit den beiden Absorbieren wurden Kernkonfigurationen mit noch niedrigeren Borkonzentrationen ausgelegt. Im Laufe der Untersuchungen mit dem iterativen 3D Verfahren konnten aber einige der definierten Randbedingungen nicht erfüllt werden. Bei den Gd-Konfigurationen konnten meistens die Leistungsspitzen im zweiten Teil des Zyklus sowie am Zyklusende nicht beherrscht werden. Bei den Er-Konfigurationen war eine weitere Absenkung der Borkonzentration aufgrund einer zu kurzen Zyklusdauer nicht möglich. Erbium absorbiert am Zyklusende ziemlich stark wobei die negative Reaktivität nicht nur von dem schwach sondern auch von dem stark absorbierenden ^{167}Er verursacht wird. Die Mengen einzelner Gd- und Er-Isotope im Brennstoff am Zyklusbeginn und Zyklusende werden in Kap. 9.3 dargestellt. In den folgenden Kapiteln werden die wesentlichen Parameter der neuen borarmen Kerne aufgezeigt.

6.5.1 Kritische Borkonzentration

Die kritischen Borkonzentrationen neuer Kerne liegen am Zyklusbeginn bei 518 ppm (Gd-Konfiguration) und 805 ppm (Er-Konfiguration). Abbildung 6-7 zeigt die Entwicklung der Borkonzentration-Kurven im Laufe des Zyklus.

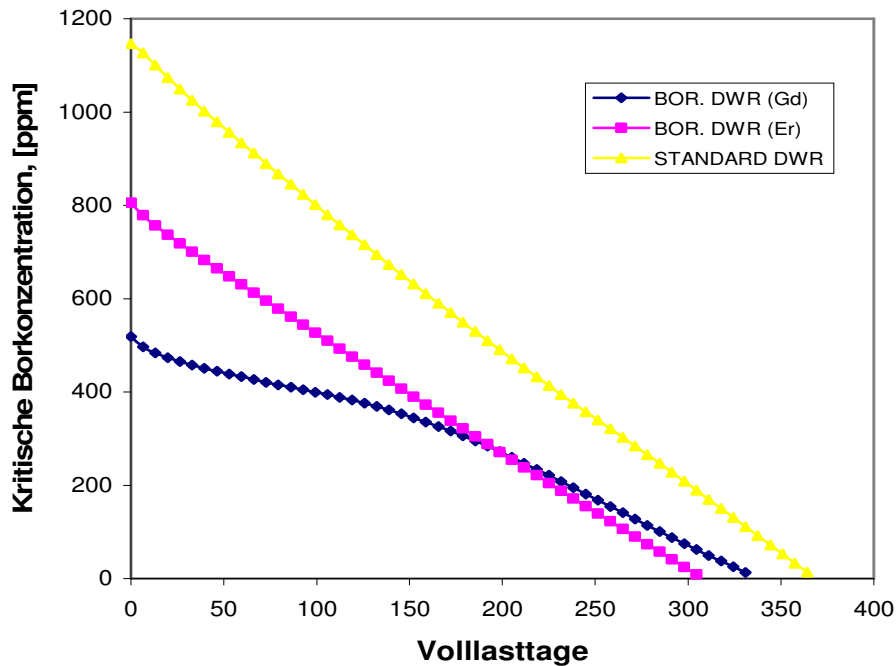


Abbildung 6-7: Kritische Borkonzentrationen im Laufe des Zyklus

Auf dem Bild ist zu sehen, dass die Standard- und die Er-Konfiguration monoton abfallende Kurven besitzen. Im Gegensatz dazu sinkt die Borkonzentration des Gd-Kerns langsamer ab, insbesondere zwischen 40 und 185 VLT. In diesem Zeitraum steigt k_{inf} der frischen BE mit einer kleineren Gd-Konzentration relativ schnell an und dadurch sinkt die Borkonzentration der Gd-Kernkonfiguration langsamer ab.

6.5.2 Brennelementtypen

Die beiden borarmen Konfigurationen wurden jeweils mit Hilfe von zwei Brennstofftypen ausgelegt. Für den Gd-Kern wurden folgende Brennelementtypen verwendet: 24 Gd-Stäbe, 9% Gd_2O_3 und 4.2% ^{235}U -Anreicherung (Typ 1) und 24 Gd-Stäbe, 3% Gd_2O_3 und 4.0% ^{235}U -Anreicherung (Typ 2). Die Brennstoffkombination für die Er-Konfiguration besteht aus Er16-6%-4.7 (Typ 1) und Er20-8%-3.9 (Typ 2). Abbildung 6-8 zeigt einen Vergleich der k_{inf} -Kurven dieser Brennstoffe bei Moderatordichte 0.720 g/cm^3 und Brennstofftemperatur $840 \text{ }^\circ\text{K}$. Die Borkonzentration wurde auf 0 ppm gesetzt.

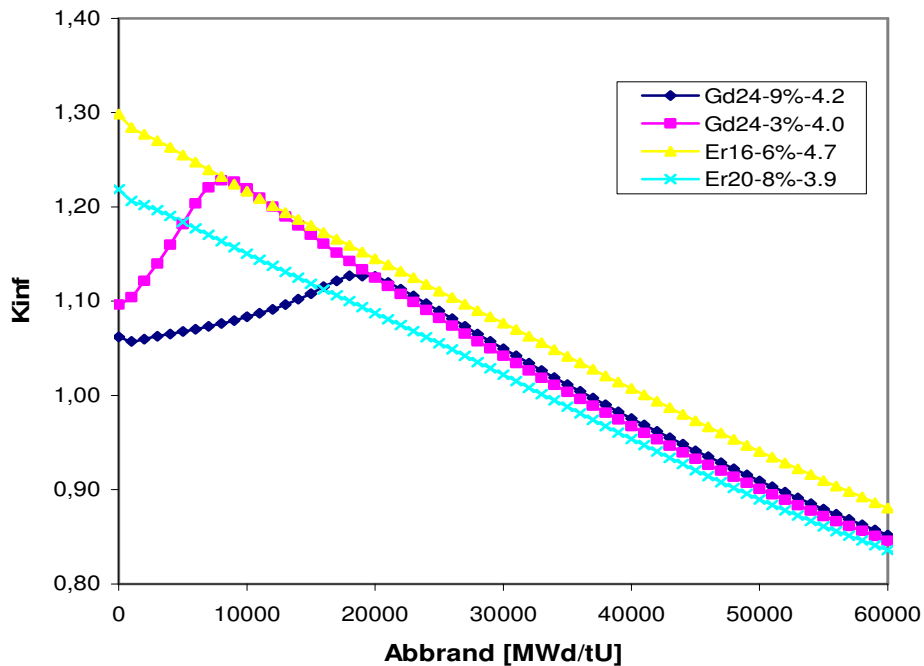


Abbildung 6-8: Brennstofftypen der borarme Kerne

Die BE mit 3% Gd_2O_3 besitzen aufgrund der kleineren Absorbiermenge bei 0 MWd/tU größere Reaktivität als die BE mit 9% Gd_2O_3 . Durch die kleinere Selbstabschirmung brennt das Gd relativ schnell aus und der Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf} erreicht schon bei etwa 8.000 MWd/tU seinen maximalen Wert von 1.22810. Damit die maximale Stabileistung nicht überschritten wird, muss sichergestellt werden, dass zu diesem Zeitpunkt die frischen BE mit 9% Gd_2O_3 keine zu hohe Reaktivität besitzen. Der Gd-Ausbrandpunkt dieses Brennstoffs wurde so eingestellt, dass dessen größter k_{inf} erst bei etwa 18.000 MWd/tU erreicht wird. Im Gegensatz zu Gd, werden die Neutronenmultiplikationsfaktoren beider Er-Brennelementtypen immer kleiner mit dem steigenden Abbrand.

6.5.3 Kernkonfigurationen

Mit den in Kap. 6.5.2 beschriebenen Brennstofftypen wurden zwei optimierte Kernkonfigurationen entwickelt. Im Gd-Kern sind 50% aller BE von Typ 1 und die restlichen von Typ 2. Um die Gleichgewichtszyklus-Randbedingung zu erfüllen, müssen auch in jedem Batch 24 BE von jedem Typ beladen werden. Die ersten drei Batches bestehen aus jeweils 48 BE und das vierte aus 49 BE. Abbildung 6-9 zeigt die Kernkonfiguration des borarmen Gd-Kerns. Die unterschiedlichen Batches werden mit

verschiedenen Farben dargestellt und der Brennelementtyp wird mit der Konzentration des Absorbers (3% und 9%) gezeigt.

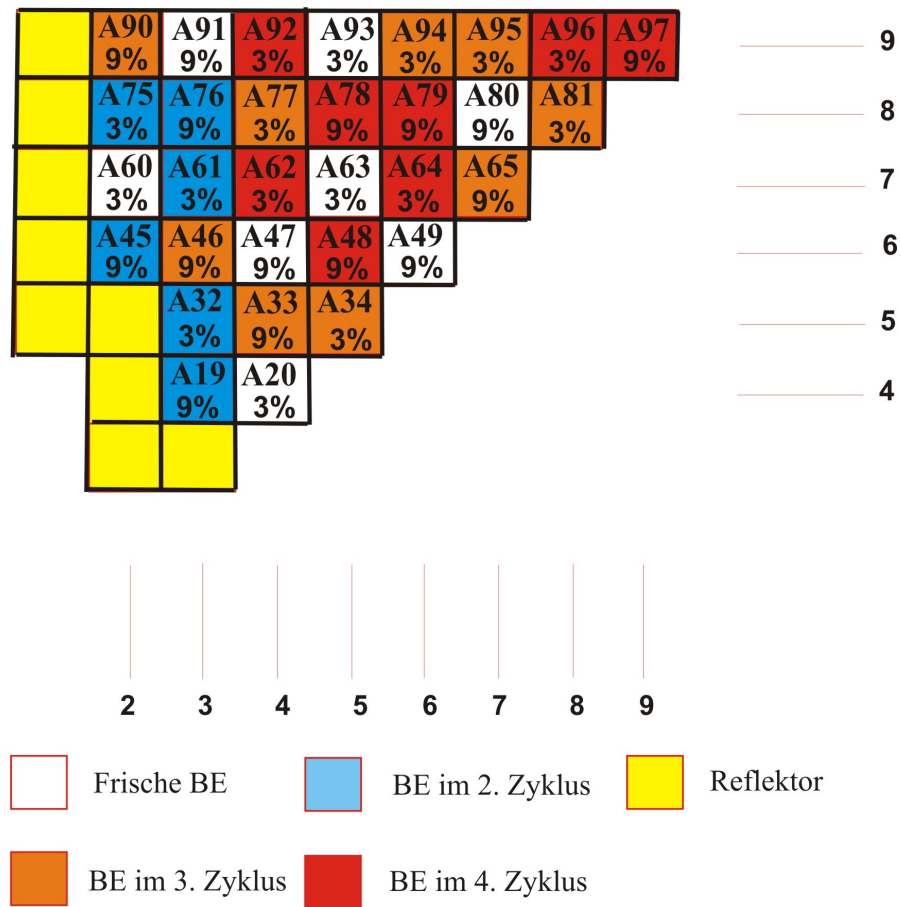


Abbildung 6-9: Kernkonfiguration des borarmen Gd-Kerns

In dieser Kernkonfiguration besitzen die BE im 2. Zyklus eine sehr hohe Reaktivität, deswegen sind sie am Kernrand angeordnet. Darüber hinaus werden die BE von den beiden Typen abwechselnd positioniert um den Effekt der zeitlichen Verschiebung der Gd-Ausbrandpunkte zu verstärken und dadurch zu hohe Leistungsspitzen zu vermeiden (A75 und A76; A32 und A19; A47 und A63). Das frische A80 konnte relativ zentral positioniert werden, da es 9% Gd_2O_3 (langsameres Ausbrandverhalten) enthält und seine Nachbarbrennelemente (A79, A95, A81, A65) in ihrem dritten und vierten Abbrandzyklus sind.

In dem Er-Kern haben 2/3 aller BE 8% Er_2O_3 und die restlichen – 6% (Abbildung 6-10). Das Er-BE hat ein anderes Abbrandverhalten im Vergleich mit Gd und ist dem Abbrandverhalten eines Uran-BE ähnlich. Die höchste Reaktivität besitzen die frischen BE, aus diesem Grund wurden sie am Kernrande angeordnet. Das frische A63 wurde

relativ zentral positioniert, um die Leistung in der Region A78-A64-A48-A62 zu erhöhen und die Leistungsdichteverteilung im Kern abzuflachen.

Um die BE in den beiden borarmen Kernen optimal anzuordnen wurden insgesamt mit dem POWEROPT und QUABOX/CUBBOX mehr als 1400 verschiedene Gd- und Er-Kernkonfigurationen generiert und analysiert. Die Untersuchungen zeigen, dass für die Optimierung der BE-Anordnung im Er-Kern kein spezielles Vorgehen erforderlich ist. Im Gegensatz dazu muss aufgrund des komplexeren Abbrandverhaltens der Gd-BE eine fortschrittliche Beladestrategie entwickelt werden.

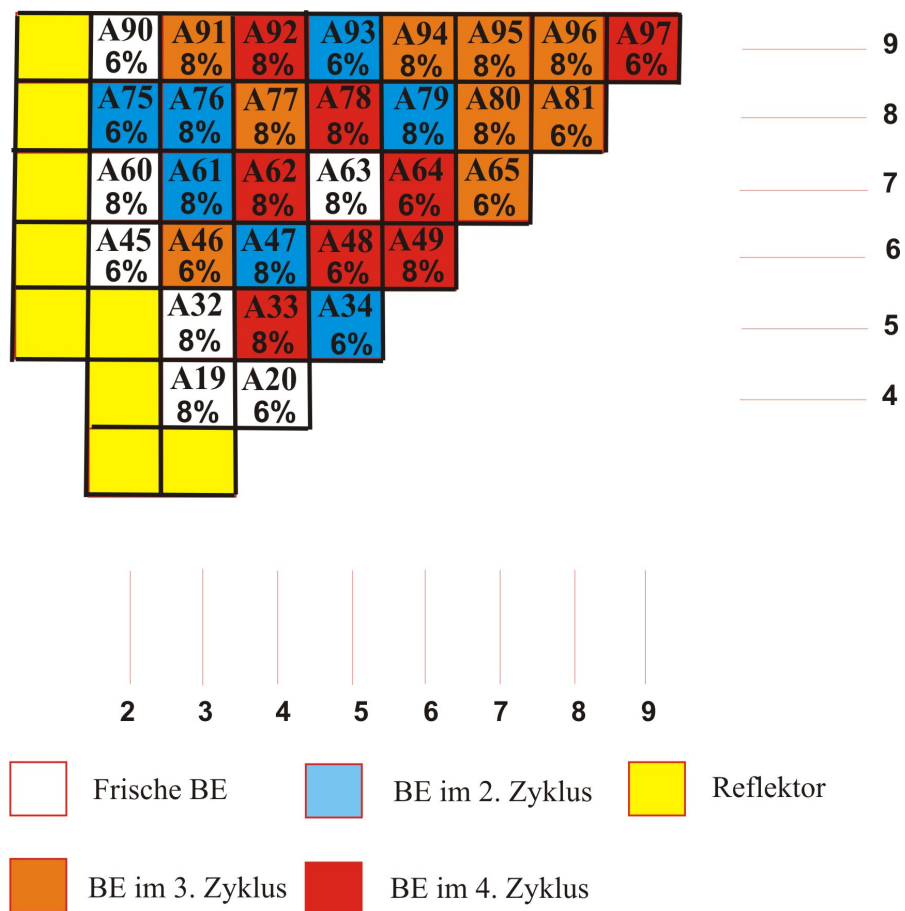


Abbildung 6-10: Kernkonfiguration des borarmen Er-Kerns

6.5.4 Leistungsdichteverteilung und maximale Leistungsspitze

Die Leistungsdichteverteilung im DWR Reaktorkern ist im Laufe des Zyklus nicht konstant und wird wesentlich durch die Steuerabstellung, die Verteilung abbrennbarer Neutronenabsorber sowie den Abbrandzustand des Kerns beeinflusst.

Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 zeigen die integralen BE-Leistungen am Zyklusbeginn (oberer Wert) und Zyklusende (unterer Wert) des Gd- und Er-Kerns für jedes BE.

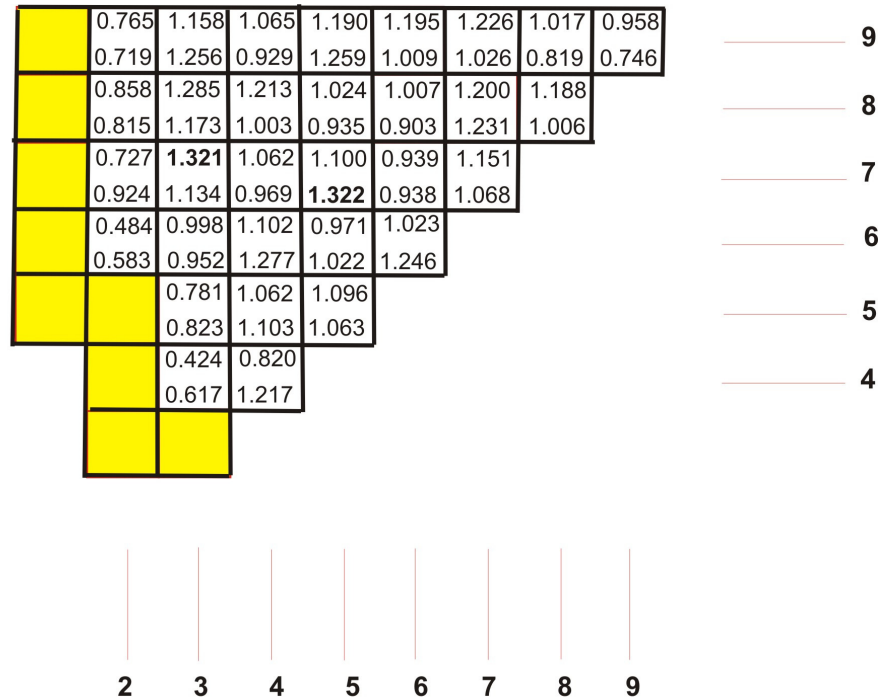


Abbildung 6-11: Integrale BE-Leistungen am Zyklusbeginn und Zyklusende (Gd-Kern)

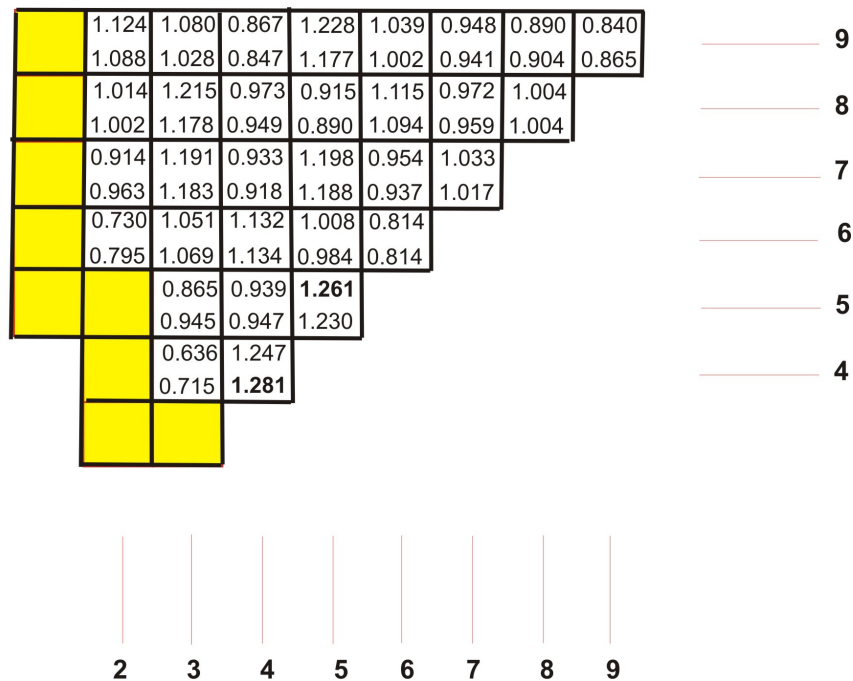


Abbildung 6-12: Integrale BE-Leistungen am Zyklusbeginn und Zyklusende (Er-Kern)

Die maximale lokale Leistungsspitze im Kern wird als das Verhältnis zwischen der maximalen lokalen und der mittleren Leistung im Gesamtkern definiert. Da der Kernmodell QUABOX/CUBBOX ein Nodalcode ist, berechnet er die maximale Leistungsspitze für das ganze BE und nicht für den heißesten Stab. Um die lokale Leistungsspitze im Kern zu ermitteln, muss dieser Wert mit dem lokalen Überhöhungsfaktor F_{BE} aus den 2D Zellrechnungen multipliziert werden. Die Positionierung der Absorberstäbe in den ausgewählten Gd- und Er-BE wurde mit zahlreichen HELIOS Simulationen optimiert und dadurch wurden niedrige F_{BE} erzielt (s. Anhang D).

Die maximale lokale Stablleistung ergibt sich als Ergebnis der Multiplikation der maximalen lokalen Leistungsspitze und der mittleren Stablängenleistung im Kern. Diese beträgt 204 W/cm für ein Standard- 16x16 BE. Abbildung 6-13 zeigt die Entwicklung der maximalen lokalen Leistungsspitzen im Laufe des Zyklus für die borarmen Kerne und einen Standard-DWR Kern.

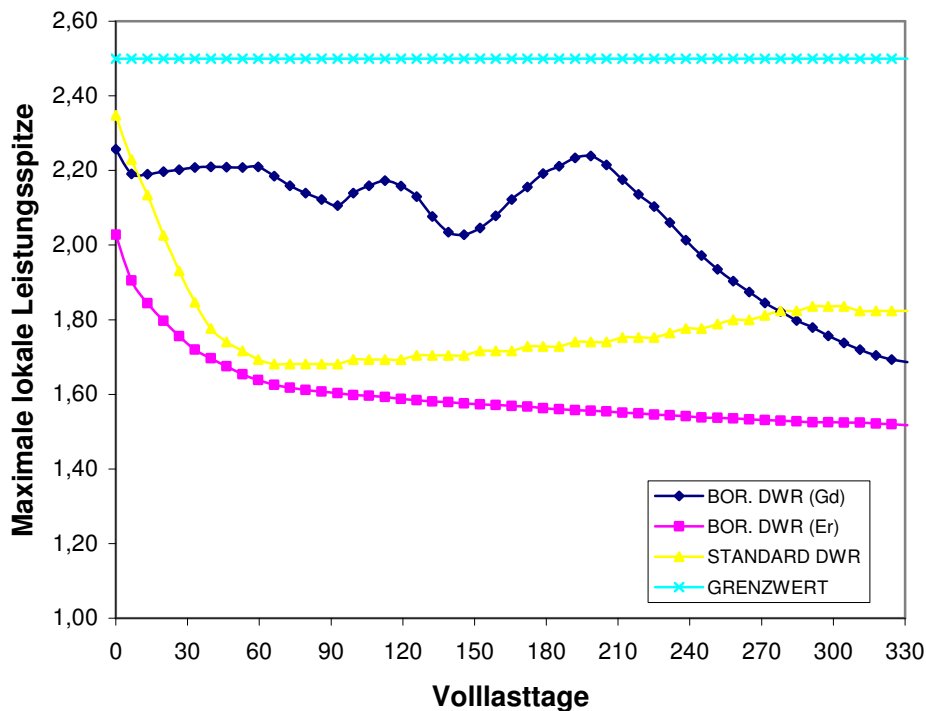


Abbildung 6-13: Maximale lokale Leistungsspitze im Laufe des Zyklus

In der Leistungsspitzenkurve des Gd-Kerns werden drei verschiedene Phasen beobachtet: von 0 bis 90 VLT, von 90 bis 120 VLT und von 140 bis 330 VLT. Die maximale Leistungsspitze für den gesamten Zyklus tritt am Zyklusbeginn bei A61 auf -

2.26 (460 W/cm). Zunächst sinkt sie, da mit dem steigenden Abbrand die Reaktivität des BE A61 (2. Zyklus) mit der höchsten Leistung im Kern absinkt. Ab dem 90 VLT wird aber einen Anstieg beobachtet: ab diesem Zeitpunkt tritt die größte Leistungsspitze in A93 auf, da dessen Absorber (3% Gd) schnell abbrennt. A63 und A93 sind vom gleichen Typ. Um einen gleichzeitigen Reaktivitätsanstieg im Laufe des Zyklus und letztendlich eine regionale Erhöhung der Leistung zu vermeiden, wurden sie mit den hoch ausgebrannten A77, A78 und A79 getrennt. Nachdem A93 sein Maximum erreicht hat, sinkt die maximale Leistungsspitze im Kern bis 2.04. Da das Gd in den BE A47 und A49 langsam abbrennt, steigt ab etwa 150 VLT die Leistung von A63. Dies beeinflusst auch das A93 und für seinen höchstbelasteten Brennstab erreicht die maximale Leistungsspitze 2.24 (457 W/cm). Ab etwa 215 VLT sinkt sie bis zum ZE, da die A93 und A63 BE schon Abbrände von etwa 10.000 MWd/tU erreicht haben. Nach 304 VLT erzeugt A63 die höchste Leistung im Kern, aufgrund der immer höheren Reaktivität der Nachbarbrennelemente A47 und A49 (beide 9% Gd).

In der Er-Kernkonfiguration wird die höchste Leistung während des gesamten Zyklus von A20 (X4, Y4) und A34 (X5, Y5) erzeugt. Diese BE befinden sich im 1. bzw. im 2. Zyklus. Die Optimierung der Leistungsdichteverteilung des Er-Kerns war deutlich einfacher im Vergleich mit dem Gd-Kern, wobei kein spezielles Brennstoffkonzept erforderlich war.

Es ist zu beobachten, dass sich die Leistungsspitzen-Kurve der Gd-Konfiguration von den anderen deutlich unterscheidet. Sie hat zwei gut ausgeprägte Spitzen. Die erste wird durch den Gd-Ausbrand in den BE mit 3% Gd₂O₃ und die zweite durch den Gd-Ausbrand in den BE mit 9% Gd₂O₃ bestimmt. Im Gegensatz dazu sinkt die maximale Leistungsspitze des Standard-Kerns in den ersten 60 VLT rasch ab und bleibt im Bereich 1.70 - 1.82. Die flachste Leistungsdichteverteilung im Kern konnte mit dem Er-Brennstoff erzielt werden. Die Leistungsspitze liegt am Zyklusbeginn bei 2.03 (414 W/cm) und sinkt bis zum Zyklusende auf 1.52.

Es ist interessant, dass bei 0 MWd/tU die Leistungsspitze des von der Industrie optimierten Standard-Kerns (2.35, 482 W/cm) höher als die Leistungsspitze der borarmen DWR ist (2.26, 460 W/cm; 2.03, 414 W/cm). Es muss beachtet werden, dass die Abbrandrechnungen für steuerstabfreie Kerne durchgeführt wurden. Darüber hinaus könnten die vier D-Bänke für eine weitere Reduzierung der maximalen Stableistung während des Zyklus benutzt werden. Generell zeigt aber der neue Gd-Kern deutlich höhere Leistungsspitzen während des Zyklus.

Der Reaktorkern ist für eine maximale lokale Spitzenbelastung von ca. 515 W/cm ausgelegt. Dies entspricht einer maximalen Leistungsspitze im Nennbetriebzustand von 2.5. Die höchstzulässige Stablängenleistung, bei der in der Stabmitte noch kein Schmelzen auftritt, liegt bei etwa 650 W/cm und für frische BE sogar bei 820 W/cm [KWU-1984]. Jedoch wird durch Begrenzungsmaßnahmen die lokale Leistung automatisch unterhalb ca. 460 W/cm gehalten [SIEMENS-1991].

Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15 zeigen die Leistungsdichteverteilung beider borarmer Kerne berechnet mit dem gekoppelten System ATHLET-QUABOX/CUBBOX.

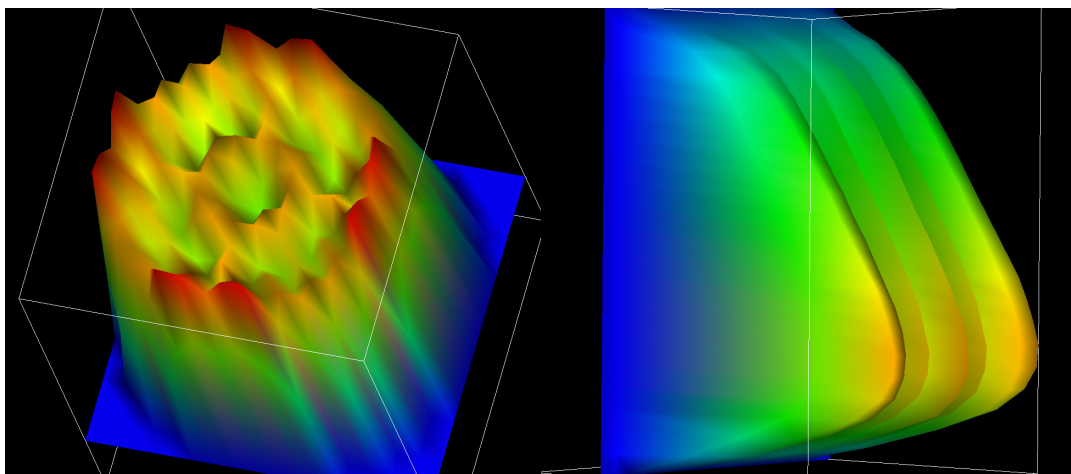


Abbildung 6-14: 3D radiale und axiale Leistungsdichteverteilung des borarmen Gd-Kerns

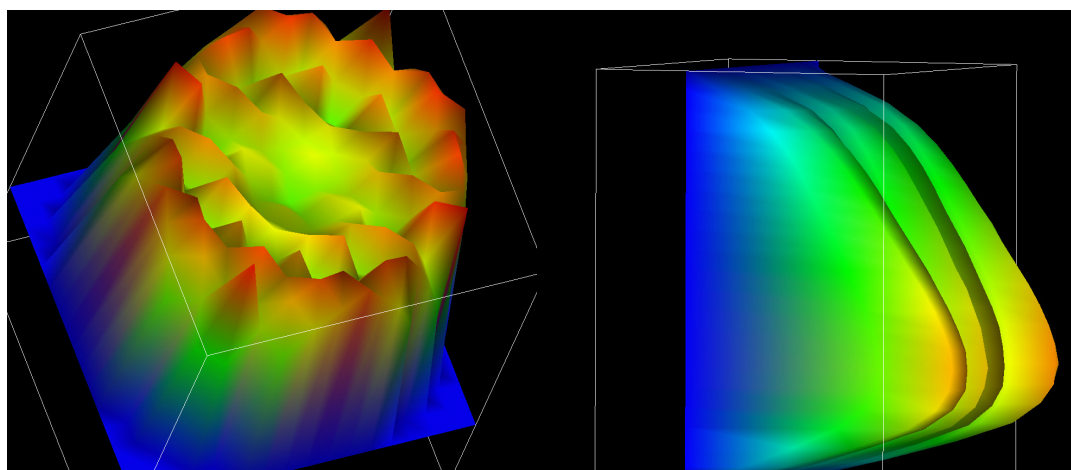


Abbildung 6-15: 3D radiale und axiale Leistungsdichteverteilung des borarmen Er-Kerns

6.5.5 Zyklusdauer und Entwicklung des k_{eff} im Laufe des Zyklus

Abbildung 6-16 zeigt die Entwicklung effektiver Neutronenmultiplikationsfaktoren der untersuchten Kerne. Es ist zu sehen, dass die borarmen Kernkonfigurationen eine deutlich kleinere Überschussreaktivität am Zyklusbeginn im Vergleich mit dem Standard-Kern besitzen. Die k_{eff} -Kurven sowohl des Er-Kerns auch des Standard-Kerns fallen monoton mit dem steigenden Abbrand ab. Im Gegensatz zu diesen bildet sich beim Gd-Kern ein Plateau zwischen 50 und 170 VLT. Die Auslegung dieses Kerns mit einer solchen relativ flachen k_{eff} -Kurve war eine große Herausforderung, da die frischen BE mit hohem Gd-Gehalt nicht nur die Leistungsdichteverteilung im Kern, sondern auch das Verhalten von k_{eff} stark beeinflussen.

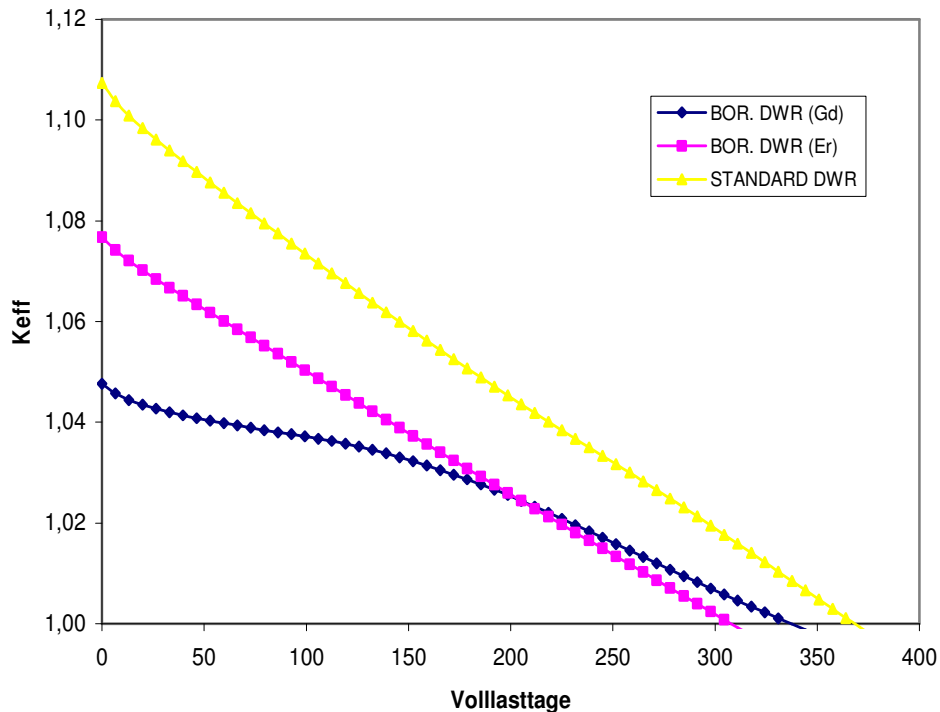


Abbildung 6-16: k_{eff} -Kurven der untersuchten Kerne

Die mit dem Gd-Kern erzielte Zyklusdauer beträgt 331 VLT und ist vergleichbar mit der Zyklusdauer heutiger Kerne, die mit einem 12-Monats-Zyklus gefahren werden. Die Zyklusdauer des Standard-DWR ist um zusätzliche 33 VLT länger und der Er-Kern kann nur 305 VLT gefahren werden. Mit diesen konnte die Zyklusdauer-Randbedingung nicht erfüllt werden. Grund dafür ist die starke unerwünschte Absorption am Zyklusende, die näher in Kap. 9 diskutiert wird.

6.5.6 Abbrandverteilung und Entladeabbrand

Um einen Gleichgewichtskern auslegen zu können, müssen zwei grundsätzliche Randbedingungen erfüllt werden:

- Gleiche BE-Anzahl von jedem Typ in jedem Batch
- Die BE von Batch i haben am Zyklusbeginn den gleichen Abbrand wie die BE vom Batch $i-1$ am Zyklusende

Da mit einer vorgegebenen Abbrandverteilung im Kern die zweite Randbedingung nicht erfüllt werden konnte, wurde das Programm CONVERGE entwickelt und mit QUABOX/CUBBOX gekoppelt. CONVERGE bekommt vom Diffusionscode den mittleren ZE-Abbrand von jedem BE. Mit der Batch-Information vom POWEROPT-Beladeplan berechnet es den mittleren Batch-Abbrand. Das Programm analysiert den Unterschied zwischen dem Zyklusende-Abbrand vom Batch $i-1$ und dem Zyklusbeginn-Abbrand vom Batch i für alle vier Batches und generiert iterativ eine neue radiale Abbrandverteilung. Mit ihrer Hilfe wird einen neuen Eingabedatensatz für QUABOX/CUBBOX vorbereitet und anschließend eine Abbrandrechnung durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse werden vom CONVERGE analysiert und eine neue Abbrandverteilung vorbereitet. Der iterative Prozess wird mit Hilfe des Programms voll automatisiert. Üblicherweise reichen etwa 6-7 Iterationsschritte, bis ein Abbrandgleichgewicht im Kern erreicht wird. Eine ähnliche Methode zur Kernauslegung eines Gleichgewichtskerns wurde in [Ben-Gurion University of the Negev - 2006] vorgeschlagen. Mit dem beschriebenen Verfahren wird sichergestellt, dass die nach jedem Zyklus entladenen BE mit den gleichen frischen BE ersetzt werden können. Dabei werden auch die gleichen Umsetzoperationen wie im letzten Zyklus durchgeführt. Auf diese Weise kann die niedrige Borkonzentration und die Erfüllung wesentlicher Auslegungsrandbedingungen für den nächsten Zyklus gewährleistet werden.

Abbranderhöhungen wurden in Deutschland bisher im internationalen Vergleich besonders intensiv verfolgt. Dies dürfte auch damit zusammenhängen, dass die Entsorgungskosten in Deutschland vom Abbrand weitgehend unabhängig sind. Ein hoher Entladeabbrand bedeutet eine bessere Ausnutzung des Brennstoffs. Aus den oben genannten Gründen ist die Erzielung eines hohen Entladeabbrands von besonderer Bedeutung für die EVUs. Abbildung 6-17 zeigt die erreichten mittleren

Brennelementabbrände am Zyklusende und Tabelle 6-1 stellt die mittleren Batch-Abbrände beider Kerne dar.

Tabelle 6-1: Mittlere Batch-Abbrände am Zyklusende für den Gd- und Er-Kern

Batch	Mittlerer Abbrand am ZE (Gd-Kern)	Mittlerer Abbrand am ZE (Er-Kern)
	GWd/tU	GWd/tU
1	13,06	10,85
2	23,46	24,30
3	35,68	36,14
4	47,19	47,06

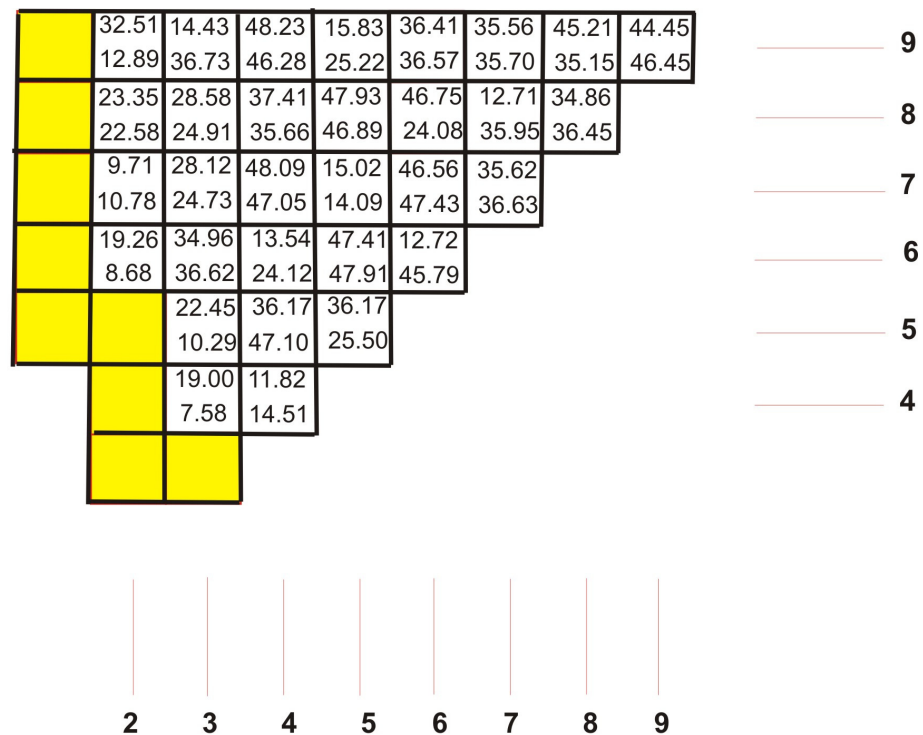


Abbildung 6-17: Abbrandverteilung am Zyklusende für den Gd- (oben) und Er-Kern (unten)

Der maximale BE-Entladeabbrand im Gd-Kern beträgt 48.22 GWd/tU und wird vom BE A92 (X4, Y9) erreicht. Grund für diesen Spitzenwert sind die beiden frischen Nachbarbrennelemente A91 (X3, Y9) und A93 (X5, Y9), die im Laufe des Zyklus eine hohe Leistung erzeugen. Der höchste BE-Abbrand im Er-Kern wurde von A48 (X5, Y6) erzielt.

6.5.7 Steuerstabwirksamkeit

Mit der Hilfe des Diffusionscodes QUABOX/CUBBOX wurden die Wirksamkeiten der Steuerstäbe berechnet. Obwohl alle Steuerstäbe aus dem gleichen Absorbermaterial hergestellt worden sind (Ag-In-Cd) haben die einzelnen Stäbe unterschiedliche Wirksamkeiten. Die Steuerstabwirksamkeit hängt stark von der konkreten Kernkonfiguration und der Position des Steuerstabs im Kern ab. Es ist auch zu erwähnen, dass je flacher die Leistungsdichteverteilung im Kern ist, desto geringer sind die Unterschiede bei den Wirksamkeiten einzelner Steuerelemente. Generell ist eine geringe Steuerstabwirksamkeit unerwünscht, da in diesem Fall eine genügend große Abschaltreaktivität des Reaktors nicht sichergestellt werden kann. Sehr hohe Steuerstabwirksamkeiten sind auch nicht vorteilhaft, da dies einen negativen Einfluss auf die Reaktivitätsregelung, Leistungsdichteverteilung im Kern und die Brennstoffausnutzung (gleichmäßiger Abbrand im Kern) haben wird. Weiterhin muss bei hohen Steuerstabwirksamkeiten auch mit einem ungünstigen Ablauf von Steuerstabausfahr- und Steuerstabauswurf-Störfällen gerechnet werden.

Abbildung 6-18 zeigt die Steuerstabwirksamkeiten beider borarmer Kerne. Die Steuerstabzahl, das Absorbermaterial und die Position der Steuerelemente der ursprünglichen Standard-DWR Konfiguration wurden nicht geändert.

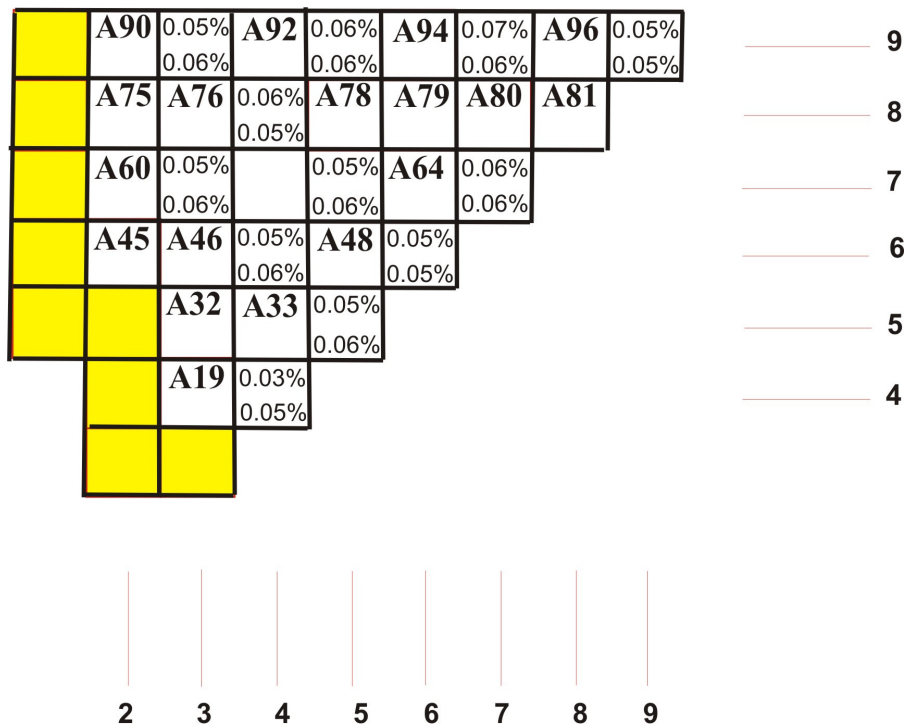


Abbildung 6-18: Wirksamkeit der Steuerstäbe im Gd- (oben) und Er-Kern (unten)

Die Analysen zeigen, dass sich der wirksamste Steuerstab im BE A95 (X7, Y9) des Gd-Kerns befindet. Dieses BE erzeugt eine hohe Leistung und ist nahe am Kernzentrum. Es ist zu sehen, dass die Wirksamkeiten aller Steuerstäbe in den beiden Kernen relativ gleich sind, dies deutet auf flache Leistungsdichteverteilung auf.

6.5.8 Berechnung des DNB-Verhältnisses

Um das DNB-Verhältnis berechnen zu können wurden sowohl Thermohydraulik- auch Kinetik-Eingabedaten beider Kerne für das gekoppelte System ATHLET-QUABOX/CUBBOX entwickelt. Der Einsatz solcher fortschrittlicher Simulationssysteme ist für eine realistische Berechnung des DNB-Verhältnisses von übergeordneter Bedeutung [Carlin et al., 2006]. Deshalb wurde ein ATHLET Kernmodell mit 193 thermohydraulischen Kanälen vorbereitet und ein geeignetes Mapping-Schema für die Kopplung zwischen ATHLET und QUABOX/CUBBOX programmiert. Im nächsten Schritt wurden mehrere dynamische Rechnungen mit dem gekoppelten System durchgeführt um die Stabilität des neuen Modells zu überprüfen. Es wurden plausible Ergebnisse für die wesentlichen thermohydraulischen und neutronenkinetischen Größen erzielt. Für die Berechnung des minimalen DNB-Verhältnisses wurde die Westinghouse W-3 Korrelation verwendet.

Im Nennbetrieb ist der minimale DNB-Wert 3.92 für den Gd-Kern (A61, Node 9) und 4.11 für der Er-Kern (A20, Node 10). Aufgrund der höheren Leistungsspitzen im Standard-DWR ist der Abstand zur kritischen Heizflächenbelastung kleiner. Der DNB-Wert von 3.65 tritt im BE A93 (Node 12) auf. Der Vergleich mit der Auslegungsrandbedingung von 2.07 zeigt aber einen genügend großen Abstand zur kritischen Heizflächenbelastung für alle Kerne.

6.5.9 Wesentliche Auslegungsparameter der borarmen Kerne

Die wesentlichen Auslegungsparameter aller untersuchten Kerne sind in der Tabelle 6-2 zusammengefasst. Darüber hinaus können diese mit den Daten des Standard-Kerns verglichen werden. Eigentlich ist es möglich diese Parameter durch den Einsatz komplexer Programmsystemen zur Optimierung der Beladepläne wie z.B. PRIMO, PARAT-SWR, ROSA usw. weiterzuverbessern [Becker et al., 2001]. Die Anwendung solcher Codes könnte einen erheblichen Einfluss auf den wirtschaftlichen sowie auch auf den sicherheitstechnischen Anlagenbetrieb haben. Generell ist aber ein erfahrener

Industrie-Kernausleger in der Lage, die von einem fortschrittlichen Programm vorgeschlagene Lösung weiter zu optimieren.

Die Optimierung der Kernkonfigurationen beider borarmer Kerne wurde auf der Basis der erworbenen spezifischen Kenntnisse und Erfahrungen durchgeführt. Die genaue Position jedes BE wurde nach aufwendigen Analysen unter Berücksichtigung wesentlicher Randbedingungen wie z.B. maximale Leistungsspitze, Zyklusdauer usw. festgestellt. Jedoch wäre dies ohne die Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR Kernen mit reduziertem Borsäureeinsatz sowie den Einsatz von INTERFACE, REBA, POWEROPT und CONVERGE nicht möglich gewesen.

Tabelle 6-2: Wesentliche Auslegungsparameter borarmer Kerne

Parameter der DWR Kerne	Borarmer DWR (Gd)	Borarmer DWR (Er)	Standard DWR
Kritische Borkonzentration am Zyklusbeginn Vollast heiß, Xe gleichg. [ppm]	518	805	1137
Kritische Borkonzentration. am Zyklusbeginn Nulllast heiß, Xe gleichg. [ppm]	610	895	1277
k_{eff} (BOC), Vollast heiß, Bor=0 ppm, Xe gleichg.	1.04767	1.07675	1.10735
k_{eff} (EOC), Vollast heiß, Bor=0 ppm, Xe gleichg.	1.00111	1.00008	1.00116
k_{eff} (BOC), Nulllast heiß, Bor=518/805/1137 ppm, alle Stäbe eingefahren	0.92551	0.93108	0.93058
k_{eff} (BOC), Nulllast heiß, Bor=518/805/1137 ppm alle Stäbe eingefahren außer Stuck Rod	0.93887	0.94745	0.94135
Zyklusdauer [VLT]	331	305	364
Minimales DNB-Verhältnis	3.92	4.11	3.65
Maximale lineare Stableistung [W/cm]	460	414	479
Max. Leistungsspitze	2.26	2.03	2.35
Lokaler Überhöhungsfaktor F_{BE}	1.13	1.08	1.09
Wirksamkeit des wirks. Steuerstabs [%]	0.07	0.06	0.10
Mittl. Kernabbrand am Zyklusbeginn [MWd/tU]	18.400	17.800	18.300
Mittl. Kernabbrand am Zyklusende [MWd/tU]	29.800	28.700	31.200

6.6 Ableitung der äquivalenten Punktkinetik

Um die Reaktivitätseigenschaften der Kernkonfigurationen besser zu analysieren wurden von den nuklearen Wirkungsquerschnitten mit der Hilfe des 3D Diffusionscodes QUABOX/CUBBOX die äquivalenten Punktkinetik-Daten abgeleitet und die Rückwirkungseigenschaften untersucht. Für dieses Ziel wurden die einzelnen Reaktivitätskoeffizienten berechnet.

6.6.1 Kühlmitteldichtekoeffizient und Dichterückwirkung

Vom besonderen Interesse bei dem Einsatz von Borsäure im DWR Kühlmittel ist das Verhalten des Kühlmittelkoeffizienten – Kühlmitteltemperatur- und Kühlmitteldichtekoeffizient. Eine Temperaturerhöhung in einem borfreien Kühlmittel führt zu einer Verringerung der Moderatorichte und dadurch zu einer Reaktivitätsabnahme, da der Reaktor stärker untermoderiert wird. Bei borhaltigem Kühlmittel bedeutet eine Dichteverringerng jedoch auch eine gleichzeitige Verringerung der neutronenabsorbierenden Substanz im Kern, d.h. der Kühlmitteltemperaturkoeffizient erhält eine positive Komponente. Je niedriger die Borkonzentration im Kern ist, desto kleiner wird diese Komponente und desto negativer wird der Kühlmitteltemperaturkoeffizient. Die Auswirkung der Moderatorichte auf die Reaktivität kann auch mit Hilfe des Kühlmitteldichtekoeffizients berücksichtigt werden. Dieser ist positiv, im Betrag durch Borsäure verkleinert und mit einem umgekehrten Vorzeicheneichen wie der Kühlmitteltemperaturkoeffizient, da eine Zunahme der Kühlmitteltemperatur eine Abnahme der Kühlmitteldichte bedeutet. Da die erzeugten Wirkungsquerschnitte für die neuen borarmen DWR Kernkonfigurationen dichteabhängig sind, wurden der Kühlmitteldichtekoeffizient und schließlich die Dichterückwirkung berechnet. Zusätzlich wurde auch der Kühlmitteltemperaturkoeffizient für bestimmte Moderatortemperaturen geprüft. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass dieser sogar bei niedrigen Temperaturen (170 °C) und maximaler Borkonzentration (Zyklusbeginn) negativ ist.

Abbildung 6-19 zeigt die Kühlmitteldichtekoeffizienten der untersuchten Kerne. Es ist zu sehen, dass die borarme Kernkonfigurationen im gesamten Dichtebereich einen deutlich größeren Kühlmitteldichtekoeffizient als der Standard-Kernkonfiguration besitzen. Dies gilt insbesondere für den Dichtebereich unter 600 kg/m³. Bei 570 kg/m³ ist der Kühlmittelkoeffizient des borarmen Gd-Kerns um zusätzliche 11 pcm/kg/m³ und bei 400 kg/m³ um 21 pcm/kg/m³ größer als der Kühlmitteldichtekoeffizient des Standard-Kerns. Insgesamt ist bei 400 kg/m³ der Koeffizient des borarmen Gd-Kerns um 34% größer.

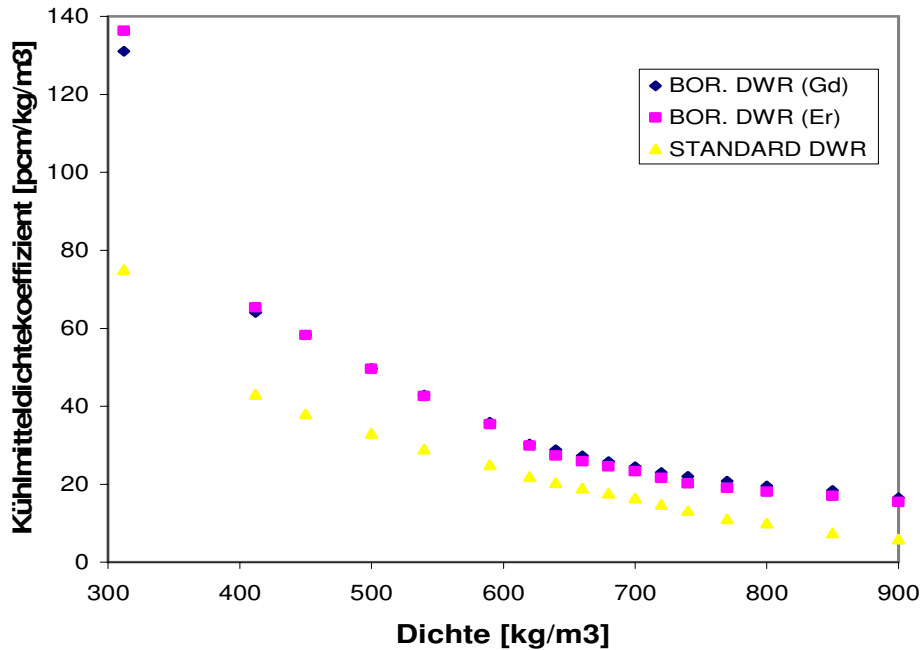


Abbildung 6-19: Kühlmitteldichtekoeffizienten

Die Kühlmitteldichtekoeffizient-Werte des Er-Kerns sind den Kühlmitteldichtekoeffizient-Werten des Gd-Kerns ähnlich. Da die drei Kerne am Zyklusbeginn mit 518, 805 und 1137 ppm gefahren sollen, ist zu erwarten, dass die Kurve des Er-Kerns etwa zwischen der Standard-DWR-Kurve und der Gd-Kurve liegen wird. Darüber hinaus ist im Dichtebereich 630-900 kg/m³ der Koeffizient des Er-Kerns etwas kleiner als der des Gd-Kerns, aber mit der absinkenden Dichte wird er immer größer. Bei 310 kg/m³ ist der Er-Koeffizient sogar um 5 pcm größer als der Gd-Koeffizient. Dieses Verhalten deutet auf eine steigende Absorptionsfähigkeit des Er- im Vergleich mit dem Gd-Brennstoff bei einer absinkenden Kühlmitteldichte. Um dies näher zu untersuchen wurden zwei gleiche BE-Konfigurationen (eine mit Gd und eine mit Er) mit dem Zellcode HELIOS vorbereitet und deren Wirkungsquerschnitte erzeugt. Die Analysen zeigen, dass mit der absinkenden Kühlmitteldichte die Absorption vom Er-Brennstoff etwas schneller als die Absorption vom Gd-Brennstoff ansteigt. Grund dafür ist sein Absorptionswirkungsquerschnitt für thermische und epithermische Neutronen. Abbildung 6-20 zeigt die die Absorptionswirkungsquerschnitte von Gd- und Er-Brennstoffen bei verschiedenen Moderatorichten.

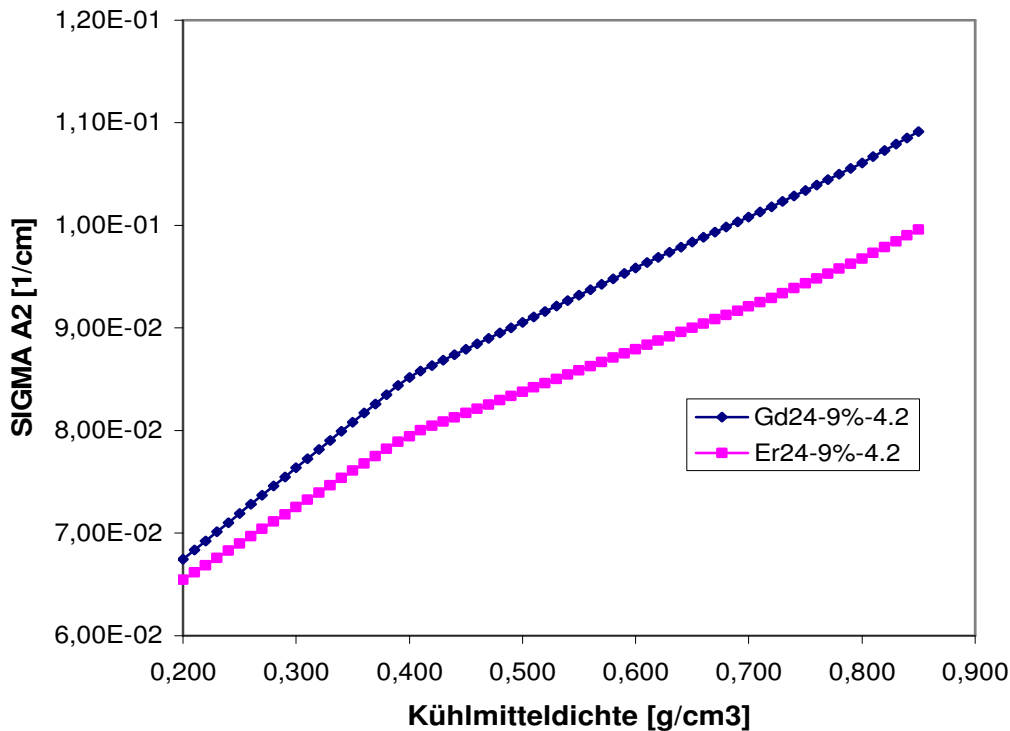


Abbildung 6-20: Absorptionswirkungsquerschnitte für thermische Neutronen beider Brennelementkonfigurationen (Abbrand = 0 MWd/tU, Bor = 0 ppm)

Tabelle 6-3 zeigt die in dem Zellcode HELIOS programmierten Grunddaten von Gd und Er [Studsvik-2006]. Mit einer steigenden Kühlmitteltemperatur bzw. sinkenden Kühlmitteldichte wird das Neutronenspektrum zu höheren Energien verschoben, d.h. das Spektrum wird härter. Es ist zu sehen, dass das Resonanzintegral von ^{167}Er viel größer im schnell-thermischen Gebiet als deren von ^{157}Gd und ^{155}Gd ist. Dies erklärt warum bei kleineren Kühlmitteldichten der Unterschied bei den Absorptionsfähigkeiten von Gd- und Er-Brennstoffen immer kleiner wird. Diese Eigenschaften von Er werden auch in [Vesterlund und Junkrans, 1998] und [Jonsson und Gunn] bestätigt. Erbium wird zur Verstärkung des Kühlmitteldichtekoeffizienten von Kernen mit einer sehr langen Zyklusdauer (24 Monate) verwendet. Darüber hinaus wird es im Brennstoff der RBMK-Anlagen eingesetzt, um den Dampfblasenkoeffizient dieser Reaktorkerne zu verbessern [Bubelis et al., 2003].

In einem nächsten Schritt wurde auch die Kühlmitteldichterückwirkung berechnet (Abbildung 6-21). Aufgrund der größeren Koeffizienten beider borarmer Kerne wird bei kleineren Dichten mehr negative Reaktivität zugeführt. Der Reaktivitätsunterschied zwischen dem Gd-Kern und dem Standard-Kern ist bei etwa $500 \text{ kg/m}^3 \Delta\rho = -3.3\%$ und

-6.2% bei 400 kg/m³. Die Reaktivität aller im Kern eingefahrenen Steuerstäbe beträgt bei Nulllast heiß etwa $\Delta\rho = -7,5\%$. Dies bedeutet, dass bei einer Kühlmitteldichte von 400 kg/m³ die negative Reaktivitätsäquivalenz von 83% aller Steuerstäbe zusätzlich zugeführt wird.

Tabelle 6-3: Grunddaten der Gd- und Er-Isotope

Element	Isotop	nH* [%]	σ_{2200} [barn]	RI _∞ [barn]
Gd	¹⁵² Gd	0.2	14.4	404.5
	¹⁵⁴ Gd	2.1	85.9	230.7
	¹⁵⁵ Gd	14.8	60900	1557
	¹⁵⁶ Gd	20.6	1.709	105.2
	¹⁵⁷ Gd	15.7	255100	758.8
	¹⁵⁸ Gd	24.8	2.002	62.77
	¹⁶⁰ Gd	21.8	0.764	7.89
Er	¹⁶² Er	0.14	-	-
	¹⁶⁴ Er	1.56	-	-
	¹⁶⁶ Er	33.41	19.6	96
	¹⁶⁷ Er	22.94	659	2970
	¹⁶⁸ Er	27.07	2.74	37
	¹⁷⁰ Er	14.88	5.8	45

* natürliche Häufigkeit einzelner Isotope

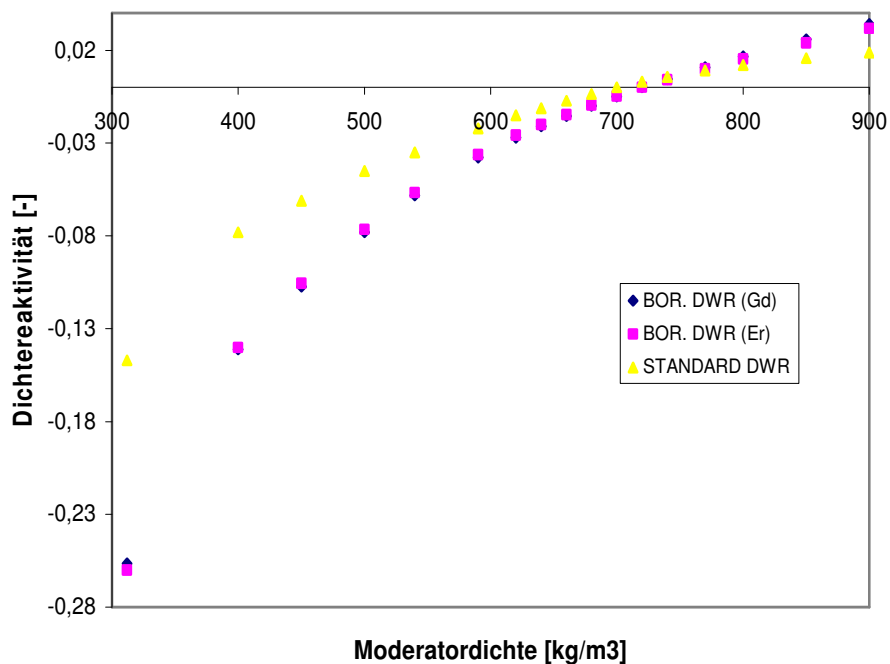


Abbildung 6-21: Dichterückwirkung

6.6.2 Brennstofftemperaturkoeffizient und Brennstoffrückwirkung

Eine Änderung der Brennstofftemperatur beeinflusst die Neutronenbilanz im thermischen und epithermischen Energiebereich. Der Dopplereffekt bringt den Hauptbeitrag zur Änderung der Neutronenbilanz im epithermischen Energiebereich, da er auf der Resonanzabsorption der Neutronen durch schwere Kerne beruht. Mit steigender Brennstofftemperatur werden mehr Neutronen im Brennstoff absorbiert und dadurch ergibt sich ein negativer Reaktivitätsbeitrag.

Abbildung 6-22 zeigt die Brennstofftemperaturkoeffizienten der untersuchten Kerne. Es ist zu sehen, dass die Unterschiede relativ klein sind. Generell wird oft bei Störfallanalysen der Brennstofftemperaturkoeffizient mit ca. $-2.5 \text{ pcm}^{\circ}\text{C}$ als nahezu konstant angesehen. Die Brennstoffrückwirkung wird in Abbildung 6-23 dargestellt.

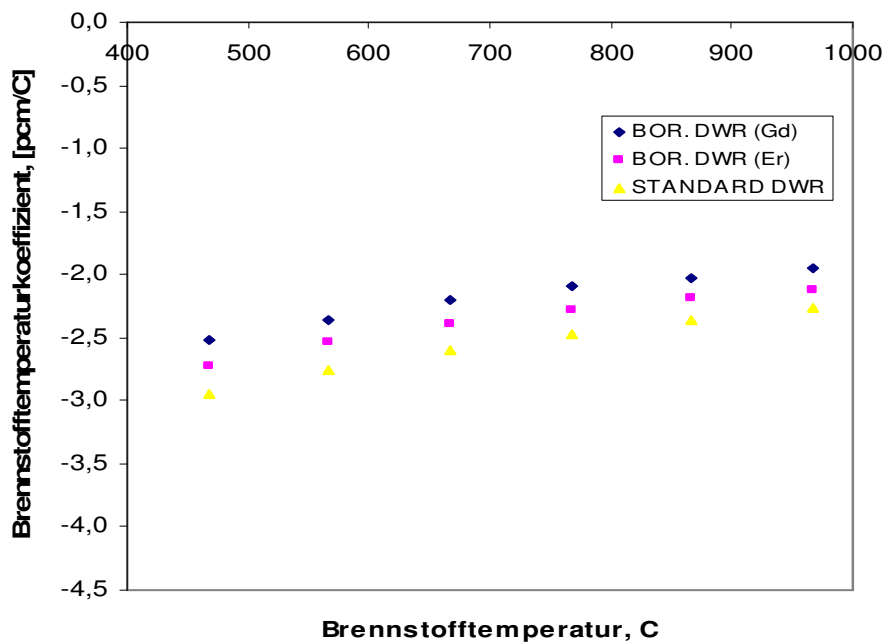


Abbildung 6-22: Brennstofftemperaturkoeffizient

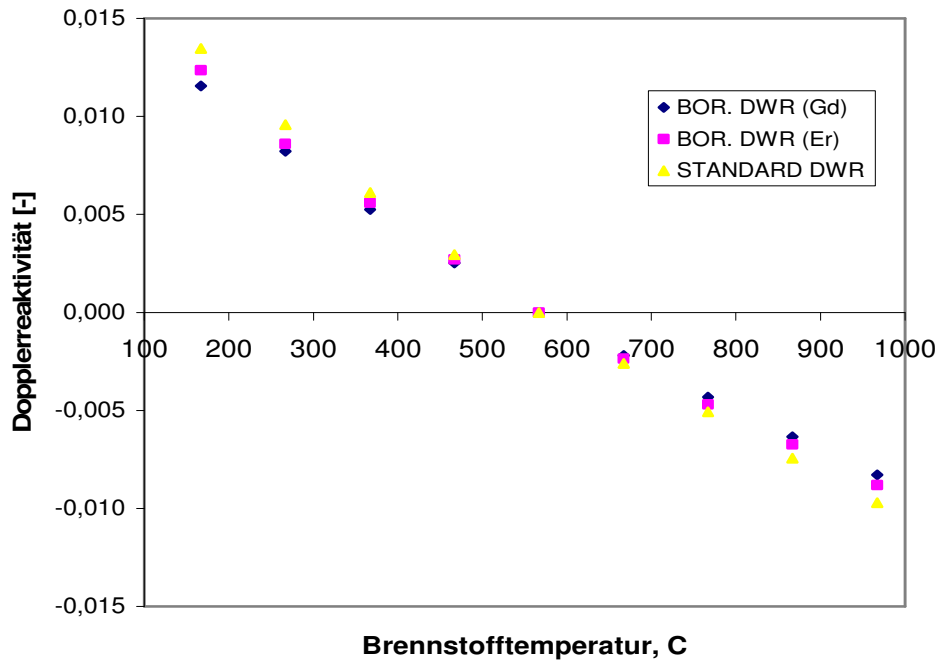


Abbildung 6-23: Brennstoffrückwirkung

6.7 Zusammenfassung

Mit der Hilfe des iterativen Diffusionsverfahrens und der Programme QUABOX/CUBBOX, POWEROPT und CONVERGE wurden unter Berücksichtigung der vordefinierten Auslegungsrandbedingungen zwei optimierte borarme Kernkonfigurationen ausgelegt. Die Kernausslegung der ersten Kernkonfiguration basiert auf einer fortschrittlichen Gd-Brennstoffstrategie mit einer zeitlichen Verschiebung des Gd-Ausbrandpunktes. Für die Kompensation der Überschussreaktivität sind am Zyklusbeginn nur 518 ppm Bor erforderlich. Die zweite Kernkonfiguration wurde mit Hilfe von Er-Brennstoff ausgelegt und die berechnete kritische Borkonzentration lag bei 805 ppm. Die neuen Kerne bieten eine 50% bzw. 30% Reduzierung des Borgehalts im Kühlmittel im Vergleich mit der heutigen DWR Praxis. Die BE-Typen sowie die genaue Positionen einzelner BE im Reaktorkern wurden dargestellt. Ferner wurden weitere wesentliche Parameter der neuen Kernkonfigurationen wie Zyklusdauer, maximale Leistungsspitze, Entladeabbrand, Steuerstabwirksamkeit usw. ermittelt und mit den Werten des Standard-Kerns verglichen.

7 Modellierung der DWR Anlage in ATHLET

Um die potentiellen sicherheitstechnischen Vorteile der borarmen Kernkonfigurationen in verschiedenen Transienten sowie Störfällen zu analysieren wurden unterschiedliche ATHLET Eingabedaten auf der Basis des von der GRS entwickelten und validierten GKN2-Simulator Datensatzes vorbereitet [GRS-2000]. Die folgenden Abschnitte enthalten eine kurze Beschreibung der ATHLET-Modellierung.

7.1 Primärkreis

Der Primärkreis wurde mit vier separaten Loops dargestellt, um eine Simulation asymmetrischer Transienten zu ermöglichen. Die wesentlichen Betriebs- sowie Sicherheitssysteme wie z. B. Volumenregelsystem (VRS), Zusatzboriersystem (ZBS), Hochdruck- und Niederdruckeinspeisung (HD- und ND-Einspeisung), Druckspeicher usw. wurden mit Hilfe von FILLs und separaten Thermofluidobjekten modelliert. Ferner wurden die DE mit drei verschiedenen U-Rohr-Bündeln dargestellt. Jedes Bündel hat etwa 1300 U-Rohre und wurde mit 15 Nodes repräsentiert. Diese Modellierung ist von übergeordneter Bedeutung für die Simulation des Naturumlaufs bei Deborierungsereignissen. Abbildung 7-1 zeigt Loop 3 der Anlage, vereinfacht wird auch der RDB dargestellt.

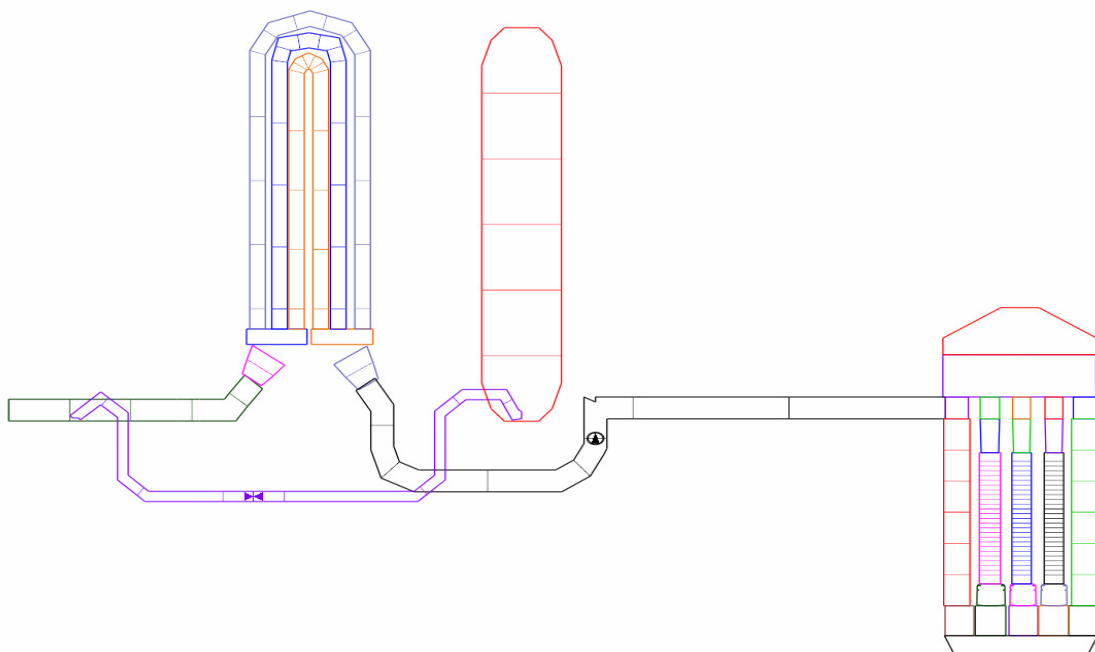


Abbildung 7-1: Primärkreis

Es wurde auch eine detaillierte Mehrkanal-Modellierung des RDB realisiert. Sie ermöglicht die Darstellung mehrdimensionaler Strömungen sowie eine realistischere Simulation der Vermischungsvorgänge im Reaktor. Generell wird die Mehrkanal-Modellierung im RDB durch folgende grundsätzliche Schritte verwirklicht:

- Anschluss aller Hauptkühlmittelleitungen an eigenständige thermohydraulische Kanäle
- Aufteilung des Reaktorkerns in mehrere Ringe
- Darstellung des Ringraums mit acht parallelen Fluidkanälen

Der Reaktorkern wurde mit Hilfe von 17 separaten Fluidkanälen repräsentiert. Die Kernkanäle bestehen aus 26 axialen Nodes und wurden in zwei Ringen und einer zentralen Zone angeordnet. Abbildung 7-2 zeigt die Position verschiedener Kühlkanäle im Reaktorkern. Eine ähnliche radiale Aufteilung wurde auch für das obere und untere Plenum ausgewählt. Der Ringraum wurde mit Hilfe von acht parallelen Fluidkanälen dargestellt, wobei jeder Kanal aus einem Objekt unterhalb des kalten Stranges (PV-DCB1 bis PV-DCB8), und einem Objekt auf der Höhe des kalten Stranges (PV-DCM1 bis PV-DCM8) besteht. An die kalten Stränge schließen PV-DCM2, PV-DCM3, PV-DCM6 und PV-DCM7 an. Die horizontale Strömung zwischen den Volumina auf der Höhe der Stützen wurde mit Hilfe von Single Junction Pipes (SJP) modelliert. Die Geometrie des Ringraums und die Formverlustbeiwerte sind dem Eingabedatensatz für GKN2 entnommen worden. Die Querströmung zwischen den Objekten unterhalb des Stützens wurde mit Hilfe von zusätzlichen Objekten simuliert.

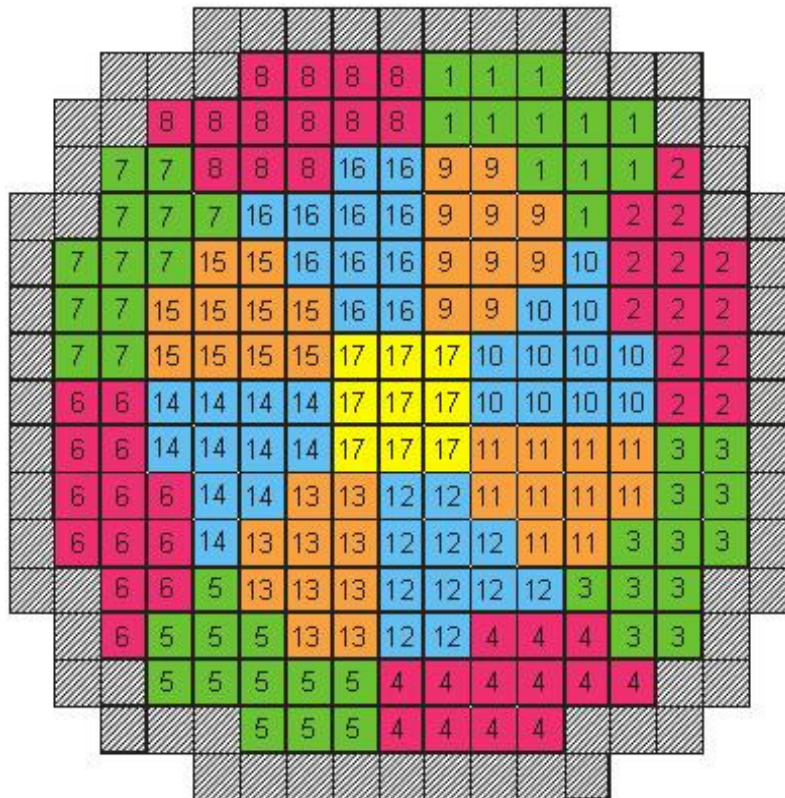


Abbildung 7-2: Position der Kühlkanäle im DWR Kern

7.2 Sekundärkreis und Balance-Of-Plant Modell

Der Sekundärkreis und das Balance-Of-Plant Modell wurden mit der Simulationssprache GCSM (General Control Simulation Module) dargestellt, wobei die Signale in entsprechenden logischen Steuerungsblöcken systematisiert wurden. Der DE-Ringraum, -Riser, -Dom sowie der Dampfsammler wurden mit separaten Thermofluid Objekten repräsentiert.

7.3 Wesentliche Parameter der DWR Anlage im Nennbetrieb

Um das Verhalten der drei Kernkonfigurationen bei verschiedenen Transienten und Störfällen vergleichen zu können, wurden auf der Basis des bereits beschriebenen detaillierten DWR Datensatzes unterschiedliche Datensätze für die folgenden Kernkonfigurationen vorbereitet: borarme Gd-Kernkonfiguration, borarme Er-Kernkonfiguration und Standard-Kernkonfiguration. Die wesentlichen Parameter der DWR Anlagen im Nennbetrieb zeigt Tabelle 7-1.

Tabelle 7-1: Wesentliche Betriebsparameter der DWR Anlagen

Physikalische Größe	Wert
Reaktorleistung (MW _{th})	3760
Primärdruck (MPa)	15.8
Druckhalterfüllstand (m)	7.46
Massenstrom pro Loop (kg/sec)	4860
Borkonzentration (ppm)	518/805/1137
Sekundärdruck (MPa)	6.68
Speisewassermenge pro DE (kg/sec)	512
Dampfmenge pro DE (kg/sec)	512
Speisewassertemperatur (°C)	217

Die drei ATHLET-Datensätze unterscheiden sich nur durch die anfängliche Borkonzentration und die Punktkinetikdaten im Block NEUKINP.

8 Untersuchungen zum Einfluss der Borreduzierung auf die DWR Sicherheit

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist eine Untersuchung der Voraussetzungen und der grundsätzlichen Möglichkeiten, ob durch Alternativstrategien der Reaktivitätssteuerung und -regelung mit reduziertem Boreinsatz bei existierenden deutschen DWR sicherheitstechnische Verbesserungen erreicht werden können. Der Schwerpunkt wird auf Verbesserungen bei Deborierungsstörfällen und beim präventiven anlageninternen Notfallschutz gelegt. Da die in Kap. 6.6.1 erzielten Ergebnisse verbesserte Rückwirkungseigenschaften der borarmen Kerne gezeigt haben, wurde es für sinnvoll gehalten, deren Wirksamkeit auch bei ATWS-Transienten zu untersuchen.

Für dieses Ziel wurden mit den borarmen Kernkonfigurationen und die Kernkonfiguration des Standard-DWR Simulationen und Vergleichsanalysen zu ATWS, Deborierungsstörfällen sowie zu auslegungsüberschreitenden Ereignissen durchgeführt.

8.1 Einfluss der Borreduzierung auf das Kernverhalten bei ATWS-Ereignissen

Das aus dem Englischen übernommene Acronym ATWS (Anticipated Transients Without Scram) bezeichnet Transienten, die auf Grund ihrer Eintrittshäufigkeit während der Betriebsdauer der Anlage zu erwarten sind, bei denen aber die angeforderte Rektorschnellabschaltung versagt. Diese könnte aufgrund eines Fehlers im Reaktorschutzsystem oder eines mechanischen, gemeinsam verursachten Ausfalls (GVA, common cause failure) unverfügbar werden [STUK-2003]. Nach dem deutschen Regelwerk werden bei den Sicherheitsanalysen solcher Ereignisse keine zusätzlichen Einzelfehler postuliert. Weiterhin werden alle Systeme, die von der Transiente nicht direkt betroffen sind als funktionsfähig angenommen [Papukchiev et al., 2006].

Da der Ablauf der ATWS-Transienten stark von der Wechselwirkung zwischen Thermohydraulik- und Neutronenkinetik-Phänomenen abhängt, sind diese Ereignisse für die Analyse der Wirksamkeit der Reaktivitätseigenschaften besonders geeignet. Die

negative Dichterückwirkung ist einer der wichtigsten Faktoren, der die Reaktorleistung im kritischen Zeitfenster reduziert und den Primärdruckanstieg begrenzt.

8.1.1 Anfangs- und Randbedingungen

Mit dem Systemcode ATHLET wurden thermohydraulische Untersuchungen zum ATWS-Speisewasserausfall durchgeführt. ATWS-Speisewasserausfall ist eine Betriebstransiente mit dem gleichzeitigen Ausfall aller Hauptspeisepumpen und des Schnellabschaltsystems. Die Systeme, die von der Transiente nicht direkt betroffen sind werden als funktionsfähig simuliert. Ferner wurden keine Einzelfehler postuliert. Die Anfangs- und Randbedingungen für die Simulationen sind:

- Thermische Reaktorleistung – 3760 MW_{th} (100%)
- Primärdruck im Nennbetrieb – 15.78 MPa
- Sekundärdruck im Nennbetrieb – 6.78 MPa
- Einspeiserate des Notspeisesystems: 35 kg/s
- ZBS boriert mit 2 kg/s (7000 ppm) Loop 1, 2, 3 und 4 auf
- ZBS-Verzögerung: 30 s
- Die vier Hauptkühlmittelpumpen (HKMP) werden nicht ausgeschaltet

8.1.2 Transientenablauf

Bei t=0 s fallen die Speisewasserpumpen aus. Dies führt zu einer kurzzeitigen, geringfügigen Druck- und Temperaturerhöhung im Primär- und Sekundärsystem. Aufgrund der ausgefallenen DE-Bespeisung und der signifikanten thermischen Reaktorleistung sinken die DE-Füllstände und nach 10 s werden vom Reaktorschutz RESA und Turbinenschnellabschaltung (TUSA) Signale ausgelöst. Absorberstäbe fallen gemäß der Störfallannahme nicht in den Kern ein. Nach der TUSA steigt der Sekundärdruck stark an und bewirkt eine rasche Erhöhung der Drücke und Temperaturen im Primärkreis (Abbildung 8-1). Der maximale Primärdruck erreicht knapp 18.2 MPa und ein weiterer Anstieg wurde durch das rechtzeitige Öffnen der Abblase- und Sicherheitsventile am DH vermieden (Abbildung 8-2).

Der Anstieg der Primärtemperatur führt zu geringerer Kühlmitteldichte (Abbildung 8-3) und verschlechterter Moderation, die letztendlich in einer negativen Reaktivität

resultieren (Abbildung 8-4 und Abbildung 8-5). Aufgrund der Dichterückwirkung wird die thermische Reaktorleistung stark reduziert (Abbildung 8-6) und mit dem Einleiten des sekundärseitigen 100 K/h Abfahrens werden die Umleitstation und die Abblaseregelventile geöffnet. Die durch diese Maßnahmen verursachte Abkühlung der Sekundärseite führt zur einer kurzzeitigen Stabilisierung der Reaktorleistung bei etwa 2250 MW_{th}.

30 s nach dem Transientenbeginn beginnt das ZBS in jeden Loop 2 kg/s, auf eine Konzentration von 7000 ppm boriertes Wasser einzuspeisen. Dennoch ist zu dem Zeitpunkt für die Reduktion der thermischen Leistung die negative Dichterückwirkung maßgebend. Da die DE-Füllstände weiter abfallen, wird 80 s nach dem Transientenbeginn die 5 m – Marke erreicht. Das Reaktorschutzsystem schaltet die Notspeisewasserpumpen ein und damit wird jeder DE mit 35 kg/s Notspeisewasser bespeist.

Aufgrund der stark reduzierten Reaktorleistung und des sekundärseitigen Abfahrens fallen die Primärtemperaturen weiter. Dies resultiert in einer steigenden Kühlmitteldichte, die bei ca. 350 s einen kleinen Reaktivitäts- und schließlich auch einen Leistungsanstieg verursacht. Im Laufe der Zeit wird der Primärkreis weiter gekühlt und aufgrund der steigenden Kühlmitteldichte wird die Dichterückwirkung ab ca. 500 s positiv. Bis zum diesen Zeitpunkt ist aber das Primärkühlmittel durch das ZBS schon ausreichend aufboriert und damit wird eine langfristige Unterkritikalität des Reaktors garantiert. Tabelle 8-1 zeigt den Ereignisablauf während des ATWS-Speisewasserausfalls.

Tabelle 8-1: Ereignisablauf während des ATWS-Speisewasserausfalls

Ereignis	Borarmer DWR (Gd)	Borarmer DWR (Er)	Standard DWR
Speisewasserausfall (s)	0	0	0
RESA, TUSA Signal (s)	10	10	10
Öffnung des DH Abblaseventils (s)	11	11	11
Öffnung des DH Sicherheitsventils 1 (s)	16	16	15
Öffnung des DH Sicherheitsventils 2 (s)	--	18	17
Primärdruckspitze (MPa)	17.98	18.01	18.25
Öffnung der Umleitstation (s)	13	13	12
Öffnung des Abblaseregelventils (s)	18	18	17
Wassermasse durch das DH-Abblaseventils (kg)	0	0	6748
Gesamtmasse durch das DH-Abblaseventils (kg)	2410	2553	9576
Starten des Zusatzboriersystems (s)	30	30	30
Starten des Notspeisesystems (s)	85	84	82

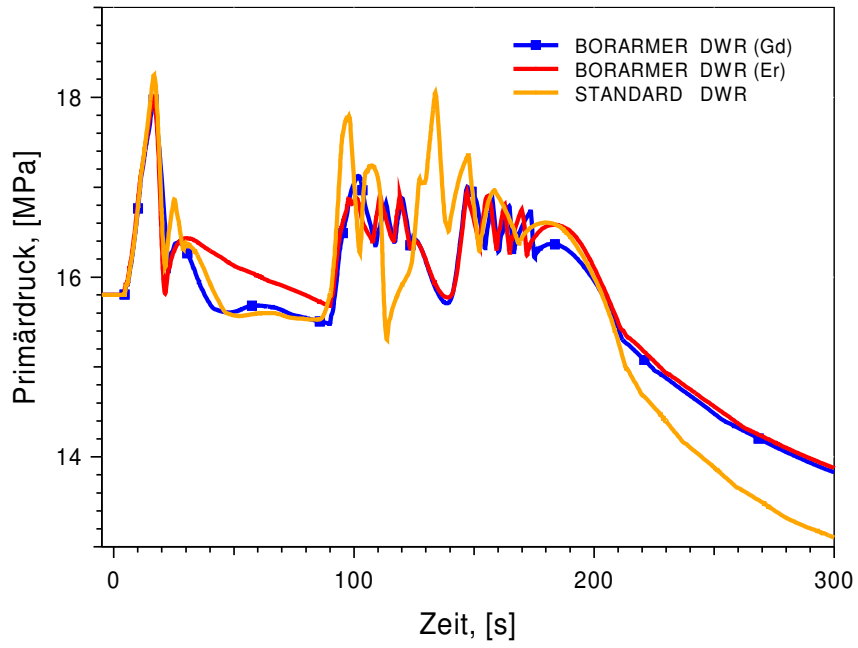


Abbildung 8-1: Druck im Primärkreis

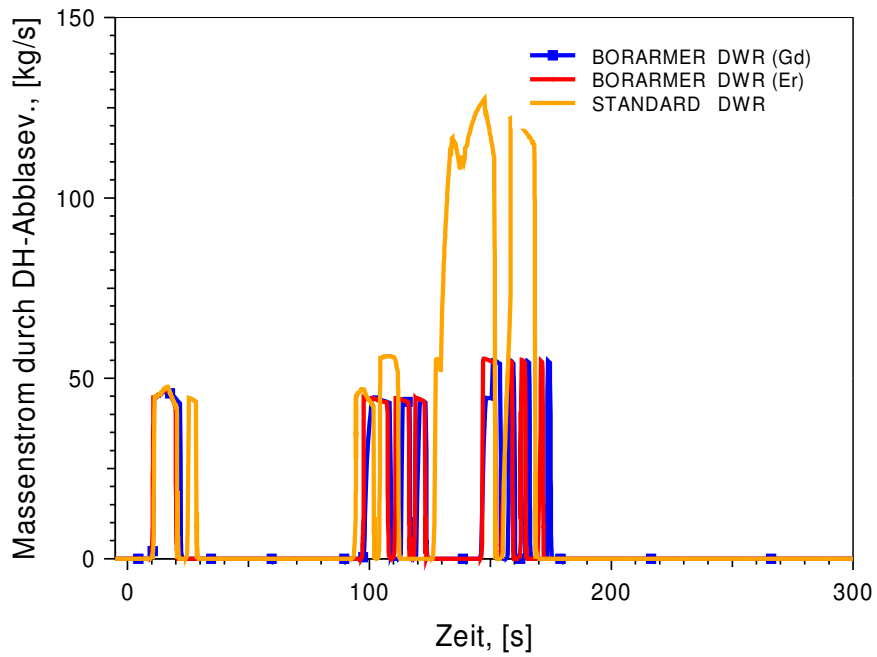


Abbildung 8-2: Massenstrom durch die DH-Abblaseventile

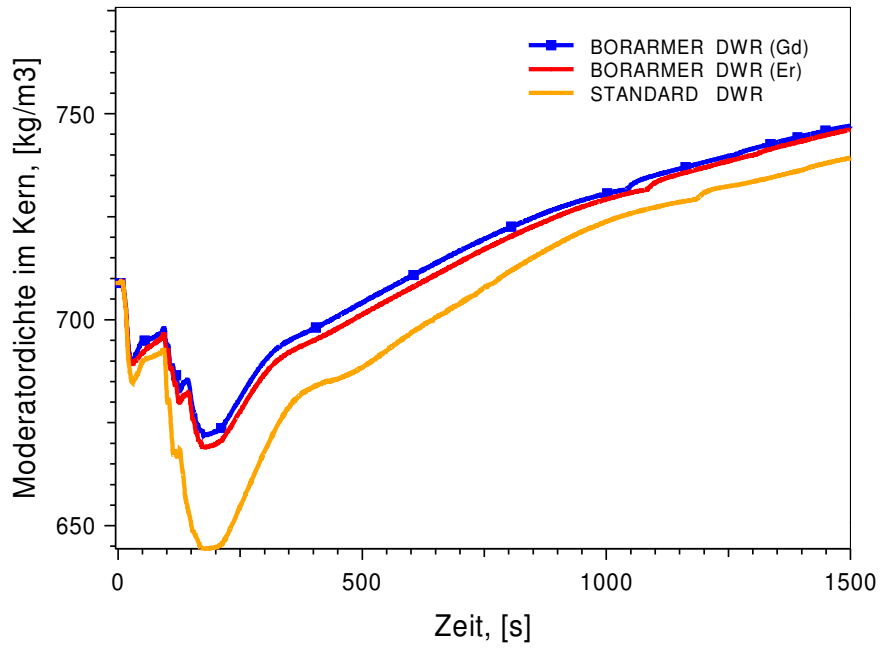


Abbildung 8-3: Kühlmitteldichte im Reaktorkern

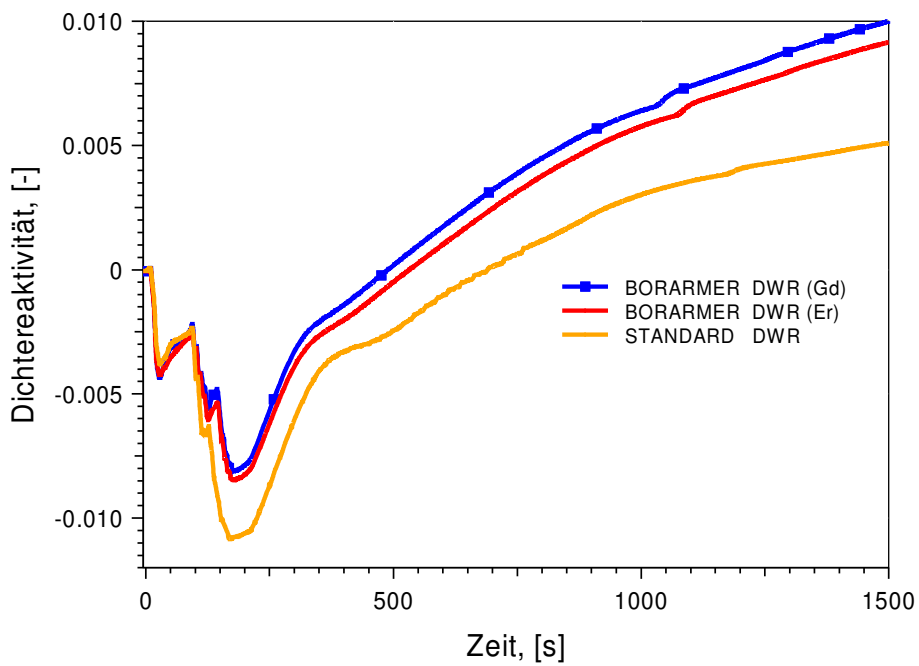


Abbildung 8-4: Dichtereaktivität

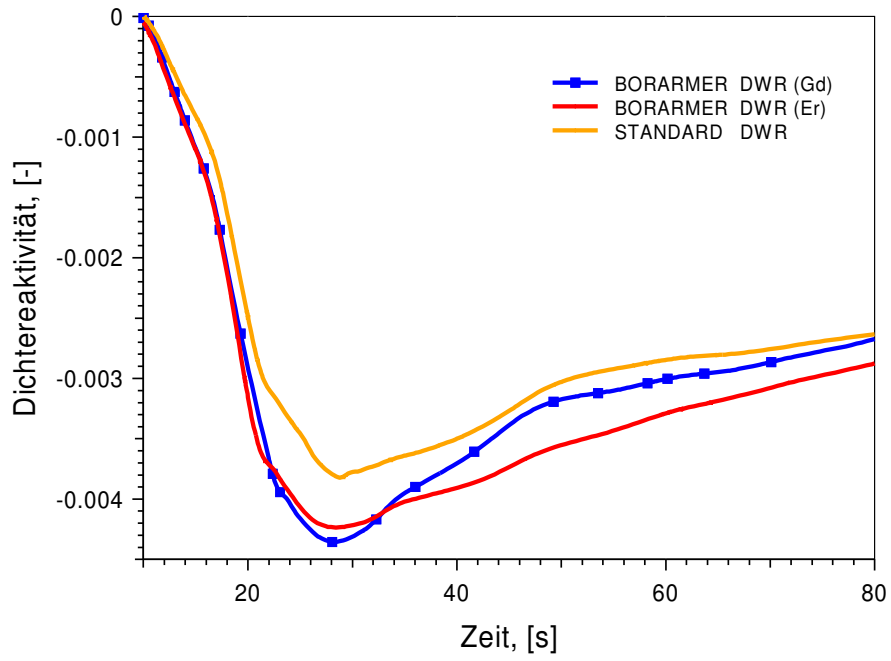


Abbildung 8-5: Dichtereaktivität (Detail)

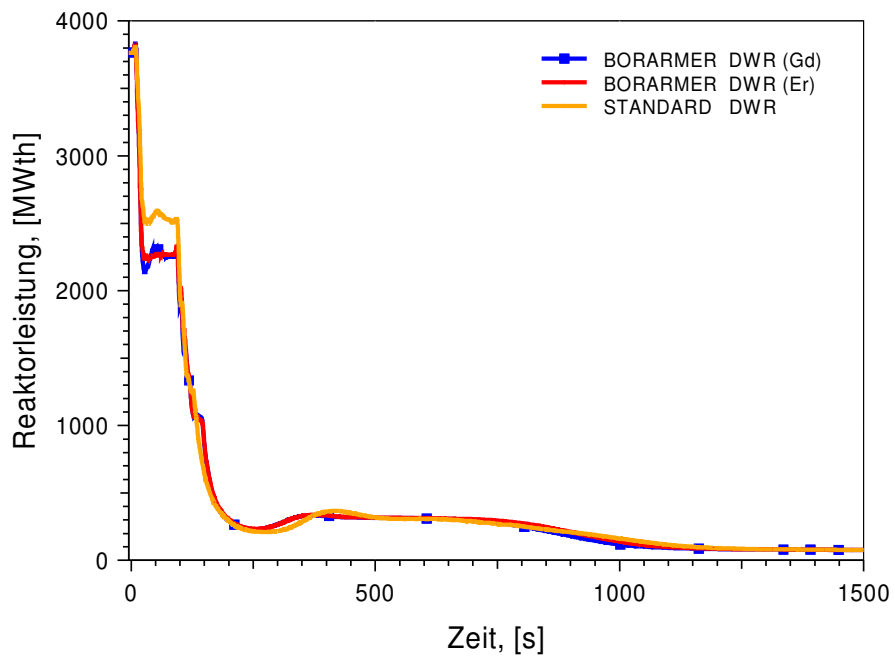


Abbildung 8-6: Thermische Reaktorleistung

8.1.3 Auswertung der erzielten Ergebnisse

Die durchgeführten Simulationen zeigen die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Auslegung der drei Kernkonfigurationen. Die wesentlichen Unterschiede sind:

- Generell zeigen sich ähnliche Druckabläufe und Systemverhalten in allen Rechnungen.
- Der Primärdruck bleibt weit unter den in dem deutschen Regelwerk definierten Akzeptanzgrenzen [RSK-1996]. Die Druckspitzen sind aufgrund der großen Kapazitäten der DH-Ventile ähnlich.
- In der ersten Phase des ATWS-Speisewasserausfalls (0-300 s) ist die Dichterückwirkung für die Reduktion der thermischen Reaktorleistung maßgebend. Danach wird durch das ZBS-Einspeisen die Borkonzentration im Primärkreis erhöht und die zugeführte negative Reaktivität kann die positive Dichterückwirkung kompensieren und schließlich eine langfristige Unterkritikalität gewährleisten (Abbildung 8-7).

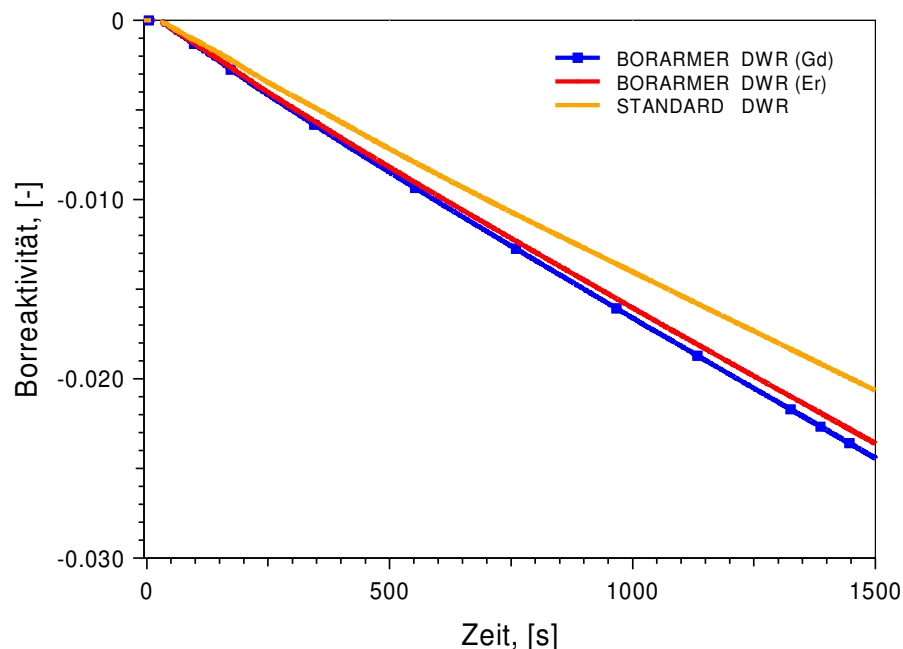


Abbildung 8-7: Borreaktivität

- Zwei spätere Druckspitzen (17.6 und 18.0 MPa) im Kern können in der Rechnung mit dem Standard-DWR beobachtet werden (100 s und 135 s). Im

Gegensatz, werden in den Simulationen mit den borarmen Kernen nach der ersten Druckspitze 17.1 MPa nicht überschritten.

- Grund für dieses Verhalten ist die schnellere Reduktion der thermischen Reaktorleistung borarmer Kerne. Im kritischen Zeitfenster 0-100 s weisen aufgrund der stärkeren Dichterückwirkung diese eine um etwa 250 MW_{th} niedrigere Leistung als der Standard-DWR auf.
- Die niedrigere Leistung führt aber auch zu kleinerer Kühlmitteldichte und dies erklärt die höhere Reaktivität der borarmen Kernkonfigurationen zwischen 100 und 300 s.
- Die höhere thermische Leistung des Standard-DWR wird durch die häufiger angeforderten und länger offen bleibenden DH-Ventile abgeführt.
- In der Simulation mit dem borarmen Gd-Kern genügen zwei DH-Ventile um den Druck abzubauen, während alle drei Ventile in den anderen zwei Rechnungen angefordert werden.
- Die besseren Reaktivitätseigenschaften der borarmen Kernkonfigurationen zeigen sich vor allem in einem großen Unterschied bei der durch die DH-Ventile abblasenen Kühlmittelmenge. Diese ist für die borarmen Kernkonfigurationen um etwa den Faktor vier kleiner als bei der Standard-Kernkonfiguration (Abbildung 8-8).
- Weiterhin wird durch die DH-Ventile bei den borarmen DWR nur Dampf abblasen. Der Standard-DWR bläst aufgrund der höheren Reaktorleistung zusätzliche 6.650 kg Wasser ab.

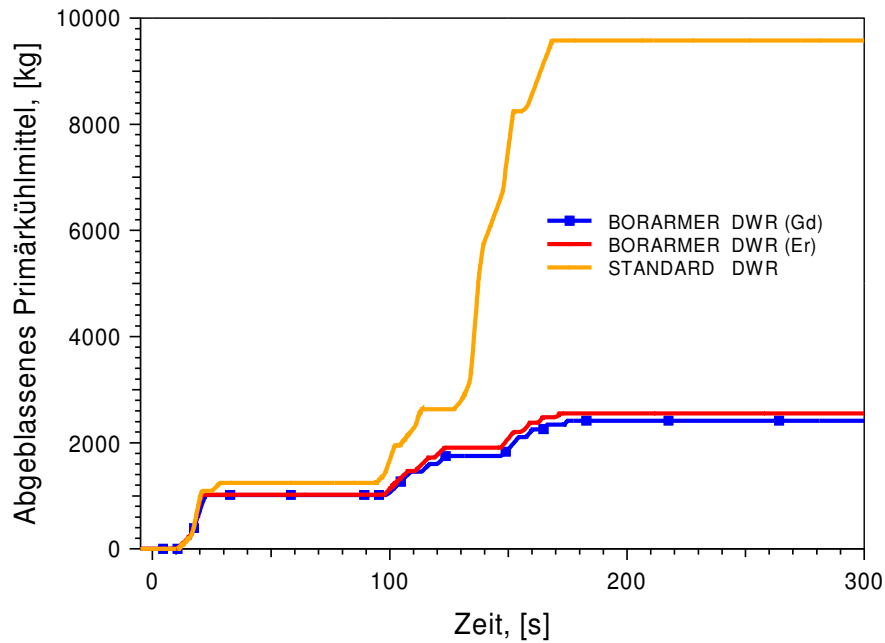


Abbildung 8-8: Abgeblasenes Primärkühlmittel

Weitere Abbildungen zum Transientenablauf sind im Anhang E zusammengestellt.

8.1.4 Zusammenfassung

Die durchgeführten Sicherheitsanalysen haben gezeigt, dass der ATWS-Speisewasserausfall mit allen Kernkonfigurationen beherrscht wurde. Der Primärdruck konnte Dank der großen Kapazitäten der Sicherheitsventile in den vorgeschriebenen Grenzen gehalten werden. Langfristig werden alle Kerne ausreichend gekühlt und ihre Unterkritikalität wird gewährleistet.

Bei den Rechnungen ergaben sich signifikante Unterschiede aufgrund der verschiedenen Rückwirkungseigenschaften. Die Leistung der borarmen DWR Kernkonfigurationen wird im kritischen Zeitfenster 0-100 s schneller reduziert und dies führt zu kleineren Druckspitzen. Ferner wird auch die durch die Ventile abgeblasene Primärkühlmittelmenge um einen Faktor vier kleiner als beim Standard-DWR. Dies hat eine wichtige sicherheitstechnische Bedeutung, da die Kapazität des Abblasebehälters etwa 1.200 kg beträgt [KWU-1983]. Bei größeren Mengen brechen dessen Berstscheiben und das Kühlmittel wird in den SHB freigesetzt. Die freigesetzte Kühlmittelmenge könnte mit der borarmen Kernausslegung wesentlich reduziert werden. Die schnellere Reduktion der thermischen Reaktorleistung mit Hilfe der verstärkten

Rückwirkungseigenschaften hat die verbesserte inhärente Sicherheit der borarmen Kernkonfigurationen bestätigt.

8.2 Einfluss der Borreduzierung auf das Kernverhalten bei Deborierungsstörfällen

Unter normalen Bedingungen wird die Borsäure in den heutigen DWR zur Reaktivitätskontrolle sowie zur Abbrand- und Xenonvergiftungskompensation im Primärkühlmittel eingesetzt. Da die versehentliche und unerwünschte Verringerung der Borkonzentration im Kern eine positive Reaktivitätszufuhr bedeutet, kann diese in bestimmten Fällen zu einem Reaktivitätsanstieg oder einem Leistungsanstieg führen. Solche Ereignisse werden als Deborierungsstörfälle bezeichnet. Die Häufigkeit dieser Störfälle ist sehr gering und liegt im Bereich 10^{-5} /Jahr. Derzeit werden in Deutschland zwei wesentliche Deborierungsszenarien diskutiert: inhärente und externe Deborierung [Weiß, 2003]. Bei den externen Deborierungsstörfällen kann niedrig boriertes Kühlmittel durch folgende Mechanismen in den Primärkreislauf gelangen und eine Deborierung verursachen [Pointner, 2006]:

- Einspeisung aus Deionat führenden Systemen (z.B. VRS)
- Einströmen von Speisewasser in den Primärkreis bei einem unerkannten Dampferzeugerheizrohrleck im Nichtleistungsbetrieb

In den inhärenten Deborierungsszenarien kann sich ein niedrigborierter oder sogar borfreier Kondensatpfropfen aufgrund eines kleinen Lecks mit gleichzeitigem Ausfall bestimmter Sicherheitssystemen bilden. In diesem Fall verdampft das Kühlmittel im Kern und der dabei erzeugte Dampf kondensiert in den DE U-Rohren (Reflux-Condenser-Betrieb). Da der Dampf nur sehr wenig Bor aufnehmen kann, bildet sich ein niedrig borierter oder borfreier Kondensatpfropfen (Borkonzentration < 50 ppm) in den U-Rohren sowie in den kalten Strängen hinter den HKMP. Nach der Wiederherstellung des Naturumlaufs, wird das Kondensat in Richtung RDB transportiert. Dadurch kann sich eine Reaktivitätszufuhr und ein Reaktivitätsanstieg ereignen [Papukchiev et al., 2006].

8.2.1 Anfangs- und Randbedingungen

Mit dem Systemcode ATHLET wurden thermohydraulische Untersuchungen zur Deborierung aufgrund eines 35 cm^2 Lecks im Primärkreis durchgeführt. Die Anfangs- und Randbedingungen für die Simulationen sind:

- Thermische Leistung – 3850 MW (102%)
- Nachzerfallswärme - DIN 25463 + 2 SIGMA
- Primärdruck im Nennbetrieb – 15.78 MPa
- Sekundärdruck im Nennbetrieb – 6.78 MPa
- Leckgröße und -position: 35 cm^2 im heißen Strang von Loop 1
- Nach der Lecköffnung tritt Notstromfall auf
- HD-Einspeisung nur in Loop 1 und Loop 3
- Keine HD-Einspeisung in Loop 2 und Loop 4 (Einzelfehler und Reparatur an je einem Notstromdiesel)
- Druckspeicher speisen in die heißen Strängen von Loop 1, 2, 3 und 4
- ZBS boriert mit 2 kg/s Loop 1, 2, 3 und 4 auf

8.2.2 Stöfallablauf

Das 35 cm^2 kleine Leck wird bei 0 s am Boden des heißen Strangs vom Loop 1 geöffnet (Abbildung 8-10). Nach einem raschen Abfall des Primärdrucks (Abbildung 8-11) werden RESA, TUSA und HKMP AUS Signale vom Reaktorschutz ausgelöst. Da die HKMP ausgeschaltet werden, wird der Wärmetransfer im Primärkreis nur durch Naturumlauf erhalten. Das zugrunde liegende physikalische Prinzip beruht auf der Temperaturabhängigkeit der Dichte des Primärkühlmittels und der räumlichen Anordnung der Primärkühlkreis Komponenten. Das im Kern aufgeheizte Kühlmittel steigt aufgrund seiner geringeren Dichte auf und gelangt durch die heißen Stränge in die U-Rohre der DE. Das Kühlmittel wird in den U-Rohren gekühlt und aufgrund seiner größeren Dichte gelangt es durch die kalten Stränge zurück zum RDB.

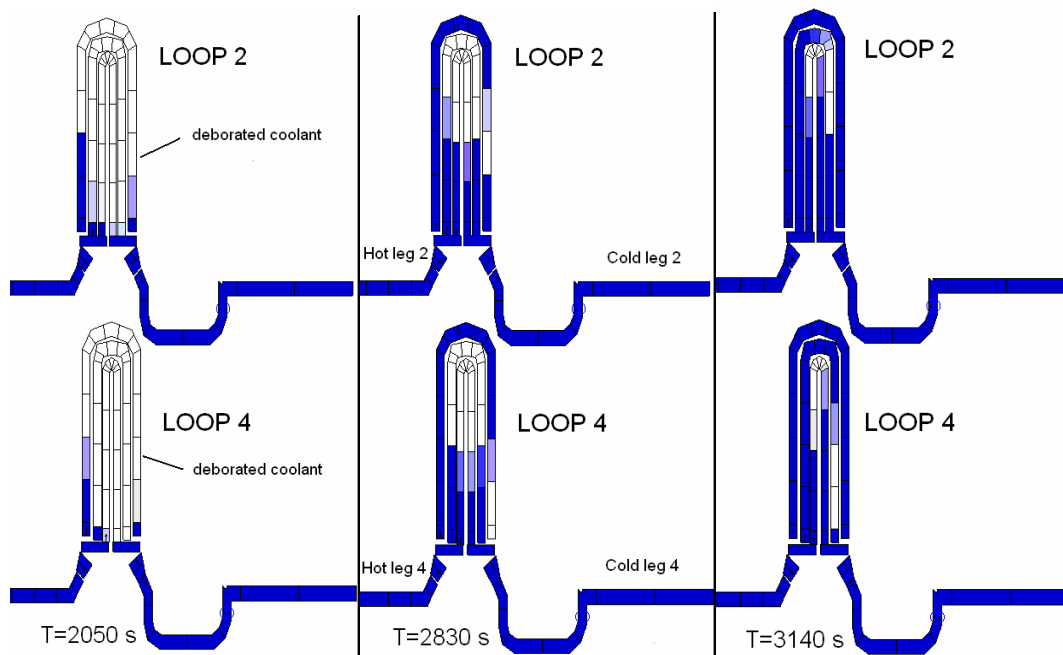
Etwa 70 s nach dem Stöfallbeginn wird die HD-Einspeisung in Loop 1 und 3 aktiviert, da der Primärdruck 11.0 MPa unterschritten hat (Abbildung 8-12). Aufgrund der postulierten Ausfälle wird kein Kühlmittel in die Loops 2 und 4 eingespeist (Abbildung 8-13). Sekundärseitig ist der Druck infolge der TUSA zunächst gestiegen, da kurzzeitig

keine Wärme von den DE abgeführt wird. Mit einem geregelten Öffnen der Umleitstation wird die Wärmesenke zur Verfügung gestellt und der Druckanstieg abgebaut. Weiterhin wird durch das sekundärseitige Abfahren mit 100 K/h eine Primärdruckabsenkung erreicht.

Mit einem sinkenden Druck im Primärkreis wird der Anteil des Dampfgehalts immer größer. Das vom Kern zu den DE strömende Fluid ist zunehmend ein Zwei-Phasen-Gemisch. Gleichzeitig vergrößert sich auch der Bereich, in dem das Zwei-Phasen-Gemisch dominiert. Immer mehr Dampfblasen gelangen über den Bogen der U-Rohre auf die kalte Seite. Dadurch sinkt die Fluidichte in diesem Bereich des Primärkreises und dies verlangsamt den Naturumlauf. Die Folge der kleineren Fließgeschwindigkeit ist eine Kondensation des Dampfes bereits auf der aufsteigenden, heißen Seite der U-Rohre. Nach gewisser Zeit kommt der Naturumlauf in den betroffenen U-Rohren zum Erliegen. Ausgehend vom U-Rohr Bogen, bildet sich in beiden Richtungen eine stagnierende Dampfblase. Je intensiver dieser Prozess ist und je mehr U-Rohre betroffen sind, desto schwächer wird der Naturumlauf im betroffenen Loop. Bei ca. 1350 s kommt es zum Abreißen des Naturumlafs in den Loops ohne HD-Einspeisung im Gegensatz zu den anderen (Abbildung 8-14 und Abbildung 8-15). Dieser Anlagenzustand wird als Reflux-Condenser-Betrieb bezeichnet. Der um null oszillierende Wassermassenstrom in den heißen Strängen 2 und 4 deutet diesen Anlagenzustand an. Da der Dampf nur bis zu 50 ppm Bor enthalten kann, bildet sich bei dessen Kondensation in den entleerten DE U-Rohren borfreies Kondensat.

Wenn der Primärdruck 2.6 MPa erreicht (ca 2620 s), öffnen die Rückschlagklappen aller an den heißen Strängen angeschlossenen Druckspeicher. Damit wird der Primärkreis mit 2200 ppm boriertem Wasser bespeist. Da die gesamte Einspeiserate (HD-Einspeisung und Druckspeicher) wesentlich größer als der Bruchmassenstrom ist, wird der Primärkreis langsam aufgefüllt. Wenn die U-Rohr-Bögen wieder mit Wasser aufgefüllt werden, setzt sich ab ca. 2750 s der Naturumlauf (Abbildung 8-14) wieder. Dies findet zuerst in den langen und danach in den kurzen U-Rohren statt. Grund dafür sind die größere Fläche und die damit verbundene verbesserte Wärmeübertragung.

Mit Hilfe des Analysesimulators ATLAS kann die Verteilung der Borkonzentration im Primärkreis während des Deborierungsstörfalls visualisiert werden. Abbildung 8-9 zeigt sie in den betroffenen Loops 2 und 4 für die zwei wesentlichen Störfallphasen – Reflux-Condenser-Betrieb (T= 2050 s) und Wiedereinsetzen des Naturumlafs (T=2830 und T=3140). Die weiße Farbe stellt 0 ppm dar und dunkel blau - 1000 ppm oder mehr.



Reflux-Condenser-Betrieb

Wiederansetzen des Naturumlaufs

Abbildung 8-9: Verteilung der Borkonzentration im Primärkreis

Nach dem Wiedereinsetzen des Naturumlaufs fließt das Kondensat in den Pumpenbogen. Dort wird ein Kondensatpfropfen gebildet, der zum RDB-Eintritt transportiert wird. Auf diesem Weg wird das Kondensat durch die Einspeisung der Sicherheitssysteme aufboriert. Anschließend wird die Borkonzentration im Primärkreis auch durch das Einspeisen des ZBS (7000 ppm) erhöht. Abbildung 8-16 und Abbildung 8-17 zeigen die Borkonzentration am RDB-Eintritt. Es ist zu sehen, dass das Kühlmittel in den Simulationen mit den borarmen DWR-Kernkonfigurationen schneller aufboriert wird. Aus diesem Grund ist auch die Differenz zwischen der minimalen Borkonzentration am RDB-Eintritt und der Anfangsborkonzentration bei den borarmen Kernkonfigurationen größer.

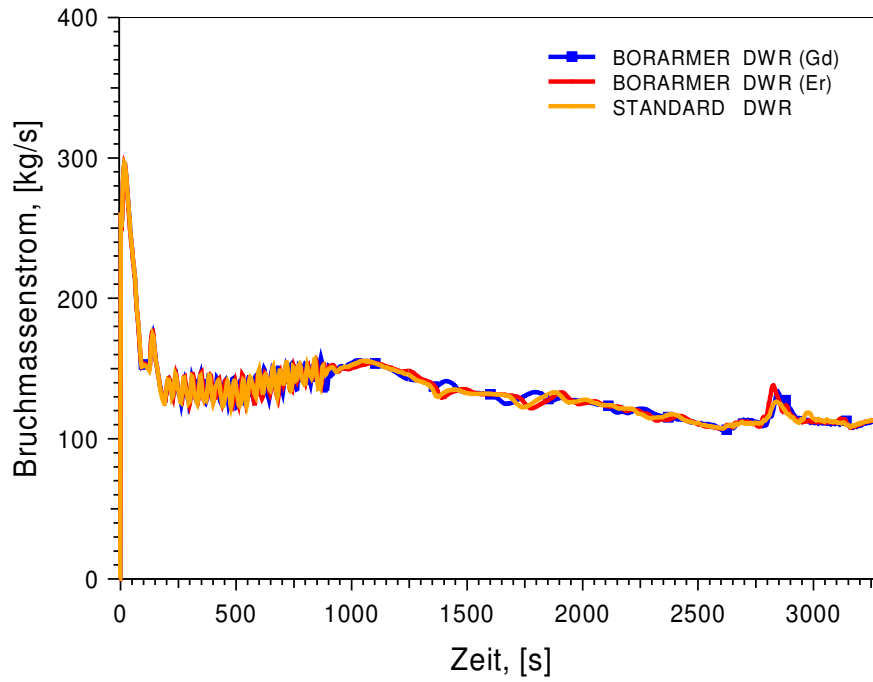


Abbildung 8-10: Bruchmassenstrom

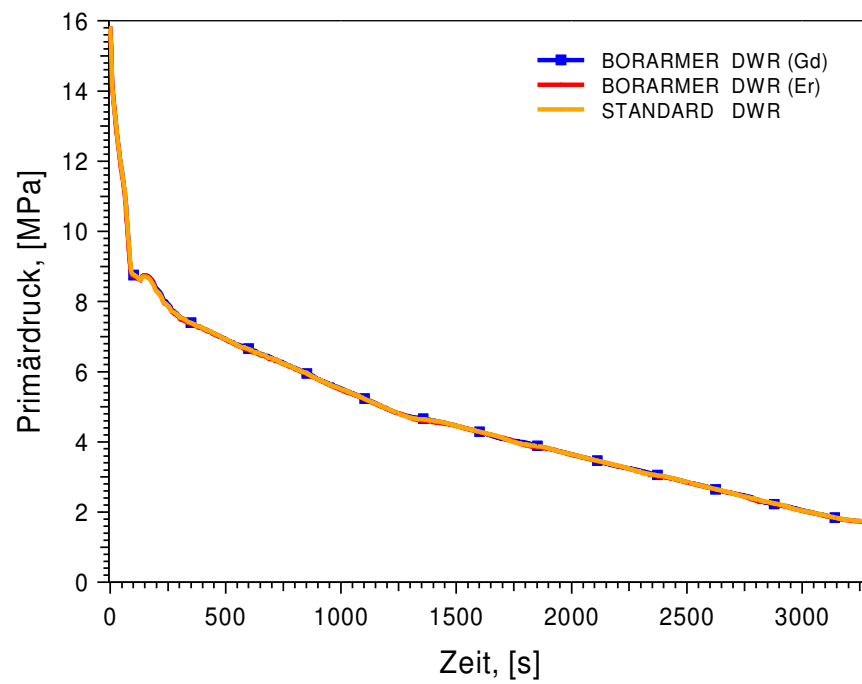


Abbildung 8-11: Primärdruck

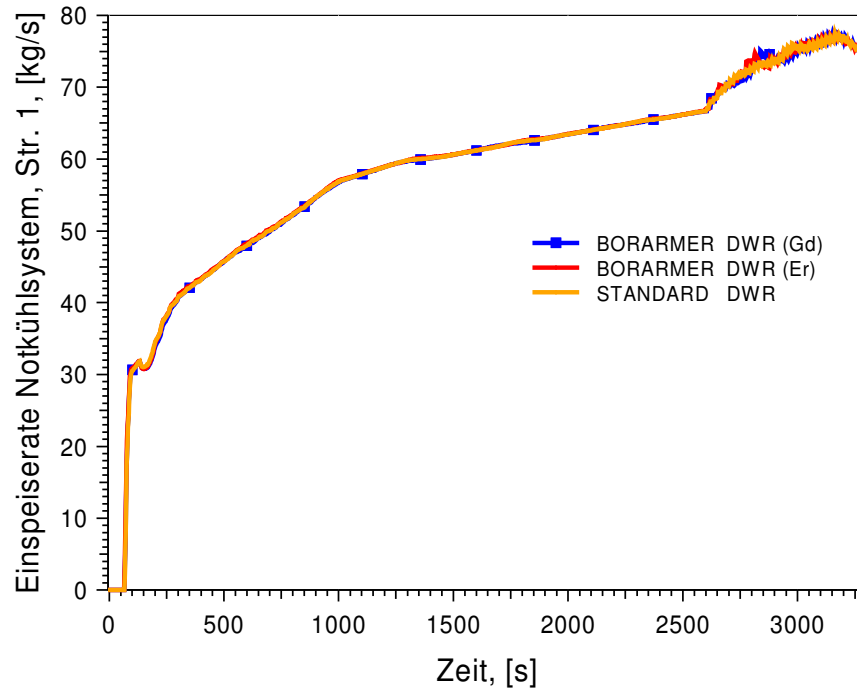


Abbildung 8-12: Einspeiserate des Notkühlsystems in Loop 1 (Loop 3 ähnlich)

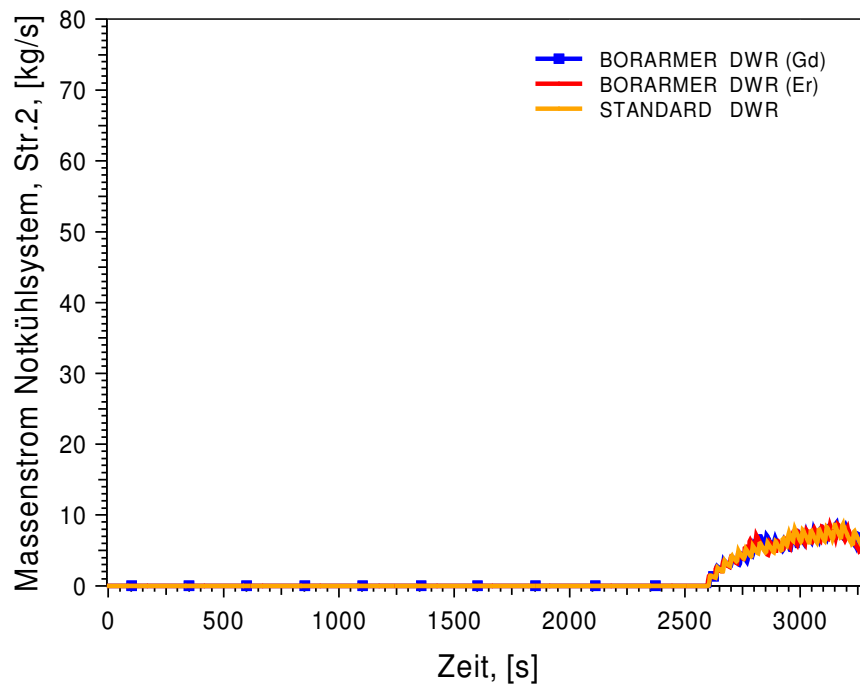


Abbildung 8-13: Einspeiserate des Notkühlsystems in Loop 2 (Loop 4 ähnlich)

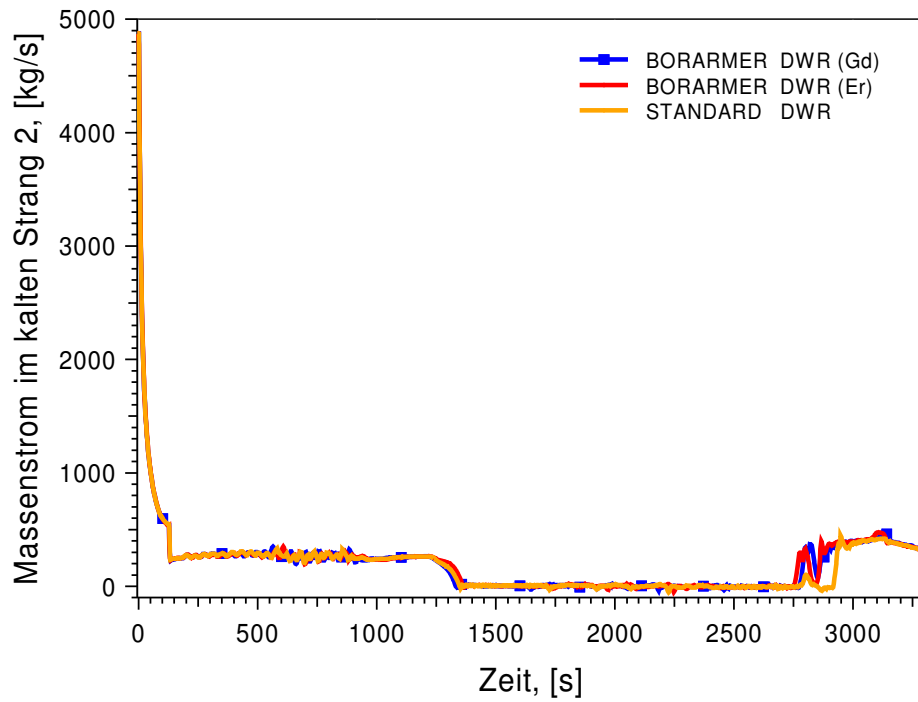


Abbildung 8-14: Massenstrom im kalten Strang vom Loop 2 (Loop 4 ähnlich)

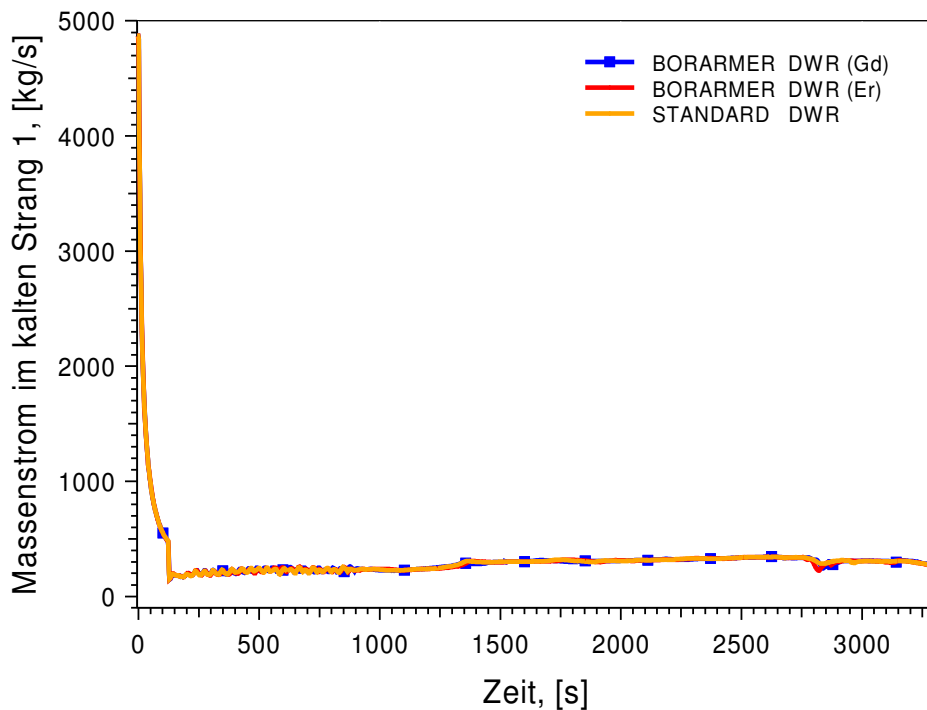


Abbildung 8-15: Massenstrom im kalten Strang vom Loop 1 (Loop 3 ähnlich)

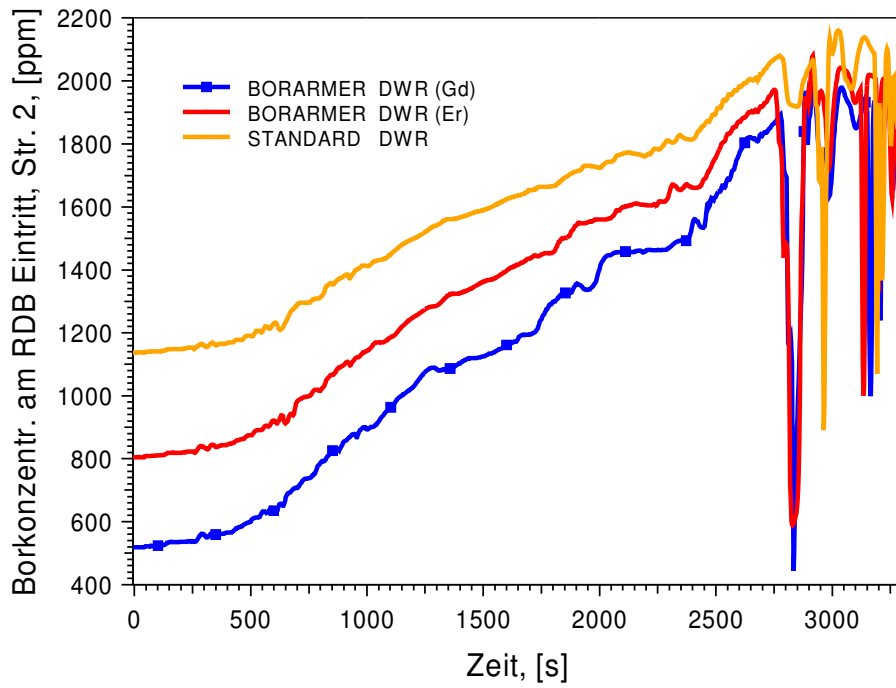


Abbildung 8-16: Borkonzentration am RDB-Eintritt, kalter Strang 2

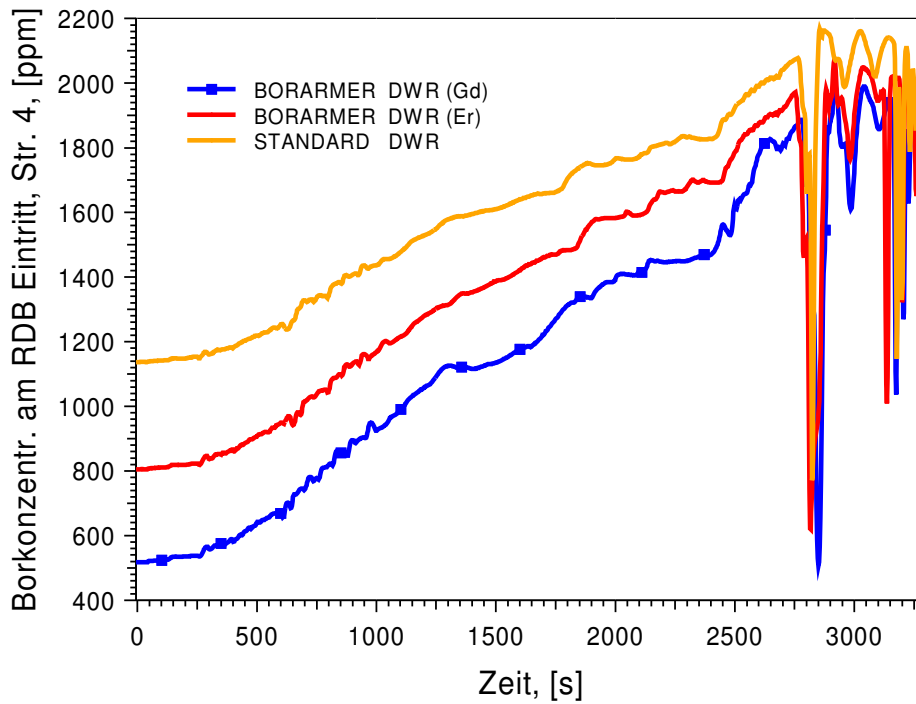


Abbildung 8-17: Borkonzentration am RDB-Eintritt, kalter Strang 4

Für eine potentielle Rekritikalität ist die minimale Borkonzentration am Kerneintritt von übergeordneter Bedeutung. Im Ringraum und im unteren Plenum sammelt sich hochboriertes Wasser, das die Konzentration des Kondensatpfropfens weiter erhöht. Tabelle 8-2 zeigt die minimalen Borkonzentrationen am Eintritt ausgewählter Kernkanäle sowie die Differenz zwischen minimalen und Anfangsborkonzentrationen für die verschiedenen Kernkonfigurationen.

Tabelle 8-2: Minimale Borkonzentration am Kerneintritt ausgewählter Kernkanäle

Kernkanal	DWR Kern	C_{min} , ppm	$C_{min} - C_{init}$, ppm
6	borarmer (Gd)	1103	585
	borarmer (Er)	1123	318
	standard	1371	234
7	borarmer (Gd)	1061	543
	borarmer (Er)	1218	413
	standard	1493	356
8	borarmer (Gd)	1269	751
	borarmer (Er)	1515	710
	standard	1816	679
10	borarmer (Gd)	1787	1269
	borarmer (Er)	1853	1048
	standard	1992	855
12	borarmer (Gd)	1687	1169
	borarmer (Er)	1720	915
	standard	1933	796

8.2.3 Auswertung der erzielten Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der Störfallsimulationen sind in den folgenden Absätzen zusammengestellt:

- Generell ergeben sich ähnliche Abläufe für den Primär-, Sekundärdruck und Bruchmassenstrom. Grund dafür ist die gleiche Leckgröße/Leckposition sowie das gleiche Verhalten der Primär- und Sekundärsysteme.
- In allen Simulationen bleiben die minimalen Borkonzentrationen am Kerneintritt höher als die entsprechenden Anfangsborkonzentrationen.
- Die Größe des Kondensatpfropfens ist hauptsächlich von der Zeit abhängig, in der sich die einzelnen Loops im Reflux-Condenser-Betrieb befinden. Längere Zeit im Reflux-Condenser bedeutet intensivere Dampfproduktion im Kern und letztendlich eine größere Kondensatmenge.
- Mit der Zeit steigt aber aufgrund der Aufborierung die Borkonzentration im Primärkreis. Der Kondensatpfropfen wird dann auf dem Weg zum RDB und

Reaktorkern mit Kühlmittel einer höheren Borkonzentration vermischt und damit wird auch dessen Borkonzentration erhöht. Findet der Wiedereinsetzen des Naturumlaufs früher statt, ist mit einer kleineren Kondensatmenge zu rechnen. Auf dem Weg zum Reaktorkern wird das borfreie Wasser aber auch mit einem niedriger borierten Kühlmittel vermischt.

- Für die borarmen Kernkonfigurationen ergibt sich ein größerer Unterschied zwischen der Anfangs- und der minimalen Borkonzentration am RDB und am Kerneintritt während des gesamten Störfalls.
- Dies kann mit der schnelleren Aufborierung der borarmen DWR Kerne erklärt werden. Maßgebend für die Aufborierungsdynamik ist die Differenz zwischen der Anfangsborkonzentration und der Borkonzentration des eingespeisten Kühlmittels (2200 ppm).
- Der Abstand zur Rekritikalität ist in allen drei Simulationen aufgrund der RESA sowie der intensiven Aufborierung des Primärkreises genügend groß (Abbildung 8-18).
- Die schnellere Aufborierung des Kühlmittels führt aber zu einer größeren negativen Reaktivitätszufuhr. Während der gesamten Transiente ergibt sich für die borarmen Kerne ein um $\Delta\rho = -2.5\%$ (Gd-Kern) bzw. $\Delta\rho = -1.0\%$ (Er-Kern) größerer Reaktivitätsabstand zur Rekritikalität im Vergleich mit dem Standard-Kern. Diese zusätzlichen $\Delta\rho = -2.5\%$ negative Reaktivität entsprechen der negativen Reaktivität von etwa 30% aller Steuerstäbe.

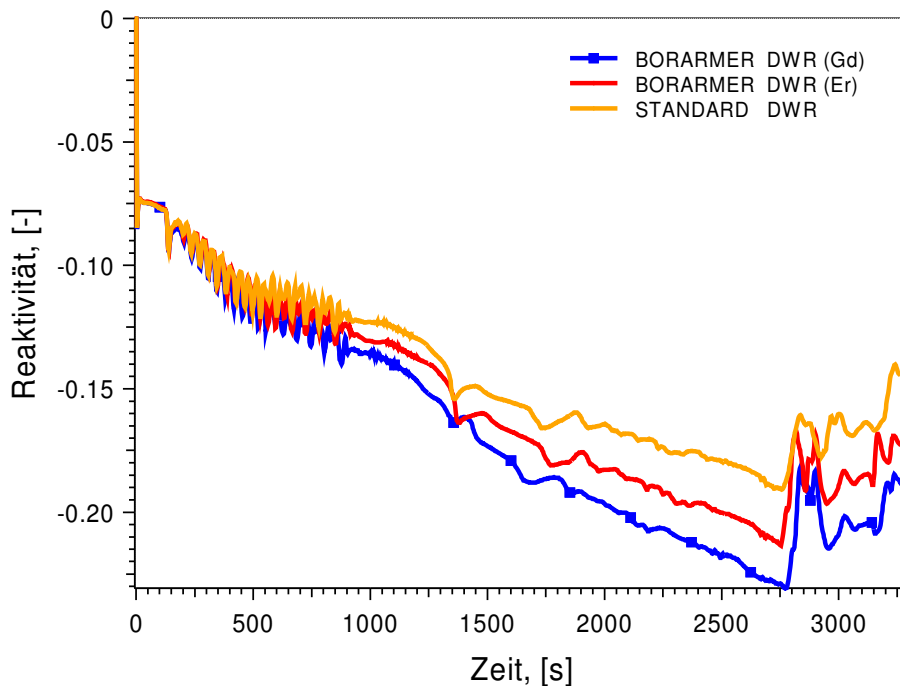


Abbildung 8-18: Reaktivität

Weitere Abbildungen können im Anhang F gefunden werden.

8.2.4 Zusammenfassung

Die durchgeführten Sicherheitsanalysen haben gezeigt, dass bei der simulierten Deborierung dank der RESA sowie der intensiven Aufborierung des Primärkreises Rekritikalität nicht erreicht wurde. In allen Simulationen bleiben die berechneten minimalen Borkonzentrationen am Kerneintritt höher als die Anfangsborkonzentrationen. Dennoch ergeben sich aufgrund der niedrigeren Anfangsborkonzentrationen größere Sicherheitsabstände zur Rekritikalität in den Rechnungen mit den borarmen DWR. Die Analysen zeigen eine um $\Delta\rho = -1.0\%$ (Er-DWR) und $\Delta\rho = -2.5\%$ (Gd-DWR) negativere Reaktivität im Vergleich mit dem Standard-DWR. Die sicherheitstechnische Bedeutung dieser zusätzlichen Reaktivität ist erheblich, da $\Delta\rho = -2.5\%$ etwa der Reaktivität von 30% aller komplett im Kern eingefahrenen Steuerstäbe entsprechen.

8.3 Einfluss der Borreduzierung auf die Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen

8.3.1 Auslegungsüberschreitende Ereignisse und anlageninterne Notfallmaßnahmen

Die auslegungsüberschreitenden Ereignisse sind Ereignisse für die keine Vorsorge gegen Schäden zu treffen ist, bei denen aber die Möglichkeit einer Minderung der Auswirkungen zu prüfen ist. Sie sind der Sicherheitsebene 4 der deutschen Praxis zugeordnet. Darunter versteht man Ereignisse, deren Eintreten wegen ihrer extrem geringen Wahrscheinlichkeit nicht betrachtet werden müssen. Daher ist eine Vorsorge gegen Schäden Dritter nicht erforderlich. Da die Vermeidung von Schäden auch in diesen Fällen zur weiteren Minderung des verbleibenden, mit dem Anlagenbetrieb verbundenen Risikos führen kann, werden geeignete Notfallmaßnahmen ergriffen, soweit dies nach dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit der Mittel sinnvoll ist. Eine Möglichkeit dazu ist, anlageninterne Maßnahmen zum Notfallschutz vorzusehen, mit denen erreicht wird, dass auch bei unterstelltem Eintritt des betrachteten Ereignisses keine nicht tolerablen Folgen eintreten [ILK-2005].

Die anlageninternen Notfallmaßnahmen haben die Aufgabe, Unterkritikalität, Kernkühlung und Aktivitätsrückhaltung selbst dann zu gewährleisten, wenn zur Störfallbeherrschung wesentliche Systemfunktionen der Sicherheitssysteme nicht verfügbar sind [GRS-1990]. Der Bereich der anlageninternen Notfallmaßnahmen umfasst Maßnahmen, die beim Ausfall von Sicherheitssystemen eingesetzt werden können. Dabei wird unterschieden zwischen Maßnahmen zur Verhinderung einer Kernschmelze (präventive Notfallmaßnahmen) sowie Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen (mitigative Notfallmaßnahmen). Fallen nach einem auslösenden Ereignis Systemfunktionen aus, so kann es zu einem Systemschaden kommen. Werden bei einem Systemschadenzustand präventive anlageninterne Notfall-Systemfunktionen nicht wirksam, kommt es zu einem Kernschadenzustand oder sogar zu einem schweren Reaktorunfall mit einer erheblichen Beschädigung oder Schmelzen des Reaktorkerns.

Das bestehende Notfallschutzkonzept des DWR legt den Schwerpunkt der Notfallmaßnahmen bei Ausfall der Nachwärmeabfuhr auf Einspeisungen in das Sekundärsystem. Einspeisungen in das Primärsystem im Rahmen von

Notfallmaßnahmen sind auf Bleed-and-Feed beschränkt. Mit dieser Maßnahme sollen die Kernbedeckung und die Nachwärmeabfuhr über die primärseitigen Einspeise- und Nachwärmeabfuhrsysteme sichergestellt werden. Hierbei wird durch das Öffnen und Offenhalten beider DH-Sicherheitsventile und des DH-Abblaseregelventils der Primärkreisdruck unter die Nullförderhöhe der Sicherheitseinspeisepumpen abgesenkt, so dass diese einspeisen können. Ab einem Primärdruck von 2.6 MPa erfolgt eine Einspeisung aus den Druckspeichern. Sinkt der Druck unter 1.0 MPa ab, so kann nach dem Entleeren der Flutbehälter eine Niederdruckeinspeisung aus dem Sumpf durchgeführt werden. Die Nachwärmeabfuhr erfolgt dann über die Zwischen- und Nebenkühlwassersysteme.

Sinkt der Füllstand im Reaktordruckbehälter (RDB) unter einen bestimmten Wert ab oder steigt die BE-Austrittstemperatur über 400 °C an, so ist die Notfallmaßnahme Bleed-and-Feed einzuleiten. Beim Kühlmittelverluststörfall ist die Zeitspanne zwischen dem Anstehen dieser Kriterien und dem Zeitpunkt, bis zu dem Bleed-and-Feed zur Verhinderung des Kernschadenzustands wirksam sein muss, so kurz, dass dieses Ziel kaum erreichbar ist. Die GRS schätzt in diesem Fall die Erfolgswahrscheinlichkeit von Bleed-and-Feed bei den Kühlmittelverluststörfällen als sehr gering ein [GRS-2001].

Größere Flexibilität für Einspeisungen im Primärkreis wäre bei Kühlmittelverluststörfällen und terroristischen EVA-Ereignissen mit Verlust äußerer Barrieren (SHB oder Druckführendenumschließung) sowie einem großen Verlust von Systemen bei zunächst intaktem Kern von großer Bedeutung. In solchen Fällen könnte es sinnvoll sein, nicht boriertes Wasser zur Kernkühlung im Primärkreis einzuspeisen. Um das Potenzial solcher flexibler Notfallmaßnahmen zu untersuchen, wurden Störfallsimulationen mit Einspeisung von unboriertem Wasser im Primärkreis durchgeführt [Papukchiev et al., 2007].

8.3.2 Anfangs- und Randbedingungen

Für die Untersuchung der Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes borarmer DWR Kerne bei Störfällen mit einer Einspeisung von nicht boriertem Wasser wurde ein hypothetisches auslegungsüberschreitendes Ereignis simuliert. Das Szenario ist ein kleines Leck mit einem gleichzeitigen Ausfall mehrerer betrieblichen Systeme sowie von Sicherheitssystemen. Darüber hinaus wurde angenommen, dass kein boriertes

Kühlmittel zur Verfügung steht. Die genauen Anfangs- und Randbedingungen für die Simulationen sind:

- Thermische Leistung – 3760 MW (100%)
- Nachzerfallswärme - DIN 25463 + 2 SIGMA
- Primärdruck im Nennbetrieb – 15.78 MPa
- Sekundärdruck im Nennbetrieb – 6.78 MPa
- Leckgröße und -position: 50 cm² im heißen Strang von Loop 1
- Ausfall von HD-, ND-Einspeisung, Druckspeicher, ZBS, VRS

Präventive Notfallmaßnahmen:

- 1200 s nach dem Störfallbeginn wird mit einer konstanten Einspeiserate von 70 kg/s borfreies Wasser (20 °C) im kalten Strang 3 eingespeist.

8.3.3 Störfallablauf ohne präventive Notfallmaßnahmen

Bei 0 s Simulationszeit wird ein kleines Leck (50 cm²) im heißen Strang von Loop 1 geöffnet. Nach dem raschen Primärdruckabfall werden RESA, TUSA und HKMP AUS Signale vom Reaktorschutz eingeleitet. Aufgrund des Kühlmittelverlustes sinkt der Primärdruck und nach etwa 200 s werden 11.0 MPa erreicht. Eine HD-Einspeisung wird nicht aktiviert. In dieser Störfallphase stellt sich Naturumlauf im Primärkreis ein. Das zugrunde liegende physikalische Prinzip beruht auf der Temperaturabhängigkeit der Dichte des Primärkühlmittels und der räumlichen Anordnung der Primärkühlkreiskomponenten. In den ersten etwa 1250 s wird ein Teil der entstehenden Nachzerfallswärme durch den Naturumlauf vom Kern abtransportiert und ein weiterer Teil durch den Bruch weggenommen. Da der Primärdruck weiter absinkt, bilden sich immer mehr Dampfblasen im Primärkreis. Das vom Kern zu den DE strömende Fluid ist zunehmend ein Zwei-Phasen-Gemisch. Immer mehr Dampfblasen gelangen in die kalte Seite der U-Rohre und aufgrund der sinkenden Fluidichte in diesem Bereich folgt daraus ein immer langsamer Naturumlauf. Etwa 1400 s nach dem Störfallbeginn kommt der Naturumlauf im Primärkreis zum Erliegen. Die Anlage befindet sich im Reflux-Condenser-Betrieb.

Mit einer immer noch signifikanten Nachzerfallswärme, Reflux-Condenser-Bedingungen und nicht zur Verfügung stehenden Notkühlsystemen kann eine

ausreichende Kühlung des Reaktorkerns nicht gewährleistet werden. Ohne weitere Notfallmaßnahmen steigt die Hüllrohrtemperatur des heißesten Stabs im Kern kontinuierlich an und etwa 2100 s nach dem Störfallbeginn wird der Grenzwert von 1200 °C [RSK-1996] überschritten. In den derzeitigen Sicherheitsanalysen wird davon ausgegangen, dass bei solchen Hüllrohrtemperaturen Kernschäden zu erwarten sind.

8.3.4 Störfallablauf mit präventiven Notfallmaßnahmen

Um solche Störfallabläufe zu vermeiden, werden präventive Notfallmaßnahmen durchgeführt. Es wurde angenommen, dass 1200 s nach der Lecköffnung, eine Einspeisung von borfreiem Wasser im Primärkreis erfolgt.

Mit dieser Maßnahme konnte eine ausreichende Kernkühlung sichergestellt und unzulässige Hüllrohrtemperaturen vermieden werden. Die Einspeisung von borfreiem Wasser führt aber zu einer Verringerung der Borkonzentration im Reaktorkühlkreislauf und letztendlich zu einer Deborierung. Aufgrund der zugeführten positiven Reaktivität werden in allen Simulationen Rekritikalität und schließlich Return-to-Power erreicht.

8.3.5 Auswertung der erzielten Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Störfallsimulationen werden in den nächsten Absätzen zusammengestellt:

- Generell ergeben sich ähnliche Abläufe für den Primär-, Sekundärdruck und Bruchmassenstrom. Grund dafür ist die gleiche Leckgröße/Leckposition sowie das gleiche Verhalten der Primär- und Sekundärsysteme. Wesentliche Unterschiede ergeben sich erst, wenn Rekritikalität erreicht wird.
- Die borarmen Kernkonfigurationen bekommen stärkere Dichterückwirkung aufgrund der verbesserten Reaktivitätseigenschaften (Abbildung 8-19).
- In der ersten Störfallphase steigt aufgrund der Dampfblasengehaltsentwicklung im Kern die Borkonzentration an. Der Dampf kann bis zu 50 ppm transportieren und die restliche Bormasse bleibt im flüssigen Kühlmittel (Abbildung 8-20).

- Die positive Reaktivität aufgrund des borfreien Kühlmittels im Primärkreis ist für die Standard-Kernkonfiguration am größten ($\Delta\rho = 9.5\%$), da sie die höchste kritische Borkonzentration besitzt. Die Borreaktivität für die Er-Kernkonfiguration beträgt $\Delta\rho = 7.1\%$ und im Fall mit Gd werden nur $\Delta\rho = 4.5\%$ positive Reaktivität zugeführt (Abbildung 8-21). Die Größe der Reaktivitätszufuhr ist auch von den verwendeten Borcoeffizienten abhängig. Die Zahlen unterscheiden sich relativ wenig (-8.78 (Gd), -8.86 (Er) und -8.10 (Standard) pcm/ppm) und wurden von den Wirkungsquerschnitten abgeleitet.
- Rekritikalität und Return-to-Power treten zu unterschiedlichen Zeitpunkten in den verschiedenen Rechnungen auf (Abbildung 8-22 und Abbildung 8-23). Return-to-Power tritt bei der Standard-Kernkonfiguration 31 min, bei der Er-Kernkonfiguration 56 min und bei der Gd-Kernkonfiguration 106 min nach dem Störfallbeginn auf.
- Die zusätzliche Zeit zur Rekritikalität der borarmen Kerne bedeutet verbesserte inhärente DWR Sicherheit und eine erhöhte Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes. Sie könnte zur Vorbereitung von boriertem Kühlmittel oder zu Identifikation und Durchführung weiterer Notfallmaßnahmen benutzt werden.
- Weiterhin stabilisieren sich die thermischen Leistungen der borarmen Kerne auf niedrigeren Niveaus im Vergleich mit dem Standard-DWR (65, 98 und 135 MW_{th}).
- Durch die Einspeisung vom borfreien Wasser wurden unzulässige Hüllrohrtemperaturen und die damit verbundenen potentiellen Kernschaden vermieden (Abbildung 8-24).

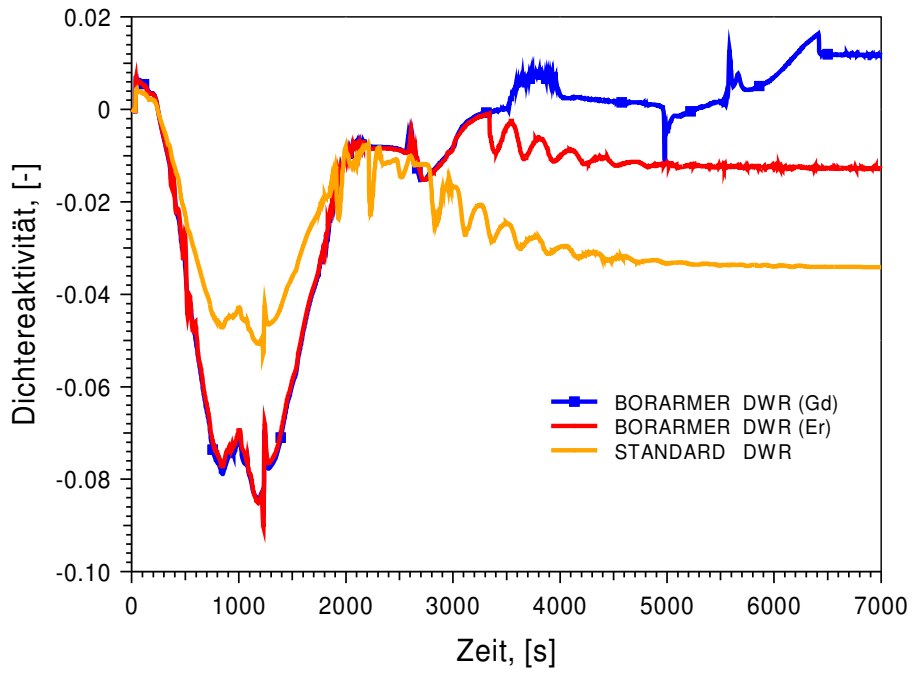


Abbildung 8-19: Dichterückwirkung

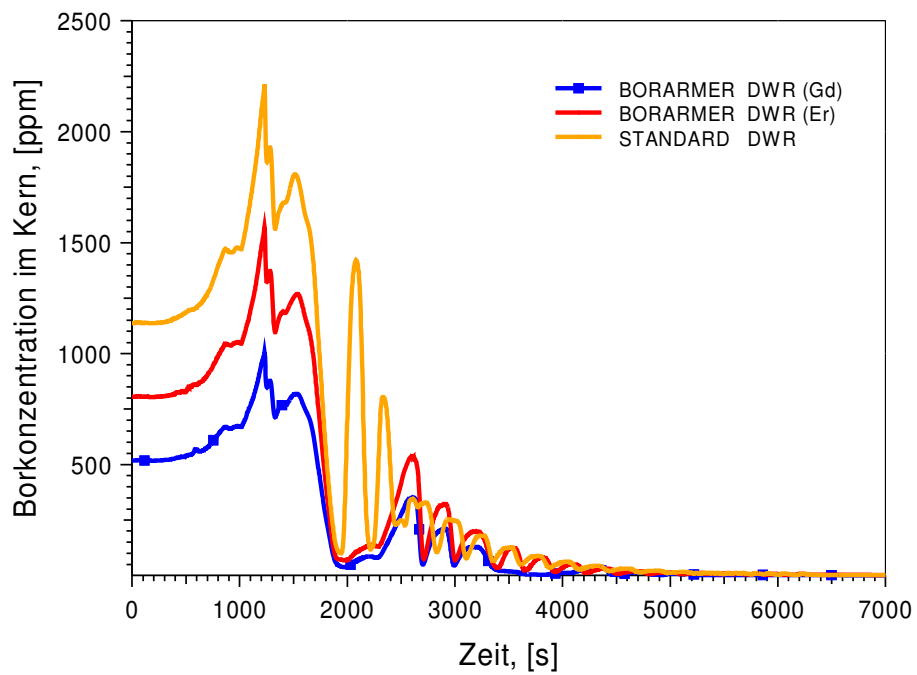


Abbildung 8-20: Borkonzentration im Reaktorkern

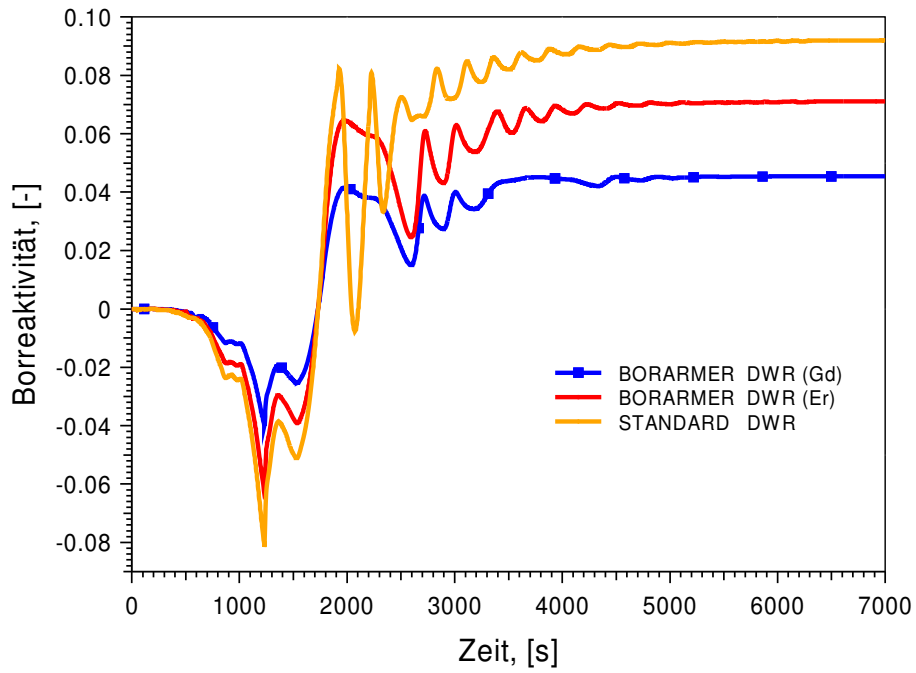


Abbildung 8-21: Borrückwirkung

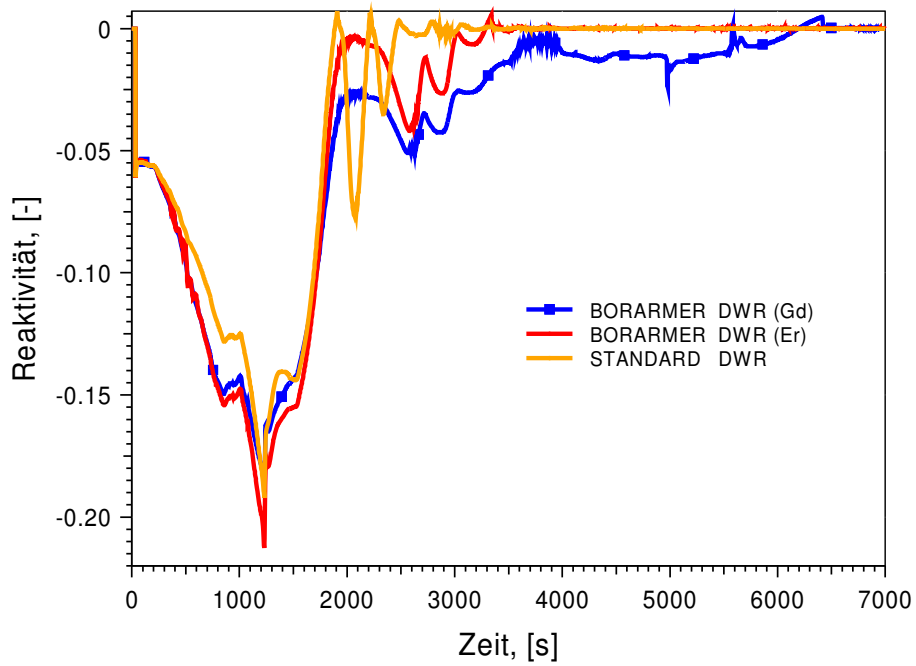


Abbildung 8-22: Reaktivität

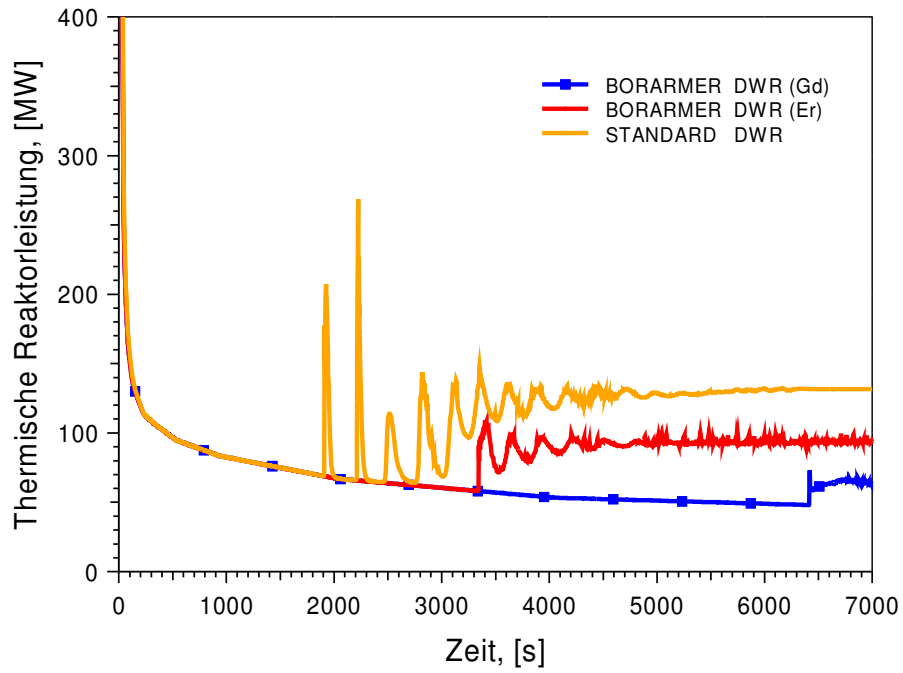


Abbildung 8-23: Thermische Reaktorleistung

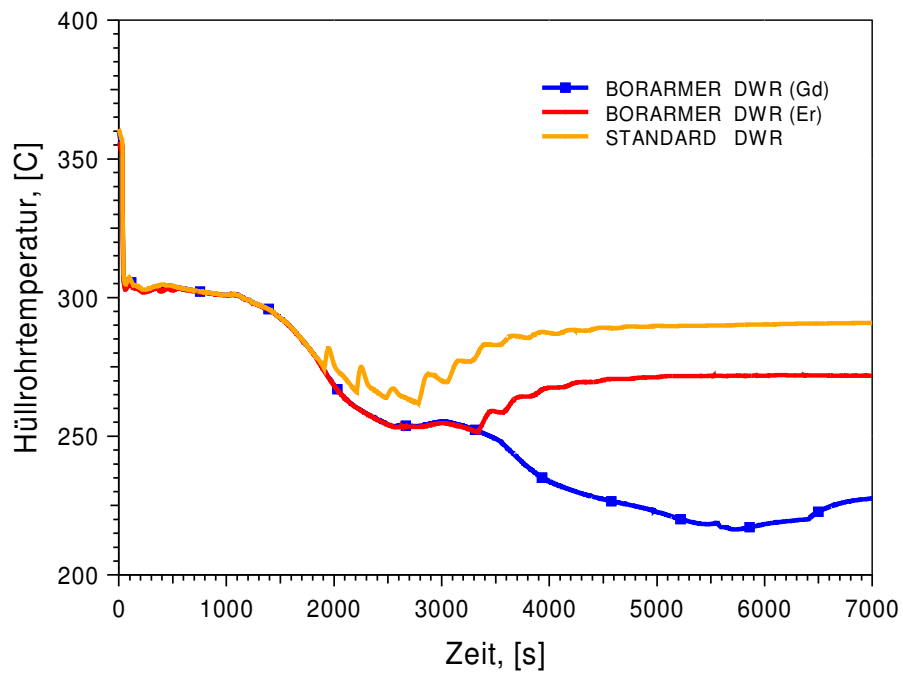


Abbildung 8-24: Hüllrohrtemperatur des heißesten Stabs

Weitere Abbildungen können im Anhang G gefunden werden.

8.3.6 Weitere Untersuchungen zur Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes

Um die Bedeutung der erhöhten Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes borarmer Kernkonfigurationen weiter zu untersuchen, wurden zusätzliche Parameteranalysen mit dem Systemcode ATHLET durchgeführt. Es ist interessant, mit welcher Borkonzentration des eingespeisten Wassers könnten in den ersten 15000 s die DWR Kernkonfigurationen unterkritisch gehalten werden können. Um dies abzuschätzen, wurden mehrere zusätzliche Rechnungen mit einer Simulationsdauer bis zu 250 min nach dem Störfallbeginn durchgeführt. Einspeisestrategien mit unterschiedlich borierterem Wasser wurden simuliert. Dabei wurde in den verschiedenen Rechnungen die Borkonzentration des eingespeisten Wassers mit einem 200 ppm – Schritt erhöht. Abbildung 8-25 zeigt die Zeit zur Rekritikalität mit den verschiedenen Einspeisestrategien.

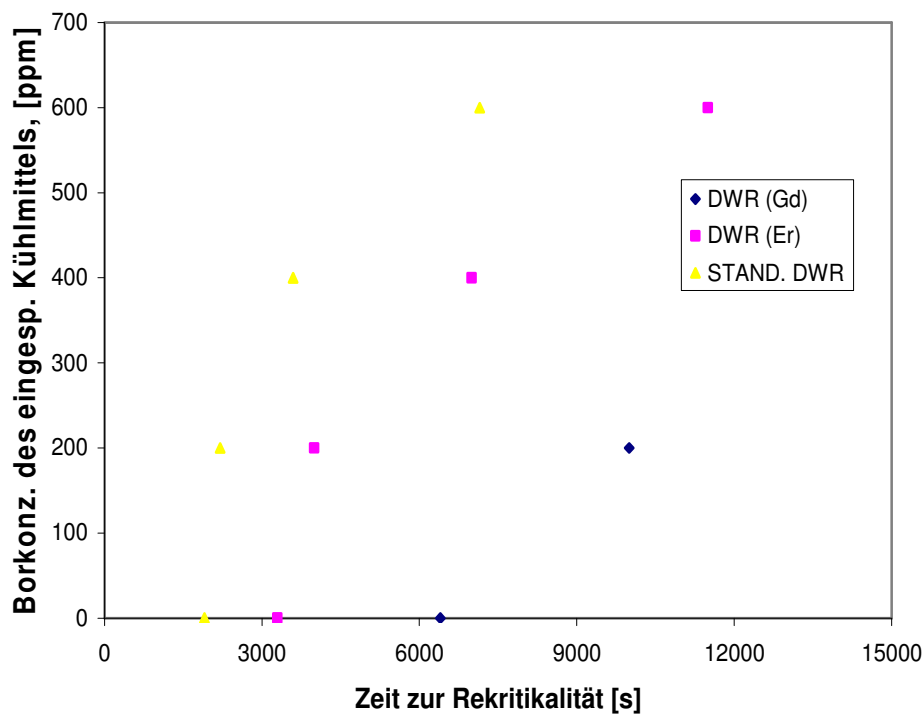


Abbildung 8-25: Zeit zur Rekritikalität mit verschiedenen Einspeisestrategien

Folgende Schlussfolgerungen können gemacht werden:

- Einspeisung mit 800 ppm ist für die Unterkritikalität aller Kerne ausreichend

- 600 ppm sind zu wenig für die Standard- und die Er-Kernkonfiguration und diese erreichen Rekritikalität mit einem Zeitabstand von 78 min
- Mit 400 ppm Bor im eingespeisten Kühlmittel erreicht die Er-Kernkonfiguration Rekritikalität fast zum gleichen Zeitpunkt, zu dem der Standard-DWR mit 600 ppm kritisch wird
- 400 ppm reichen, um die Unterkritikalität der Gd-Kernkonfiguration zu gewährleisten
- Kernkühlung mit 200 ppm führt zu einer signifikanten positiven Reaktivitätszufuhr und letztendlich zur Rekritikalität aller Kerne. Mit der Gd-Kernkonfiguration werden zusätzliche 100 min im Vergleich mit der Er-Konfiguration und 130 min im Vergleich mit der Standard-Kernkonfiguration gewonnen.

Diese und die vorherigen Ergebnisse zeigen, dass für die Unterkritikalität der Standard- und Er-Kernkonfigurationen 800 ppm Borsäure vorbereitet werden muss. Die zur Verfügung stehende Zeit für diese Aktion beträgt 31 min im ersten Fall und 56 min im zweiten. Die Unterkritikalität der borarmen Gd-Kernkonfiguration kann mit nur 400 ppm Borsäure garantiert werden, wobei für dessen Vorbereitung 106 min zur Verfügung stehen.

8.3.7 Zusammenfassung

Die durchgeführten Sicherheitsanalysen haben gezeigt, dass bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen mit kleinem Leck und einem kompletten Ausfall der Notkühlsysteme mit einer Überschreitung der maximalen zulässigen Brennstabhüllrohrtemperatur zu rechnen ist. Um dies zu vermeiden wurden präventive Notfallmaßnahmen mit einer Einspeisung von borfreiem Wasser simuliert. In allen untersuchten Szenarien blieb die maximale Hüllrohrtemperatur unter 1200 °C. Darüber hinaus ergaben sich erhöhte Sicherheitsmargen zur Rekritikalität für die borarmen Kernkonfigurationen. Die Standard-Kernkonfiguration wurde nach 31 min, die borarme Er- nach 56 min und die borarme Gd- Kernkonfiguration nach etwa 106 min kritisch. Diese und weitere Untersuchungen haben die verbesserte inhärente Sicherheit und die erhöhte Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes der neuen Kerne bestätigt.

9 Bewertung der Alternativstrategien und Vergleich mit Standard-DWR

Auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen werden Vor- und Nachteile der untersuchten Alternativstrategien der Reaktivitätssteuerung und –regelung aufgezeigt. Die Alternativstrategien wurden mit dem Standard-DWR auf sechs wesentlichen Ebenen verglichen – Borreduzierung, Brennelement- und Kernausslegung, Zyklusdauer, Urananreicherung, Entladeabbrand und inhärente Sicherheit.

9.1 Borreduzierung

Mit den borarmen Gd- und Er-Kernkonfigurationen konnte eine um 50% bzw. 30% niedrigere kritische Borkonzentration im Vergleich mit der heutigen DWR Praxis erzielt werden. Grund für diesen Unterschied ist der deutlich kleinere Absorptionswirkungsquerschnitt von Er. Die Reduzierung des Borgehalts im Kühlmittel könnte durch eine neue Bestimmung der einzelnen Beiträge in der Reaktivitätsbilanz erzielt werden. Um dies zu erreichen musste der Absorbergehalt um einen Faktor 9 (Gd-Kern) und um einen Faktor 8.3 (Er-Kern) erhöht werden. Tabelle 9-1 zeigt den Absorbergehalt in den untersuchten DWR Kernen.

Im Hinblick auf das übergeordnete Ziel des Vorhabens, nämlich eine Reduktion des Borgehalts im Primärkühlmittel, ist der Einsatz von Gd im Vergleich mit dem Er deutlich vorteilhafter.

Tabelle 9-1: Absorbergehalt in den untersuchten DWR Kernen

Parameter	Bor. DWR (Gd)	Bor. DWR (Er)	Standard-DWR
Absorber-BE im Kern	193	193	56
Absorberstäbe im gemittelten Absorber-BE	24	18.5	8
Absorberstäbe im Kern	4632	3570	448
Absorberkonz. im gemittelten Absorber-BE	6	7.26	7
Absorbermasse im Stab, kg	0.177	0.214	0.207
Absorbermasse im BE, kg	4.25	3.96	1.65
Absorbermasse im Kern, kg	820	764	92.7
Absorbermasse/Gesamtmasse des Brennstoffs	0.00820	0.00764	0.000927

9.2 Brennelement- und Kernauslegung

Bei der Auslegung von BE mit einem hohen Absorbergehalt ist der Einsatz von Er im Vergleich mit Gd günstig, da es eine flachere Leistungsdichteverteilung innerhalb des BE ermöglicht. Bereits bei BE-Konfigurationen mit 12 Absorberstäben ergibt sich eine um 4% höhere maximale Leistungsspitze und bei Konfigurationen mit 36 Stäben führt der Einsatz von Gd zu einer um 6% größeren Leistungsspitze im Vergleich mit Er. Dies ist mit dem größeren Absorptionswirkungsquerschnitt von Gd verbunden.

Auch bei der Kernauslegung zeigte der borarme Gd-Kern Nachteile im Vergleich mit den anderen Kernen. Die Optimierung seiner Leistungsdichteverteilung war ein aufwendiger Prozess, der sowohl für den Zyklusbeginn auch für das Zyklusende durchgeführt werden musste. Aufgrund des spezifischen Abbrandverhaltens der Gd-Brennelemente ist oft eine flache Leistungsdichteverteilung am Zyklusbeginn am Zyklusende ungleichmäßig.

Mit Hilfe von Er wurde eine Kernkonfiguration mit einer flacheren Leistungsdichteverteilung ausgelegt. Die Reaktivität der Er-Brennelemente nimmt mit dem steigenden Abbrand monoton ab und dadurch ist es möglich, größere Leistungsspitzen während des gesamten Zyklus zu vermeiden. Die über die gesamte Zyklusdauer gemittelten maximalen Leistungsspitzen liegen bei 2.05 (Gd-Kern), 1.79 (Standard-Kern) und 1.60 (Er-Kern), d.h. der Gd-DWR hat eine um 13% höhere und der Er-DWR eine um 11% niedrigere Leistungsspitze als der Standard-DWR. Eine niedrigere Leistungsspitze hat neben der betrieblichen (gleichmäßiger Abbrand und bessere Brennstoffausnutzung) auch sicherheitstechnische Bedeutung. Mit einer niedrigeren Brennstofftemperatur sowie einer niedrigeren maximalen linearen Stableistung werden größere Sicherheitsmargen und eine verbesserte Sicherheit bei verschiedenen Transienten und Störfällen gewährleistet (z.B. bei einem großen Bruch).

9.3 Zyklusdauer

Die Zyklusdauer ist ein Auslegungsparameter, der einen wesentlichen Einfluss auf den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb hat. Sie ist hauptsächlich von der Größe der Überschussreaktivität am Zyklusbeginn (Urananreicherung) und der Kernbeladung abhängig. Bei Kernkonfigurationen mit abbrannbaren Absorbern spielt auch die restliche unerwünschte Absorption am Zyklusende eine wichtige Rolle und aus diesem

Grund haben die Gd- und Er-Kernkonfigurationen eine kürzere Zyklusdauer im Vergleich mit der Standard-Kernkonfiguration. Tabelle 9-2 gibt einen Überblick über die Menge der stark (^{157}Gd , ^{155}Gd , ^{167}Er) und schwach absorbierenden Gd- und Er-Isotope im ersten Batch für die wesentlichen BE-Typen.

Tabelle 9-2: Menge der verschiedenen Absorberisotope in den BE im 1. Batch

BE-Typ	DWR Kern	Isotop	Zyklusbeginn	Zyklusende	ZE/ZB
			g/BE	g/BE	%
Gd8-7%		^{157}Gd	181	0	0
	Standard	^{155}Gd	170	0	0
		^{154}Gd	25	23	92
Gd24-9%		^{157}Gd	712	38	5
	Gd	^{155}Gd	663	120	18
		^{154}Gd	94	88	94
Gd24-3%		^{157}Gd	236	0	0
	Gd	^{155}Gd	220	0	0
		^{154}Gd	31	29	92
Er20-8%		^{167}Er	827	373	45
	Er	^{166}Er	1211	1184	98
		^{170}Er	588	582	99
Er16-6%		^{167}Er	504	217	43
	Er	^{166}Er	736	719	98
		^{170}Er	360	356	99

Ein kompletter Absorberabbrand ist für eine lange Zyklusdauer von übergeordneter Bedeutung. Die stark absorbierenden Isotope ^{157}Gd und ^{155}Gd sind zum Zyklusende in den BE mit 3% (borarme Gd-Kernkonfiguration) und 7% Gd_2O_3 (Standard-Kernkonfiguration) komplett ausgebrannt und die Masse des schwach absorbierenden ^{154}Gd ist relativ gering. Bei den BE mit 9% Gd_2O_3 ergibt sich ein anderes Bild. Im Laufe eines Zyklus erreichen sie zwischen 12.700 und 14.400 MWd/tU. Aus den Ergebnissen der Zellrechnungen kann festgestellt werden, dass bei solchen Abbränden weder ^{157}Gd noch ^{155}Gd komplett ausgebrannt ist. Die BE mit 9% Gd_2O_3 enthalten immer noch 5% bzw. 18% der ursprünglichen Masse der oben erwähnten Isotope. Deren Neutronenabsorption führt zu einer Verkürzung der Zykluslänge. Darüber hinaus haben die anderen schwach absorbierenden Isotope im Gd_2O_3 Gemisch kleine Absorptionswirkungsquerschnitte. Deswegen brennen diese während des Zyklus kaum aus, tragen aber wesentlich weniger zur Zyklusverkürzung bei.

Im Hinblick auf die restliche Absorption am Zyklusende zeigt das Er größere Nachteile im Vergleich mit Gd. Erbium (Er_2O_3) enthält nur ein stark absorbierendes Isotop – ^{167}Er . Es besitzt einen deutlich kleineren Absorptionswirkungsquerschnitt im Vergleich mit ^{157}Gd und ^{155}Gd und deswegen brennt es auch deutlich langsamer aus. Am Ende des

Zyklus verbleiben etwa 45% der ^{167}Er -Masse und 99% der schwach absorbierenden Er-Isotope. Mit solch signifikantem Absorbergehalt im Brennstoff ergibt sich eine Zyklusdauer von nur 305 VLT.

9.4 Urananreicherung

Die großen Absorbermengen in den beiden borarmen Kernen haben auch weitere Nachteile. Damit sie mit dem signifikanten Absorbergehalt für 331 bzw. 305 VLT gefahren werden können, muss auch der Brennstoff entsprechend höher angereichert werden. Die borarme Gd-Kernkonfiguration besteht aus Brennstoff mit einer mittleren ^{235}U -Anreicherung von 3.95% und die borarme Er- Kernkonfiguration – mit 4.05%. Die Brennstoffanreicherung der Standard-Kernkonfiguration kann mit diesen Werten nicht verglichen werden, da sie mehrere MOX Brennelemente enthält. Höher angereicherte BE sind wegen der größeren Kosten für die Anreicherung teurer.

9.5 Entladeabbrand

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Anlagenwirtschaftlichkeit ist der erreichte Entladeabbrand. Abbranderhöhungen wurden in Deutschland bisher im internationalen Vergleich besonders intensiv verfolgt. Dies dürfte auch damit zusammenhängen, dass die Entsorgungskosten in Deutschland vom Abbrand weitgehend unabhängig sind. Eine Erhöhung des Abbrands geht meist mit einer Erhöhung der Anreicherung einher.

Die mit den drei Kernen erzielten Entladeabbrände unterscheiden sich nicht sehr stark voneinander. Der mittlere Entladeabbrand des Standard-DWR ist mit 44.800 MWd/tU am niedrigsten. Trotz des großen Absorbergehalts konnten aufgrund des hoch angereicherten Brennstoffs mit den borarmen Kernen Entladeabbrände von 47.100 (Gd-Kernkonfiguration) und 46.200 MWd/tU (Er-Kernkonfiguration) erreicht werden. Darüber hinaus ist die Konzentration von ^{157}Gd und ^{155}Gd bei 47.000 MWd/tU praktisch null. Eine geringe restliche Absorption von ^{154}Gd , ^{156}Gd , ^{158}Gd und ^{160}Gd existiert aber immer noch. Der Entladeabbrand des Er- ist um etwa 1.000 MWd/tU kleiner als der Entladeabbrand von Gd-Kern, trotz der höheren Brennstoffanreicherung. Grund dafür ist das stark absorbierende ^{167}Er , das sogar bei 46.200 MWd/tU nicht komplett ausgebrannt ist. Die Analysen zeigen, dass 2.9% seiner ursprünglichen Masse immer noch in den BE mit 8% Er_2O_3 enthalten sind. Der niedrigere Entladeabbrand ist auch

den anderen schwach absorbierenden Isotopen (^{166}Er , ^{168}Er , ^{170}Er usw.) zuzuschreiben.

9.6 Inhärente Sicherheit

Die durchgeführten Störfallsimulationen und Sicherheitsanalysen haben im Hinblick auf eine verbesserte inhärente Anlagensicherheit Vorteile der neuen Kerne im Vergleich mit dem Standard-Kern aufgezeigt. Generell lassen sich mit einer borarmen Kernauslegung Verbesserungen auf zwei verschiedenen Ebenen unterscheiden:

- Ebene 1: Verbesserung der inhärenten Sicherheit aufgrund der verbesserten Rückwirkungseigenschaften
- Ebene 2: Verbesserung der inhärenten Sicherheit aufgrund der niedrigen Borkonzentration im Kühlmittel

Um Verbesserungen der neuen borarmen Kernkonfigurationen auf Ebene 1 zu untersuchen, wurde ein ATWS-Speisewasserausfall simuliert. Die Analysen zeigen, dass sich im kritischen Zeitfenster 0-200 s aufgrund der stärkeren Dichterückwirkung eine erheblich kleinere thermische Leistung für die borarmen Kernkonfigurationen im Vergleich mit dem Standard-DWR ergibt. Der größte Unterschied zwischen den borarmen und dem Standard-DWR ist eine um Faktor vier kleinere durch die DH-Ventile abgeblasene Kühlmittelmenge. Die Ergebnisse für den Gd- und Er-Kern sind aufgrund der ähnlichen Dichterückwirkungen ähnlich.

Die Ebene 2 - Untersuchungen beinhalteten Simulationen zur Deborierung und einem auslegungsüberschreitenden Ereignis. Während des Deborierungsstörfalls blieb in allen Rechnungen die am Kerneintritt berechnete Borkonzentration höher als die Anfangsborkonzentration. Jedoch ergab sich für die borarmen Kerne ein höherer Reaktivitätsabstand zur Rekritikalität während des gesamten Störfalls. Grund dafür war die größere Differenz zwischen der Anfangsborkonzentration und der Borkonzentration des eingespeisten Wassers. Sie führte zu einer schnelleren Aufborierung des Kühlmittels der borarmen Kerne. Die Rechnung mit der Gd-Kernkonfiguration ergab einen größeren Abstand zur Rekritikalität als in der Rechnung mit Er-Kernkonfiguration.

In den durchgeführten Simulationen zu auslegungsüberschreitenden Ereignissen mit kleinem Leck und einem kompletten Ausfall der Notkühlsysteme wurde im Rahmen der

präventiven Notfallmaßnahmen boriertes Wasser im Primärkreis eingespeist. Rekritikalität wurde in allen Simulationen erreicht, jedoch konnte eine zu hohe Hüllrohrtemperatur vermieden werden. Die Analysen ergaben eine größere Flexibilität der Notfallmaßnahmen für die borarmen Kernkonfigurationen. Die Standard-Konfiguration wurde nach 31 min, die borarme Er-Konfiguration nach 56 min und die borarme Gd-Konfiguration erst nach etwa 106 min kritisch. In diesem Fall hat die Gd im Vergleich zu der Er-Konfiguration eine verbesserte inhärente Sicherheit und erhöhte Flexibilität des anlageninternen Notfallschutzes gezeigt.

Im Laufe der Untersuchungen hat sich ergeben, dass das Er gewisse Vorteile mit sicherheitstechnischer Bedeutung bietet. Obwohl sein Absorptionswirkungsquerschnitt kleiner als der von Gd ist, ist er von der Kühlmitteltemperatur abhängig. Bei einer steigenden Kühlmitteltemperatur wird die Neutronenabsorption in Er_2O_3 aufgrund des deutlich größeren Resonanzintegrals intensiver und dies führt zu einem zusätzlichen negativen Beitrag des Kühlmitteldichtekoeffizienten und dadurch zu einer verbesserten inhärenten Sicherheit.

9.7 Nachteile der untersuchten Absorber

Der verstärkte Einsatz von abbrennbaren Absorbern ist mit weiteren Nachteilen verbunden [Meinl und Rizvi, 1999], einige davon sind:

- Verminderte Schwermetallmasse der Nachladung aufgrund der Brennstoff-Verdrängung
- Niedrigere Anreicherung der Absorberstäbe aufgrund geringer Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffs

Im DWR ist im bestimmungsgemäßen Betrieb Brennstoffschmelzen im Zentrum des Pellets zu vermeiden. Dies ist durch Heißkanalrechnungen zu zeigen. Die Schmelztemperatur von reinem unbestrahltem UO_2 beträgt ca. 2840 °C. Durch Beimischung von Gd_2O_3 sinkt die Schmelztemperatur um ca. 50 °C pro % Gd_2O_3 ab. Darüber hinaus sinkt die Schmelztemperatur auch mit zunehmendem Abbrand des Brennstoffs und ist bei erreichtem Entladeabbrand um ca. 200 °C niedriger als bei frischem Brennstoff. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffs durch Beimischung von Gd_2O_3 sinkt, d.h., bei gleicher linearer Stableistung ist die Brennstoffzentraltemperatur in einem Gd-haltigen Pellet höher als in einem Gd-

freien Pellet. Um unnötige Leistungsdichtebegrenzungen in der Einsatzplanung zu vermeiden, ist es üblich, bei höheren Gd_2O_3 -Konzentrationen (z.B. 7 %) die ^{235}U -Anreicherung in den Gd-haltigen Pellets niedriger zu wählen als in den Gd-freien Pellets des gleichen BE. Damit ist über die gesamte Einsatzzeit sichergestellt, dass die lokale Leistung in den Gd-haltigen Pellets signifikant niedriger ist als in den Gd-freien Pellets. Dies kompensiert den Effekt der schlechteren Wärmeleitfähigkeit und der niedrigeren Schmelztemperatur. Bei niedrigen Gd_2O_3 -Konzentrationen (3 %), wo die Effekte weniger stark ausgeprägt sind, verzichtet man heutzutage auf die Reduktion der ^{235}U -Anreicherung in den Gd-haltigen Pellets [AREVA-2004].

Trotz umfangreicher Literaturrecherche konnten keine Informationen über die Wärmeleitfähigkeit und die Schmelztemperatur von $UO_2-Er_2O_3$ Mischung gefunden werden.

9.8 Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurden zwei grundsätzliche Alternativstrategien der Reaktivitätssteuerung und –regelung untersucht: Auslegungsstrategie mit Einsatz von Gd und Auslegungsstrategie mit Einsatz von Er. Die durchgeführten Vergleichsanalysen haben gezeigt, dass diese Alternativstrategien sowohl Vorteile als auch verschiedene Nachteile aufweisen. Ein direkter Vergleich der untersuchten Alternativstrategien mit einem Standard-DWR zeigt Tabelle 9-3. Der Kern, der mehr Vorteile bzgl. des jeweiligen Kriteriums aufweist, ist in der Tabelle mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet. Allerdings wurden in der Tabelle die in Kap. 9.7 beschriebenen Nachteile nicht berücksichtigt.

Tabelle 9-3: Vergleich der untersuchten Kerne

Kriterium	Borarmer DWR (Gd)	Borarmer DWR (Er)	Standard-DWR
Borreduzierung	•		
BE-Auslegung		•	
Kernauslegung		•	
Zyklusdauer			•
Entladeabbrand	•		
Inhärente Sicherheit	•		

Aufgrund der durchgeführten Analysen erscheint die Alternativstrategie mit Einsatz von Gd als aussichtsreicher für einen realen industriellen Einsatz. Mit dieser Alternativstrategie konnte der Borgehalt im Kühlmittel um 50% im Vergleich mit der heutigen DWR Praxis reduziert werden. Der wesentliche Nachteil von Gd ist eine komplexere BE- und Kernausslegung im Vergleich mit Er. Im Gegensatz zu Gd, bietet die Alternativstrategie mit Er eine flachere Leistungsdichteverteilung im BE und eine wesentlich kleinere maximale Stableistung im Kern. Jedoch verbleibt am Zyklusende im Kern eine signifikante Absorbermenge und sie verkürzt die Zyklusdauer und verkleinert die erreichten Entladeabbrände. Der Er-Brennstoff muss auch höher angereichert werden, um eine zu kurze Zyklusdauer auszuschließen. Der Standard-DWR zeichnet sich mit der größten Zyklusdauer. Es muss aber erwähnt werden, dass der Einsatz von MOX-Brennelementen einen positiven Einfluss auf die Zyklusdauer hat. Die Reaktivität dieses Brennstoffs fällt mit dem steigenden Abbrand langsamer ab im Vergleich mit dem Uranbrennstoff.

Bei den durchgeführten Sicherheitsanalysen hat grundsätzlich die Gd-Kernkonfiguration eine verbesserte inhärente Sicherheit bewirkt. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass seine kritische Borkonzentration wesentlich kleiner ist als die Borkonzentration der Er-Kernkonfiguration. Die Untersuchungen mit Er ergaben, dass sein Absorptionswirkungsquerschnitt im epithermischen Bereich größer ist und deswegen absorbiert es bei kleineren Kühlmitteldichten bzw. höheren Temperaturen intensiver. Dies führt zu einem zusätzlichen negativen Beitrag des Kühlmitteldichtekoeffizienten und letztendlich zur einer Verbesserung der inhärenten Sicherheit.

Der Sinn eines Einsatzes borarmer DWR Kerne ist dementsprechend differenziert zu sehen. Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Untersuchungen können hier naturgemäß nur grundsätzliche Fragenstellungen klären, auf denen weiterführende detaillierte Analysen aufbauen könnten. Relevante Fragestellungen sind das Verhalten solcher Kernkonfigurationen bei Unterkühlungstransienten, die Auswirkung des Absorbergehalts auf die Brennstoffeigenschaften sowie eine gesonderte Entsorgung von Gd- und Er-Brennelementen. Ein weiteres Untersuchungspotenzial besteht in der vollständigen Automatisierung des iterativen 3D Diffusionsverfahrens, sowie bei der Erstellung einer gemeinsamen Kommunikationsschnittstelle zwischen den einzelnen Schritten der entwickelten Methodik zur Auslegung und Optimierung von DWR mit reduziertem Borsäureeinsatz.

Literaturverzeichnis

[AEI-1996] Atomic Energy Insights, Vol. 2, Issue 6, Sept. 1996
<http://www.atomicinsights.com/sep96/materials.html>

[AREVA-2004] R. Boehm, private Mitteilung, 2004

[Becker et al., 2001] Becker, A. et al., "Erfahrungen mit der numerischen Beladeplanoptimierung für Siedewasserreaktoren mit PARAT-BWR", 2001, http://www.wire.tu-bs.de/OLDWEB/axmann/pdf/PARAT_paper_2001.pdf

[Ben-Gurion University of the Negev - 2006] Dissolution, Reactor and Environmental Behavior of $ZrO_2 - MgO$ Inert Fuel Matrix; Neutronic Evaluation of $ZrO_2 - MgO$ Inert Fuels, Final Report, Reactor Analysis Group, Ben-Gurion University of the Negev, July, 2006

[Bubelis et al., 2003] Bubelis, E. et al., "Analysis of Nuclear Characteristics of Ignalina NPP RBMK-1500 Reactors Using New Uranium-Erbium Fuel", Proc. of the Annual Meeting on Nuclear Technology 2003, 20–22. May, 2003, Berlin, Germany

[Bubelis et al., 1999] Bubelis, E. et al., "Analysis of Nuclear Characteristics of Ignalina-RBMK Reactors Using New Fuel Elements with 2.4% Enrichment and Erbium", Proc. of the Annual Meeting on Nuclear Technology 1999, 18–20. May, 1999, Karlsruhe, Germany

[Carlin et al., 2006] Carlin, E. et al., "Margin Assessment of AP1000 Loss of Flow Transient", Proc. of the 14th International Conference on Nuclear Engineering ICONE 14, 17-20. July, Miami, USA

[Deffain et al., 1999] Deffain, J.-P. et al., "Feasibility Studies of a Soluble Boron-Free 900-MW (electric) PWR, Core Physics-II: Control Rod Follow, Load Follow, and Reactivity-Initiated Accident Linked to RCCAs", Nucl. Techn. Vol. 127, Sept. 1999

[E.ON-2005] Randbedingungen für die Kernausslegung eines realistischen DWR Kerns, Fachgespräch bei E.ON Kernkraft GmbH, Hannover, 2005

[EPRI-1989] Elimination of Soluble Boron for a New PWR Design, Technical Report NP-6536, Electric Power Research Institute, 1989

[Fiorini et al., 1999] Fiorini, G. L. et al., "Feasibility Studies of a Soluble Boron-Free 900-MW (electric) PWR, Safety Systems: Consequences of the Partial or Total Elimination of Soluble Boron on Plant Safety and Plant Systems Architecture", Nucl. Techn. Vol. 127, Sept. 1999

[FZR-2002] Erzeugung und Nutzung von Bibliotheken von Zwei-Gruppen-Diffusionsparametern zur Berechnung eines KWU-Konvoi-Reaktors mit dem Reaktordynamik-Programm DYN3D, Abschlussbericht Teil 1, FZR-346, April 2002

[Galperin et al., 1986] Galperin et al., Substitution of the Soluble Boron Reactivity Control by Gadolinium Burnable Poisons, Nucl. Technology, Vol. 75, pp. 127-133, 1986

[Gronau, 1978] Gronau, D., Physik des Druckwasserreaktors, Grundlagen und Betriebspraxis, KWU Technischer Bericht R 124-319/78, 1978

[GRS-1990] Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B, GRS, Verlag TÜV Rheinland, 1990

[GRS-2001] Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland, GRS-175, GRS, 2001

[GRS-2003] Bereitstellung von nuklearen Daten für die DWR-Anlage KKW und die SWR-Anlage KKP-1, GRS-A-3169, Dezember, 2003

[GRS-2005] Weiterentwicklung und Verifikation/Validierung von Rechenprogrammen für die Reaktorsicherheit, GRS PT R, November, 2005

[IAEA-2006] Development and Review of Plant Specific Emergency Operating Procedures, Safety Report Series, No. 48, IAEA, 2006

[ILK-2005] ILK Stellungnahme zu Anforderungen bei Betriebstransienten mit unterstelltem Ausfall der Schnellabschaltung (ATWS), ILK, März, 2005

[Jonsson und Gunn] Jonsson, A., und Gunn, J., "The Erbium Burnable Absorber in the Design and Operation of 18- and 24-Month Fuel Cycles", Transactions of the ANS, Vol. 73, 29.10 – 1.11.1995, San Francisco, USA

[Kim, 1998] Kim et al., 1998, "Nuclear Design Feasibility of the Soluble Boron Free PWR Core", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 30, No. 4, pp. 342-352, August, 1998

[Kim, 2000] Kim, S. und Kim, J., "A Reactivity Hold-Down Strategy For Boron Free Operation by Introducing Pu-238 Added Fuel", Annals of Nuclear Energy 27, pp. 855-871, 2000

[KWU-1975] Sicherheitsbericht Gemeinschaftskernkraftwerk Neckar (GKN II) mit Druckwasserreaktor 2500 MWth, Gemeinschaftskernkraftwerk Neckar GmbH, Esslingen, KWU, Band 1, September, 1975

[KWU-1983] Sicherheitsbericht (projektneutral) Kernkraftwerk KWU - DWR, Band 2, 2.7-2.17, Januar, 1983

[KWU-1984] 1300 MW Nuclear Power Plant with Pressurized Water Reactor, Technical Description, Nuclear Steam Supply System, Reactor Core, KWU, May, 1984

[Meinl und Rizvi, 1999] Meinl, R. und Rizvi, S., "Brennelementauslegung mit geringen Gd-Konzentrationen Ersteinatz in Beznau-2", Tagungsband Jahrestagung Kerntechnik 1999, 18-20. Mai, 1999, Karlsruhe, Deutschland

[NERI-2003] – Development of Improved Burnable Poisons for Commercial Nuclear Power Reactors, Final Report on NERI Project Number 99-0074, NERI September 2003

[ORNL-2000] Parametric Study on the Effect of Burnable Poisons Rods for PWR Burnup Credit, ORNL/TM-2000/373, ORNL. 2000

[Papukchiev et al., 2005] Papukchiev, A., et al., "Coupled Thermal Hydraulics – 3D Kinetics Analysis of ATWS", Proc. of the Annual Meeting on Nuclear Technology 10-12. May, Nuremberg, Germany

[Papukchiev et al., 2006] Papukchiev, A., et al., "Influence of Low Boron Core Design on PWR Transient Behavior", Proc. of the Annual Meeting on Nuclear Technology 16-18. May, Aachen, Germany

[Papukchiev et al., 2006] Papukchiev, A., et al., "Influence of Low Boron Core Design on PWR Transient Behavior", Proc. of the 14th International Conference on Nuclear Engineering ICONE 14, 17-20. July, 2006, Miami, USA

[Papukchiev et al., 2006] Papukchiev, A., et al., "Impact of Boron Dilution Accidents on Low Boron PWR Safety", Proc. of the Topical Meeting on Reactor Physics PHYSOR 2006, 10-14. September, 2006, Vancouver, Canada

[Papukchiev et al., 2007] Papukchiev, A., et al., "Influence of Boron Reduction Strategies on PWR Accident Management Flexibility", Proc. of the 15th International Conference on Nuclear Engineering ICONE 15, 22-26. April, 2007, Nagoya, Japan

[Papukchiev et al., 2007] Papukchiev, A., et al., "Improved PWR Accident Management Procedures through Low Boron Core Design", Proc. of the Annual Meeting on Nuclear Technology 22-24. May, 2007, Karlsruhe, Germany

[Pointner, 2006] Pointner, W., "Borverdünnungsszenarien und ihre sicherheitstechnische Bedeutung", Fachtagung der KTG-Fachgruppen „Sicherheit kerntechnischer Anlagen“, „Thermo- und Fluidodynamik“ und „Betrieb von kerntechnischen Anlagen“, Rossendorf, 3-4. April, 2006

[RSK-1996] RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, Ursprungsfassung (3. Ausgabe vom 14. Oktober 1981) mit Änderungen vom 15.11.1996, RSK, 1996

[Schlieck et al., 2000] Schlieck, M. et al., "Optimized Gadolinia Concepts for Advanced In-Core Fuel Management in PWRs", Nuclear Engineering and Design 205, 2001

[Secker und Erwin] Secker, J., und Erwin, R., "ZrB₂: The Optimum Integral Fuel Burnable Absorber for PWRs", Transactions of the ANS, Vol. 62, 11–16. November, 1990, Washington, USA

[SIEMENS-1991] DWR-Einführungskurs B 221 D, Band 5, Teil 1, SIEMENS, 1991

[Studsvik-2006] R. Stamm'ler, private Mitteilung, 2006

[STUK-2003] Transient and Accident Analysis for Justification of Technical Solutions at Nuclear Power Plants, YVL 2.2, STUK, 2003

[Thomet, 1999] Thomet, P., "Feasibility Studies of a Soluble Boron-Free 900-MW (electric) PWR, Core Physics-I: Motivations, Assembly Design, and Core Control", Nucl. Techn. Vol. 127, Sept. 1999

[Vesterlund und Junkrans, 1998], Vesterlund, G. und Junkrans, S., "Perspectives on LWR Fuel Development", Twenty-Third Symposium of the Uranium Institute, 10-11. September, 1998, London, Great Britain

[Weiß und Kliem, 2003] Weiß, F.-P. und Kliem, S. "Study of Boron-dilution Transients in PWRs", The 2003 FJOH Summer School in Reactor Physics, 20-29. August, 2003, FZK, Karlsruhe, Germany

[Zhiven, 2003] Zhiven, Xu, "Design Strategies for Optimizing High Burnup Fuel in Pressurized Water Reactors", Ph.D. Thesis, Dept. of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2003

Abkürzungen

ABB	Asea Brown Boveri
AEI	Atomic Energy Insights
ATWS	Anticipated Transients With Failure to Scram
BAA	Burnable Absorber Assembly
BE	Brennelement
CEA	Commissariat a l'Energie Atomique
DE	Dampferzeuger
DH	Druckhalter
DWR	Druckwasserreaktor
EPRI	Electric Power Research Institute
Er	Erbium
EVA	Einwirkungen von Außen
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GCSM	General Control Simulation Module
Gd	Gadolinium
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
GVA	Gemeinsam verursachte Ausfälle

HD-Einspeisung	Hochdruck-Einspeisung
HKMP	Hauptkühlmittelpumpe
ILK	Internationale Länderkommission
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institute
JPSR	JAERI Passive Safety Reactor
KWU	Kraftwerk Union
LWR	Leichtwasserreaktor
MOX	Mixed Oxide Fuel
ND-Einspeisung	Niederdruck-Einspeisung
PIUS	The Process Inherent Ultimate Safety Reactor
RBMK	Reaktor Bolshoi Moshnosti Kanalnyi
RESA	Reaktorschnellabschaltung
RDB	Reaktordruckbehälter
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
SHB	Sicherheitsbehälter
SIR	Safe Integral Reactor
SJP	Single Junction Pipe
SWR	Siedewasserreaktor
TUSA	Turbinenschnellabschaltung
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein

VLT	Volllasttage
VRS	Volumenregelsystem
VVER	Wasser Wasser Energie Reaktor
WABA	Wet Annular Burnable Absorber
ZB	Zyklusbeginn
ZBS	Zusatzboriersystem
ZE	Zyklusende

ANHANG A: Struktur des Brennelementdatensatzes

Um Diffusionsrechnungen mit dem 3D Model QUABOX/CUBBOX sowie physikalische Untersuchungen mit GENLIB durchführen zu können, wurde eine spezielle Struktur des Brennelementdatensatzes entwickelt [GRS-2003]. Der Wirkungsquerschnittsdatensatz eines Brennelementes enthält 8 Wirkungsquerschnitte, 15 Entwicklungskoeffizienten sowie die Xenon Konzentration (Tabelle 1).

Tabelle 1: Liste der Zwei-Gruppen-Diffusionsparametern im Brennelementdatensatz

WQ-Typ	Beschreibung
D1	Diffusionskonstante (schnelle Gruppe), Referenzwert
DX-D1(Xe)	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Xenonkonzentration
D2	Diffusionskonstante (thermische Gruppe), Referenzwert
DX-D2(Xe)	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Xenonkonzentration
$\Sigma R1$	Streuquerschnitt (schnelle Gruppe), Referenzwert
DT- $\Sigma R1(T_i)$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Brennstofftemperatur
DB- $\Sigma R1(c_{Bor})$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Borkonzentration
$\Sigma A1$	Absorptionsquerschnitt (schnelle Gruppe), Referenzwert
DX- $\Sigma A1(Xe)$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Xenonkonzentration
DT- $\Sigma A1(T_i)$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Brennstofftemperatur
$\Sigma A2$	Absorptionsquerschnitt (thermische Gruppe), Referenzwert
DX- $\Sigma A2(Xe)$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Xenonkonzentration
DT- $\Sigma A2(T_i)$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Brennstofftemperatur
DB- $\Sigma A2(c_{Bor})$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Borkonz.
$\Sigma nF1$	Spaltquerschnitt (schnelle Gruppe), Referenzwert
DT-n $\Sigma f1(T_i)$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Brennstofftemperatur
DB-n $\Sigma f1(c_{Bor})$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Borkonzentration
n $\Sigma f2$	Spaltquerschnitt (thermische Gruppe), Referenzwert
DX-n $\Sigma f2(Xe)$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Xenonkonzentration
DT-n $\Sigma f2(T_i)$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Brennstofftemperatur
DB-n $\Sigma f2(c_{Bor})$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Borkonzentration
Σxe	Absorptionsquerschnitt Xenon, Referenzwert
DB- $\Sigma xe(c_{Bor})$	Abweichung vom Referenzwert als Funktion der Borkonzentration
NXE	Xe-Konzentration

Die verschiedenen Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter werden in einer Form von Funktionstabellen abgespeichert. Die wichtigsten Interpolationsparameter sind der Abbrand $X(1)$, die instantane Moderatorordichte $X(2)$ und die historische Moderatorordichte $X(3)$. Die Rechenstützpunkte für den Abbrand sind 0, 250, 500, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000, 5.000, 6.000, 7.000, 8.000, 9.000, 10.000, 11.000, 12.000, 13.000, 14.000, 15.000, 16.500, 18.000, 20.000, 22.500, 25.000, 27.500, 30.000, 32.500, 35.000, 37.500, 40.000, 45.000, 50.000, 55.000, 60.000, 65.000, 70.000 MWd/tU., für die instantane Moderatorordichte - 0.200, 0.400, 0.616, 0.720, 0.797, 0.850 g/cm³ und für die historische Moderatorordichte - 0.616, 0.720 und 0.797 g/cm³. Der Einfluss weiterer Parameter wie der Brennstofftemperatur, der Borkonzentration und der Xenonkonzentration wird durch die Entwicklungskoeffizienten beschrieben. Die Abbrandrechnung wurde für eine Brennstofftemperatur von 600 °C und eine Borkonzentration von 500 ppm im Xenongleichgewicht durchgeführt. Die entsprechenden Werte wurden später als Referenzwerte der Wirkungsquerschnittsbibliothek in GENLIB und QUABOX/CUBBOX Subroutine CROLRA angesetzt.

Anwendung der Zwei-Gruppen-Daten in GENLIB oder QUABOX/CUBBOX

Der oben beschriebene Brennelementdatensatz enthält Zwei-Gruppen-Diffusionsparameter für verschiedene Kombinationen von schrittweise variierten Werten des Abbrandes (BUR) und der Betriebsparameter Moderatorordichte (ρ_m), Brennstofftemperatur (T_{br}), Borkonzentration (C_b). Es wurden Verzweigungsrechnungen für bestimmte Stützstellen dieser Parameter durchgeführt. Da in GENLIB oder QUABOX/CUBBOX jedoch Daten für beliebige Betriebszustände, d.h. für beliebige aktuelle Werte von BUR, ρ_m , T_{br} und C_b benötigt werden, ist eine Interpolation bzw. Parametrisierung der Daten notwendig.

Ein aktueller makroskopischer Wirkungsquerschnitt, Diffusionskoeffizient oder anderer neutronenphysikalischer Parameter wird deshalb in der folgenden Form dargestellt:

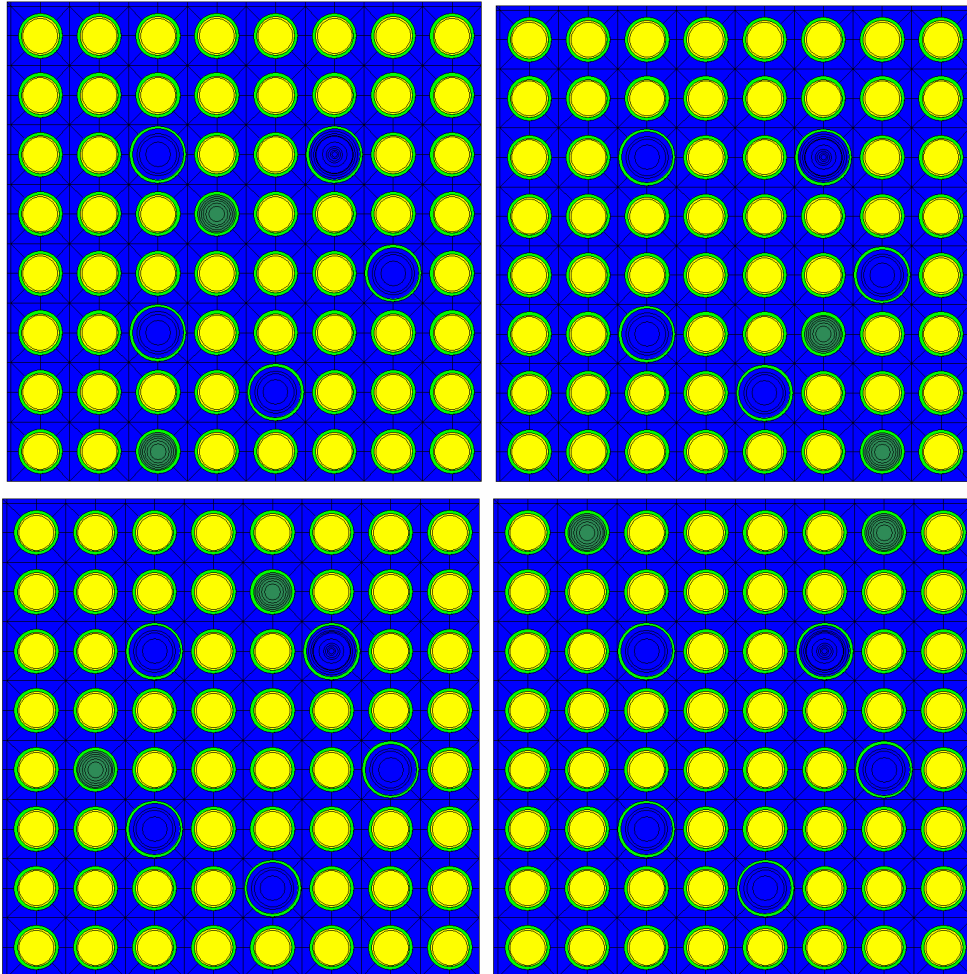
$$\begin{aligned} \Sigma A2 (BUR, \rho_m, T_{br}, C_b) = & \Sigma A2_{base} (BUR, \rho_m) + DX-\Sigma A2(Xe) + DT-\Sigma A2(T_f) + \\ & + DB-\Sigma A2(C_b) \end{aligned}$$

$\Sigma A2_{base} (BUR)$ ist der Basiswert bei nominalen Betriebsparametern und aktuellem nodalen Abbrand (BUR). Die folgenden drei Entwicklungskoeffizienten stehen für die

Korrekturen bezüglich der aktuellen thermohydraulischen Parameter, d.h. bei verschiedenen Borkonzentrationen, Brennstofftemperaturen usw. werden unterschiedliche Korrekturen für die Berechnung des Wirkungsquerschnitts verwendet.

Obwohl das Programm GENLIB ein Bestandteil vom Diffusionscode QUABOX/CUBBOX ist, könnte es zur Überprüfung der Plausibilität der erzeugten Nukleardaten verwendet werden. Es basiert auf mehrere FORTRAN Subroutinen, eine der wichtigsten davon ist LINT4D. Sie enthält einen komplexen Algorithmus mit dessen Hilfe eine lineare Interpolation in die Wirkungsquerschnittstabellen durchgeführt werden kann. Generell kann diese Subroutine bis vier unabhängige, physikalische Parameter wie z.B. Abbrand, Moderatordichte, Borkonzentration und Brennstofftemperatur berücksichtigen. Für eine beliebige Parameterkombination, die einen Reaktorzustand definiert, werden die Wirkungsquerschnitte durch lineare Interpolation im Intervall zwischen den gegebenen Stützstellen interpoliert. Um eine Konsistenzanalyse der physikalischen Daten zu ermöglichen, war eine Modifikation des Programms notwendig. Weiterhin wurde die Subroutine KINF von dem 3D Kernmodel übernommen und in GENLIB integriert. Dadurch war es möglich, mit Hilfe der erzeugten Wirkungsquerschnitte den Neutronenmultiplikationsfaktor k_{inf} zu berechnen.

ANHANG B: Leistungsdichteverteilung in Gd- und Er-Brennelementen



HELIOS Modelle der untersuchten Brennelementkonfigurationen

1.088	1.064	1.056	1.048	1.044	1.040	1.023	1.003	1.105	1.083	1.078	1.071	1.066	1.062	1.051	1.041
1.064	1.054	1.065	1.032	1.036	1.060	1.017	0.954	1.083	1.080	1.102	1.072	1.067	1.085	1.048	1.020
1.055	1.064	0.000	0.992	1.031	0.000	1.049	0.933	1.078	1.102	0.000	1.097	1.090	0.000	1.071	1.017
1.044	1.028	0.989	0.216	0.966	1.074	1.077	0.997	1.070	1.072	1.097	1.058	1.042	1.068	1.060	1.015
1.036	1.027	1.022	0.960	0.993	1.071	0.000	1.065	1.066	1.067	1.090	1.042	0.986	0.970	0.000	0.996
1.027	1.041	0.000	1.058	1.064	1.065	1.073	1.040	1.062	1.085	0.000	1.067	0.967	0.209	0.891	0.887
1.008	0.978	0.979	1.040	0.000	1.070	1.025	1.009	1.051	1.048	1.071	1.059	0.000	0.877	0.800	0.776
0.993	0.917	0.214	0.961	1.057	1.038	1.009	0.996	1.041	1.020	1.017	1.014	0.992	0.865	0.198	0.733

1.065	1.037	1.012	0.961	0.918	0.965	1.005	1.017	0.863	0.206	0.884	0.966	0.969	0.890	0.208	0.883
1.036	1.028	1.031	0.941	0.214	0.971	1.010	1.006	0.932	0.915	0.983	0.997	1.000	0.992	0.928	0.942
1.011	1.031	0.000	1.010	0.985	0.000	1.063	1.026	0.997	1.024	0.000	1.055	1.061	0.000	1.048	1.005
0.961	0.941	1.011	1.018	1.032	1.092	1.105	1.063	1.027	1.035	1.071	1.052	1.058	1.103	1.102	1.057
0.918	0.214	0.985	1.032	1.048	1.101	0.000	1.100	1.042	1.050	1.088	1.068	1.062	1.105	0.000	1.096
0.965	0.971	0.000	1.092	1.101	1.091	1.095	1.062	1.044	1.076	0.000	1.118	1.109	1.092	1.093	1.059
1.005	1.010	1.063	1.105	0.000	1.095	1.043	1.026	1.025	1.035	1.083	1.115	0.000	1.094	1.040	1.022
1.017	1.006	1.026	1.064	1.100	1.062	1.026	1.010	0.981	0.985	1.019	1.062	1.098	1.059	1.022	1.006

Relative Leistungsdichteverteilung in Gd-Brennelementen

1.050	1.027	1.023	1.017	1.014	1.012	1.000	0.988	1.059	1.037	1.033	1.027	1.024	1.022	1.012	1.003
1.027	1.023	1.045	1.016	1.017	1.041	1.002	0.964	1.037	1.035	1.060	1.031	1.029	1.051	1.014	0.984
1.022	1.045	0.000	1.034	1.043	0.000	1.042	0.971	1.033	1.060	0.000	1.062	1.061	0.000	1.049	0.991
1.014	1.015	1.033	0.471	1.010	1.070	1.068	1.007	1.027	1.031	1.062	1.030	1.027	1.068	1.062	1.009
1.012	1.014	1.040	1.008	1.006	1.058	0.000	1.047	1.024	1.029	1.061	1.027	1.003	1.030	0.000	1.022
1.008	1.035	0.000	1.065	1.056	1.041	1.044	1.008	1.022	1.051	0.000	1.068	1.030	0.468	0.989	0.956
0.996	0.992	1.025	1.058	0.000	1.043	0.988	0.970	1.012	1.014	1.049	1.061	0.000	0.986	0.918	0.895
0.986	0.957	0.454	1.000	1.045	1.008	0.970	0.954	1.003	0.985	0.991	1.009	1.021	0.952	0.422	0.869

1.041	1.017	1.008	0.991	0.982	0.991	0.995	0.993	0.980	0.452	0.971	0.989	0.990	0.971	0.449	0.957
1.017	1.014	1.034	0.993	0.465	1.020	1.001	0.979	0.983	0.981	1.018	1.003	1.005	1.021	0.979	0.960
1.007	1.034	0.000	1.034	1.033	0.000	1.046	0.994	1.002	1.031	0.000	1.046	1.050	0.000	1.042	0.988
0.991	0.993	1.035	1.017	1.024	1.076	1.077	1.027	1.010	1.017	1.052	1.027	1.032	1.080	1.078	1.026
0.982	0.465	1.033	1.024	1.022	1.068	0.000	1.059	1.015	1.023	1.060	1.036	1.027	1.071	0.000	1.060
0.991	1.020	0.000	1.076	1.068	1.051	1.053	1.016	1.015	1.048	0.000	1.085	1.073	1.053	1.054	1.017
0.995	1.001	1.046	1.077	0.000	1.053	0.995	0.976	1.003	1.009	1.054	1.082	0.000	1.055	0.997	0.978
0.993	0.979	0.994	1.027	1.059	1.016	0.976	0.960	0.983	0.973	0.993	1.028	1.061	1.018	0.978	0.961

Relative Leistungsdichteverteilung in Er-Brennelementen

ANHANG C: Wesentliche Prinzipien der DWR Auslegung

Die Auslegung bestehender DWR Kerne beruht auf den folgenden drei wesentliche Prinzipien [Gronau, 1978], [SIEMENS - 1991]:

Optimierung der Leistungsdichteverteilung

- genügend großer Filmsiede (DNB) – Abstand
- genügend geringe lokale Spitzenleistung bzw. ausreichend kleiner Fq-Faktor (Heißkanalfaktor)
- möglichst hohe Leistungsdichte im gesamten Kern bzw. möglichst hoher Entladeabbrand für alle Brennelemente
- möglichst flache Leistungsdichteverteilung im gesamten Kern bzw. möglichst gleichmäßiger Abbrand für alle Brennelemente

Negativer Kühlmitteltemperaturkoeffizient der Reaktivität

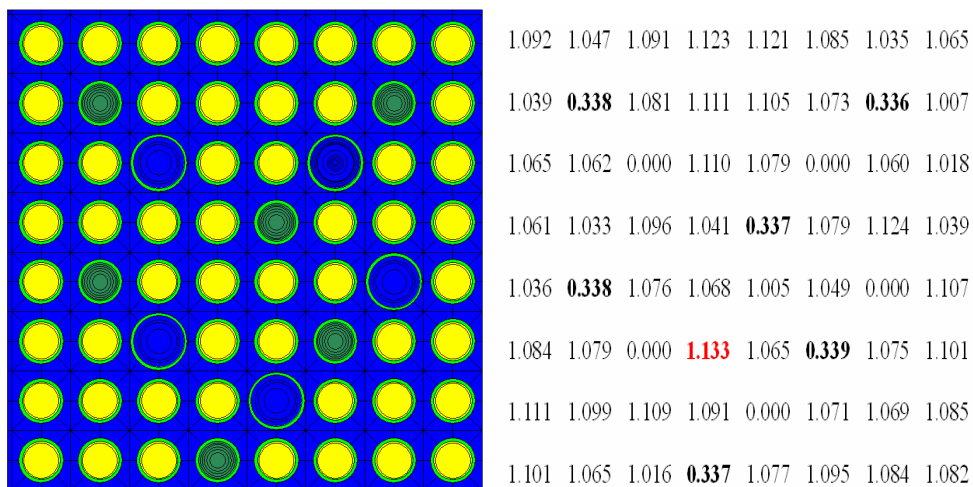
- geeignete Wahl des Moderationsverhältnisses
- ausreichend niedrige Borkonzentration zu Zyklusbeginn

Optimierung von Anzahl und Position der Steuerstäbe

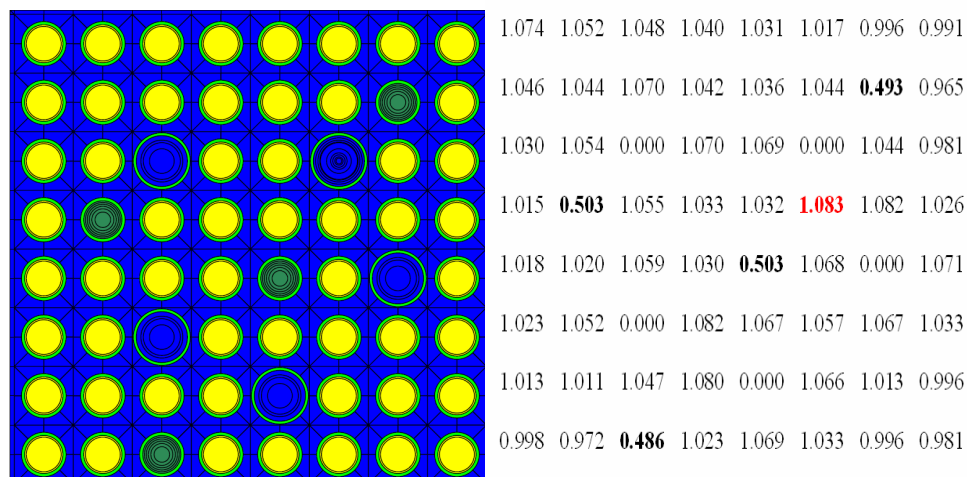
- ausreichende Nettowirksamkeit

möglichst geringe Verformung der Leistungsdichteverteilung beim Verfahren von Steuerstabgruppen (D-Bänke)

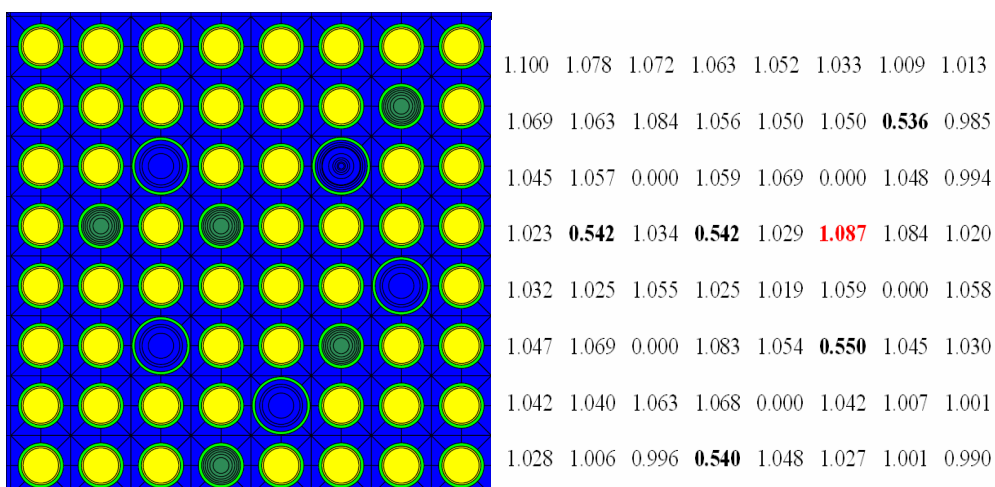
ANHANG D: Leistungsdichteverteilung in den Brennelementen der borarmen Kerne



Brennelement mit 24 Gd-Stäben

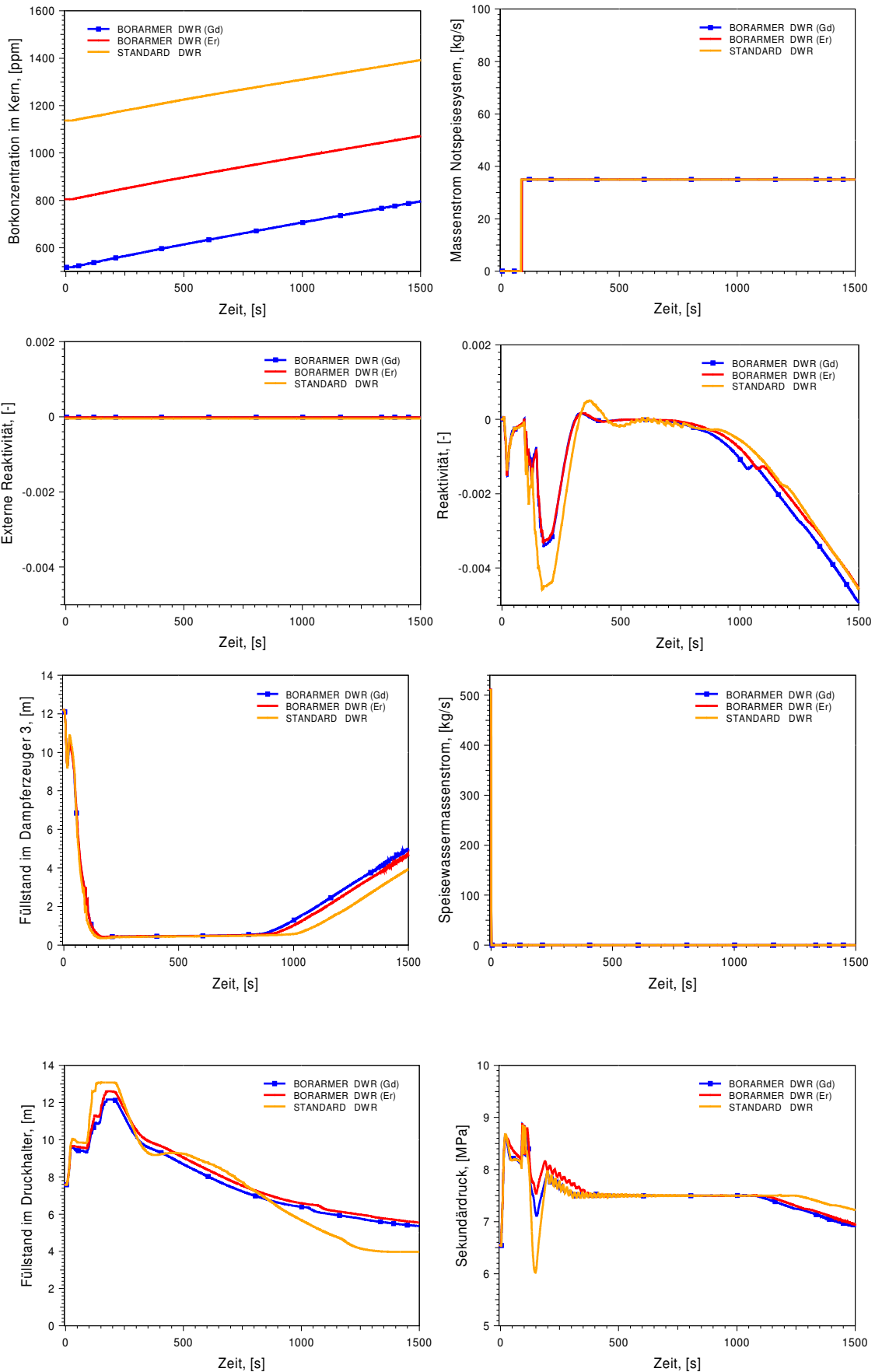


Brennelement mit 16 Er-Stäben

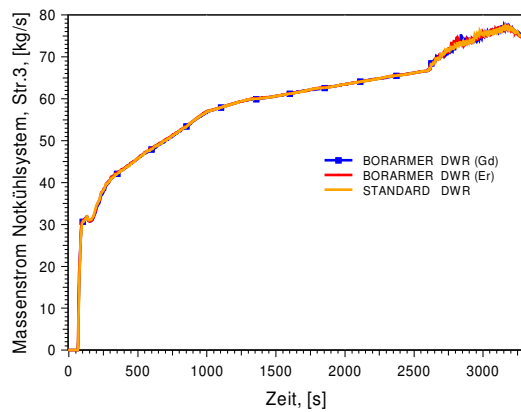
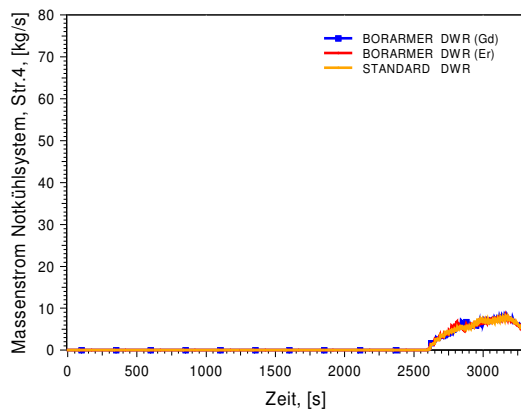
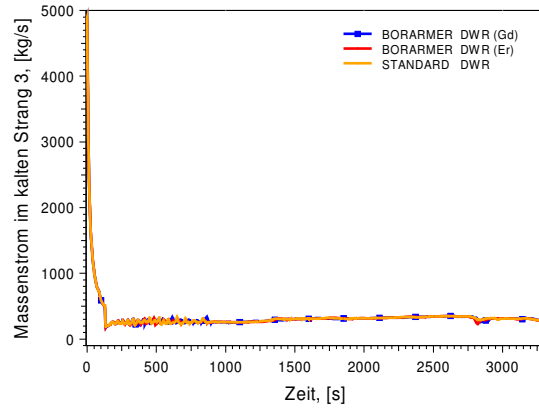
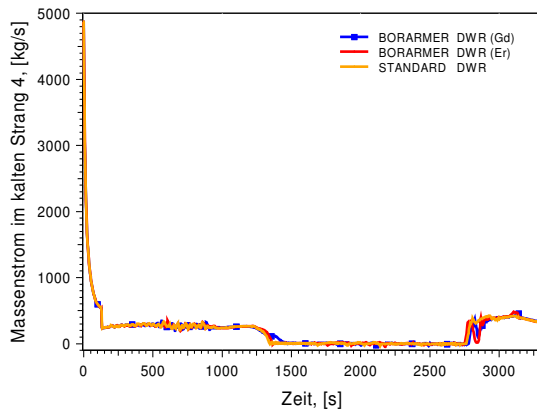
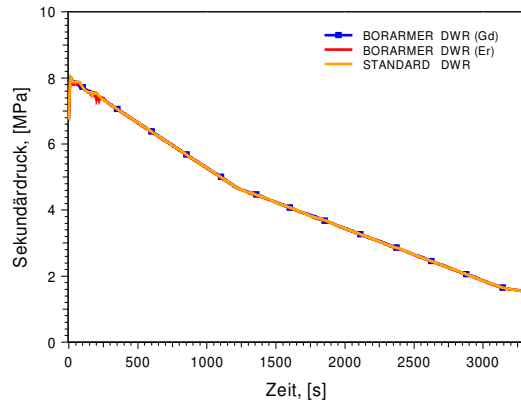
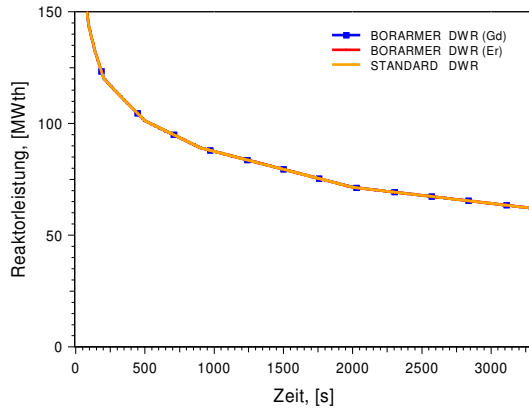


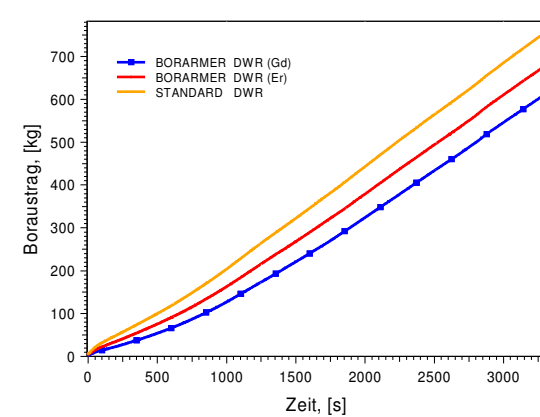
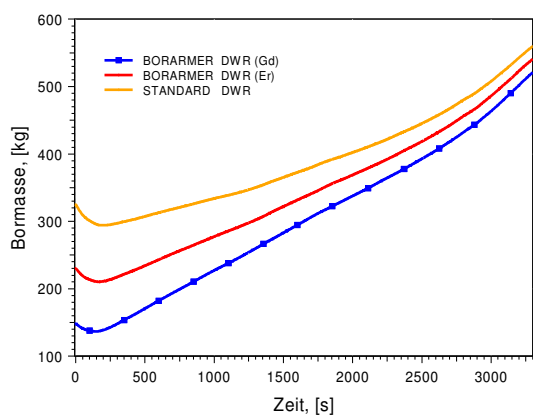
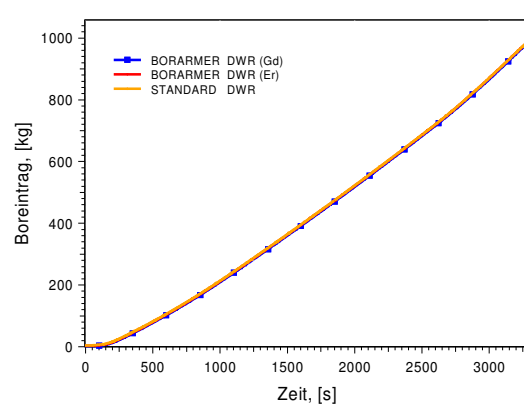
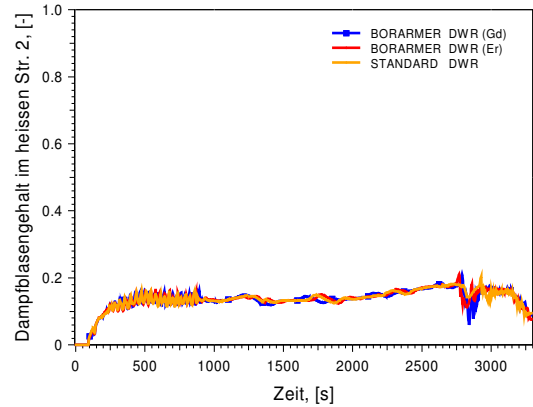
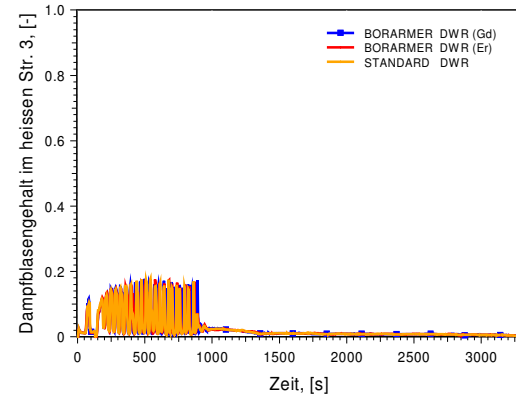
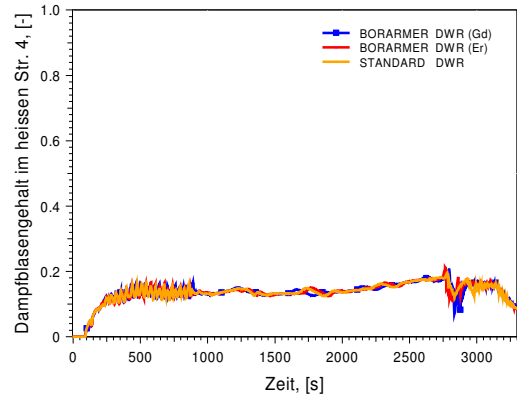
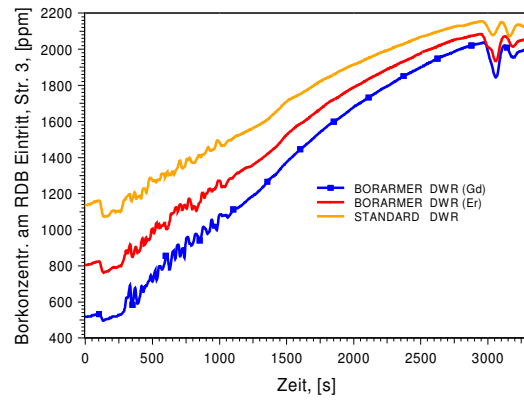
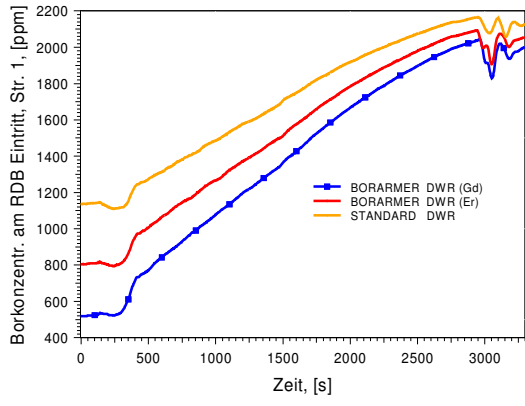
Brennelement mit 20 Er-Stäben

ANHANG E: Weitere Abbildungen zum ATWS-Speisewasserausfall



ANHANG F: Weitere Abbildungen zur Deborierung





ANHANG G: Weitere Abbildungen zu auslegungsüberschreitenden Ereignissen

