

**Vergleichsrechnungen
und Parameterstudien
mit HELIOS und TRITON**

Vergleichsrechnungen und Parameterstudien mit HELOS und TRITON

Technischer Bericht

Fabian Sommer

Mai 2017

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unter dem Kennzeichen 3614R03341 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Abbrandberechnung, Abbrandkredit, Nuklidinventar, Siedewasserreaktor, HELIOS, TRITON

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Vergleich zwischen HELIOS und TRITON Rechnungen.....	3
2.1	Abbrandprogramm TRITON.....	3
2.2	Multiplikationsfaktor	5
2.3	Nuklidinventare.....	6
3	Parameterstudie zur Schrittlänge der Abbrandrechnung.....	9
3.1	Modifizierte Abbrandhistorien.....	9
3.2	Ergebnisse.....	10
3.2.1	Multiplikationsfaktor HELIOS	11
3.2.2	Multiplikationsfaktor TRITON.....	12
3.2.3	Nuklidinventare HELIOS.....	13
3.2.4	Nuklidinventare TRITON.....	15
4	Vergleich Abbrand der gadoliniumhaltigen Stäbe via flux oder power.....	17
4.1	Multiplikationsfaktor TRITON: Abbrand via flux vs. power.....	17
4.2	Nuklidinventare TRITON: Abbrand via flux vs. power	18
	Literaturverzeichnis.....	21
	Abbildungsverzeichnis.....	23
	Tabellenverzeichnis.....	25
	Abkürzungen.....	27

1 Einleitung und Zielsetzung

Im Vorhaben 3614R03341 „Beurteilung der Machbarkeit einer Validierung von Rechen-codes für Kritikalitäts- und Abbrandrechnungen für den Einsatz in Systemen mit Siedewasserreaktor-Brennstoff“ /BEH 17/ wurde das Abbrandprogramm HELIOS für die Berechnung von Nuklidinventaren gewählt, da es aufgrund seiner schnellen Rechenroutinen Monte-Carlo-basierte Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen erlaubt. Das Programm wurden im Zuge dieser Analysen sowohl auf die Untersuchung von Nachbestrahlungsproben (post irradiation experiments, PIE) angewendet, als auch bei den Untersuchungen mit einem generischen Siedewasserreaktor-(SWR)-Brennelement (BE) eingesetzt. Da dieses Programm in der GRS in der Vergangenheit in erster Linie zur Berechnung von Weniggruppen-Wirkungsquerschnitten für Diffusionsrechenverfahren verwendet wurde und nur in wenigen Fällen explizit zur Nuklidinventarbestimmung, wurden einige Vergleichsrechnungen und Voruntersuchungen durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Rechenergebnisse mit etablierten Rechenverfahren auf diesem Gebiet sicherzustellen.

Dabei wurden die von HELIOS berechneten Verläufe des Neutronenmultiplikationsfaktors k_{eff} mit den Ergebnissen von TRITON verglichen. Diese Abbrandsequenz aus dem SCALE 6.1.2 Paket ist eines der Standardprogramme zur Nuklidinventarberechnung in der GRS, so dass auf einen großen Erfahrungsschatz mit diesem Programm zurückgegriffen werden kann. Dies ermöglicht eine bessere Einschätzung und Bewertung der mit HELIOS erzielten Ergebnisse. Zusätzlich wurden die Nukliddichten nach 40 GWd/tSM Abbrand für einen Satz von für die Kritikalität des abgebrannten Brennelements relevanten Nukliden verglichen.

Neben dem direkten Vergleich der beiden Programme wurde auch untersucht, welchen Einfluss die Länge der Abbrandschritte hat, und der Unterschied quantifiziert der sich ergibt, wenn in den TRITON Rechnungen die gadoliniumhaltigen Brennstäbe (BS) mit konstantem Neutronenfluss („flux“-Option) oder mit konstanter Leistung („power“-Option) abgebrannt werden.

Für diese Rechnungen wurde ein axialer Abschnitt des im Vorhaben verwendeten generischen SWR BE verwendet. Die genauen Spezifikationen des verwendeten BE und dessen Implementierung in den beiden Codes finden sich in Kapitel 7.3 des Ab-

schlussberichts zu diesem Vorhaben /BEH 17/. Eine nähere Beschreibung der verwendeten Codes HELIOS findet sich in Kapitel 4 des Abschlussberichts /BEH 17/.

2 Vergleich zwischen HELIOS und TRITON Rechnungen

Die Vergleichsrechnungen wurden für beide Codes an drei repräsentativen axialen Positionen des untersuchten generischen Brennelements durchgeführt: Für die untere Zone mit 0 % Dampfblasengehalt, die mittlere Zone mit 40 % Dampfblasengehalt und die obere Zone mit 70 % Dampfblasengehalt. Alle Rechnungen wurden jeweils ohne Steuerkreuz durchgeführt.

Für den Vergleich wird zunächst der Verlauf des Neutronenmultiplikationsfaktors als Funktion des Abbrands im Bereich 0 bis 40 GWd/tSM betrachtet. Im zweiten Schritt werden die Nuklidinventare nach Erreichen des Zielabbrandes von 40 GWd/tSM und einer Abklingzeit von 5 Jahren verglichen. Die Ergebnisse werden bezugnehmend auf den Rechenbenchmark /HAN 15/ diskutiert, in dem bereits einige Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Abbrandcodes für ein SWR Brennelement mit einem Dampfblasengehalt von 40 % vorgestellt wurden.

2.1 Abbrandprogramm TRITON

Für die Vergleichsrechnungen wurde TRITON ausgewählt, ein Modul des SCALE Softwarepakets /SCA 11/, welches unter anderem für Transport- und Abbrandberechnungen eingesetzt werden kann. Es beinhaltet Rechensequenzen für ein-, zwei- und – unter Verwendung der Monte-Carlo Codes KENO-Va oder KENO-VI – dreidimensionale Konfigurationen.

Für die vergleichenden Berechnungen wurde die TRITON Sequenz *T5-depl* mit dem KENO-Va Monte-Carlo Code verwendet, unter Verwendung der Wirkungsquerschnittsbibliothek ENDF/B-VII. Obwohl das Modell hierbei dreidimensional ist, ist es in axialer Richtung gleichförmig mit reflektierenden Randbedingungen definiert und somit effektiv zweidimensional. Daher ist es ausreichend einen kleinen axial gleichförmigen Abschnitt zu modellieren.

Für die Vergleichsrechnungen mit HELIOS wird in TRITON ein 10 cm hoher Abschnitt des in Kapitel 7.3 des Abschlussberichts beschriebenen SWR Brennelements modelliert. Bei der Materialzuweisung wurde nur die diagonale Symmetrie ausgenutzt und jede einzigartige Brennstabposition unabhängig von Anreicherung und Positionen individuell modelliert. Dies erhöht zwar im Gegensatz zu einer Bündelung von ähnlichen

Brennstäben die Rechenzeit, erhöht aber unter Umständen auch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Da bei diesem Vergleich allerdings nur wenige TRITON Rechnungen durchgeführt werden, ist dieser Rechenaufwand vertretbar. Allerdings ist der Unterschied zu einem deutlich vereinfachten Modell, in dem ähnliche Brennstäbe nach der Gruppierung in Abb. 2.1 zusammengefasst wurden und nur die verglichenen Brennstäbe individuell definiert wurden, relativ gering.

Für alle geometrisch verschiedenen Brennstabpositionen (unter Einbeziehung der diagonalen Symmetrie 51 leicht unterschiedliche Positionen) wurden für die Resonanzbehandlung die zugehörigen Dancoff-Faktoren ermittelt. Diese berücksichtigen für jede Brennstabposition den Unterschied in der Moderation zwischen einem unendlichen Gitter, das bei der Berechnung der Selbstabschirmung angenommen wird, und der realen Brennelementgeometrie. Für die gadoliniumhaltigen Brennstäbe wurde dieser Faktor für die Resonanzbehandlung noch in einen effektiven Brennstababstand (pitch) umgerechnet, da SCALE diese Umrechnung für Brennstabeinheitenzellen mit mehreren Ringzonen („multiregion cylindrical“) nicht automatisch durchführen kann.

Bei dem SWR Brennelement werden Brennstäbe mit vier verschiedenen Anreicherungen eingesetzt. Die Stäbe mit 3.6 Gew. % ^{235}U befinden sich in den Ecken des Brennelements, Stäbe mit 4.0 und 4.4 Gew. % Anreicherung sind alle im äußeren Ring verteilt. Stäbe mit 4.95 Gew. % Anreicherung stellen die Mehrheit der Stäbe dar und sind in allen Zonen präsent. Neben den reinen Uranbrennstäben werden auch Stäbe mit abbrennbarem Absorber (Gadolinium) mit zwei verschiedenen Anreicherungen eingesetzt. Da das Gadolinium aufgrund der Selbstabschirmung radial von außen nach innen abbrennt, wird jeder dieser Stäbe mit 10 konzentrischen Ringzonen gleicher Fläche modelliert und jeder dieser Zonen eine eigene Materialnummer zugewiesen.

Für den Vergleich werden drei repräsentative Stäbe, ein reiner Uranbrennstab (4T in Abb. 2.1), ein Absorberstab (GT Abb. 2.1) und ein Eckstab (1 in Abb. 2.1) ausgewählt und ihre Inventare ausgelesen. Zusätzlich werden die Nukliddichten über alle Brennstäbe gemittelt (A_v) verglichen.

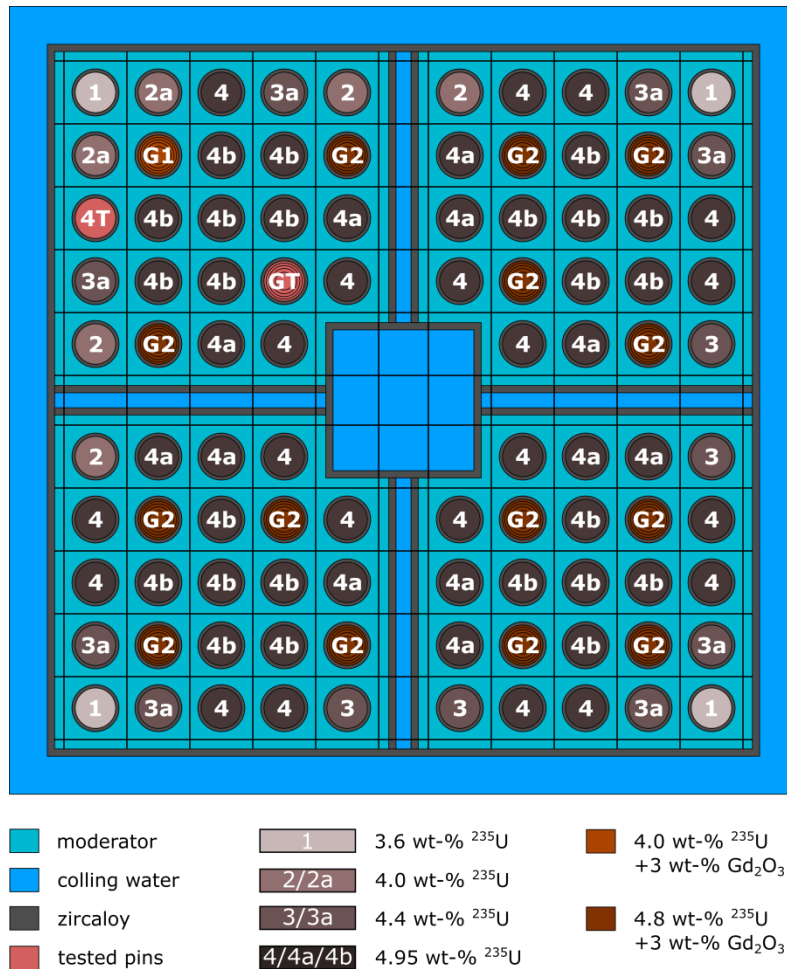


Abb. 2.1 Generisches SWR Brennelement mit Materialzuordnung nach Anreicherung und Position.

2.2 Multiplikationsfaktor

Bei SWR Brennelementen werden typischerweise neben den Brennstäben auch Stäbe mit abbrennbarem Absorber eingesetzt. Das hat zur Folge, dass der Multiplikationsfaktor k_{eff} nicht wie bei einem DWR Brennelement monoton abfällt, sondern wie in Abb. 2.2. zu Beginn ansteigt während das Gadolinium ausbrennt, nach Erreichen eines gewissen Abbrands, hier etwa 10 GWd/tSM, den Scheitelpunkt erreicht und danach monoton abfällt.

In Abb. 2.2 sind für die HELIOS und TRITON Rechnungen für die drei Fälle 0 % (H: schwarz, T: grün), 40 % (H: rot, T: gelb), und 70 % (H: blau, T: lila) Dampfblasengehalt die Verläufe des Multiplikationsfaktors k_{eff} mit dem Abbrand gezeigt. Zusätzlich ist die Abweichung zwischen den beiden Rechnungen gezeigt. Generell weisen die

TRITON Rechnungen für alle drei Fälle in der Nähe des Gadoliniummaximums im Vergleich zu den HELIOS Rechnungen leicht höhere Multiplikationsfaktoren auf, wobei die maximale Abweichung bei etwa 0,6 % für 70 % Dampfblasengehalt liegt.

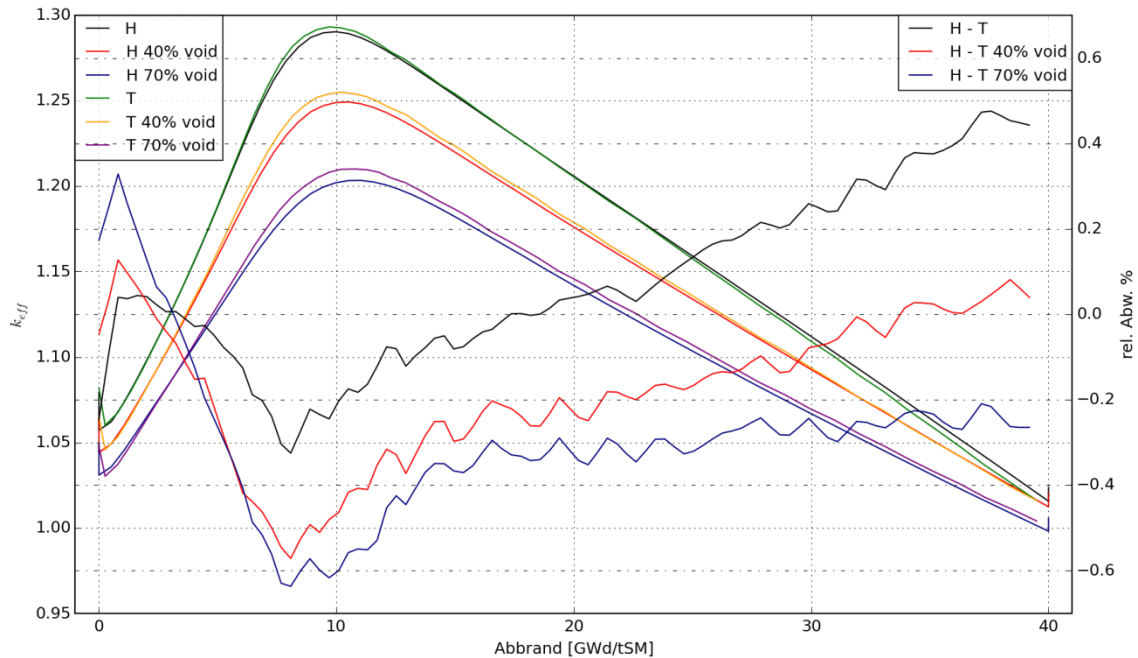


Abb. 2.2 Verlauf des Multiplikationsfaktors als Funktion des Abbrandes bei 0 %, 40 % und 70 % Dampfblasengehalt berechnet mit HELIOS und TRITON

Zum Vergleich betrachten wir die 7 eingereichten k_{eff} -Ergebnisse des Rechenbenchmarks /HAN 15/ bei 40 % Dampfblasengehalt. Diese schwanken in der Nähe des Reaktivitätsmaximums von -0,5 % bis +1,0 % um den Mittelwert aller Ergebnisse, liegen also im gleichen Bereich, wie die Abweichung bei dem vorliegenden Vergleich. Auch lag bei diesem Benchmark die einzige HELIOS Rechnung über den gesamten Abbrand unter den beiden eingereichten TRITON Rechnungen. Somit sind die hier gefundenen Ergebnisse konsistent mit früher gemachten Beobachtungen.

2.3 Nuklidinventare

Für den Vergleich der Nuklidinventare werden die Atomzahldichten in Atome/barn-cm für 44 Nuklide jeweils für die drei ausgewählten Teststäbe und gemittelt über das gesamte Brennelement angegeben. In Abb. 2.3 sind die Ergebnisse als relative Abweichungen der HELIOS Rechnungen von den TRITON Rechnungen für den reinen UO_2

Brennstab (FR03), den gadoliniumhaltigen Brennstab (FR34), den Eckstab (FR10) und gemittelt über alle Brennstäbe (Av) dargestellt.

Bei der Beurteilung der Rechnungen spielen bestimmte Nuklide eine wichtige Rolle. Als Abbrandindikator kann z. B. die Menge an ^{148}Nd herangezogen werden, welches als Spaltprodukt von ^{235}U und ^{239}Pu nahezu linear mit dem Abbrand ansteigt. Für alle Dampfblasengehalte liegen die relativen Abweichungen der Atomzahldichten für dieses Nuklid sowohl für die einzelnen Stäbe als auch im Mittel über das gesamte Brennelement unter 2 %. Dieses Ergebnis kann als konsistent mit den Ergebnissen des Rechenbenchmark /HAN 15/ gewertet werden.

Unterschiede in den Mengen der Uran- und Plutoniumisotope können z. B. auf neutronenphysikalische Unterschiede hindeuten. Die Abweichungen zwischen den beiden Programmen sind für Plutonium und Uran weitgehend konsistent mit den Abweichungen, die in /HAN 15/ gefunden wurden. Vergleicht man die Abweichungen zwischen HELIOS und TRITON für eine Reihe von Aktiniden und Spaltprodukte, so kann man eine weitgehende Übereinstimmung der Über-, bzw. Unterschätzung der beiden Codes erkennen. So finden sich gerade einige hier durch HELIOS deutlich höher ausgerechneten Kernzahldichten $^{242\text{m}}\text{Am}$ (~50 %) und ^{149}Sm , ^{151}Sm , und ^{152}Sm (~ 10 %) oder deutlich niedriger ausgerechnete Kernzahldichten ^{242}Pu , ^{243}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm , und ^{134}Cs mit je knapp -10 % und ^{155}Eu und ^{155}Gd mit -25-30 % mit sehr ähnlichen Abweichungen auch in dem Rechenbenchmark wieder /HAN 15/. Diese Abweichungen können größtenteils bekannten Unterschieden in den jeweils verwendeten Wirkungsquerschnittsbibliotheken zugeordnet werden.

Die Abweichungen aller Nuklide zwischen TRITON und HELIOS gemittelt über alle Brennstäbe sind für die drei betrachteten Dampfblasengehalte nahezu identisch. Daraus lässt sich schließen, dass bei Änderung der Kühlmitteldichte keine Fehler gemacht wurden. Nimmt man allerdings die hier gezeigten Beobachtungen und betrachtet zusätzlich die Entwicklung weiterer Stäbe, so scheint es, dass TRITON und HELIOS bei unterschiedlichen Dampfblasengehalten die Leistung unterschiedlich im Brennelement verteilen. Damit ändern sich in den individuellen Stäben auch die Abbrände und damit auch die Kernzahldichten, während die Abweichungen gemittelt über alle Brennstäbe für die drei betrachteten Dampfblasengehalte nahezu identisch sind.



Abb. 2.3 Relative Abweichungen der Nuklidinventare der HELIOS von den TRITON Rechnungen bei 0 %, 40 %, und 70 % Dampfblasengehalt für die Brennstäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über das gesamte Brennelement (Av).

3 Parameterstudie zur Schrittlänge der Abbrandrechnung

In einer Parameterstudie wurde untersucht, welchen Einfluss die Länge der Abbrand-schritte beim Abbrand des untersuchten generischen Brennelements auf k_{eff} und die Nuklidzusammensetzung hat. Da in diesem BE Typ in einigen Brennstäben (BS) Gadolinium als abbrennbarer Neutronenabsorber vorhanden ist, das im vorliegenden Fall etwa in den ersten 10 GWd/tSM ausbrennt, erfährt die Reaktivität etwa bei diesem Wert ein Maximum („peak reactivity“). Bei der Anwendung von Abbrandkredit bei SWR BE muss bei geringen Abbränden dieses Reaktivitätsmaximum berücksichtigt werden, weshalb eine genaue Charakterisierung dieses Maximums notwendig ist. Es hat sich gezeigt, dass ausreichend kleine Zeitschritte gewählt werden müssen, um korrekte Ergebnisse zu erzielen, da das Gadolinium im BS von außen nach innen abbrennt und sich die Nuklidverhältnisse relativ schnell und stark ändern. Diese Parameterstudie untersucht, wie klein diese Zeitschritte für verschiedene Codes gewählt werden müssen, ohne zu große Abweichungen in Kauf nehmen zu müssen.

Die Parameterstudie wurde für dasselbe BE mit dem deterministischen Code HELIOS /CAS 91/ und dem Monte-Carlo Code TRITON aus dem SCALE Paket /SCA 11/ durchgeführt. Zusätzlich wurde untersucht, ob es bei den TRITON Rechnungen einen Unterschied macht, ob die gadoliniumhaltigen Stäbe mit der „flux“-Option oder mit der „power“-Option abgebrannt werden. Das Benutzerhandbuch empfiehlt bei Gadolinium die Verwendung der „flux“-Option. Dabei wird die Leistungsverteilung nur aufgrund der restlichen Stäbe berechnet, während sich der daraus ergebende Neutronenfluss zum Abbrennen der gadoliniumhaltigen Stäbe verwendet wird.

3.1 Modifizierte Abbrandhistorien

Diesen Analysen wurde die Abbrandhistorie aus Kapitel 7.3.4 des Abschlussberichts zugrunde gelegt. Zu beachten ist, dass neben der Leistung in HELIOS die Zielabbrände nach allen Zyklen angegeben werden, in TRITON hingegen die Dauer jedes Zyklus. Damit ergeben sich die Abbranddaten in Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Abbranddaten

Zyklus	Zyklusdauer	Auszeit	Leistung	Abbrand	Abbrand ku- muliert
#	[d]	[d]	[kW/kgU]	[GWd/tSM]	[GWd/tSM]
1	300	60	28	8,4	8,4
2	300	60	28	8,4	16,8
3	300	60	28	8,4	25,2
4	300	60	28	8,4	33,6
5	228.57	1826	28	6,4	40,0

Um den Einfluss der Schrittlänge auf die Reaktivität und das Nuklidinventar zu untersuchen, wurden die Abbrandrechnungen mit mehreren unterschiedlich feinen Unterteilungen durchgeführt. Sowohl in HELIOS als auch in TRITON können die oben definierten groben Zeitschritte durch Angabe einer ganzen Zahl in gleich große Unterschritte aufgeteilt werden. Nachdem das Reaktivitätsmaximum nach etwa 10 GWd/tSM erreicht ist und vor allem vorher kleinere Abbrandschritte genauere Ergebnisse liefern, wurden die ersten beiden Zyklen in doppelt so viele Zeitschritte unterteilt, wie Zyklus 3 und 4. Da Zyklus 5 kürzer ist und einen geringeren Abbrand hat (je ca. 25 %) wurde hier auch die Anzahl der Schritte um 25 % verringert. Die verwendeten Unterteilungen sind in Tab. 3.2 wiedergegeben. In TRITON konnte die feinste Unterteilung nicht analysiert werden, da hier die Ausgabedatei so groß wird, dass sie offensichtlich ein programminternes Limit erreicht und die Nukliddichten nicht mehr in die Ausgabedatei geschrieben werden.

Der Vergleich vom Abbrand der gadoliniumhaltigen Stäbe via „flux“ oder „power“ bei den TRITON Rechnungen wurde mit der Abbrandeinteilung „Erweitert“ durchgeführt.

3.2 Ergebnisse

Für die HELIOS und TRITON Rechnungen werden jeweils die Verläufe des Neutronenmultiplikationsfaktors als Funktion des Abbrands im Bereich 0 bis 40 GWd/tSM für alle Abbrandeinteilungen gezeigt. Zusätzlich werden die k_{eff} Verläufe mit dem Abbrand via „flux“ und „power“ verglichen.

Tab. 3.2 Unterteilungen der Abbrandschritte.

	Abbrand/ Schritt Zylus 1-3 [GWd/tSM]	Anzahl Zeitschritte					Re- chen- zeit Helios	Re- chenzeit TRITON
		1	2	3	4	5		
Zyklus		1	2	3	4	5		
Zyklusdauer [d]		300	300	300	300	228,57		
Sehr einfach	2	4	4	4	2	2	2 min	38 h
Einfach	1	8	8	8	4	3	4 min	38 h
Erweitert	0,5	16	16	8	8	6	7 min	3,9 d
Erweitert 2	0,25	32	32	16	16	12	11 min	7,5 d
Erweitert 3	0,125	64	64	32	32	24	23 min	14,25 d
Erweitert 4	0,0625	128	128	64	64	48	43 min	Fehler

Im zweiten Schritt werden die Nuklidinventare für jeweils beide Codes für alle Zeitschritteinteilungen nach Erreichen des Zielabbrandes von 40 GWd/tSM und einer Abklingzeit von 5 Jahren verglichen. Zusätzlich werden die Nuklidinventare mit dem Abbrand via „flux“-Option und „power“-Option verglichen.

3.2.1 Multiplikationsfaktor HELIOS

Für die HELIOS Rechnungen ist der Verlauf des Neutronenmultiplikationsfaktors als Funktion des Abbrands im Bereich 0 bis 40 GWd/tSM für alle Abbrandeinteilungen in Abb. 3.1 gezeigt.

Zusätzlich ist in der Abbildung die Abweichung jeder Kurve zu der feinsten Abbrandeinteilung gezeigt („extended 4“ für HELIOS und „extended 3“ für TRITON in Abb. 3.2). Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass nach Erreichen des Gadoliniummaximums keine Abhängigkeit der Reaktivität von der Schrittlänge existiert, auch nicht von der Schrittlänge vor dem Maximum. Die geringen Abweichungen von etwa 0,1 %, die jeweils zwischen den Zyklen auftreten (kleine Spitzen bei etwa 8, 18, 26 und 34 GWd/tSM), entstehen aufgrund von Zwischenrechnungen von HELIOS für die Berechnung des Xenon-Gleichgewichts und der Interpolation der Kurven mit gröberer Einteilung auf die feinere Einteilung.

Bei der steigenden Flanke des Maximums gibt es bei grober Einteilung Abweichungen vom genauesten Fall von knapp 3 %. Bei anfänglicher Schrittlänge von 0,5 GWd/tSM (extended) sind die Abweichungen allerdings nur noch 0,25 % im Vergleich zu extended 4, sodass dieser Wert für HELIOS Rechnungen von uns als guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit (12 min / Rechnung) angesehen wird.

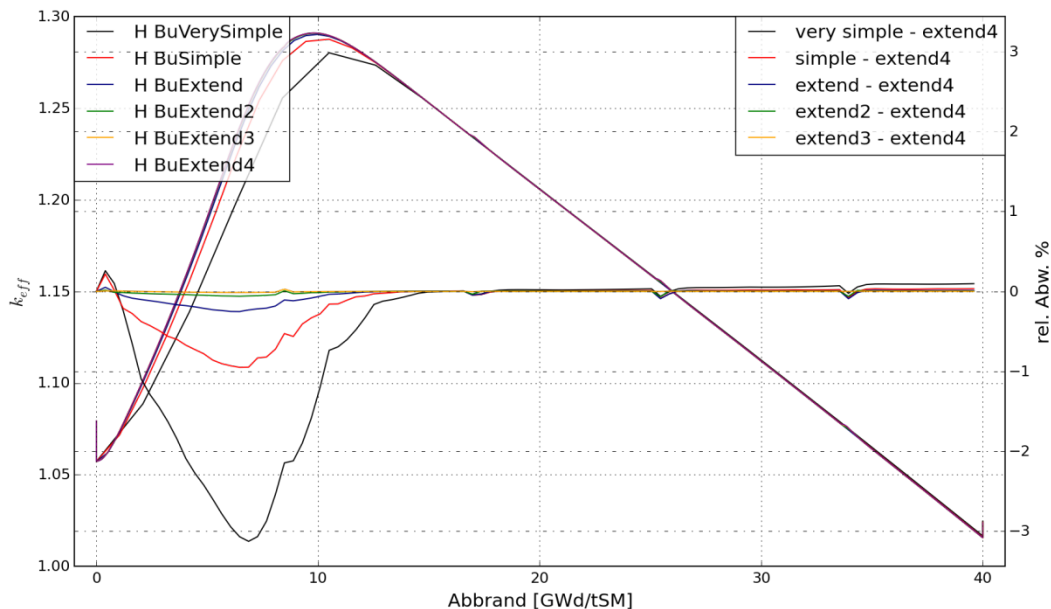


Abb. 3.1 Verlauf des Multiplikationsfaktors als Funktion des Abbrandes für die HELIOS Rechnungen.

3.2.2 Multiplikationsfaktor TRITON

Die gleichen Daten sind in Abb. 3.2 für das TRITON Modell gezeigt. Auch hier nähern sich die k_{eff} Kurven asymptotisch an. Die Abweichungen fangen bei 5,0 % an, und liegen für den Fall extended mit extended 3 bei 0,6 %. Auch für TRITON ergibt sich ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Genauigkeit und Rechenzeit für eine Einteilung des Abbrandes in 0,5 GWd/tSM Schritte.

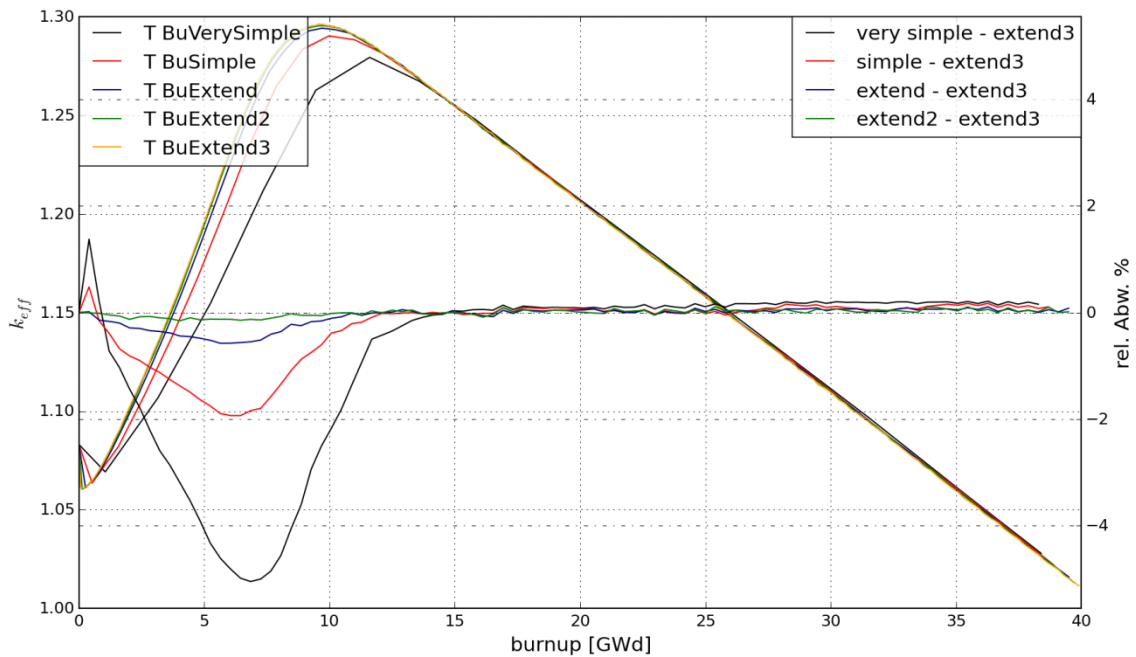


Abb. 3.2 Verlauf des Multiplikationsfaktors als Funktion des Abbrandes für die TRITON Rechnungen.

3.2.3 Nuklidinventare HELIOS

Für den Vergleich der Nuklidinventare werden die relativen Abweichungen der Kernzahl-dichten zwischen allen Abbrandeinteilungen und dem Fall extended gezeigt. Betrachtet werden alle Nuklide, die für die Bestimmung von Abbrandkredit bei Siedewasserreaktor Brennelementen relevanten sind. Es werden die Stäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über alle Brennstäbe „AV“ betrachtet. Für HELIOS sind die Ergebnisse in Abb. 2.3 dargestellt.

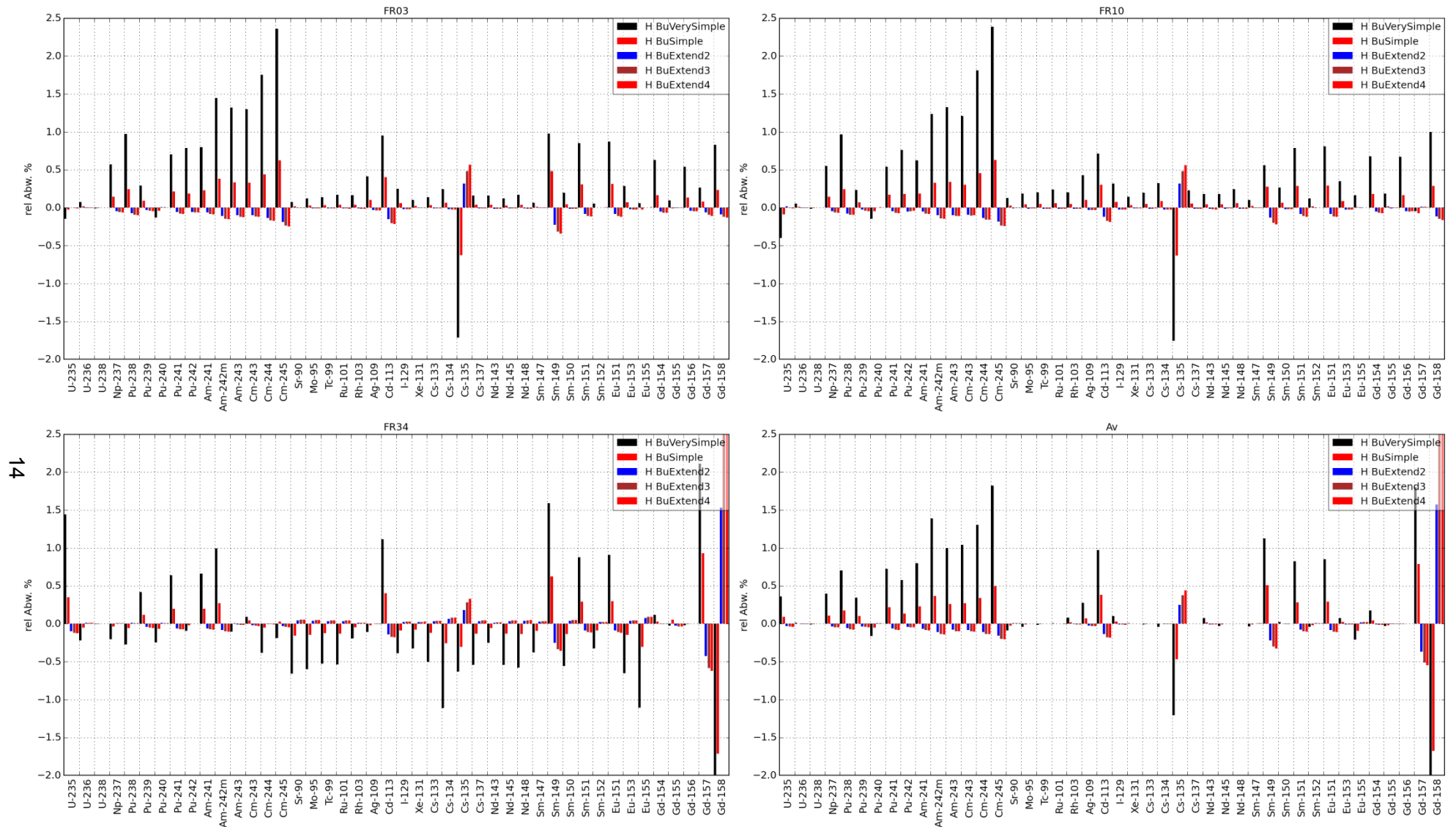


Abb. 3.3 Relative Abweichungen der gerechneten Nuklidinventare aller Zeitschritteinteilungen zu dem Fall extended für die HELIOS Rechnungen für die Brennstäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über das gesamte Brennelement (Av).

Auch bei den Nuklidinventaren erkennt man ein ähnliches Bild wie bei der k_{eff} -Entwicklung. Während der Unterschied zwischen der sehr groben Zeitschritteinteilung im Vergleich zur „extended“-Einteilung bis zu 2,5 % betragen kann, sind die Unterschiede zu den genaueren Einteilungen für alle Stäbe und Nuklide weitgehend zu vernachlässigen ($<0,25\%$). Ausnahmen bildet das Nuklid ^{135}Cs , das bei kleinerer Schrittweite um bis zu 0,6 % abweicht, und die Gadoliniumisotope ^{157}Gd und ^{158}Gd in dem gadoliniumhaltigen BS (und dadurch in der Mittelung über das gesamte BE). ^{157}Gd liegt bei $\sim 0,5\%$ Abweichung, ^{158}Gd bei bis zu 3 %.

Die Berechnung der Kernzahldichten dieser drei Isotope ist aber typischerweise problematisch und die gefundenen Abweichungen demnach akzeptabel und konsistent mit früheren Rechnungen. Vor Allem im Hinblick auf Abbrandkredit, bei dem hauptsächlich die Reaktivität relevant ist, spielen sie eine sehr untergeordnete Rolle, was sich aus den Ergebnissen in Kapitel 3.2.1 ergeben.

3.2.4 Nuklidinventare TRITON

Der gleiche Vergleich der Nukliddichten bei unterschiedlichen Abbrandschritten ist in Abb. 3.4 für das TRITON Modell dargestellt. Da es sich bei TRITON um einen Monte-Carlo Code handelt, die Rechnungen somit also eine zufällige Komponente enthalten, tritt die asymptotische Entwicklung der Nuklidverhältnisse nicht so zu Tage, wie bei den HELIOS Rechnungen.

Die Abweichungen zwischen den Abbrandschritteinteilungen „extended“ und „extended3“ liegen für die meisten Nuklide unter 0,25 %. Einige wenige liegen zwischen 0,5 % und 1,0 %: ^{245}Cm , ^{99}Tc , und bei dem Eckstab FR10 zusätzlich: ^{243}Am , ^{243}Cm , ^{244}Cm . Deutliche Abweichungen von bis zu 6 % zeigen sich bei ^{135}Cs .

Bei diesen Nukliden greift die gleiche Erklärung wie für die HELIOS Rechnungen.

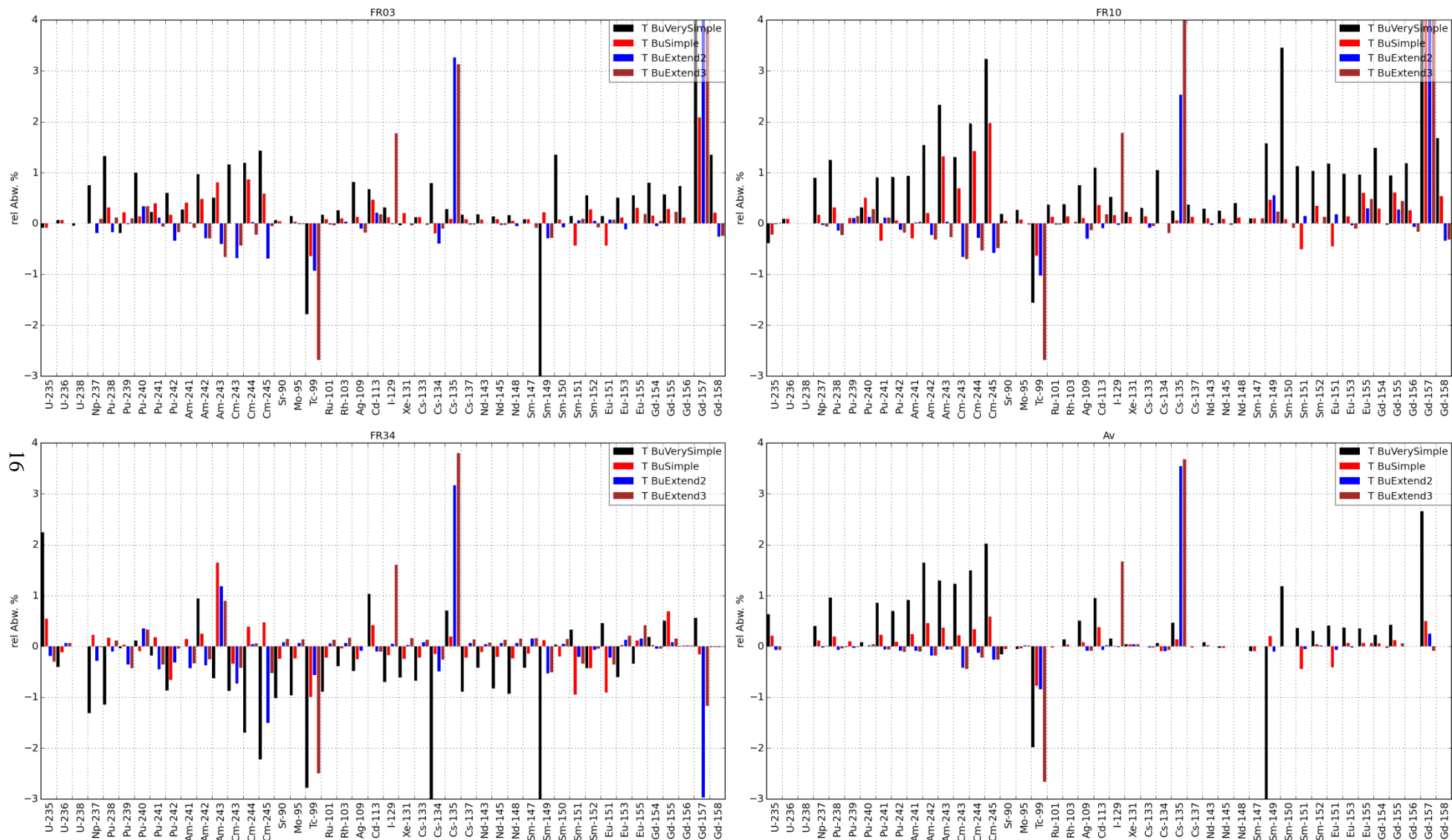


Abb. 3.4 Relative Abweichungen der mit TRITON gerechneten Nuklidinventare aller Abbrandeinteilungen zu dem Fall extended für die Brennstäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über das gesamte Brennelement (Av).

4 Vergleich des Abbrands der gadoliniumhaltigen Stäbe via flux oder power

Zusätzlich wurde untersucht, ob es Unterschiede zwischen dem Abbrand der gadoliniumhaltigen Brennstäbe via „flux“ oder „power“ gibt. Dafür wurden bei der Zeitschritteinteilung „extended“ einmal alle Stäbe mit „power“-Option abgebrannt und einmal die gadoliniumhaltigen mit „flux“-Option, während die anderen Stäbe weiterhin mit „power“-Option abgebrannt wurden.

4.1 Multiplikationsfaktor TRITON: Abbrand via flux vs. power

Der k_{eff} Verlauf ist mit einer relativen Abweichung von weniger als 0,1 % nahezu identisch, siehe Abb. 4.1.

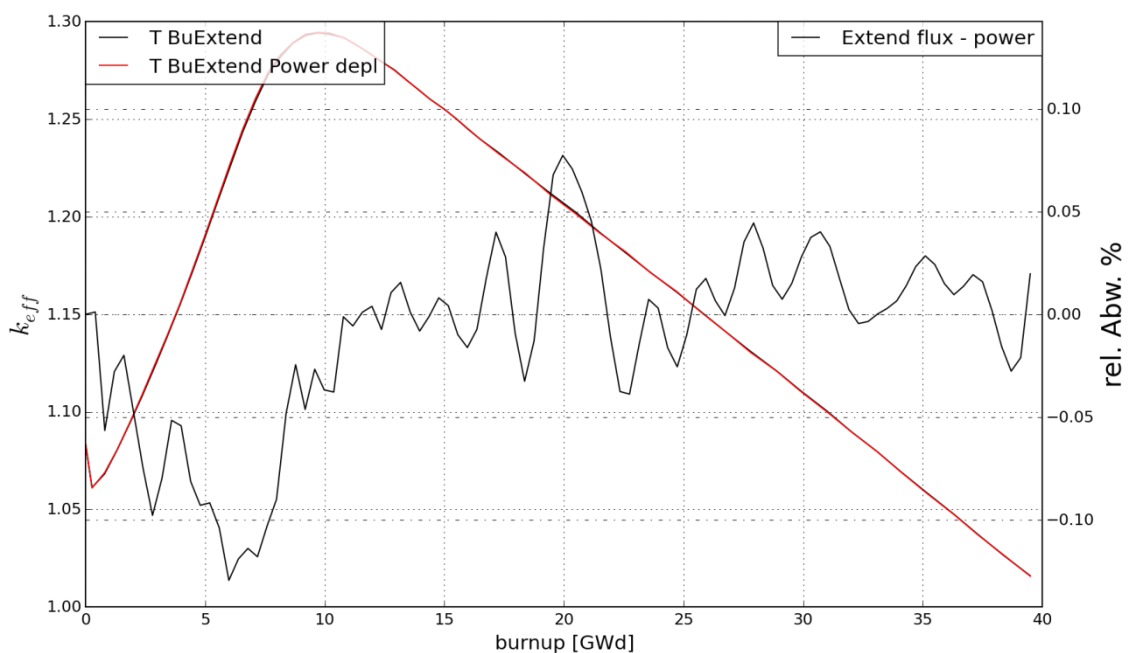


Abb. 4.1 Verlauf des Multiplikationsfaktors als Funktion des Abbrands für das TRITON Modell, Vergleich von Abbrand via „flux“ oder „power“.

4.2 Nuklidinventare TRITON: Abbrand via flux vs. power

Der Vergleich der Nuklidinventare zwischen diesen Rechnungen ist in Abb. 4.2 für die TRITON Rechnungen dargestellt. Gemittelt über das gesamte Brennelement liegen die Abweichungen unter 0,12 %, nur ^{157}Gd zeigt eine höhere Abweichung von -0,6 %. Für die meisten Brennstäbe und Nuklide liegen die Abweichungen im Bereich weniger Promille, für einige Nuklide bei bis zu 1 %. Der gadoliniumhaltige Brennstab FR34 zeigt relative Abweichungen für einige Curiumnuklide bis etwa 2 %. Für einige Nuklide, vor allem bei den gemittelten Werten, scheinen die Daten zu fehlen. Dies ist aber ein Artefakt der Ausgabedatei von TRITON. In dieser werden die Nukliddichten nur mit vier signifikanten Stellen angegeben. Deshalb kommt es bei einigen Nukliden zu einer perfekten Übereinstimmung der Werte bei den zwei Berechnungsmethoden. Aufgrund der resultierenden relativen Abweichung von exakt 0 scheinen die Daten für einige Nuklide zu fehlen.

Aus dieser Untersuchung lässt sich schließen, dass die Bestimmung der gemittelten Nuklidinventare weitgehend unabhängig von dem Abbrand der gadoliniumhaltigen Brennstäbe via Leistung oder Neutronenfluss ist. Betrachtet man allerdings das Nuklidinventar eines gadoliniumhaltigen Brennstabes, so zeigen sich für einige Nuklide Unterschiede in der Berechnung. Dies gilt vor allem für höhere Aktinoide, die in einer Kette erbrütet werden (Americium und Curium). In allen weiteren Rechnungen wird den Empfehlungen der SCALE Bedienungsanleitung gefolgt, und die gadoliniumhaltigen Brennstäbe mit dem durch die umliegenden Brennstäbe erzeugten Neutronenfluss abgebrannt.

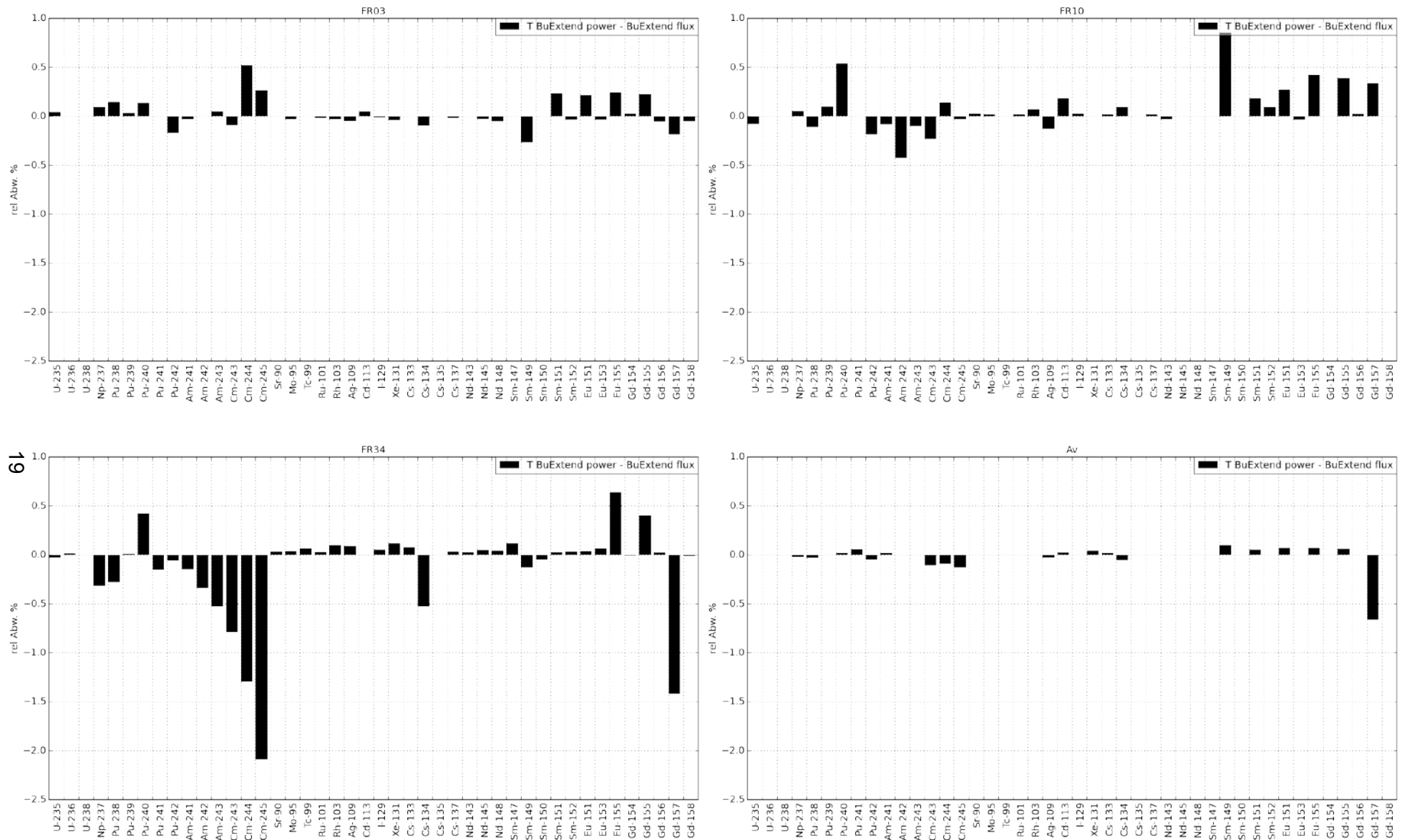


Abb. 4.2 Relative Abweichungen der mit TRITON gerechneten Nuklidinventare zwischen extended Abbrand via flux vs. power für die Brennstäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über das gesamte Brennelement.

Literaturverzeichnis

- /BEH 17/ M. Behler, V. Hannstein, R. Kilger, F. Sommer, M. Stuke, „Untersuchungen zu Validierungsmöglichkeiten von Rechencodes für Kritikalitäts- und Abbrandrechnungen von Siedewasserreaktor-Brennstoff“, GRS-470, ISBN 978-3-946607-53-3, Juli 2017.
- /CAS 91/ J. J. Casal, R. J. J. Stamm'ler, E. A. Villarino, and A. A. Ferri, “HELIOS: Geometric Capabilities of a New Fuel-assembly Program”, Proc. Int. Topl. Mtg. Advances in Mathematics, Computations, and Reactor Physics, Pittsburgh, Penn., Vol. II, Sect. 10.2.1, 1-13, April 28 – May 2 (1991).
- /HAN 15/ V. Hannstein, R. Kilger: “Rechenbenchmark zur Abbrandberechnung von Druckwasser- und Siedewasser-Brennelementen”, GRS-386, technischer Bericht im Anhang.
- /SCA 11/ *SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design*, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, June 2011. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-785.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Verlauf des Multiplikationsfaktors als Funktion des Abbrandes bei 0 %, 40 % und 70 % Dampfblasengehalt berechnet mit HELIOS und TRITON	6
Abb. 2.2	Relative Abweichungen der Nuklidinventare der HELIOS von den TRITON Rechnungen bei 0 %, 40 %, und 70 % Dampfblasengehalt für die Brennstäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über das gesamte Brennelement (Av).....	8
Abb. 2.3	Verlauf des Multiplikationsfaktors als Funktion des Abbrandes für die HELIOS Rechnungen.	12
Abb. 2.4	Verlauf des Multiplikationsfaktors als Funktion des Abbrandes für die TRITON Rechnungen.	13
Abb. 2.5	Verlauf des Multiplikationsfaktors als Funktion des Abbrands für das TRITON Modell, Vergleich von Abbrand via „flux“ oder „power“.....	17
Abb. 2.6	Relative Abweichungen der gerechneten Nuklidinventare aller Abbrandeinteilungen zu dem Fall extended für die HELIOS Rechnungen für die Brennstäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über das gesamte Brennelement (Av).....	14
Abb. 2.7	Relative Abweichungen der mit TRITON gerechneten Nuklidinventare aller Abbrandeinteilungen zu dem Fall extended für die Brennstäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über das gesamte Brennelement (Av).....	16
Abb. 2.8	Relative Abweichungen der mit TRITON gerechneten Nuklidinventare zwischen extended Abbrand via flux vs. power für die Brennstäbe FR03, FR10, FR34 und gemittelt über das gesamte Brennelement.	19

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Abbranddaten.....	10
Tab. 3.2	Unterteilungen der Abbrandschritte.....	11

Abkürzungen

BE	Brennelement
BS	Brennstab
DBG	Dampfblasengehalt
SP	Spaltprodukte
SWR	Siedewasserreaktor

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de