

**Untersuchung von
ATWS-Ereignissen
zur Präzisierung der
Nachweisforderung**

3608R01334

Untersuchung von
ATWS-Ereignissen zur
Präzisierung der
Nachweisforderung

3608R01334

A. Pautz
K.-D. Schmidt
K. Velkov

September 2008 - November 2010

Auftrags-Nr.: 820600

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3608R01334 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 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.

Kurzfassung

In dem BMU-finanzierten Projekt 3608R01334 „Untersuchung von ATWS zur Präzisierung der Nachweisforderung“ wurden zwei von der RSK aufgeworfene Aspekte hinsichtlich der Analyse von ATWS-Ereignissen tiefergehend untersucht. Zum einen wurde der Einfluss des gewählten Ausgangszustands betrachtet. Bisher wurde in Aufsichts- und Genehmigungsverfahren als Ausgangszustand für ATWS-Untersuchungen typischerweise Nennlast im sog. Xenon-Gleichgewicht (das sich spätestens nach 6 Volllasttagen einstellt) unterstellt. Zur vollständigen Abdeckung wurden im vorliegenden Bericht darüber hinaus auch Teillastzustände (30 % und 80 % Leistung, z. B. während der Anfahrphase des Reaktors) und Volllastzustände bei xenonfreiem Reaktorkern (wie sie am Zyklusbeginn auftreten können) analysiert. Außerdem wurden Methoden entwickelt und überprüft, mit denen die Kühlbarkeit des Reaktorkerns (insbesondere für ATWS-Ereignisse, in der von der Abschaltung der Hauptkühlmittelpumpen Kredit genommen wird) explizit quantifiziert werden kann. Gemäß der RSK-Stellungnahme vom 07.07.2005 muss die Kühlbarkeit des Kerns bei ATWS-Ereignissen nachgewiesen werden. Durch das Verfolgen des möglichen Auftretens einer Siedekrise am höchstbelasten Brennstab erhält man dann ein Maß für die Kühlbarkeit des Reaktors. Dazu wurden im Vorhaben geeignete Unterkanalmodelle implementiert, mit denen der Siedeübergang zuverlässig ermittelt werden kann. Die in ATHLET implementierten Modelle wurden auf ihre Eignung zur Erfassung des Zeitpunkts der Siedekrise hin untersucht und durch erweiterte Modelle ergänzt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Beschreibung der Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Das eingesetzte Rechenmodell	4
1.4	Die Xenon-Vergiftung.....	8
2	Ergebnisse der Analysen zu ATWS bei Teillastzuständen und Xenon-Gleichgewicht/Nicht-Gleichgewicht	11
2.1	Beschreibung des Transientenverlaufes.....	12
2.2	Ergebnisse der Analysen bei einer Reaktorleistung von 30 % mit Kinetikdaten bei Xenon-Gleichgewicht („Best Estimate“).....	14
2.2.1	Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen.....	14
2.2.2	Vergleich: Punktkinetik – 3D – Kinetik	18
2.2.3	Transientenverlauf mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen	25
2.2.4	Vergleich: Punktkinetik – 3D – Kinetik	29
2.3	Ergebnisse der Analysen bei einer Reaktorleistung von 30 % mit Xenon-freien Kinetikdaten.....	33
2.3.1	Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen.....	33
2.3.2	Vergleich:Punktkinetik – 3D – Kinetik	37
2.3.3	Transientenverlauf mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen	41
2.3.4	Vergleich Punktkinetik und 3D–Kinetik.....	45
2.4	Vergleich der Transientenverläufe mit „Best-Estimate“ und Xenonfreier Rückwirkung.....	49
2.4.1	Vergleiche der Transientenverläufe mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen	49
2.4.2	Vergleich: Best-estimate – xenonfrei, laufende Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 30 % Leistung	54
2.5	ATWS–Transiente für 80%-Teillastzustände	58
2.5.1	80 % Leistung, Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen.....	58
2.5.2	Vergleich: Punktkinetik – 3D – Kinetik	59
2.5.3	80 % Leistung, Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen	62

2.5.4	Vergleich: Punktkinetik und 3D-Kinetik.....	63
3	ATWS-Transiente für Volllastzustände	67
3.1	Ergebnisse der Analysen bei einer Reaktorleistung von 100 % mit xenonfreien Kinetikdaten.....	67
3.1.1	Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen.....	67
3.1.2	Vergleich Punktkinetik – 3D – Kinetik	71
3.1.3	Transientenverlauf mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen	80
3.1.4	Vergleich Punktkinetik – 3D Kinetik.....	84
3.2	Vergleich der Transientenverläufe mit laufenden und abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen bei einer Leistung von 100 %	88
3.3	Vergleich der Transientenverläufe mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen zwischen Xenongleichgewicht und xenonfrei sowie Punktkinetik und 3D-Kinetik	93
3.4	Vergleich der Transientenverläufe mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen zwischen Xenongleichgewicht und xenonfrei sowie Punkt- und 3D-Kinetik	98
4	Zusammenfassende Bewertung	103
5	Untersuchungen zur Kühlbarkeit.....	108
6	Zusammenfassung	117
7	Literatur.....	119
8	Abbildungsverzeichnis	120
9	Verteiler	134

1 Einleitung

1.1 Beschreibung der Problemstellung

Sowohl in den RSK-Leitlinien /RSK 96/ als auch in der Aktualisierung des deutschen Regelwerks /REG 08/ wird die Untersuchung von sog. ATWS-Störfällen für deutsche Kernkraftwerke gefordert. Ziel der Nachweisführung ist es zu zeigen, dass bei Betriebs transienten mit postuliertem Ausfall der ersten Anregung des Schnellabschaltsystems vorgegebene Kriterien zur Begrenzung des Druckes im Primärsystem eingehalten werden und die langfristige Kühlung des Kerns gewährleistet ist. Außerdem muss die langfristige Unterkritikalität des Kerns gesichert sein. Mit der RSK-Stellungnahme vom 07.07.2005 /RSK 05/ ist diese Nachweisforderung präzisiert worden. Vor diesem Hintergrund erhält auch die Voidreaktivitätskurve eine besondere Bedeutung. Der Verlauf der Voidreaktivitätskurve ist ein Maß für die Rückwirkung auf die Leistungserzeugung bei steigendem oder fallendem Dampfvolumenteil bzw. sich ändernder Kühlmitteldichte. Bild 1-1 zeigt Beispiele von Voidreaktivitätskurven mit unterschiedlicher Steigung.

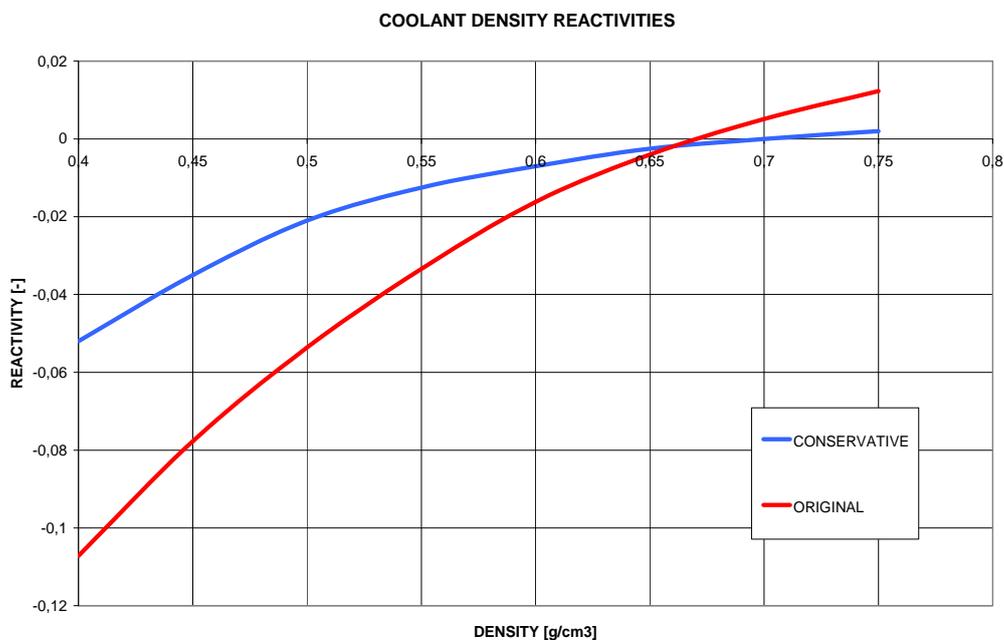


Bild 1-1 Voidreaktivitätskurven für konservativ abdeckende Rückwirkungen (blau) und für die in dieser Arbeit exemplarisch verwendete konkrete Kernbeladung (rot)

In diesem Vorhaben werden entsprechend der von der RSK präzisierten Nachweisforderung folgende Aspekte näher untersucht:

- **Der Einfluss des Ausgangszustandes soll ermittelt werden.** Bisher wurde in Aufsichts- und Genehmigungsverfahren als Ausgangszustand für ATWS-Untersuchungen typischerweise Nennlast ($100\% P_{\text{Nennlast}}$) im sog. Xenon-Gleichgewicht (das sich spätestens nach 6 Volllasttagen einstellt) berücksichtigt. In der RSK-Stellungnahme /RSK 05/ wird dagegen empfohlen, vom sog. quasistationären Leistungsbetrieb im ungünstigsten Zykluszeitpunkt auszugehen, wobei aber der Begriff „quasistationär“ nicht näher erläutert wird. Auch der ungünstigste Zykluszeitpunkt ist ggf. abhängig vom Nachweisziel. Zur vollständigen Abdeckung des Einflusses vom Ausgangszustand werden im vorliegenden Bericht daher auch Teillastzustände (30 % und 80 % Leistung, z. B. während der Anfahrphase des Reaktors) und Volllastzustände bei xenonfreiem Reaktorkern (wie sie am Zyklusbeginn auftreten können) betrachtet.
- **Die Kühlbarkeit des Reaktors soll explizit quantifiziert werden.** Gemäß der RSK-Stellungnahme /RSK 05/ muss die Kühlbarkeit des Kerns bei ATWS-Ereignissen explizit nachgewiesen werden. Dieser Sachverhalt wird insbesondere dann relevant, wenn an der Anlage durch Anstehen des ATWS-oder RESA-K-Signals die Hauptkühlmittelpumpen zur Reduzierung der Druckbelastung des Primärkreislaufs abgefahren werden. Durch das Verfolgen des möglichen Auftretens einer Siedekrise am höchstbelasteten Brennstab erhält man dann ein Maß für die Kühlbarkeit des Reaktors. Dazu sind geeignete Unterkanalmodelle zu implementieren, mit denen der Siedeübergang zuverlässig ermittelt werden kann. Die in ATHLET implementierten Modelle sind auf ihre Eignung zur Erfassung des Zeitpunkts der Siedekrise hin zu untersuchen und ggf. durch verbesserte Modelle zu ergänzen.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Untersuchung ist die Bereitstellung einer detaillierten und qualifizierten Berechnungsmethodik für ATWS-Fälle, ausgehend auch von nicht-nominalen Anlagenzuständen. Die Grundlage für die durchzuführenden Rechnungen bildet der GRS-

Systemcode **ATHLET** mit dem gekoppelten Kernmodell **QUABOX/CUBBOX** /LAN 08/ zur Beschreibung der Neutronenkinetik. Die Kühlbarkeit des Reaktorkerns wird durch das Verfolgen einer möglicherweise auftretenden Siedekrise am höchstbelasteten Brennstab nachgewiesen. Diese Art der Nachweisführung ist im Einklang mit der RSK-Stellungnahme vom 07.07.2005, wobei von realistischen Anfangs- und Randbedingungen und einer sog. „Best-Estimate“-Rechenmethodik ausgegangen wird. Die GRS unterstützt den Einsatz gekoppelter Rechenmethoden zur Analyse von ATWS-Fällen, da während solcher Transienten u. U. erhebliche Deformationen der axialen und radialen Leistungsdichteverteilung im Reaktorkern auftreten, die mit der derzeit in Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren angewendeten Vorgehensweise (Punktkinetik mit abdeckender Voidkurve) nicht erfasst werden können. Allerdings hat sich bislang in praktisch allen Untersuchungen der Punktkinetik-Ansatz als konservativ hinsichtlich der Nachweisziele herausgestellt. Im vorliegenden Projekt liegt der Schwerpunkt auf der Verwendung einer gekoppelten Rechenmethodik, falls notwendig werden aber auch Vergleiche mit Punktkinetikresultaten gezeigt.

Die Untersuchungsergebnisse zur Siedekrise sollen zur Absicherung der ATHLET-Modelle zur kritischen Wärmestromdichte mit Ergebnissen des Kernkanalmodells COBRA-TF verglichen werden, das als sog. Unterkanalcode als qualitativ hochwertiger einzustufen ist.

Mit dem gekoppelten Rechenprogramm ATHLET-QUABOX/CUBBOX und der dazugehörigen Punktkinetikversion von ATHLET wird der ATWS-Fall „Ausfall der Speisewasserversorgung“ berechnet. Dabei werden die lokalen Kühlungsbedingungen betrachtet und die Anzahl der Brennstäbe quantifiziert, bei denen eine Siedekrise in Form von DNB eintritt.

Es stehen die folgenden vier Aspekte im Vordergrund:

- der unterschiedliche Transientenverlauf bei Abschalten (RESA-K-Signal) oder Weiterlaufen der Hauptkühlmittelpumpen;
- die Bedeutung der Auswirkungen der axialen Leistungsumverteilungen bei 3D-Neutronenkinetikrechnungen gegenüber dem axial unveränderlichem Leistungsprofil bei reaktivitätsäquivalenten Punktkinetikrechnungen;

- die Unterschiede, die sich bei der Rechnung mit einem Kernausgangszustand im Xenon-Gleichgewicht gegenüber möglicherweise konservativen (d. h. zu ungünstigeren Kernzuständen führenden) xenonfreien Rückwirkungen ergeben.
- In vorangegangenen Arbeiten der GRS (siehe /POI 03/ und /HOR 08/) sind Ergebnisse ausgewählter ATWS-Analysen für den Volllastzustand bei 100 % nach 6 Volllasttagen zusammengestellt. Diese Untersuchungen sollen im vorliegenden Bericht auch auf Teillastzustände von 30 % und 80 % ausgedehnt werden.

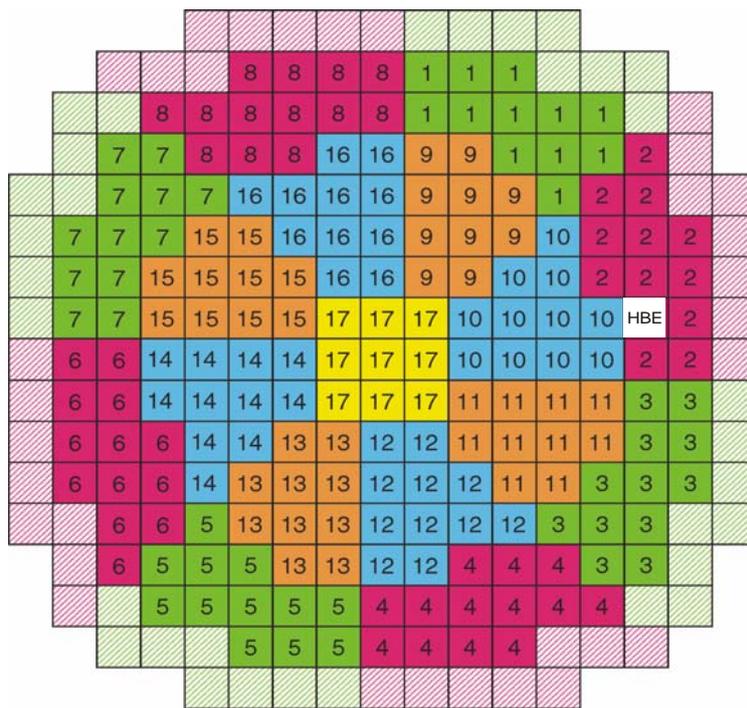


Bild 1-2 Das thermohydraulische Kernmodell für die ATWS-Untersuchungen

1.3 Das eingesetzte Rechenmodell

Zur Darstellung der thermohydraulischen Vorgänge im Reaktordruckbehälter wird die in ATHLET übliche pseudo-mehrdimensionale Modellierung mit 19 Kernkanälen im Kern eingesetzt. Die 193 Brennelemente werden durch 17 thermohydraulische Kanäle und einen Reflektorkanal modelliert. Der Heißkanal mit dem Brennstab maximaler Leistung wird durch das heiße Brennelement (HBE) als zusätzliches Brennelement modelliert. Der heiße Brennstab ist von acht Brennstäben umgeben. Das heiße Brennelement enthält also neben den Brennstäben nominaler Leistung neun Brennstäbe mit überhöhter Stableistung. Die Brennelemente haben einen unterschiedlichen Abbrandzustand. Der Kern enthält UO_2 , UO_2 -Gadolinium (Gd) und MOX-Brennelemente. Die

maximale Anreicherung von U^{235} beträgt im zugrunde gelegten generischen Kernmodell (angelehnt an einen älteren Zyklus von KKP-2) mit einer typischen Mischkernbeladung 3,95% und der Anteil von spaltbarem Plutonium liegt bei 2,85 %. Ferner werden insgesamt 10 verschiedene Gruppen von Steuerstäben modelliert.

Bild 1-2 zeigt das thermohydraulische Kernmodell und Bild 1–3 zeigt die zum Kernmodell passende Neutronenkinetik mit der Leistungsverteilung und dem Brennstab-Heißkanal mit der maximalen Stableistung. Bild 1-4 zeigt die axiale Nodalisierung, Bild 1-5 die radiale Nodalisierung. Die Bilder 1-6 und 1–7 zeigen die Brennstofftypen und die Anordnung der Steuerstabgruppen.

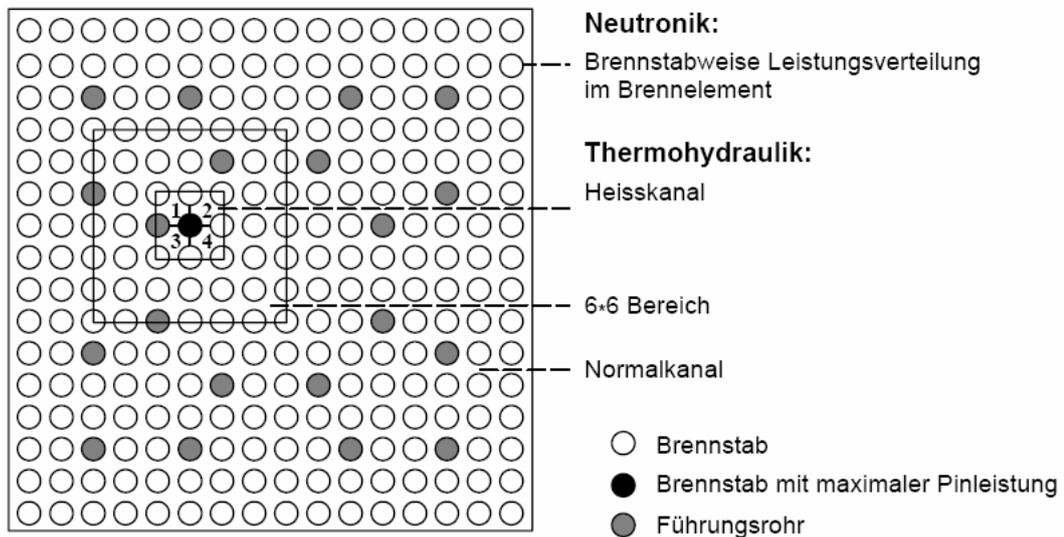


Bild 1-3 Die Unterkanalmodellierung mit dem Brennstab-Heißkanal

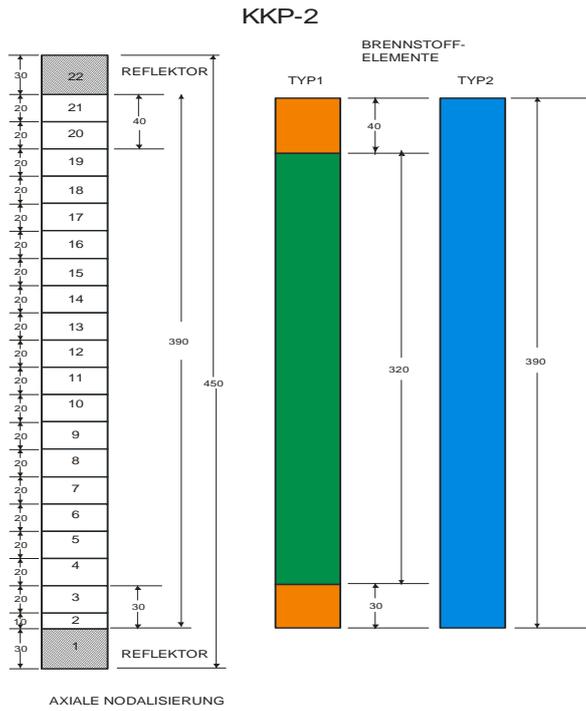


Bild 1-4 Axiale Nodalisierung der Brennstäbe

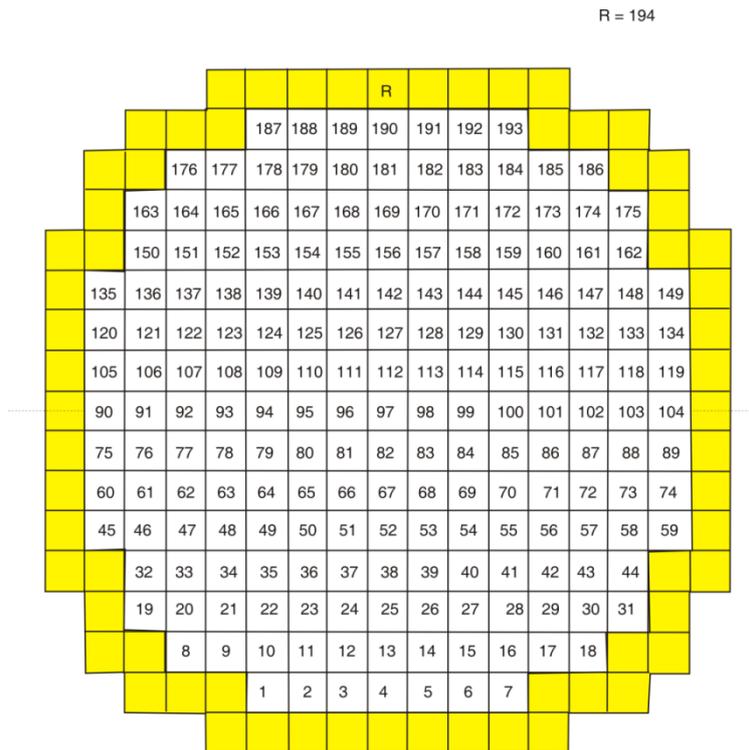


Bild 1-5 Kernbeladung mit Reflektor, R=194 symbolisiert den Reflektor

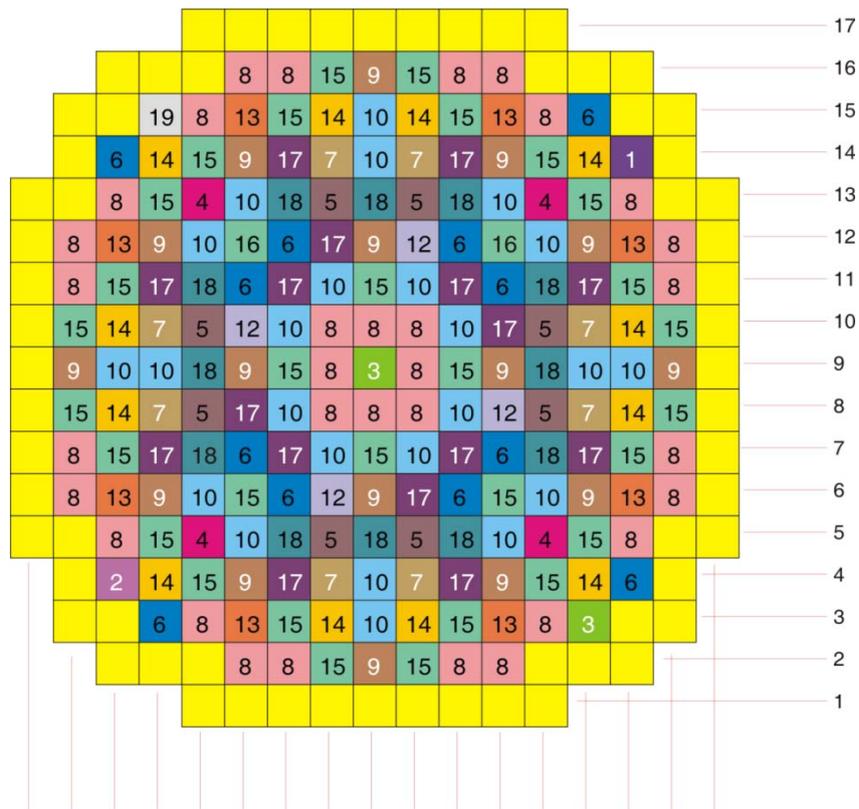


Bild 1-6 Unterschiedliche Brennstofftypen

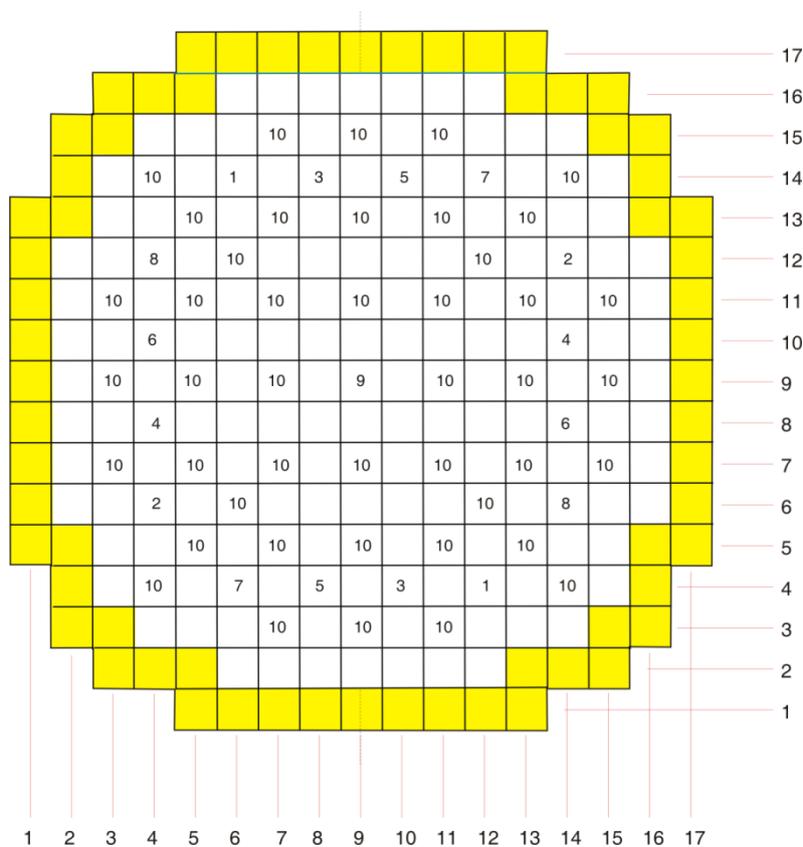


Bild 1-7 Anordnung der Steuerstabgruppen

Für die Punktkinetikrechnungen werden die Leistungsüberhöhungsfaktoren aus den gekoppelten ATHLET-QUABOX/CUBBOX-Rechnungen und den Formfaktoren aus den Wirkungsquerschnittsbibliotheken ermittelt. Es ergeben sich folgende Überhöhungsfaktoren:

- Heißes Brennelement: 1,28
- Heißes 3 x 3 Bündel: 1,47
- Heißstab: 1,55.

1.4 Die Xenon-Vergiftung

Für den Reaktorbetrieb und die Reaktivitätsbilanz des kritischen Zustandes ist die Xenon-Vergiftung bzw. die Xenon-Jod-Dynamik von besonderer Bedeutung. Aus den Spaltprodukten der Brennstoffe oder deren Zerfallskernen entstehen Atomkerne mit sehr großen Einfangsquerschnitten für thermische Neutronen. Diese stark neutronenabsorbierenden Atomkerne heißen Neutronengifte. Beispiele hierfür sind Samarium-149 mit einem Absorptionsquerschnitt von $\sigma_a = 4,1 \cdot 10^4$ barn und Xenon-135 mit einem Absorptionsquerschnitt von $\sigma_a = 2,7 \cdot 10^6$ barn ($1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$). Dabei sind Wirkungsquerschnitte von mehr als zehn barn schon große Werte, die signifikanten Einfluss auf die Neutronenbilanz im Reaktor haben können.

Xenon-135 entsteht einerseits als direktes Spaltprodukt und andererseits als Zerfallsprodukt von Jod-135. Jod-135 ist gleichzeitig Spaltprodukt. Ferner zerfällt Xenon-135 und absorbiert thermische Neutronen. Aus den Bilanzgleichungen für die Jod und Xenon-Konzentration ergeben sich folgende Gleichungen für den Gleichgewichtszustand:

$$J_{\infty} = \frac{\gamma_J}{\lambda_J} \cdot \Sigma_f \cdot \Phi_0;$$

$$X_{\infty} = \frac{(\gamma_X + \gamma_J) \cdot \Sigma_f \cdot \Phi_0}{\lambda_X + \sigma_X \cdot \Phi_0};$$

Die Gleichgewichtskonzentration des Xenons steigt zunächst linear mit dem Neutronenfluss Φ an, da im Nenner die Zerfallskonstante λ_x dominiert. Für hohe Neutronenflusswerte stellt sich ein Sättigungswert ein, da in diesem Fall der Nenner ebenfalls proportional zum Neutronenfluss ansteigt. Der sich ergebende zeitliche Verlauf der Xenonkonzentration für einen typischen Vollastreaktorbetrieb ist in Bild 1-8 dargestellt. Nach 60 Stunden, d. h. weniger als drei Tagen, steigt die Xenonkonzentration auf fast 1,00.

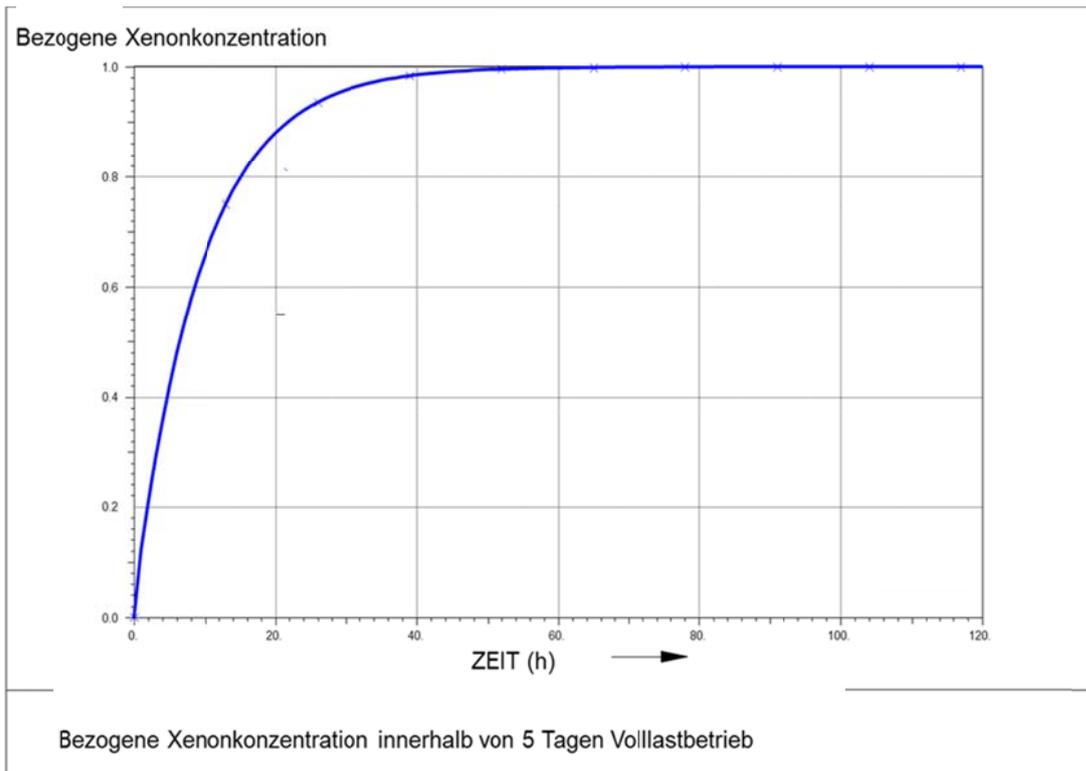


Bild 1-8 Xenonkonzentration innerhalb der ersten 5 Tage Vollastbetrieb

Der zeitliche Verlauf der Xenon-Konzentration für den Fall einer Abschaltung zum Zeitpunkt $t = 0.0$ ergibt sich ebenfalls aus der allgemeinen Bilanzgleichung zu:

$$X(t) = X_0 \cdot \exp(-\lambda_x \cdot t) + \frac{\lambda_I \cdot J_0}{\lambda_x - \lambda_I} \cdot (\exp(-\lambda_I \cdot t) - \exp(-\lambda_x \cdot t))$$

mit der Anfangsbedingung $\phi(t=0) = 0.0$

Der zweite Term beschreibt eine Glockenkurve, so dass sich ein Anstieg der Xenon-Konzentration ergibt, dessen Maximum proportional zum Ausgangsneutronenfluss ist. Daraus folgt eine starke Vergiftung durch den Xenonaufbau nach der Abschaltung oder bei Übergängen zu geringeren Leistungen. So ist die Xenonkonzentration z. B. bei ei-

nem Lastwechselvorgang von 100 % auf 25 % Leistung gemäß Bild 1-9 um fast 50 % höher ist als beim nominalen Betrieb bei einer Leistung von 100 %. In dieser Arbeit werden daher insbesondere auch Teillastzustände untersucht. In Bild 1-9 wird der zeitliche Verlauf der Xenonvergiftung nach Abschaltung des Reaktors und verschiedenen Lastwechselvorgängen gezeigt.

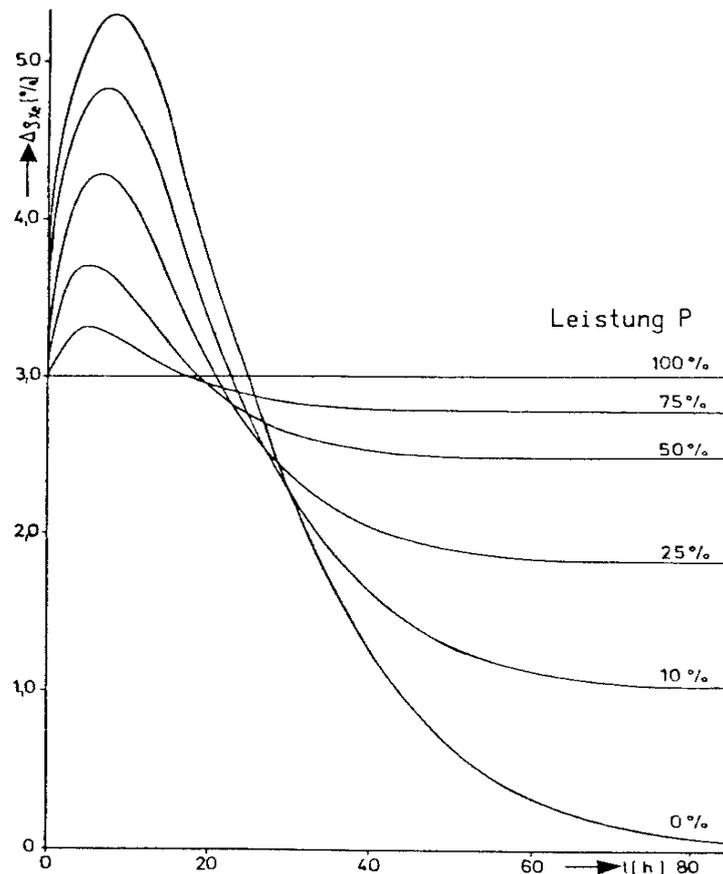


Bild 1-9 Änderung der Xenonvergiftung nach sprunghafter Leistungsabnahme

2 Ergebnisse der Analysen zu ATWS bei Teillastzuständen und Xenon-Gleichgewicht/Nicht-Gleichgewicht

Die Analysen im vorliegenden Bericht werden für drei unterschiedliche Randbedingungen durchgeführt:

1. 30 % Leistung mit „Best-Estimate“ Bedingungen für den Reaktorkern, d. h. dem der Anlagenleistung entsprechenden Xenongleichgewichtszustand;
2. 30 % Leistung mit einem Rückwirkungsverhalten des Reaktorkerns für Xenon-Nichtgleichgewichtszustände. Um die Analysen für solche Teillastzustände abdeckend durchzuführen, wurde von vorneherein unterstellt, dass sich der Kern im xenonfreien Zustand befindet. Es ist zu untersuchen, ob die Rückwirkungseffekte, bedingt durch das fehlende Xenon im Reaktorkern, deutlich andere Werte annehmen und das dynamische Verhalten des Reaktors bei ATWS signifikant beeinflussen könnten.
3. Die gleichen Fälle wie unter 2) wurden auch für 80 % Anlagenleistung untersucht.
4. Schließlich wurde auch das Störfallverhalten bei 100 % Leistung mit xenonfreien Rückwirkungen für den Reaktorkern untersucht.

Untersucht wird in allen Fällen der ATWS-Fall „Ausfall der Hauptwärmesenke“, da dieser gemäß den bereits an der GRS durchgeführten Untersuchungen den führenden Fall bei der Nachweisführung darstellt und zu den höchsten primärseitigen Druckbelastungen führt. Um nun mit dem verwendeten ATHLET-Datensatz einen Betriebszustand bei Teillast zu erreichen, wird in der ATLAS-Simulationsumgebung (die unter anderem eine grafische Schnittstelle für ATHLET zur Verfügung stellt) zunächst die Generatorleistung (in dieser Arbeit auf 30 % bzw. 80 %) vermindert. Über das Teillastdiagramm, die Generatorsollwertregelung und die Kühlmitteltemperaturregelung werden daraufhin automatisch Steuerstäbe verfahren und die thermische Reaktorleistung an die sekundärseitig angeforderte Leistung angeglichen. Dies führt zur gewünschten Verringerung der Reaktorleistung. Es sei hier bereits darauf hingewiesen, dass das Herstellen solcher nicht-nominaler Anlagenzustände generell erhebliche Fahrbewegungen der Steuerstäbe und/oder ein Aufborieren des Primärkreislaufs zur Folge hat, um die Überschussreaktivität (hervorgerufen durch die Annahme eines xenonfreien Kerns bzw. ei-

ner geringeren mittleren Kühlmitteltemperatur bei Teillast) zu binden. Dies führt aber u. U. zu erheblich deformierten axialen Leistungsprofilen oder unrealistisch hohen Bor-konzentrationen, die durch die Fahrprogramme an der Anlage üblicherweise vermieden werden.

Die Ergebnisse der Transientenrechnungen sind in den Kapiteln 2 und 3 in ihrer Gesamtheit, d. h. für die unterschiedlichen Lastzustände dargestellt. Gezeigt werden dort im Wesentlichen die zeitlichen Verläufe der für die ATWS-Nachweisführung relevanten Größen, d. h.:

- der Reaktorleistung,
- der mittleren Brennstabtemperatur im Kern,
- der mittleren Kühlmitteldichte,
- des Massenstromes am Kerneintritt und
- der mittleren Borkonzentration im Kern,
- sowie des DNB-Verhältnisses im BE CO1BS in der Höhe des axialen Nodes, an dem das minimale DNB-Verhältnis während der Transiente auftritt.

Bei der Darstellung der Transientenverläufe und den gezeigten Vergleichen zwischen Xenongleichgewichts- und xenonfreien Zuständen sowie dem Vergleich zwischen abgeschalteten und laufenden Hauptkühlmittelpumpen beginnen die Störungen nach 100 Sekunden. Bei der Darstellung der Vergleiche zwischen Punkt- und 3D-Kinetikrechnungen beginnen die Störungen nach 50 Sekunden.

2.1 Beschreibung des Transientenverlaufes

Zunächst soll der Verlauf der Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“ grundsätzlich beschrieben werden. Sekundärseitig kommt es wegen des Ausfalls des Speisewassers zu einer Erhöhung der Kühlmitteltemperatur. Die damit verbundene Ausdehnung des Kühlmittels führt zu einem Druckanstieg in der Sekundärseite und zu einem Sinken des Dampferzeugerfüllstands, ggf. bis hin zur Austrocknung. Dadurch ändern sich die Wärmeübergangsbedingungen zwischen Primär- und Sekundärseite.

Bedingt durch den verschlechterten Wärmeübergang im Dampferzeuger kommt es auf der Primärseite zu einer Druckerhöhung zu Beginn der Transiente. Bedingt durch das RESA-K-Signal wird außerdem zu Beginn der Transiente aus dem Zusatzboriersystem Borsäure in den Primärkreis eingespeist. Der Anstieg der Borkonzentration, der in den Bildern gezeigt wird, führt zu einer Verminderung der Reaktorleistung; die inhärenten Reaktivitätsrückwirkungen des Reaktors, die aus der Reduzierung der Kühlmitteldichte herrühren, sind bei auslaufenden Pumpen stärker als bei weiterlaufenden Hauptkühlmittelpumpen, führen aber in beiden Fällen zu einer mehr oder weniger schnellen Leistungsreduktion. Die durch den negativen Reaktivitätseintrag verminderte Reaktorleistung hat eine Abnahme der Brennstab- und Kühlmitteltemperaturen zur Folge.

Der wesentliche Unterschied beim Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen liegt im schnellen Absinken des Massenstromes im Primärkreis nach dem Beginn der Transiente. Die Leistungsreduktion ergibt sich wieder durch die Boreinspeisung aus dem Zusatzboriersystem und zusätzlich aus der negativen Rückwirkung aufgrund der sich verringernenden Kühlmitteldichte. Die Reaktivitätsrückwirkung ist für verschiedene Voidreaktivitätskurven im Bild 1-1 gezeigt. Die verminderte Reaktorleistung führt zu einer Abnahme der Brennstab- und Kühlmitteltemperatur. Durch die starke Abnahme der Kühlmitteltemperatur steigt die Kühlmitteldichte im Verlauf der Transiente zwischenzeitlich wieder an.

Der zeitliche Verlauf der Reaktorleistung und des Reaktordruckes sowie die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Punktkinetik- und 3D-Kinetik-Rechnung werden in den folgenden Abschnitten für jede Transiente erläutert.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass bei der Ergebnisdarstellung der zeitliche Verlauf des Massenstromes am Kerneintritt Unterschiede in der Rechnung mit Punktkinetik und 3D-Kinetik zeigt. Dies hängt damit zusammen, dass in der 3D-Kinetikrechnung der Bypass-Massenstrom durch den Kern nicht zum Kernmassenstrom addiert wird. Bei Transienten mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen, bei denen der Massenstrom sehr stark abnimmt, verschwinden diese Unterschiede im Laufe der Transiente, während bei laufenden Hauptkühlmittelpumpen der Massenstrom am Kerneintritt in den Ergebnissen der 3D-Rechnung durchgängig geringer ist. Die Gesamtmassenbilanz ist aber auf jeden Fall konsistent.

2.2 Ergebnisse der Analysen bei einer Reaktorleistung von 30 % mit Kinetikdaten bei Xenon-Gleichgewicht („Best Estimate“)

2.2.1 Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen

Information zu den durchgeführten Rechnungen (die angegebenen Datensätze können bei Bedarf, z. B. für eine Rekonstruktion der Rechenergebnisse, wiederverwendet werden und sind daher hier der Vollständigkeit halber mit angegeben):

Punktkinetik

- Borkonzentration: 1151,5 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
 - D=1,42 L1=371,19 L2=326,83 L3=10,20 L4=0,00 cm
- Name der Rechnung: p.spumoff10
- Datensatz: gkn2_17smk-1off.inp
- Beginn der Transiente: 3995 s

3D – Kinetik

- Borkonzentration: 1150 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
 - D=40,33 L1=184,44 L2=43,19 L3=43,17 L4=66,65 cm
- Name der Rechnung: SMK-given-PWR-ATWS-23.10.2008\ATWS30.Poff4
- Beginn der Transiente: 1924 s

Der Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen ist durch die steile Abnahme des Massenstromes am Kerneintritt und dem schnellen Rückgang der Reaktorleistung gekennzeichnet. Der Verlauf der entscheidenden Variablen ist in den Bildern 2-1 bis 2-6 dargestellt.

Der Reaktordruck steigt zu Beginn der Transiente um etwa 5 bar. Die Kühlmitteldichte verringert sich zunächst von 711 kg/m^3 auf 701 kg/m^3 aufgrund des abnehmenden Massenstromes. Diese Abnahme der Kühlmitteldichte bewirkt wegen der negativen Rückwirkung die rasche Leistungsabnahme. Die abnehmende Kühlmitteltemperatur führt von etwa 150 s bis etwa 280 s zu einer Zunahme der mittleren Kühlmitteldichte. Die mittlere Kühlmitteltemperatur, die im Bild 2-11 dargestellt ist, beginnt vor dem Start der Transiente zu steigen. Ist die Reaktorleistung kleiner als 30 %, so wirkt die Kühlmitteltemperaturregelung nicht mehr. Vor Beginn der Transiente verschiebt die Leistungsregelung den dritten Regelstab der D-Bank. Dadurch verringert sich die Leistungsabnahme geringfügig und die mittlere Kühlmitteltemperatur steigt an. Die ATWS-Transiente beginnt in der Rechnung mit Punktkinetik bei 3995 s und mit 3D-Kinetik bei 1924 s. Die Steuerstabbewegungen sind für beide Fälle, der Rechnung mit Punktkinetik und der mit 3D-Kinetik, in den Bildern 2-12 bis 2-13 dargestellt.

Die mittlere Brennstabtemperatur folgt der Reaktorleistung. Die Borkonzentration steigt mit dem Einspeisen der Borsäure aus dem Zusatzboriersystem nach dem Beginn des Störfalls.

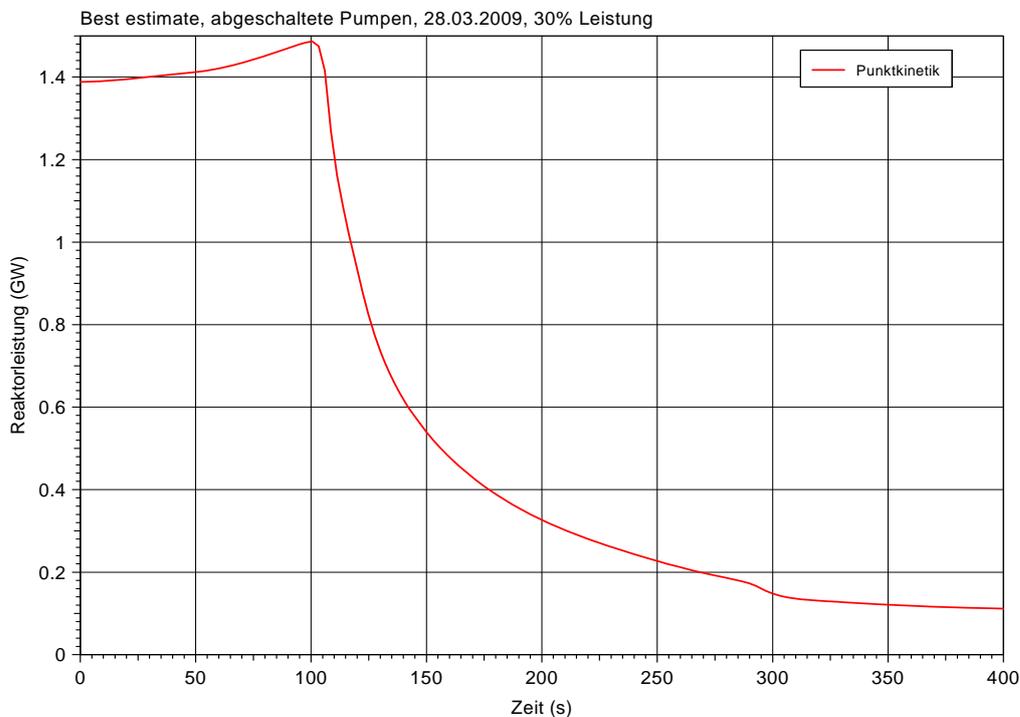


Bild 2-1 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30% Leistung, Reaktorleistung

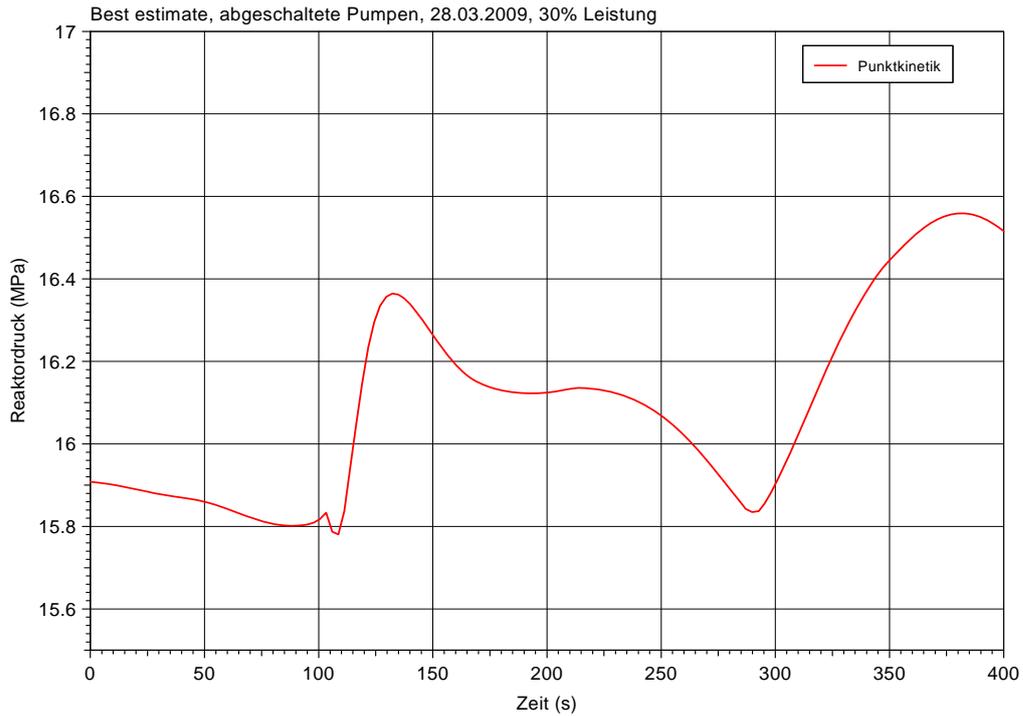


Bild 2-2 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck

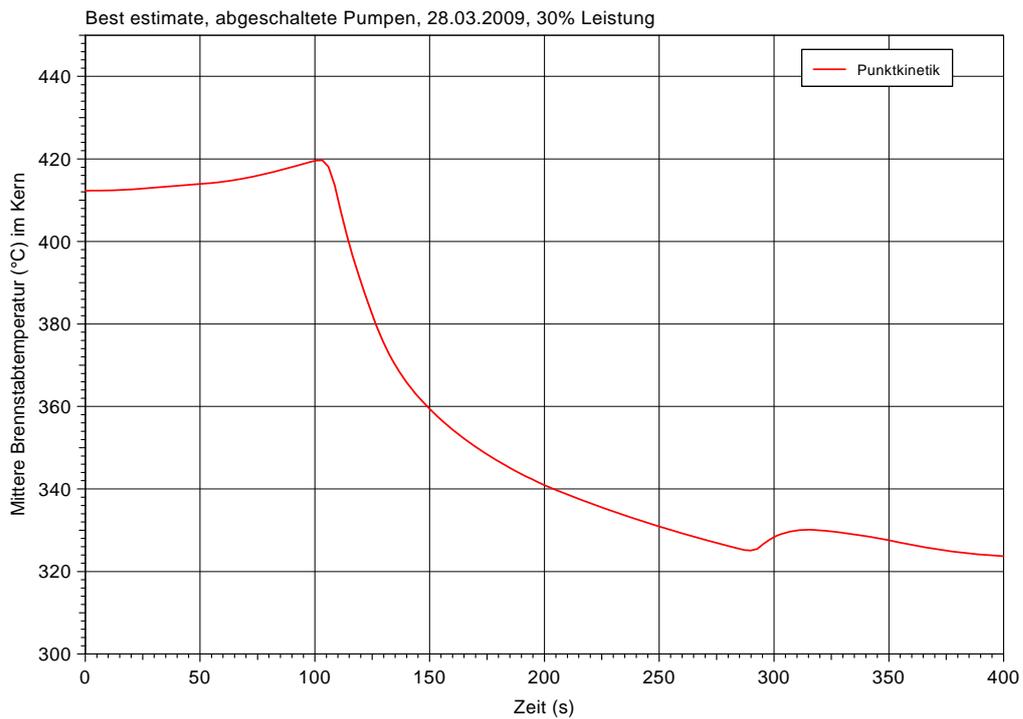


Bild 2-3 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30% Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

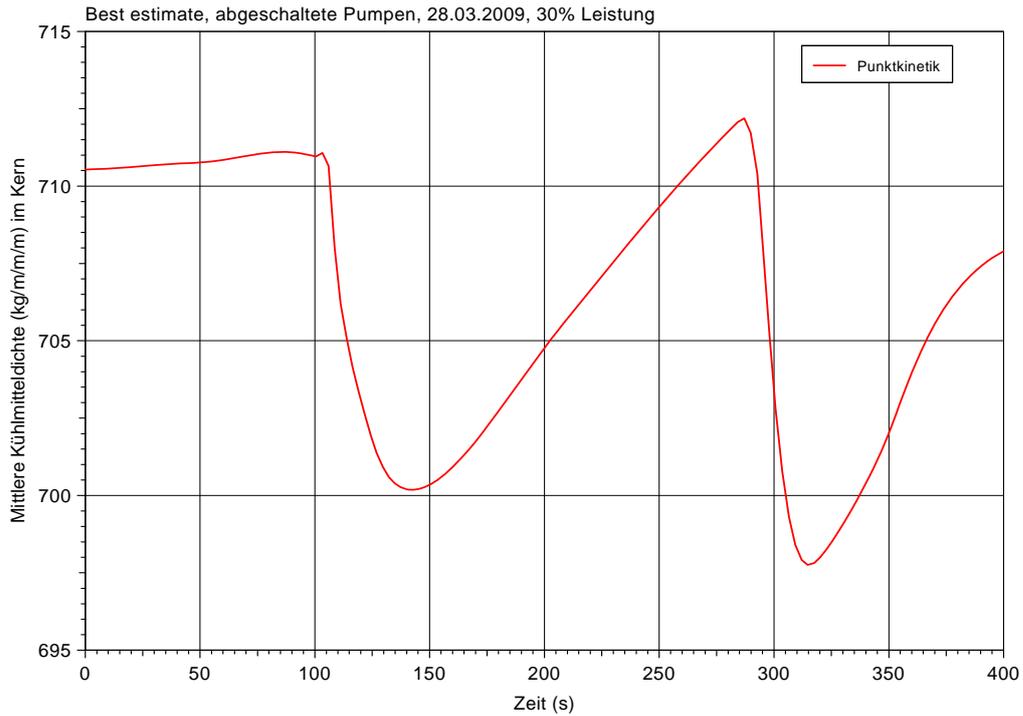


Bild 2-4 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

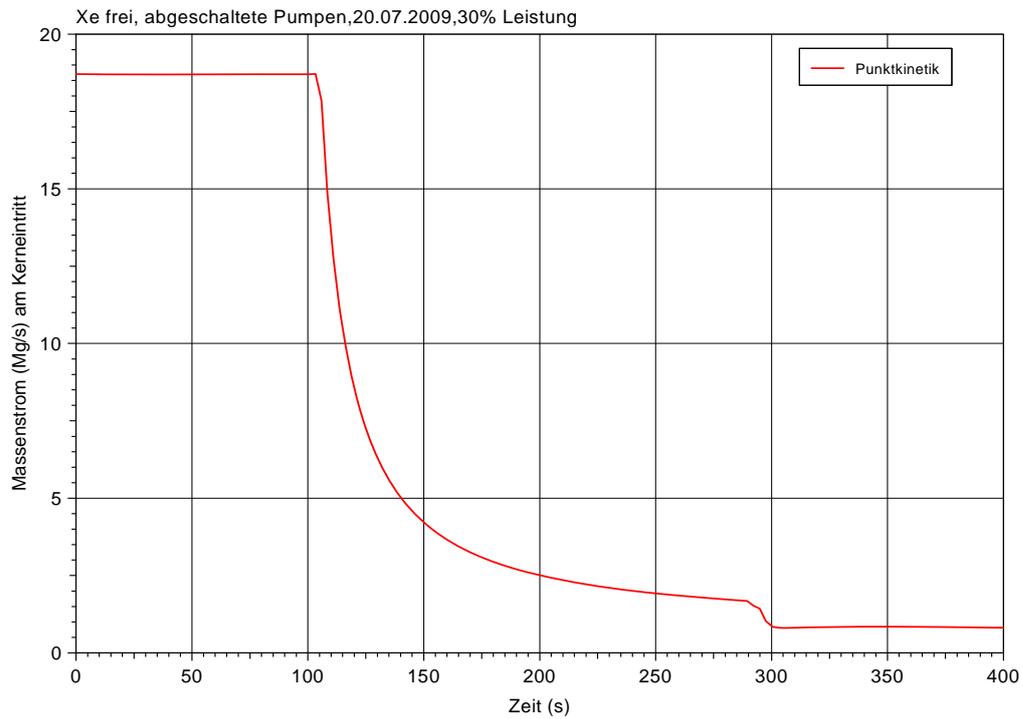


Bild 2-5 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30% Leistung, Massenstrom

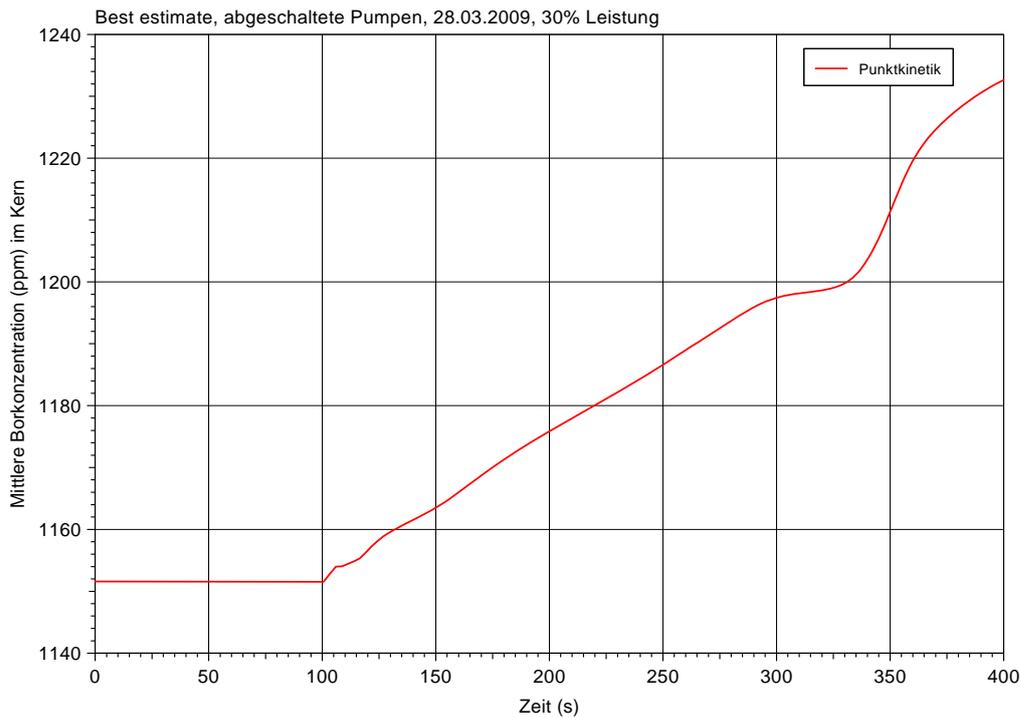


Bild 2-6 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Borkonzentration

2.2.2 Vergleich: Punktkinetik – 3D – Kinetik

Die in den Bildern 2-7 bis 2-16 dargestellten Vergleiche zwischen Punktkinetik und der 3D-Kinetikrechnung zeigen, dass sich die Variablen ähnlich ändern. Der Verlauf des Massenstromes am Kerneintritt, der Borkonzentration und der DNBR stimmen insgesamt recht gut überein.

Das DNBR, *Departure from Nucleate Boiling Ratio*, ist der Quotient aus kritischer und tatsächlicher Wärmestromdichte. Die kritische Wärmestromdichte ist diejenige, die beim Übergang vom Blasen- zum Filmsieden auftritt. Dadurch, dass sich ein isolierender Blasenfilm um die Brennstabhülle legt, verschlechtern sich die Wärmeübergangsbedingungen. Nucleate Boiling ist das sog. Blasensieden.

Die geringen Unterschiede im Verlauf der mittleren Brennstabtemperatur und der mittleren Kühlmitteldichte lassen sich mit den geringfügig unterschiedlichen Anfangswerten der Reaktorleistung und des Druckes begründen. Die etwas höhere Reaktorleistung hat eine höhere Brennstabtemperatur zur Folge. Der höhere Reaktordruck führt auf-

grund der Verringerung des Kühlmittelvolumens zu größeren Werten der mittleren Kühlmitteldichte. Im Wesentlichen hängt die DNBR bei etwa gleicher Reaktorleistung und gleichem Massenstrom im Kern vom Druck ab. Bei geringerem Druck ergeben sich größere Werte für den kritischen Wärmestrom und somit auch größere DNBR-Werte.

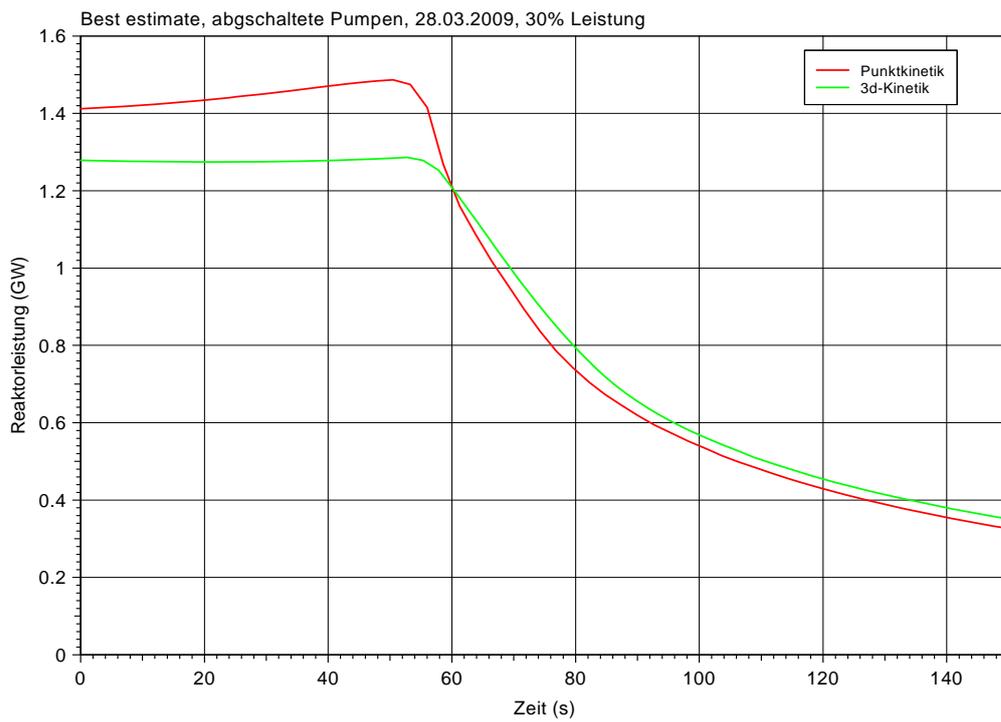


Bild 2-7 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30% Leistung, Vergleich Reaktorleistung

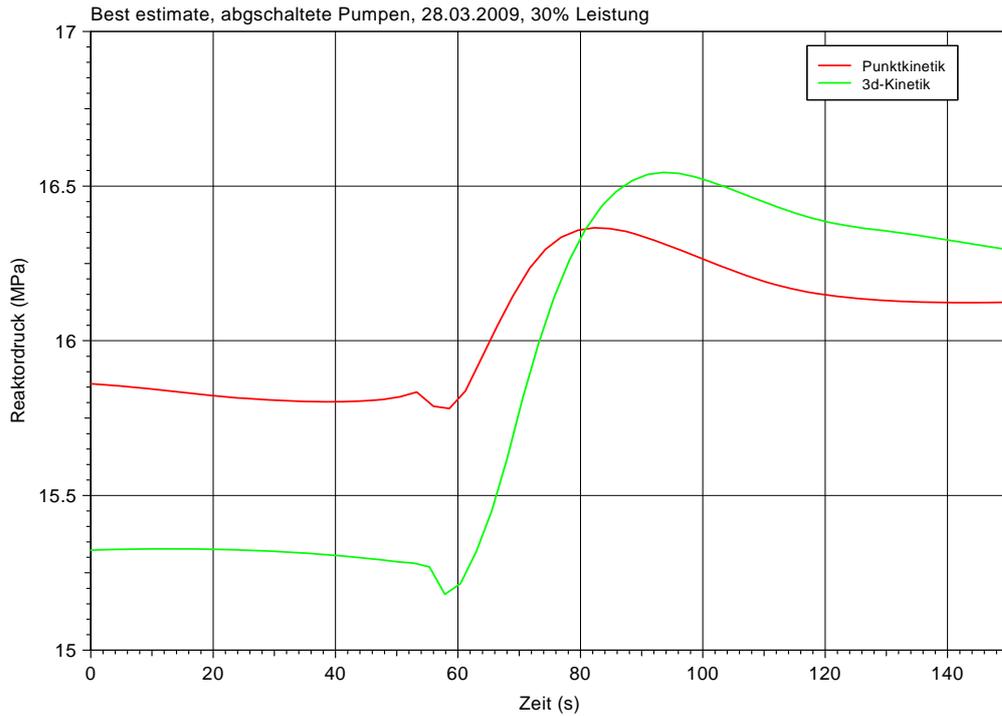


Bild 2-8 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30% Leistung, Vergleich Reaktordruck

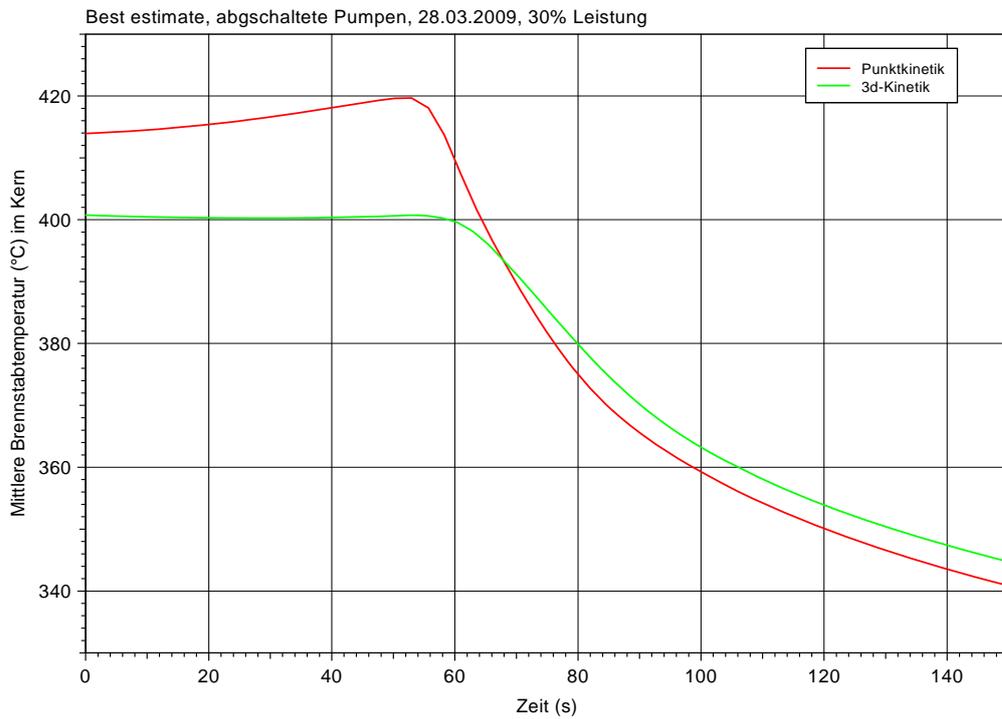


Bild 2-9 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30% Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur

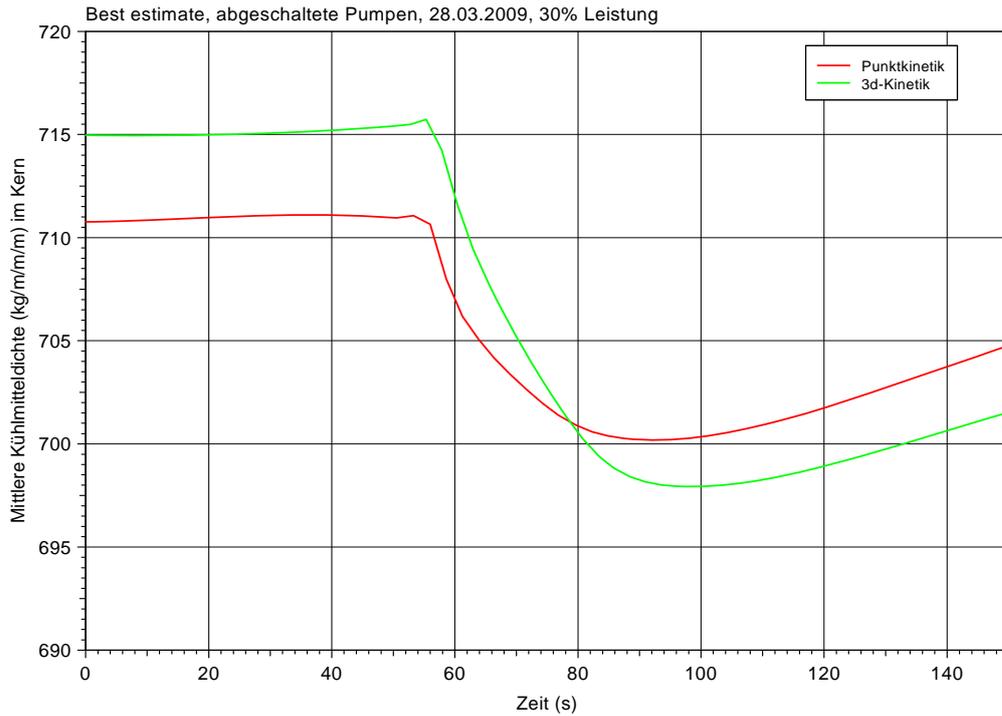


Bild 2-10 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30% Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte

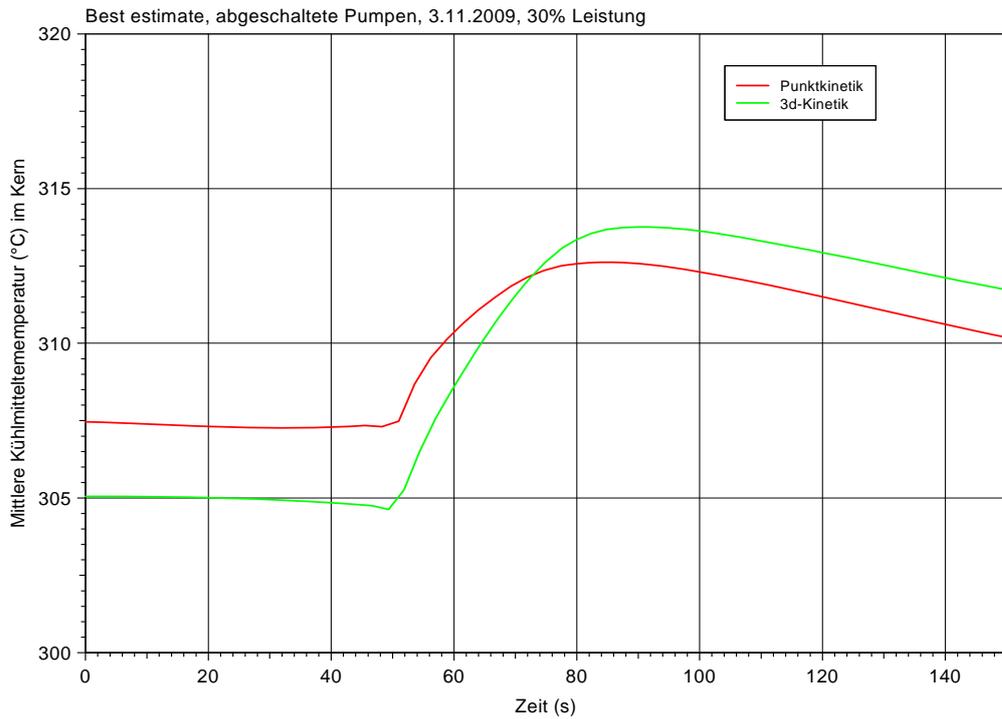


Bild 2-11 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteltemperatur

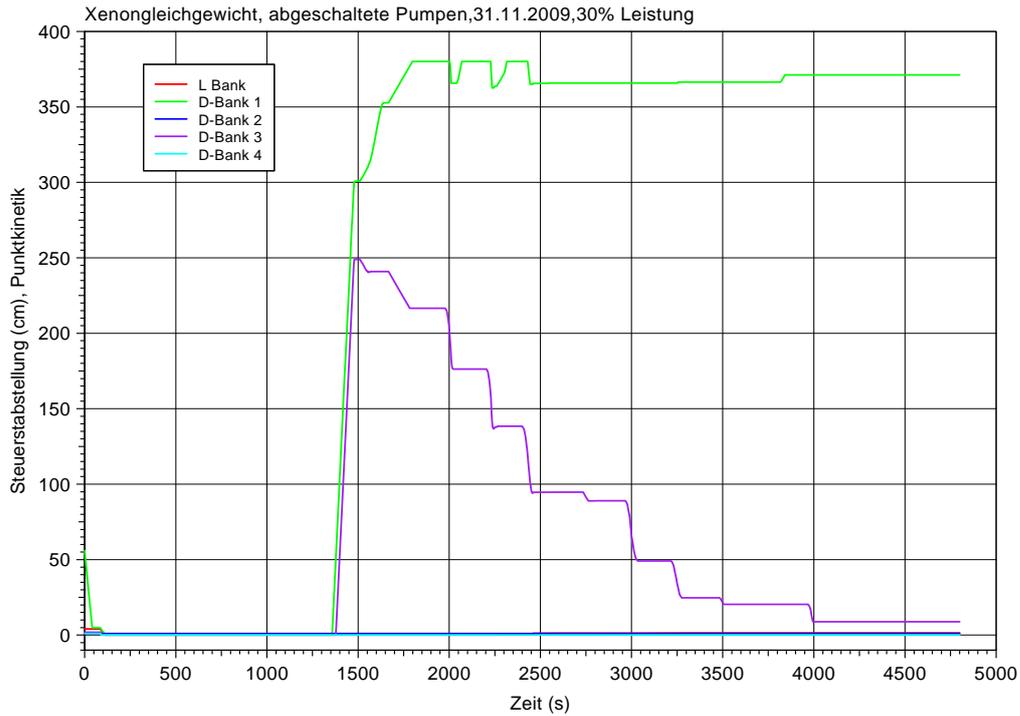


Bild 2-12 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Steuerabstellung bei der Punktkinetikrechnung

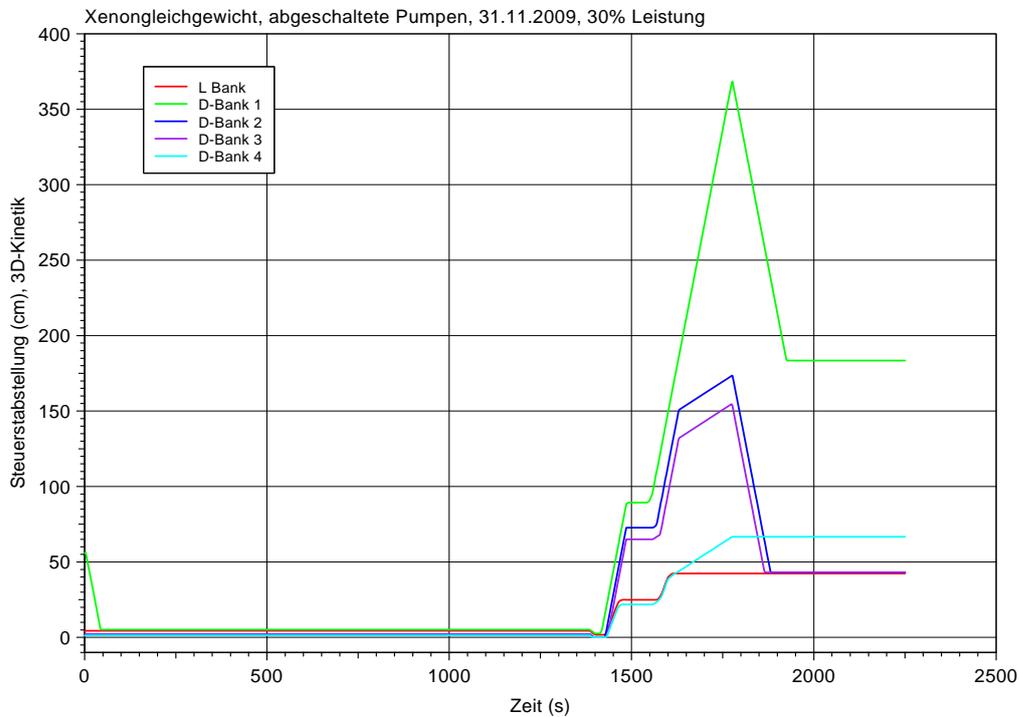


Bild 2-13 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Steuerabstellung bei der 3D-Kinetikrechnung

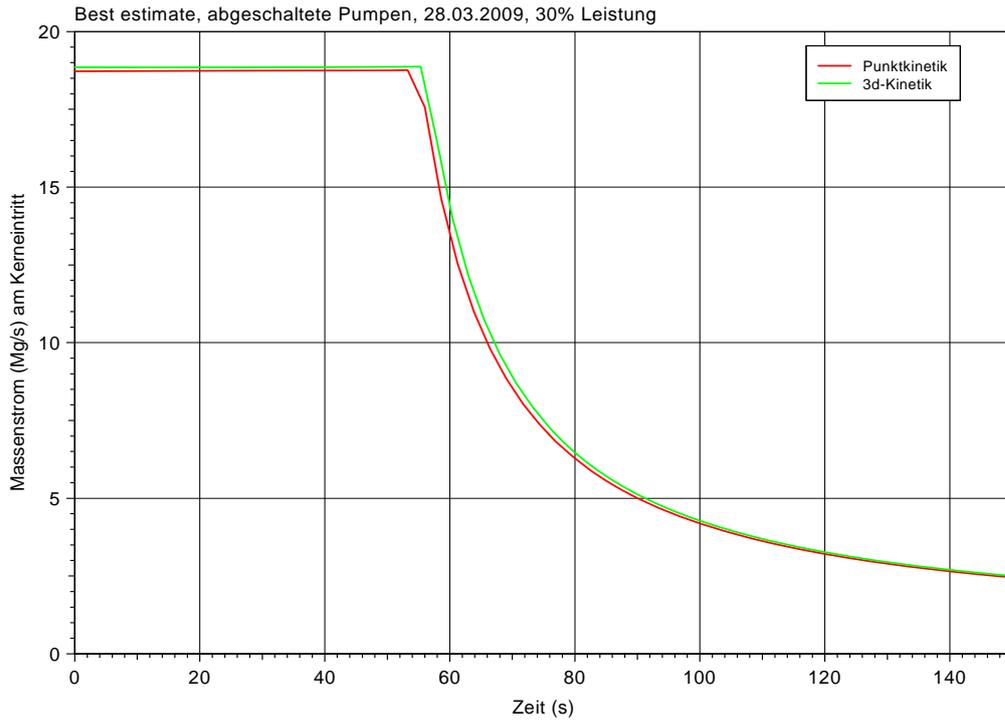


Bild 2-14 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Massenstrom

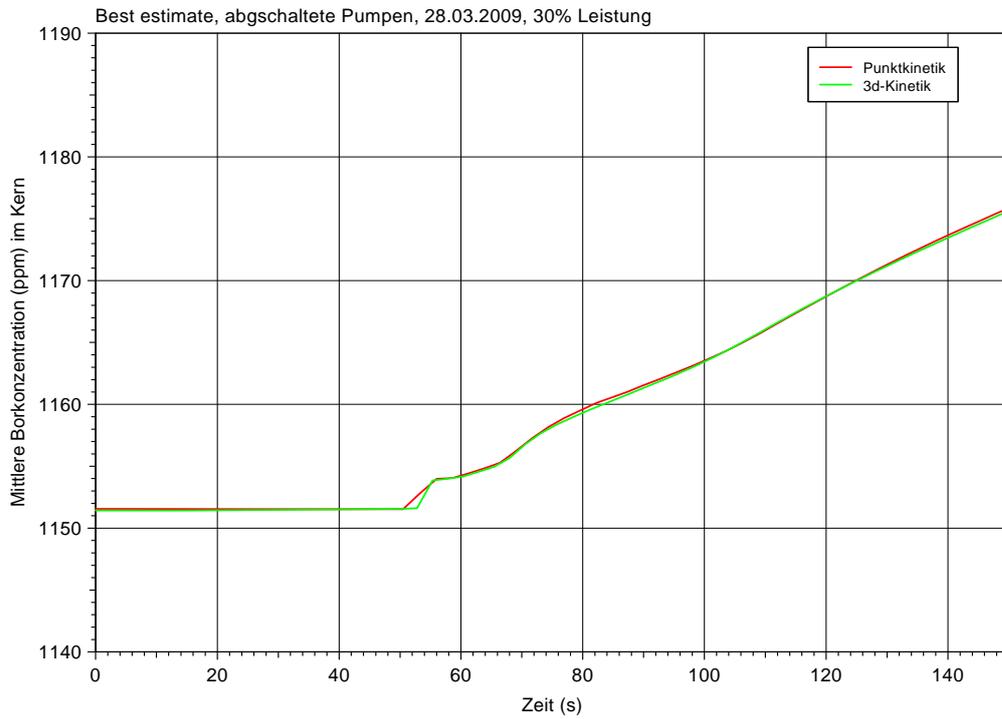


Bild 2-15 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration

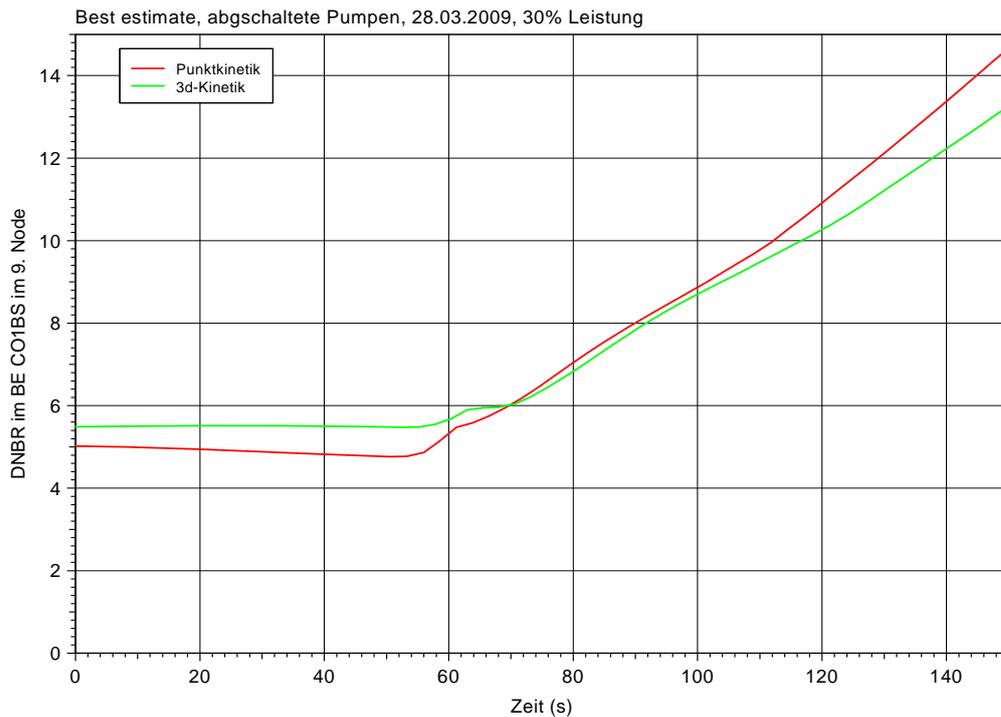


Bild 2-16 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich DNBR

Zusammenfassung:

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die beschriebene Transiente bei Teillast zu keinen Druckbelastungen des Primärkreislaufs führt, die jenseits des 1,2- bzw. 1,3-fachen des Auslegungsdrucks liegen. Darüber hinaus sind wegen des großen DNB-Verhältnisses von 4,77 (Punktkinetik) bzw. 5,48 (3D-Kinetik) keine kritischen Siedezustände während dieser Transiente zu erwarten.

2.2.3 Transientenverlauf mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen

Information zu den durchgeführten Rechnungen:

Punktkinetik:

- Borkonzentration: 1151,5 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- $D=1,42$ $L1=371,19$ $L2=326,83$ $L3=10,20$ $L4=0,00$ cm
- Name der Rechnung: p.spumon10
- Datensatz: gkn_17smk-1on.inp
- Beginn der Transiente: 3995 s

3D – Kinetik:

- Borkonzentration: 1151,5 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- $D=42,33$ $L1=184,44$ $L2=43,19$ $L3=43,17$ $L4=66,65$ cm
- Name der Rechnung: SMK-given-PWR-ATWS-23.10.2008\ATWS30.Pon3
- Beginn der Transiente: 1924 s

Die Punktkinetikrechnung mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen zeigt den typischen Verlauf der Variablen. Mit fallender Reaktorleistung, die im Bild 2-17 dargestellt ist, sinkt der im Bild 2-18 gezeigte Reaktordruck. Die im Bild 2-19 gezeigte mittlere Brennstabtemperatur sinkt proportional mit der Reaktorleistung. Da die Kühlmitteltemperatur ebenfalls abnimmt, steigt die mittlere Kühlmitteldichte, die im Bild 2-20 dargestellt ist. Mit der Kühlmitteldichte steigt auch der im Bild 2-21 gezeigte Massenstrom im Kerneintritt.

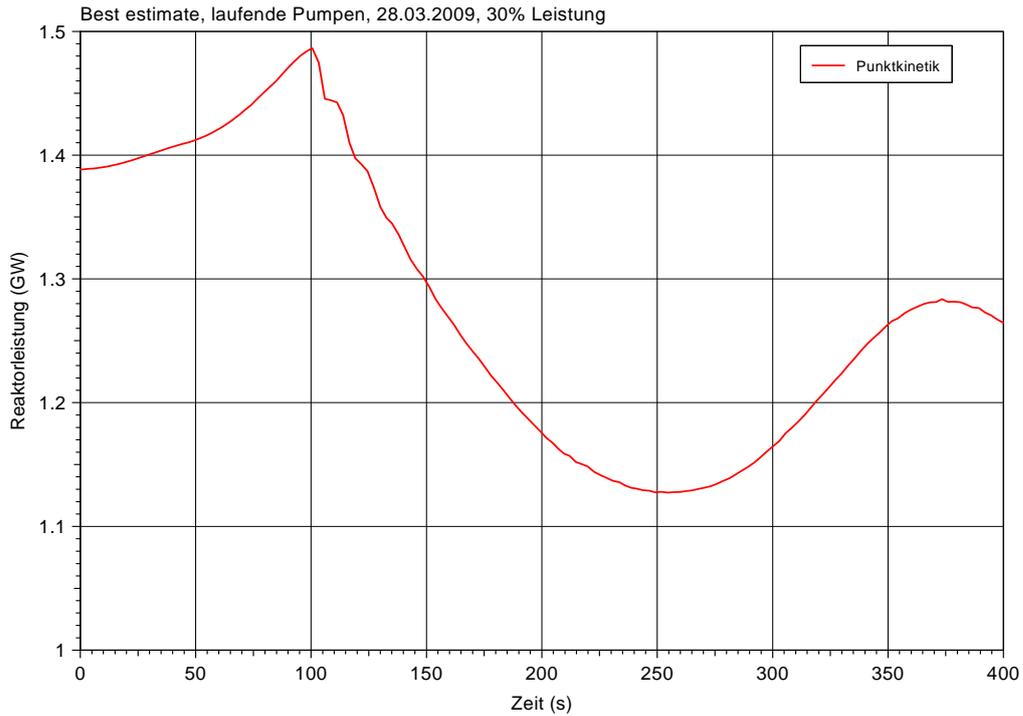


Bild 2-17 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung

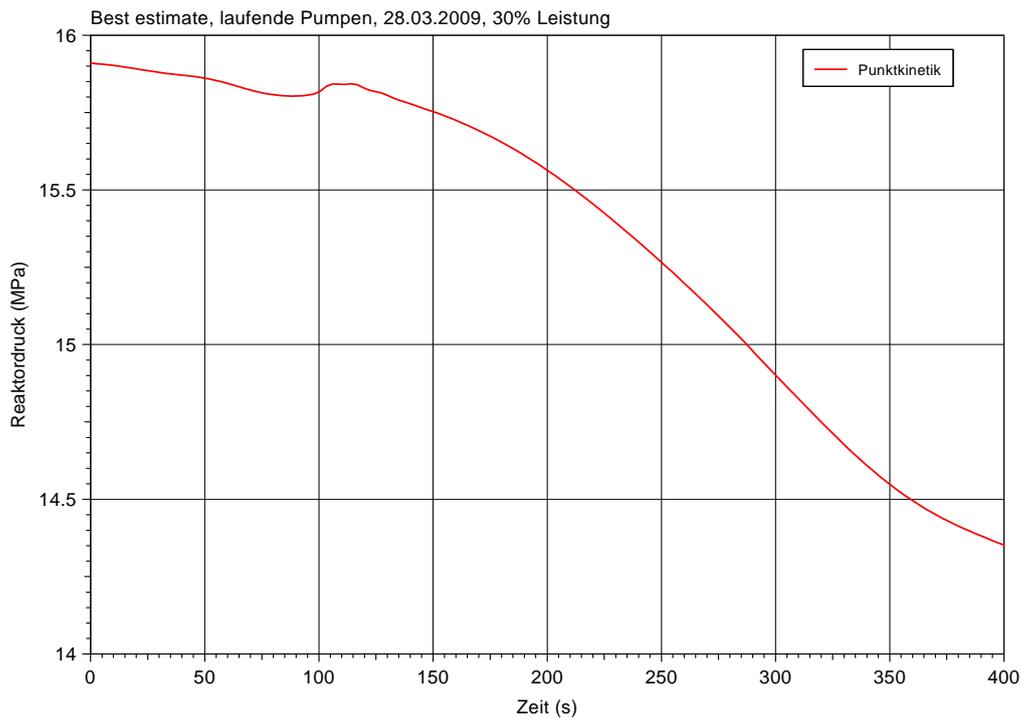


Bild 2-18 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck

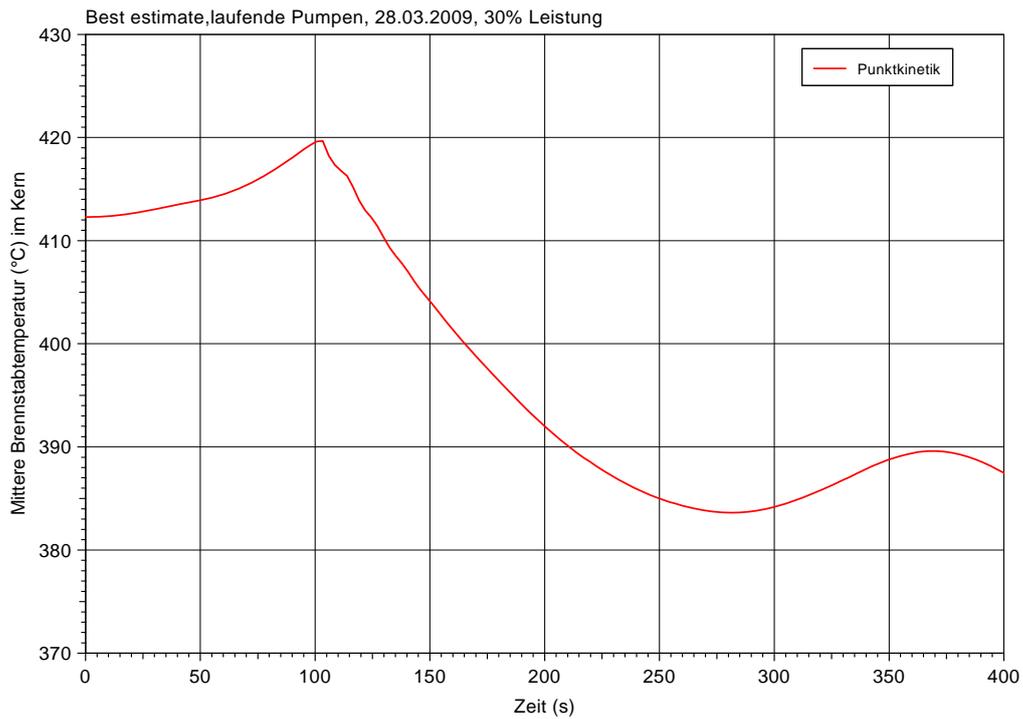


Bild 2-19 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

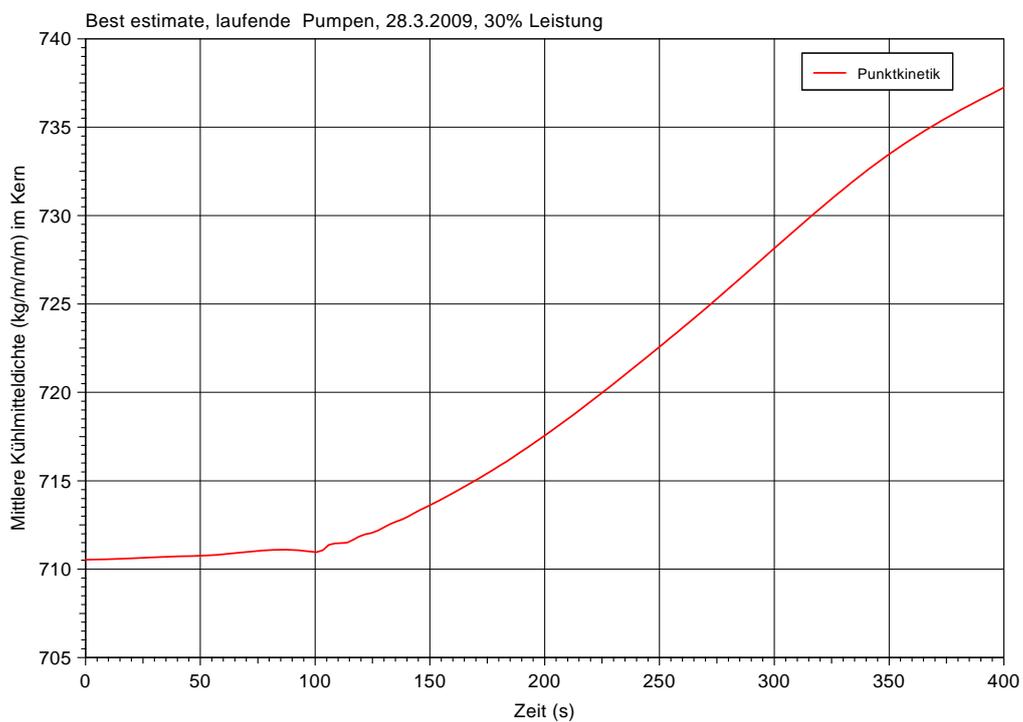


Bild 2-20 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

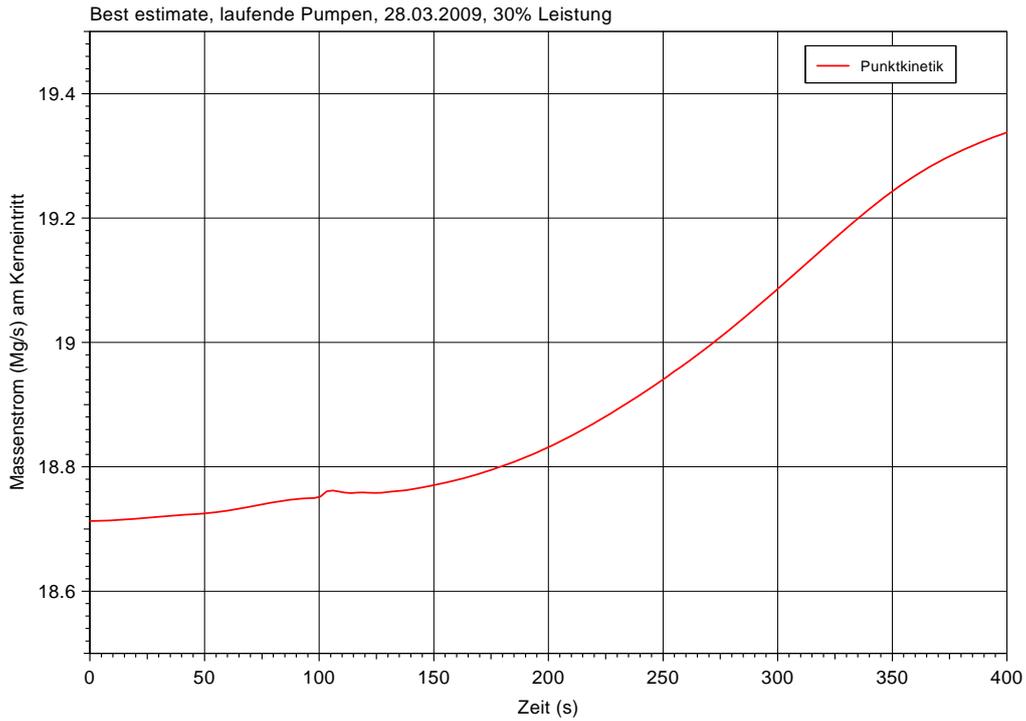


Bild 2-21 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom

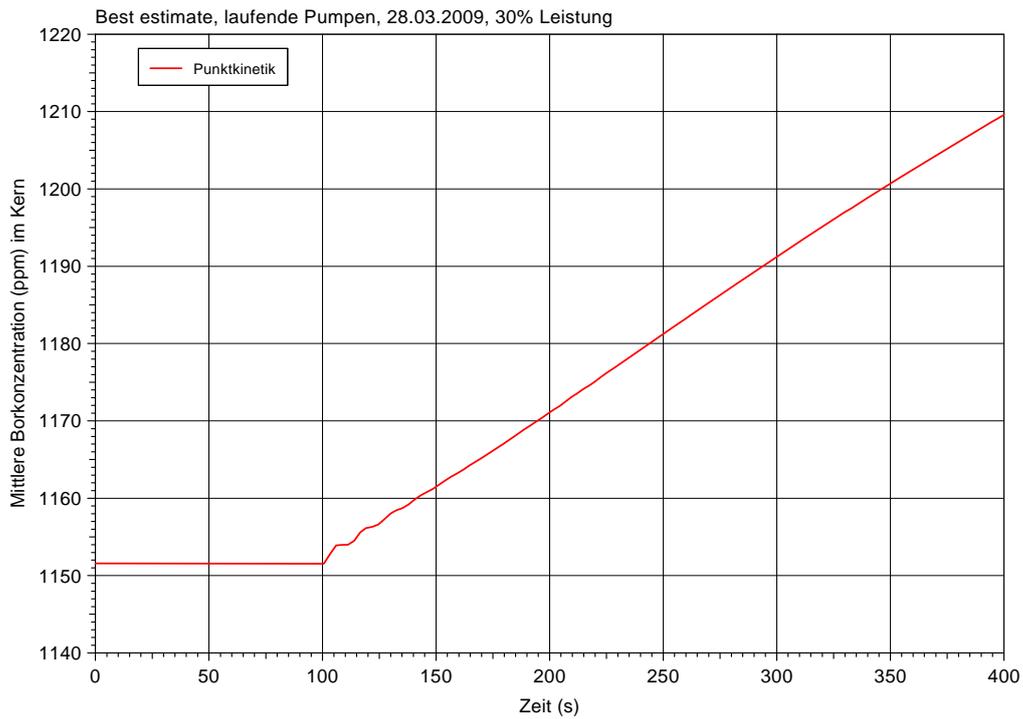


Bild 2-22 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Borkonzentration

2.2.4 Vergleich: Punktkinetik – 3D – Kinetik

Beim Vergleich der Ergebnisse der Punktkinetik- und der 3D-Kinetikrechnung, die in den Bildern 2-23 bis 2-29 gezeigt werden, sind wieder die unterschiedlichen Anfangswerte der Reaktorleistung und des Reaktordruckes entscheidend. Diese Unterschiede lassen sich auf die radiale und axiale Umverteilung der Reaktorleistung bei der Einschwingrechnung in der 3D-Kinetikrechnung zurückführen.

Die geringfügig höhere Reaktorleistung führt zu höheren mittleren Brennstabtemperaturen in der Punktkinetikrechnung. Aufgrund des kleineren Massenstromes am Kerneintritt ergeben sich kleinere Werte der mittleren Kühlmitteldichte.

Das DNBR ist in der Rechnung mit Punktkinetik geringer. Das lässt sich wieder mit dem unterschiedlichen Verlauf des Reaktordruckes erklären. In der Punktkinetikrechnung führt der größere Druck zu kleineren Werten des kritischen Wärmestromes und somit zu kleineren DNBR-Werten als bei den Ergebnissen mit der 3D-Kinetik.

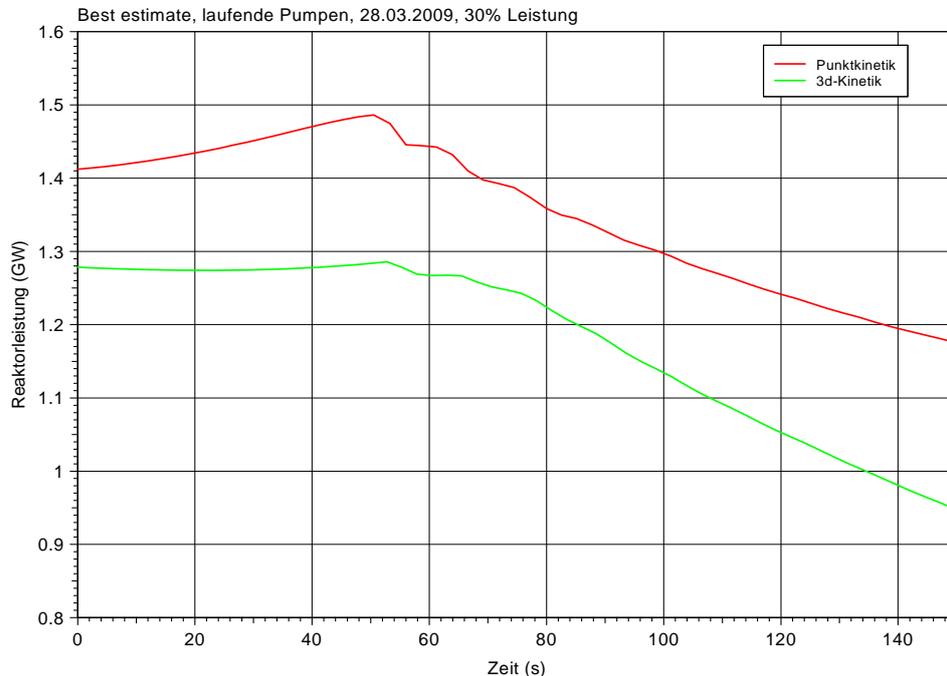


Bild 2-23 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung

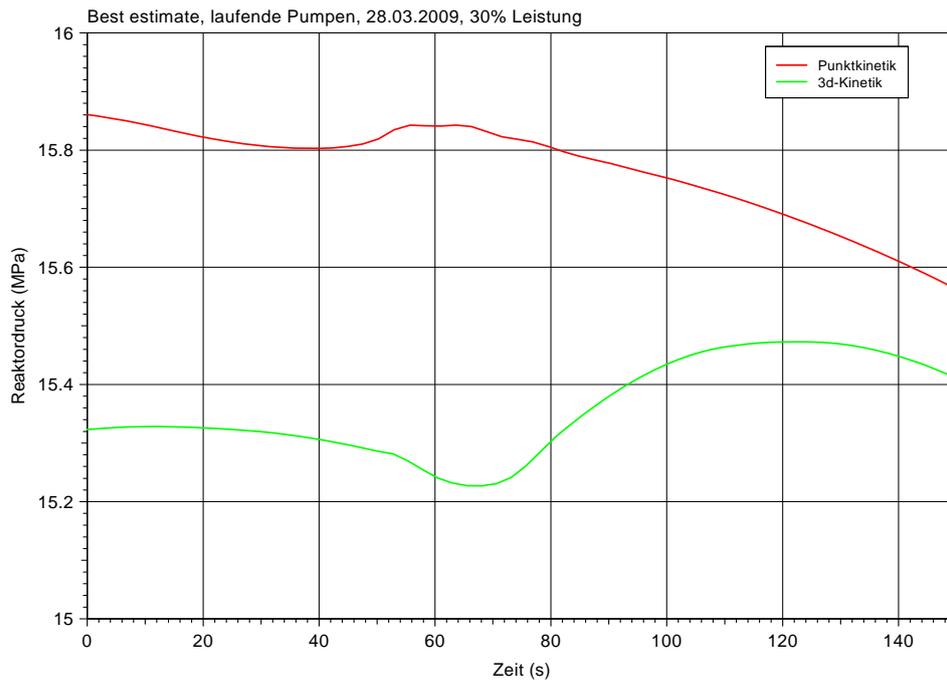


Bild 2-24 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktor-druck

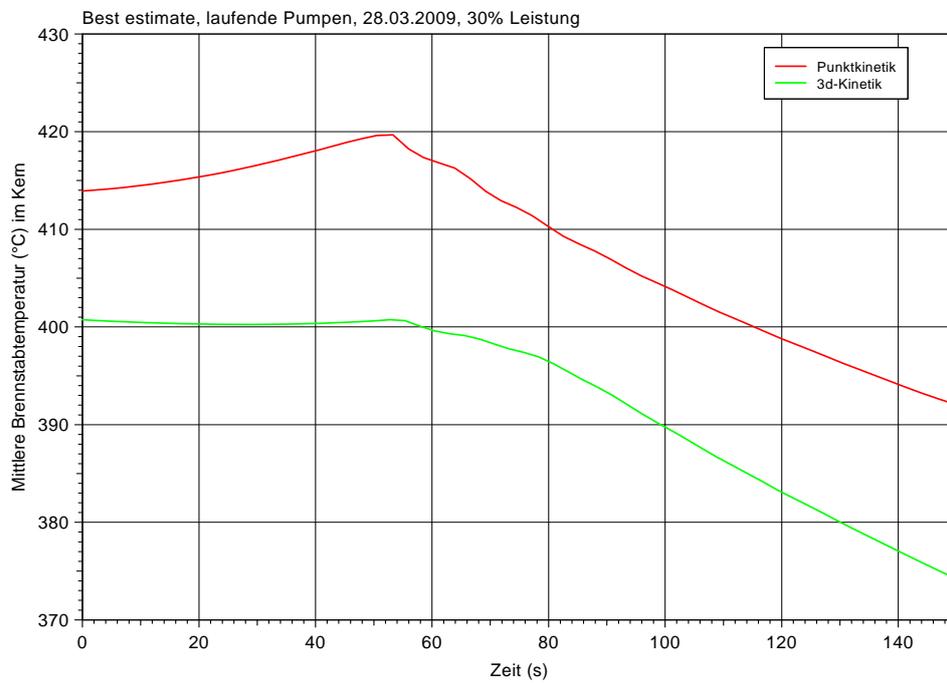


Bild 2-25 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur

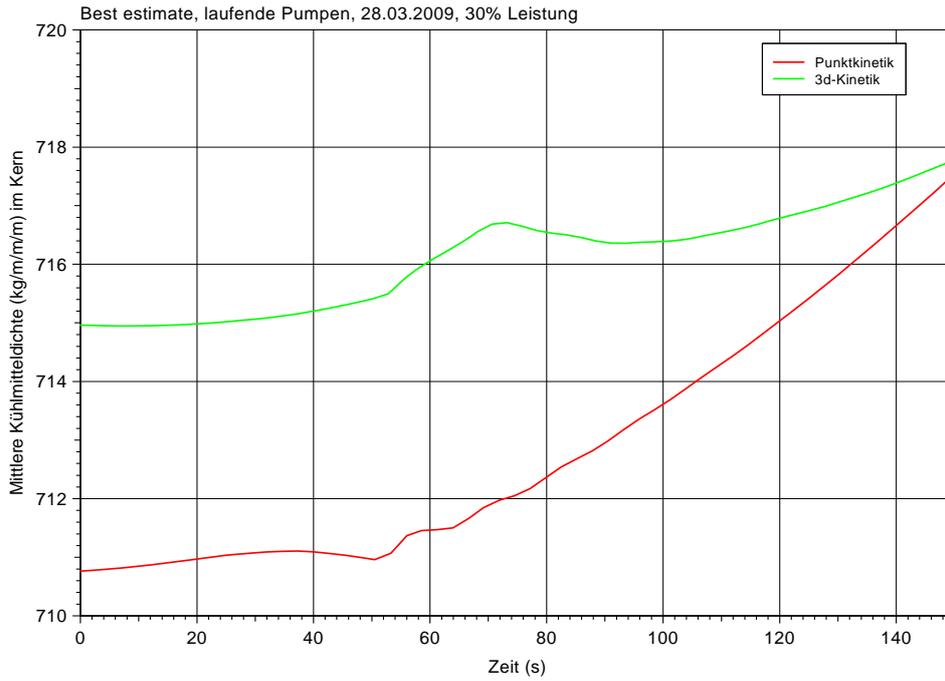


Bild 2-26 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

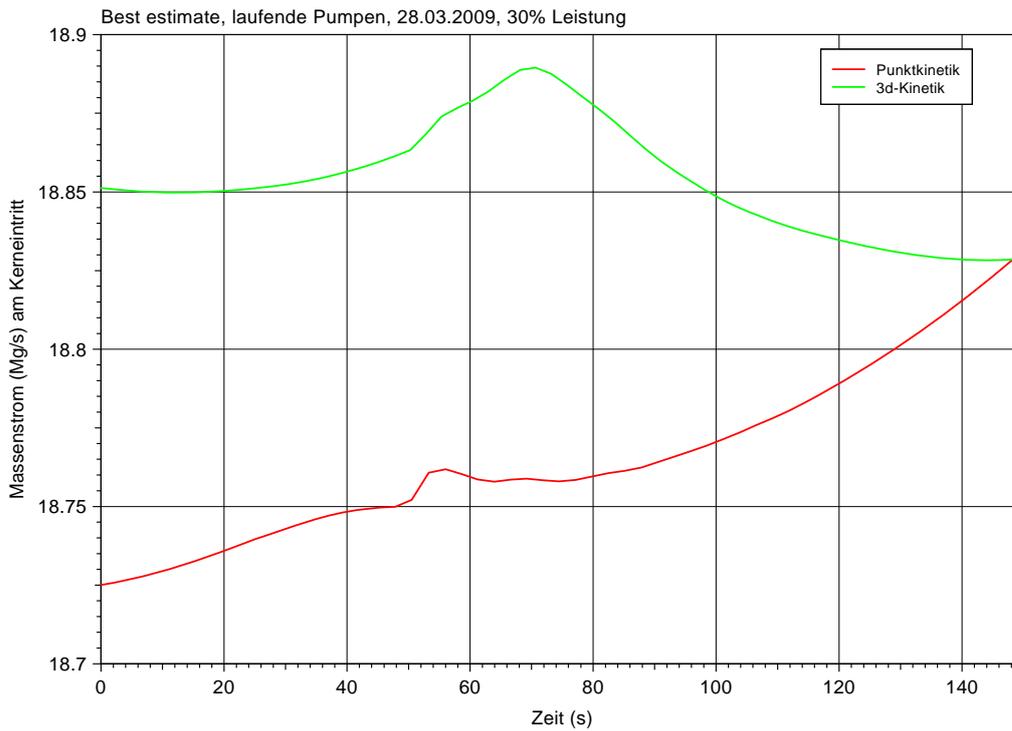


Bild 2-27 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Massenstrom

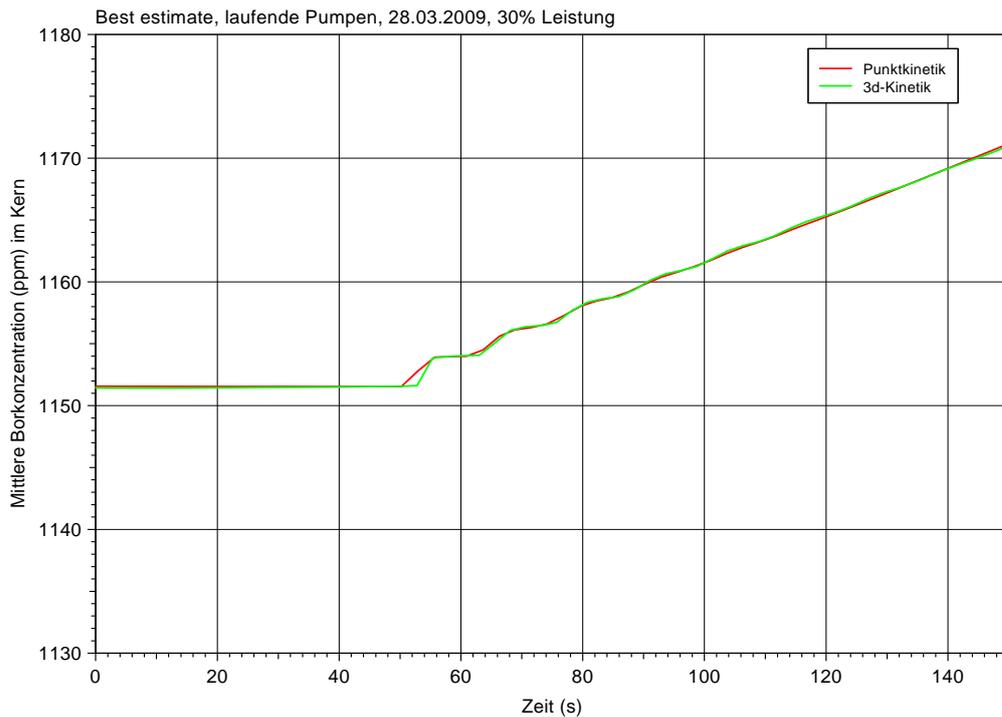


Bild 2-28 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration

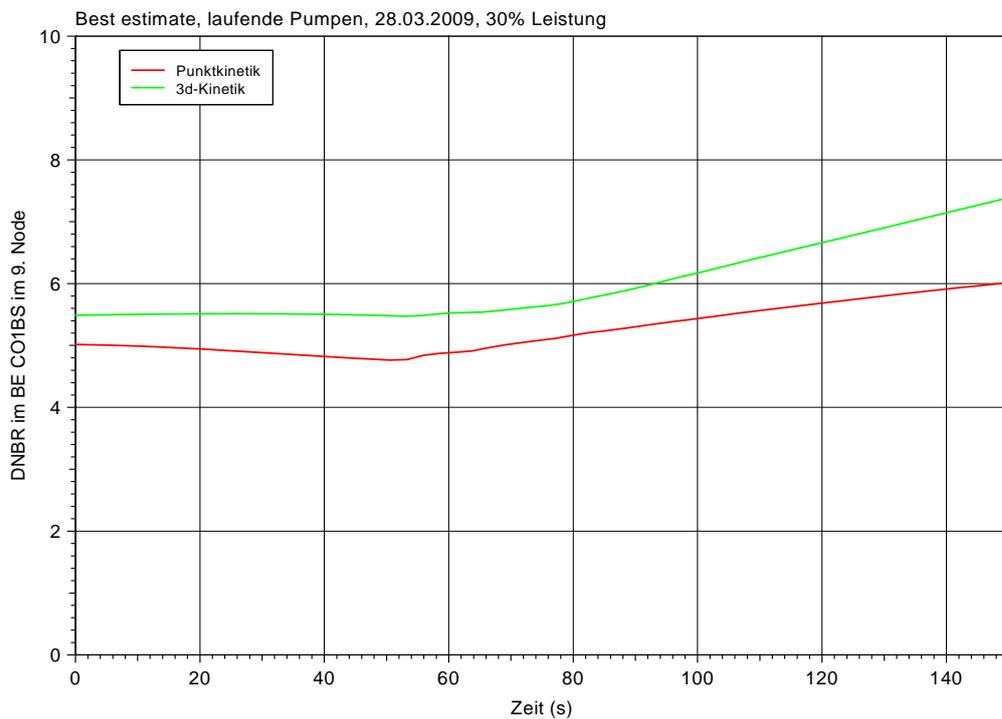


Bild 2-29 Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich DNBR

Zusammenfassung: Bei weiterlaufenden Hauptkühlmittelpumpen treten im Primärkreislauf keine unzulässigen Druckbelastungen bei 30 % der Nennlast auf. Auch das DNB-Verhältnis bleibt mit Werten von 4,8 und 5,5 (Punktkinetik bzw. 3D-Kineitk) weit

oberhalb kritischer Siedezustände. Tatsächlich sinkt das DNB-Verhältnis zu keinem Zeitpunkt während der Transiente unter den stationären Ausgangswert.

2.3 Ergebnisse der Analysen bei einer Reaktorleistung von 30 % mit Xenon-freien Kinetikdaten

2.3.1 Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen

Information zu den durchgeführten Rechnungen:

Punktkinetik:

- Borkonzentration: 1400 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- D=23,33 L1=375,67 L2=252,84 L3=24,22 L4=23,13 cm
- Name der Rechnung: p.spumoff31kon
- Datensatz: gkn_17konsmk-1.inp
- Beginn der Transiente: 3595 s

3D – Kinetik:

- Borkonzentration: 1400 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- D=139,52 L1=213,35 L2=140,37 L3=140,38 L4=120,62 cm
- Name der Rechnung: SMK-given-PWR-ATWS-16.07.2009\Atws30XeNo.B1400PoffZ2
- Beginn der Transiente: 2130 s

Die in den Bildern 2-30 bis 2-35 dargestellten Ergebnisse der Rechnungen mit Xenon-freier Rückwirkung unterscheiden sich wenig von den Ergebnissen der Rechnungen mit „Best-estimate“- Rückwirkungsdaten, d. h. im Xenongleichgewicht. Unterschiede im DNB-Ausgangswert ergeben sich vorrangig aus der Steuerstab-bedingten axialen Umverteilung der Leistung und einer zusätzlichen Aufborierung des Primärkreislaufs. Zur Reaktivitätsbindung des fehlenden Xenons muss die Borkonzentration im Kühlmittel in der Primärseite um etwa 250 ppm auf etwa 1400 ppm erhöht werden. Die Unterschie-

de der Rechnungen mit bzw. ohne Xenon werden im Abschnitt 2.3.3 mit Vergleichen in den Bildern 2-50 bis 2-64 beschrieben.

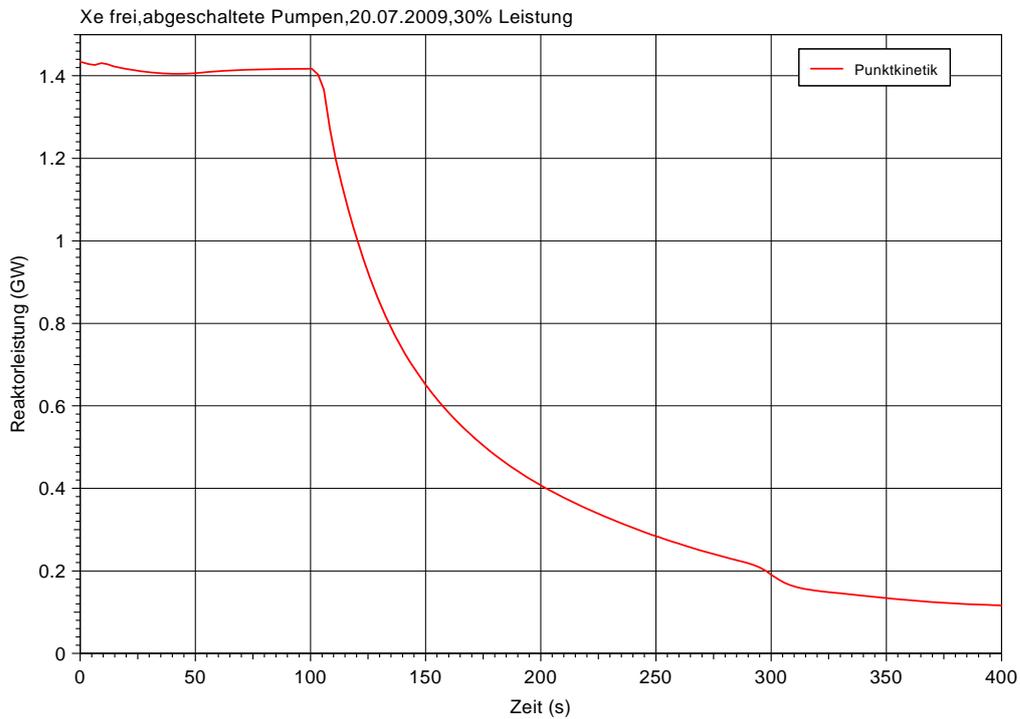


Bild 2-30 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung

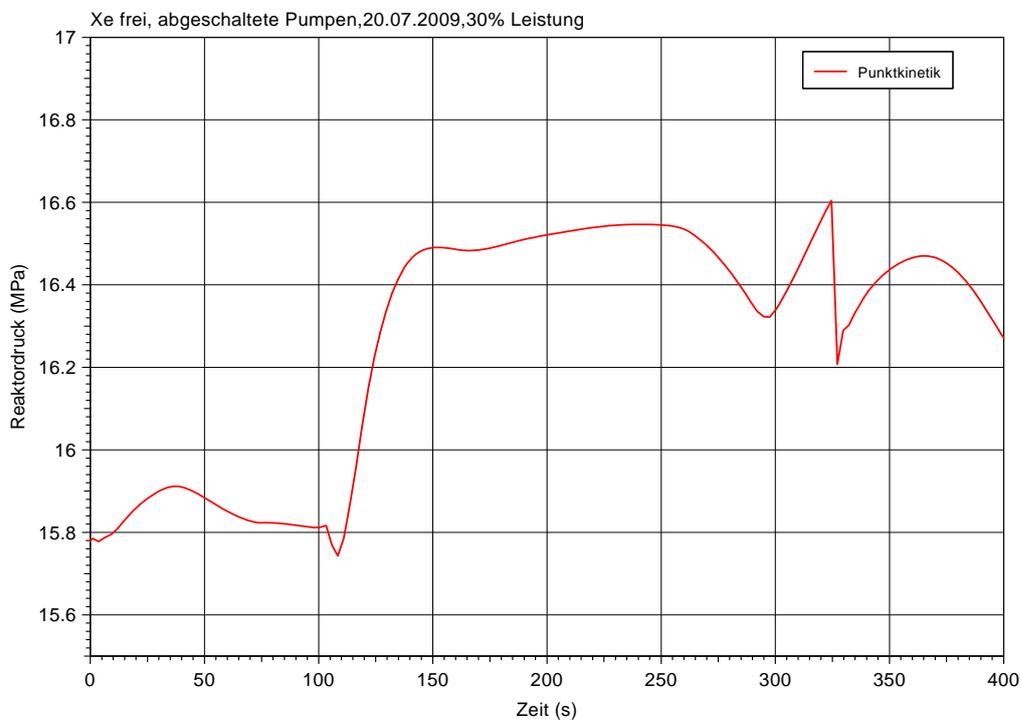


Bild 2-31 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck



Bild 2-32 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

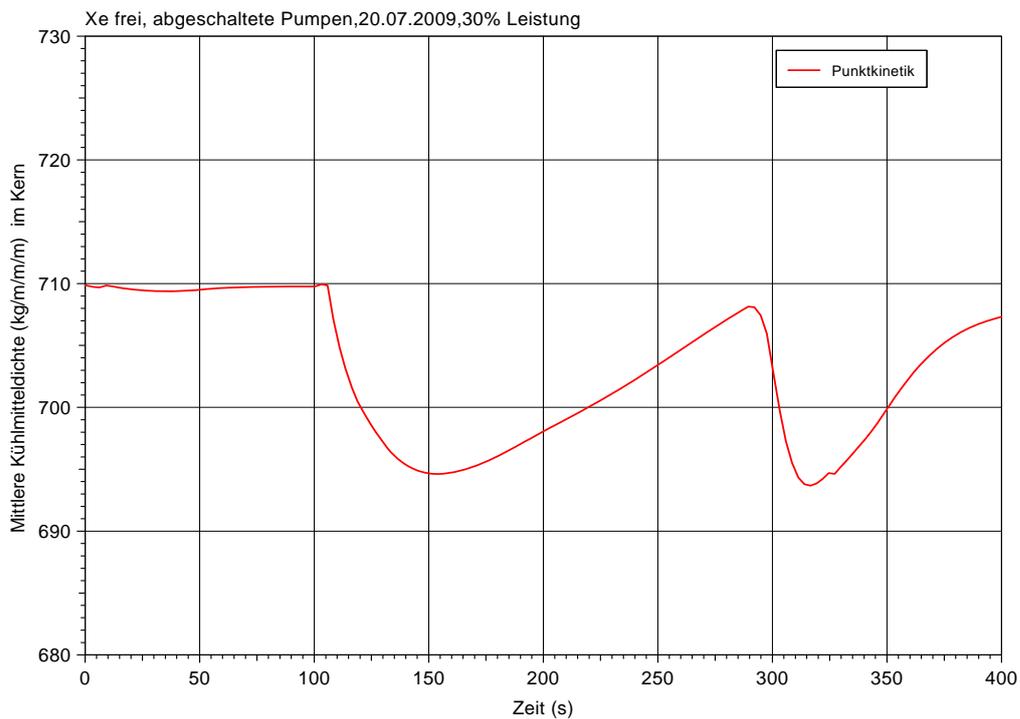


Bild 2-33 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

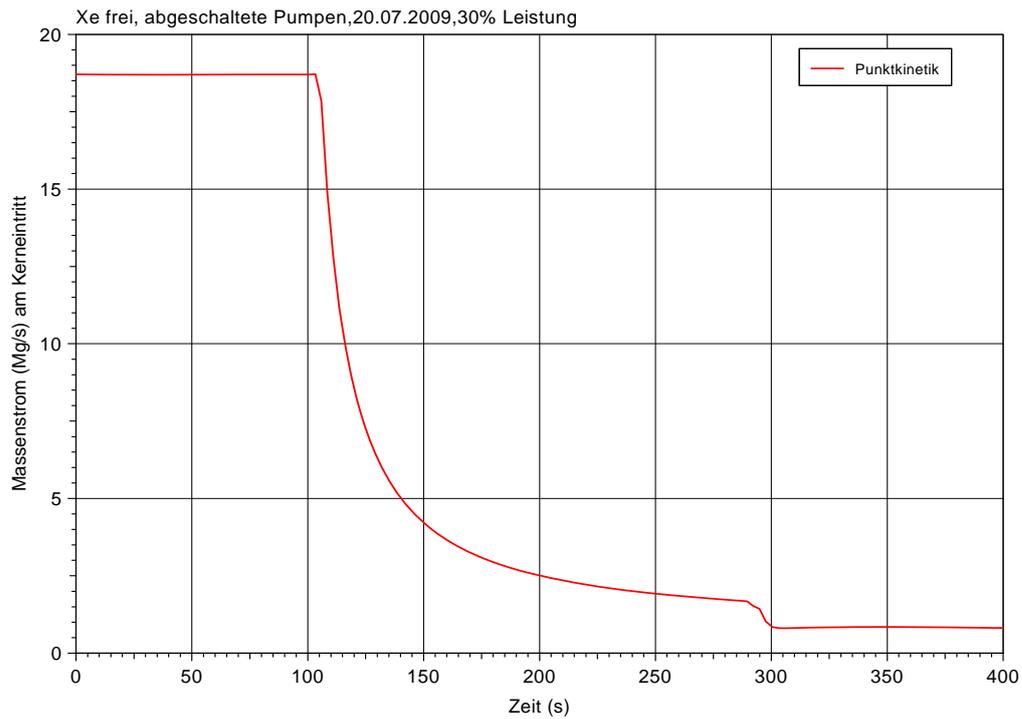


Bild 2-34 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom

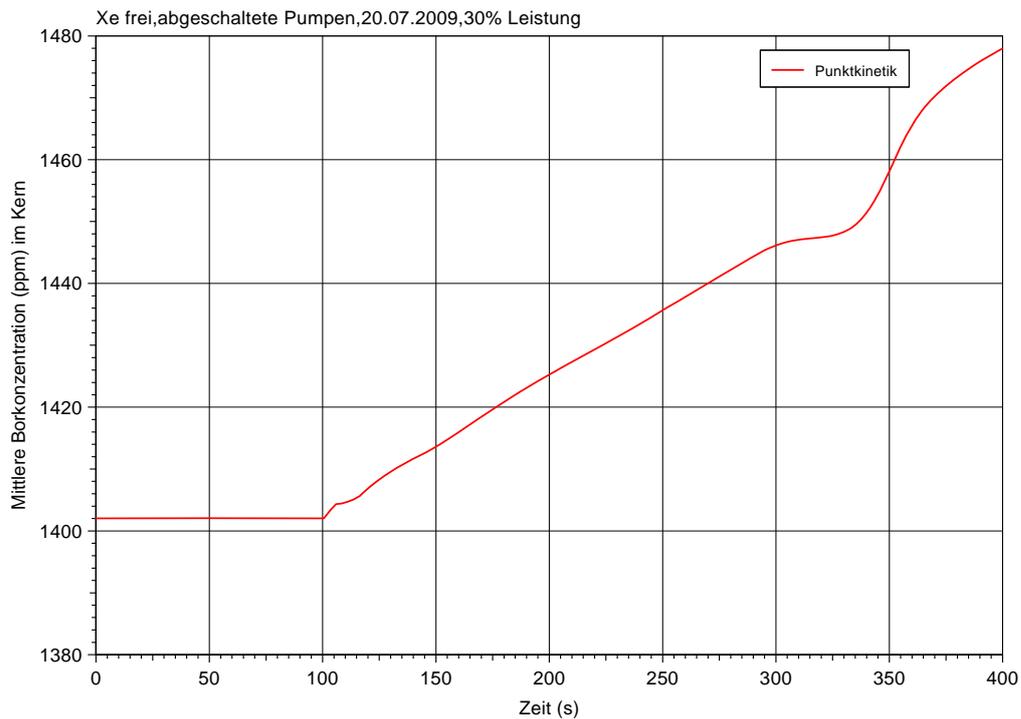


Bild 2-35 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Borkonzentration

2.3.2 Vergleich:Punktkinetik – 3D – Kinetik

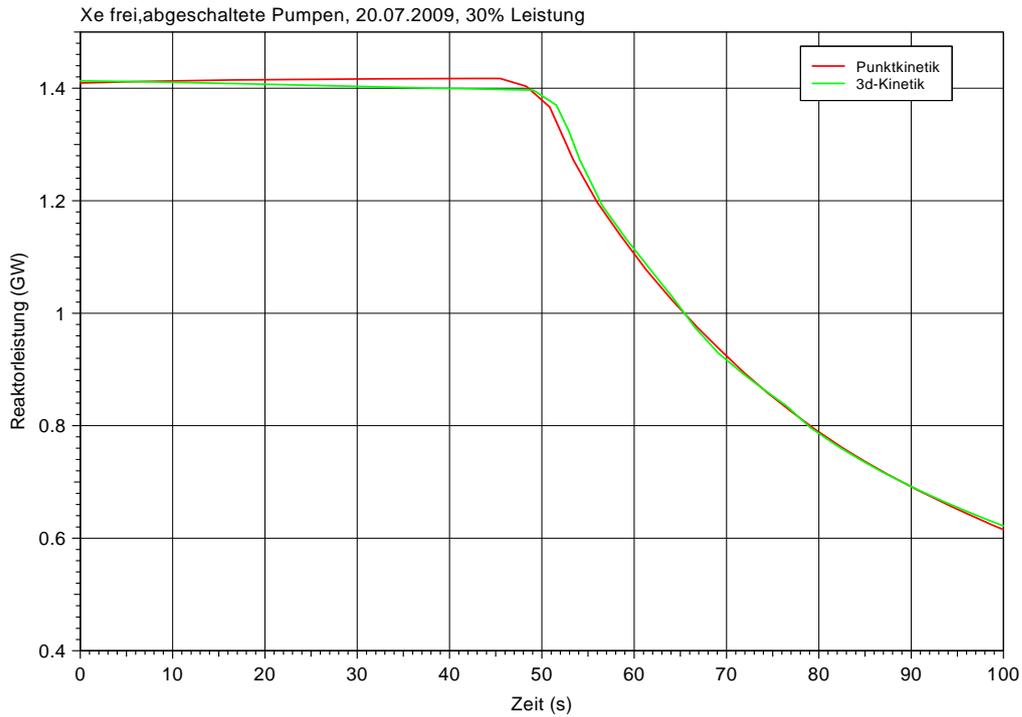


Bild 2-36 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung

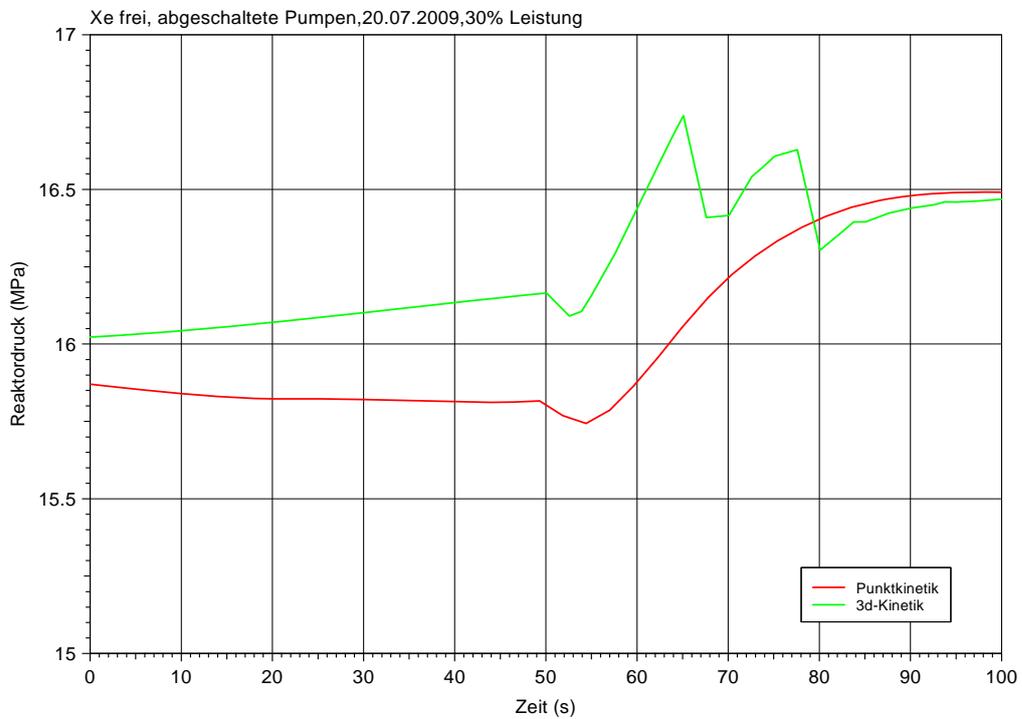


Bild 2-37 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktordruck

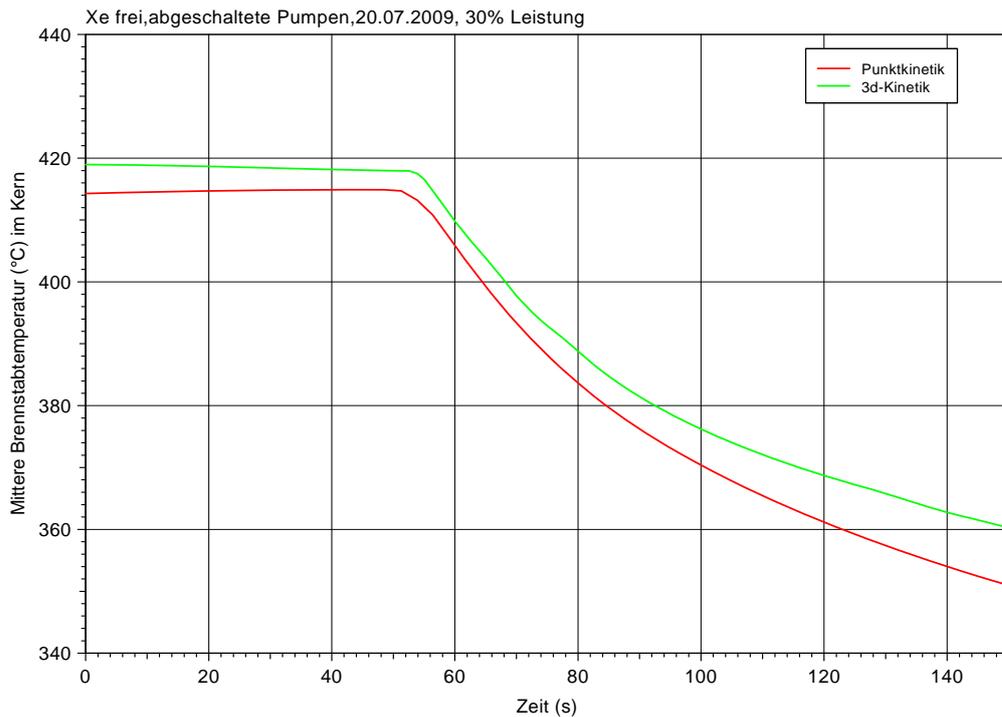


Bild 2-38 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur

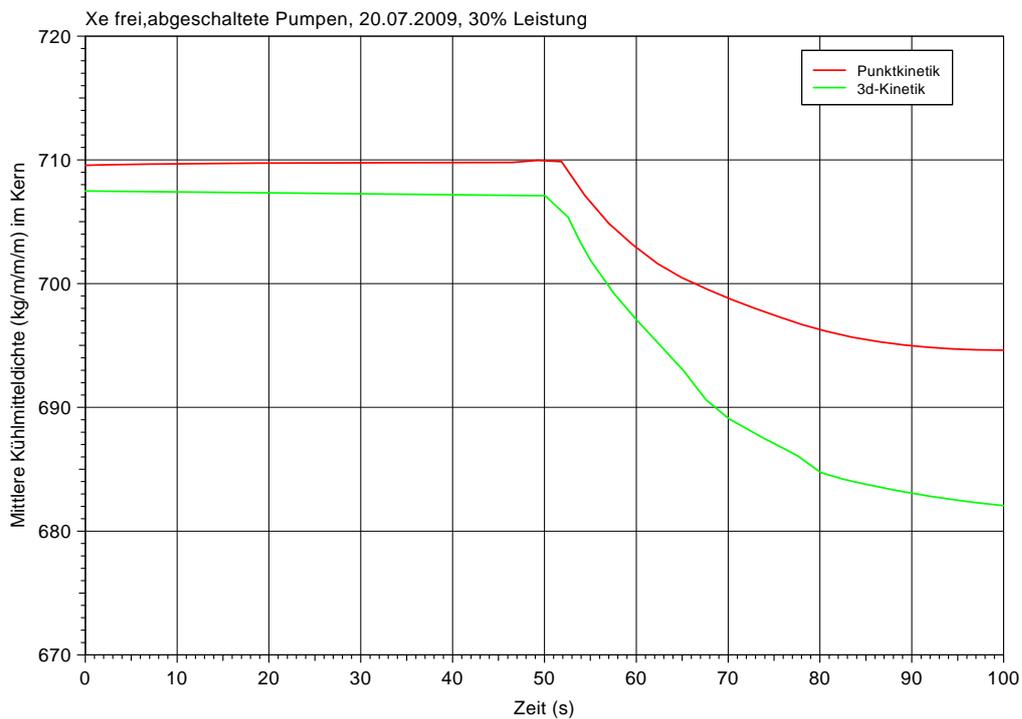


Bild 2-39 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte

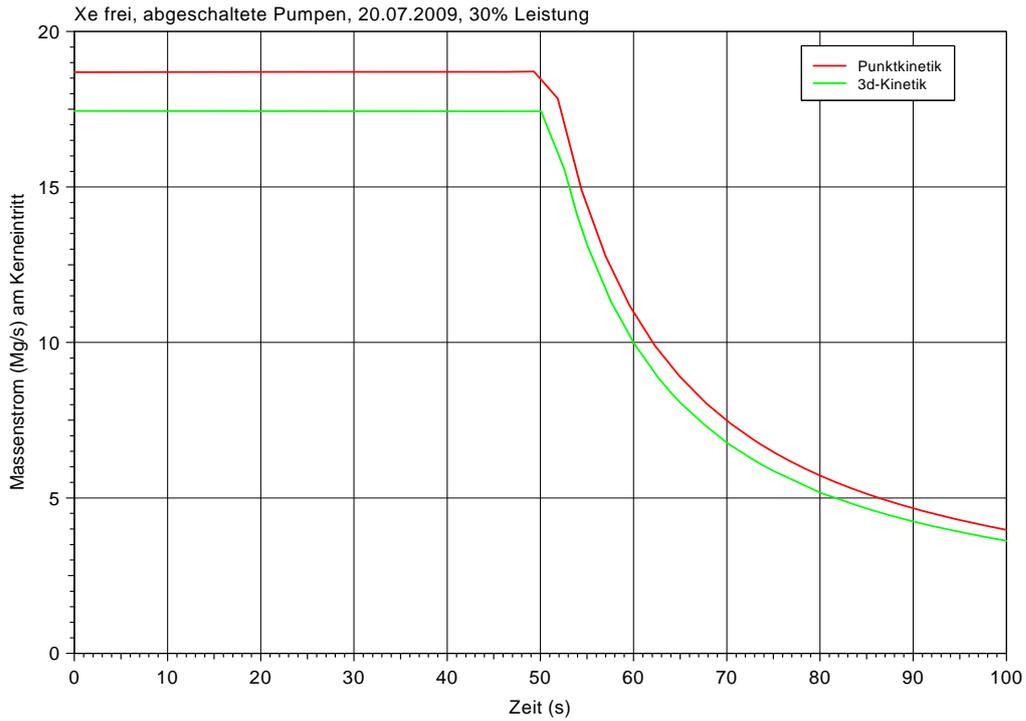


Bild 2-40 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Massenstrom

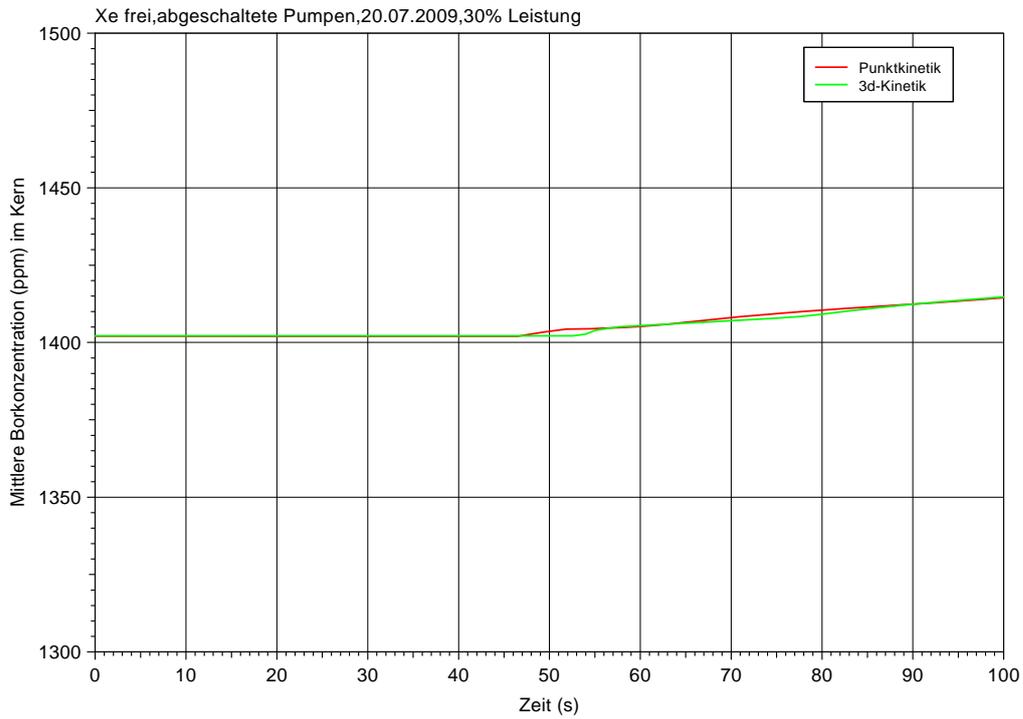


Bild 2-41 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration

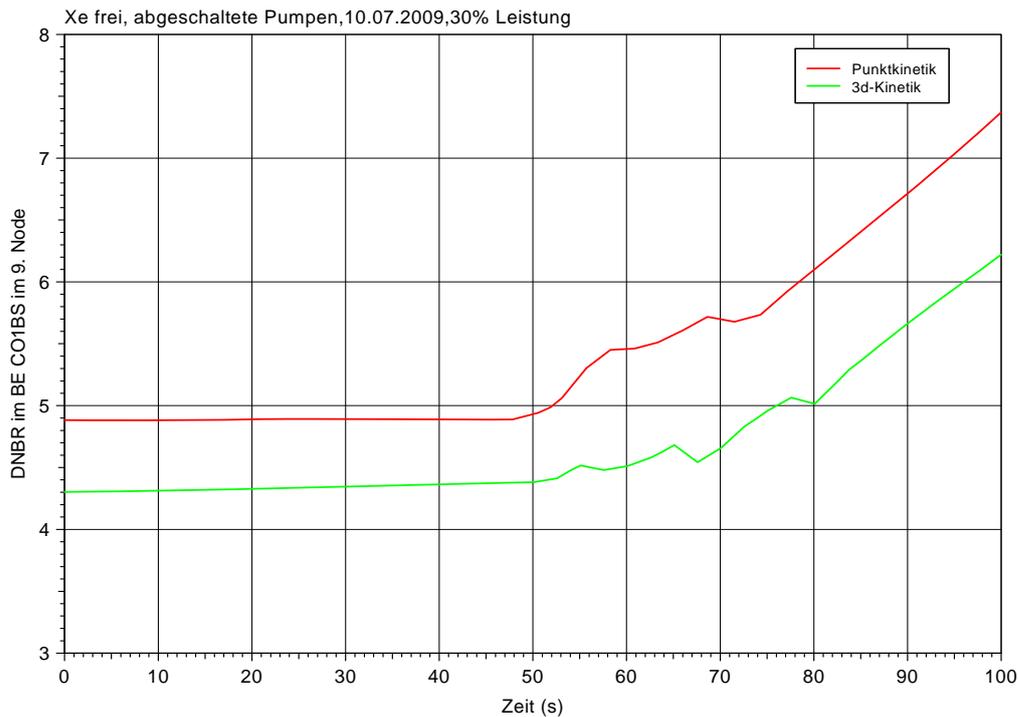


Bild 2-42 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich DNBR

Zusammenfassung:

Beim Vergleich der Ergebnisse der Punktkinetik- und der 3D-Kinetikrechnung fällt die gute Übereinstimmung beim Verlauf der Reaktorleistung, der mittleren Brennstab - und Kühlmitteltemperatur sowie der Borkonzentration auf; die entsprechenden Ergebnisse der Rechnungen sind in den Bildern 2-36 – 2-42 dargestellt. Allerdings steigt der Reaktordruck in der 3D-Kinetikrechnung um etwa 1,5 bar höher an. Das wirkt sich auf den Verlauf der Kühlmitteldichte und das DNB-Verhältnis aus. Für 30 % Nennlast im xenonfreien Zustand stellt sich derart der Fall ein, dass das DNB-Verhältnis für die 3D-Kinetik geringer ausfällt (4,38 gegenüber 4,97 für Punktkinetik). Aber auch hier gilt, dass das DNB-Verhältnis während der Transiente nicht unter den stationären Ausgangswert sinkt. Die Unterschiede im minimalen DNB-Verhältnis für die Vergleiche von Xenon-Gleichgewicht mit Xenon-freien-Rückwirkungen sind also nicht so sehr im unterschiedlichen dynamischen Rückwirkungsverhalten des Reaktors zu suchen, sondern vielmehr in den unterschiedlichen radialen und axialen Leistungsdichteprofilen im stationären Ausgangszustand.

2.3.3 Transientenverlauf mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen

Information zu den durchgeführten Rechnungen:

Punktkinetik

- Borkonzentration: 1400 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- D=20,19 L1=382,12 L2=281,91 L3=21,04 L4=17,50
- Name der Rechnung: p.spumon31kon
- Datensatz:gkn2_17konsmkon-1on.inp
- Beginn der Transiente: 3595 s

3D – Kinetik

- Borkonzentration: 1400 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- D=139,52 L1=213,35 L2=140,37 L3=140,38 L4=120,62 cm
- Name der Rechnung:SMK-given-PWR-ATWS-XE-frei-17.7.2009\ATWS30.XENo.B1400PonZ2
- Beginn der Transiente: 2030 s

Die Ergebnisse der Rechnungen mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen unterscheiden sich ebenfalls nur geringfügig in den beiden Rückwirkungsbehandlungen. Die Unterschiede werden ebenfalls im Abschnitt 2.3.4 verglichen. Die Ergebnisse zu den Rechnungen mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen sind in den Bildern 2-43 bis 2-48 dargestellt.

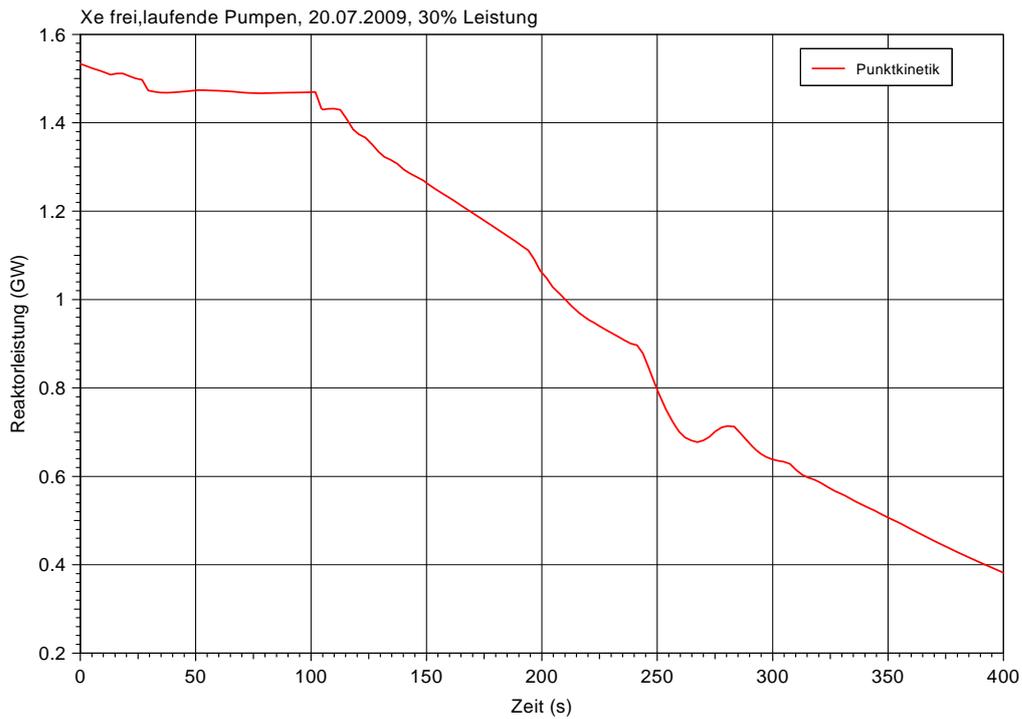


Bild 2-43 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung

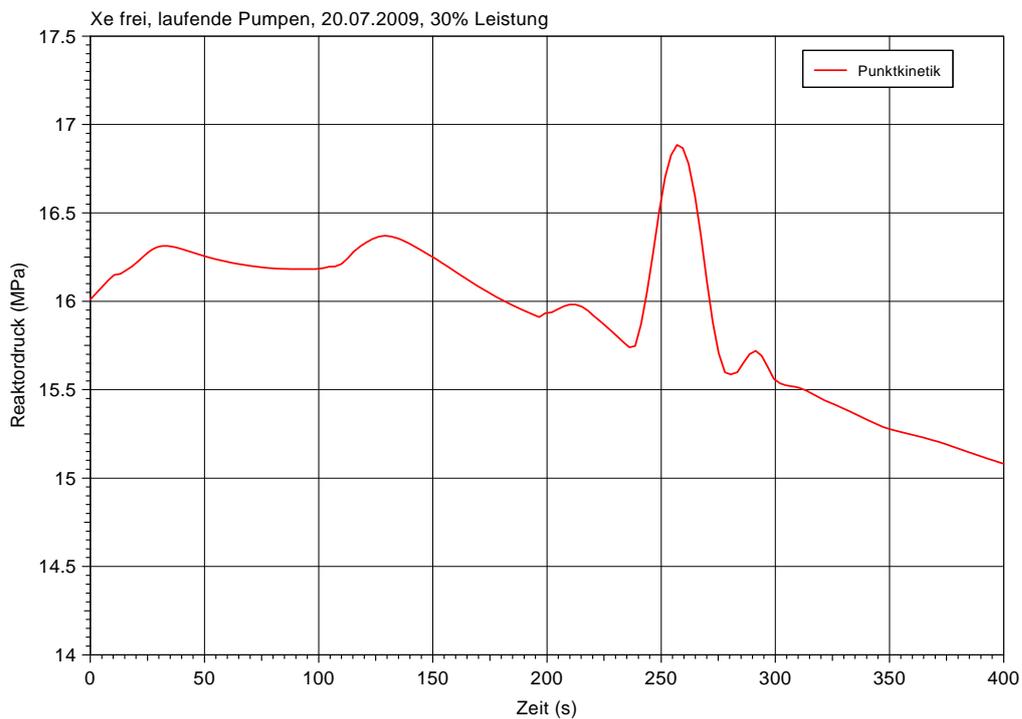


Bild 2-44 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck

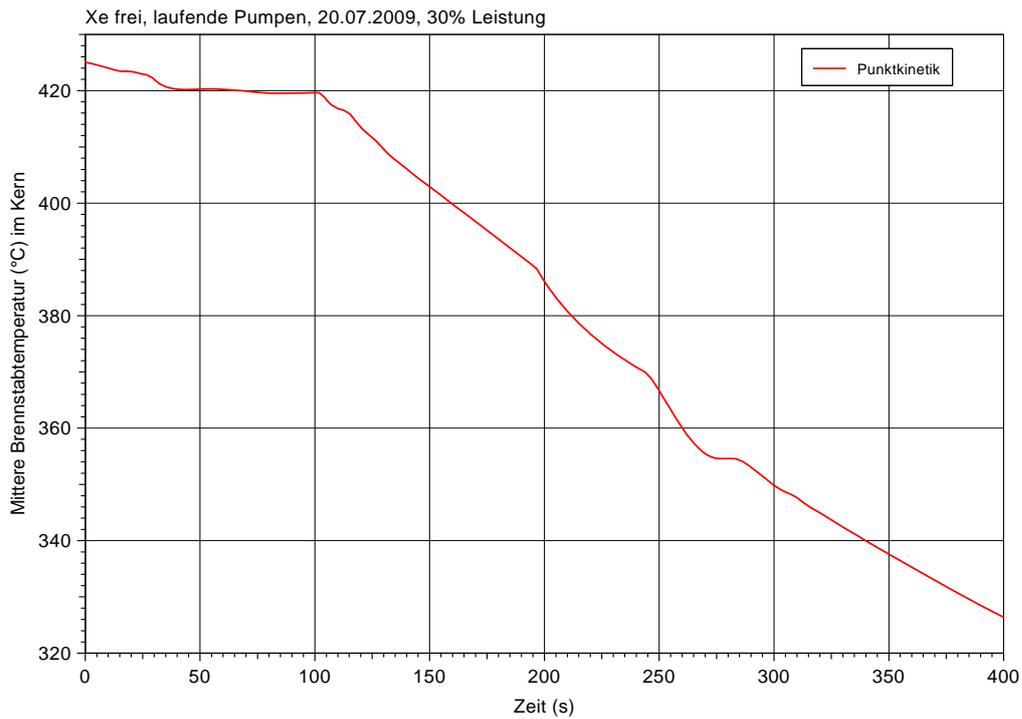


Bild 2-45 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

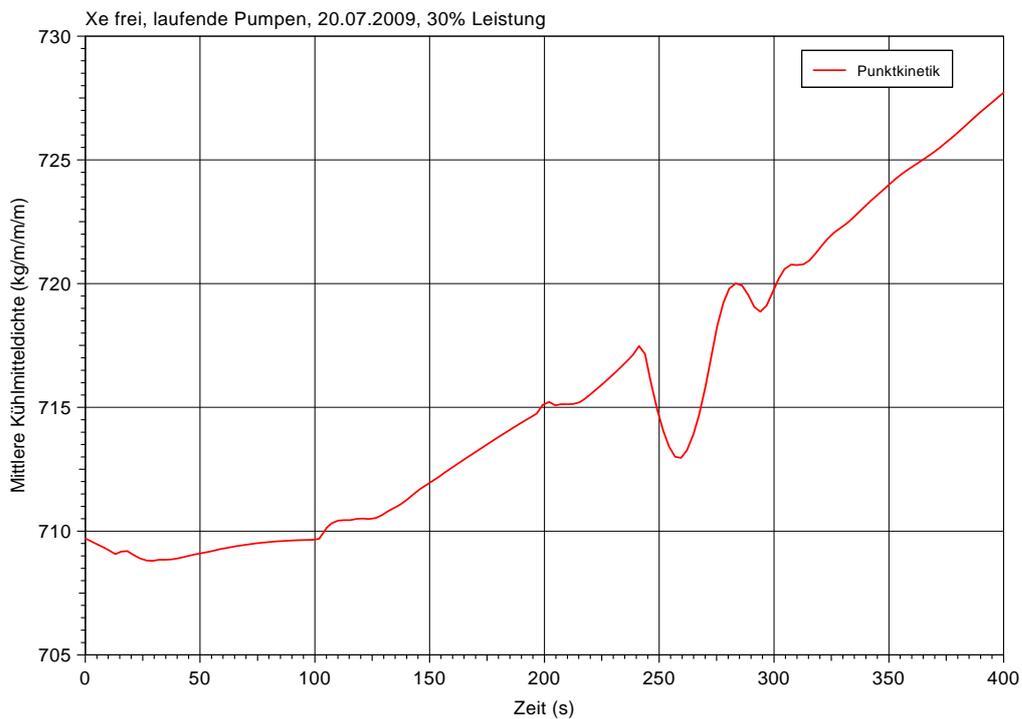


Bild 2-46 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

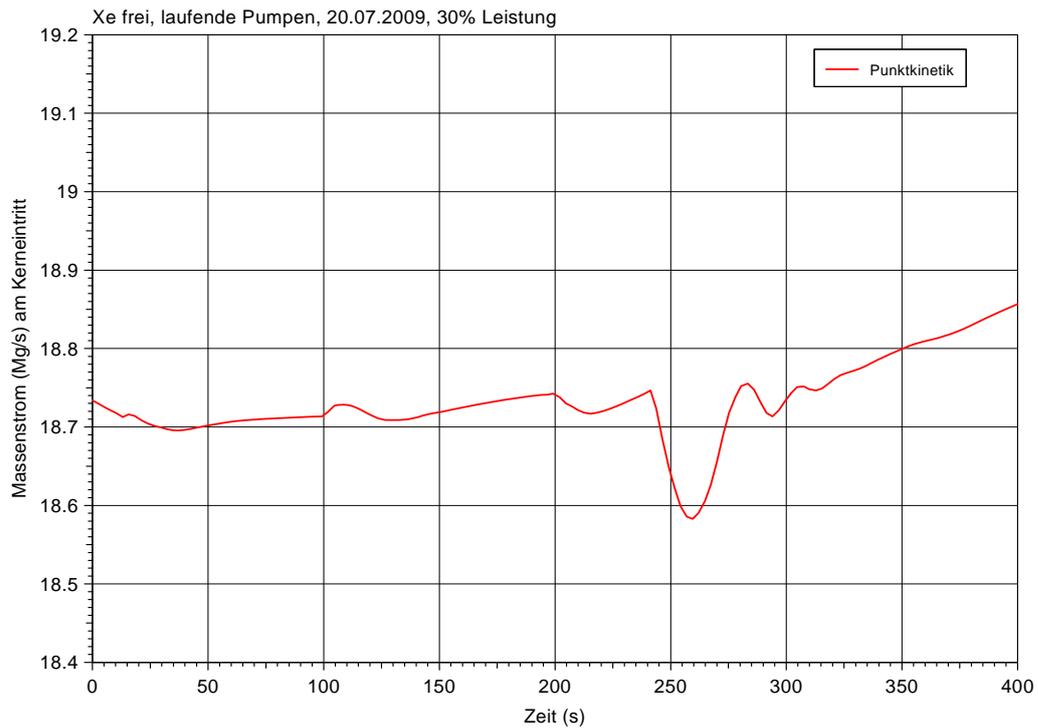


Bild 2-47 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom

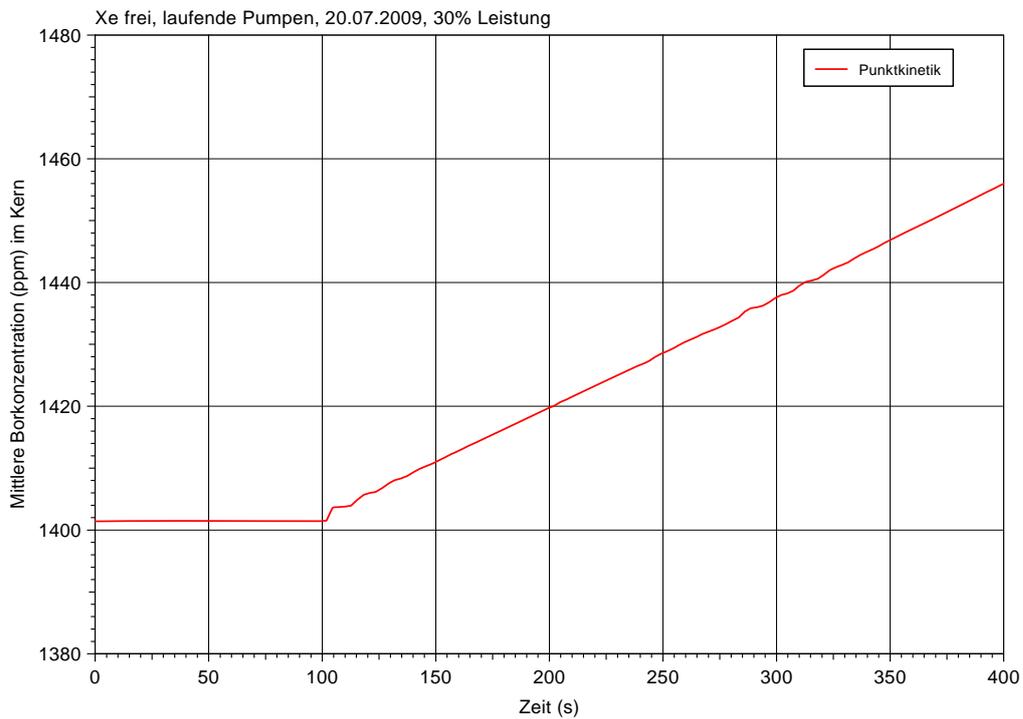


Bild 2-48 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Borkonzentration

2.3.4 Vergleich Punktkinetik und 3D-Kinetik

Der Vergleich der Ergebnisse der Punktkinetik- und der 3D-Kinetikrechnung wird in den Bildern 2-49 bis 2-55 gezeigt. Auch hier herrscht recht gute Übereinstimmung beim Verlauf der Reaktorleistung, der mittleren Brennstab - und Kühlmitteltemperatur sowie der Borkonzentration. Der Reaktordruck steigt in der 3D-Kinetikrechnung um etwa 3 bar höher an. Das wirkt sich auf den Verlauf der Kühlmitteldichte und der DNBR aus. Für die 3D-Kinetik ergibt sich ein minimales DNB-Verhältnis von 4,21, für die Punktkinetik ein Wert von 4,89. Auch hierfür sind primär die unterschiedlichen Ausgangsleistungsprofile von Punktkinetik und 3D-Kinetik verantwortlich.

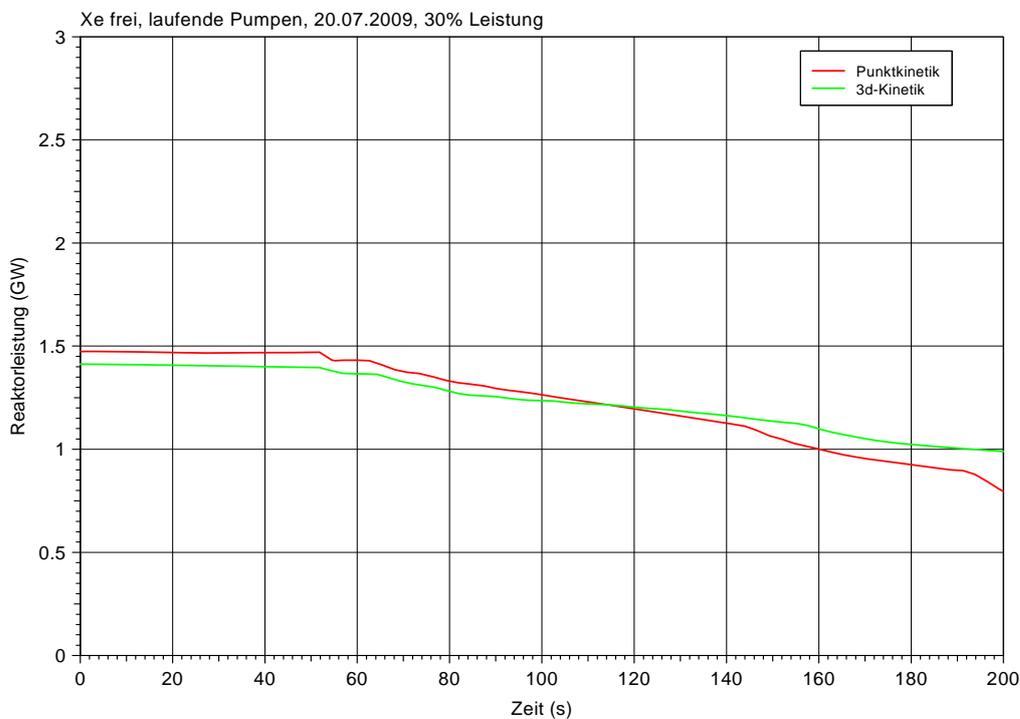


Bild 2-49 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung

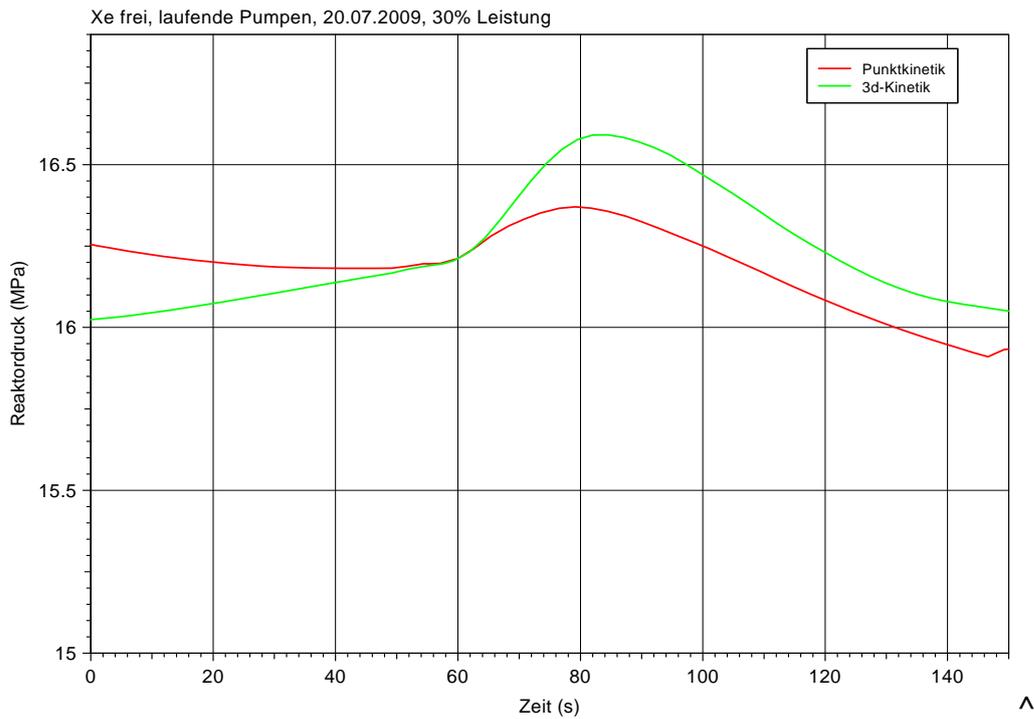


Bild 2-50 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktordruck

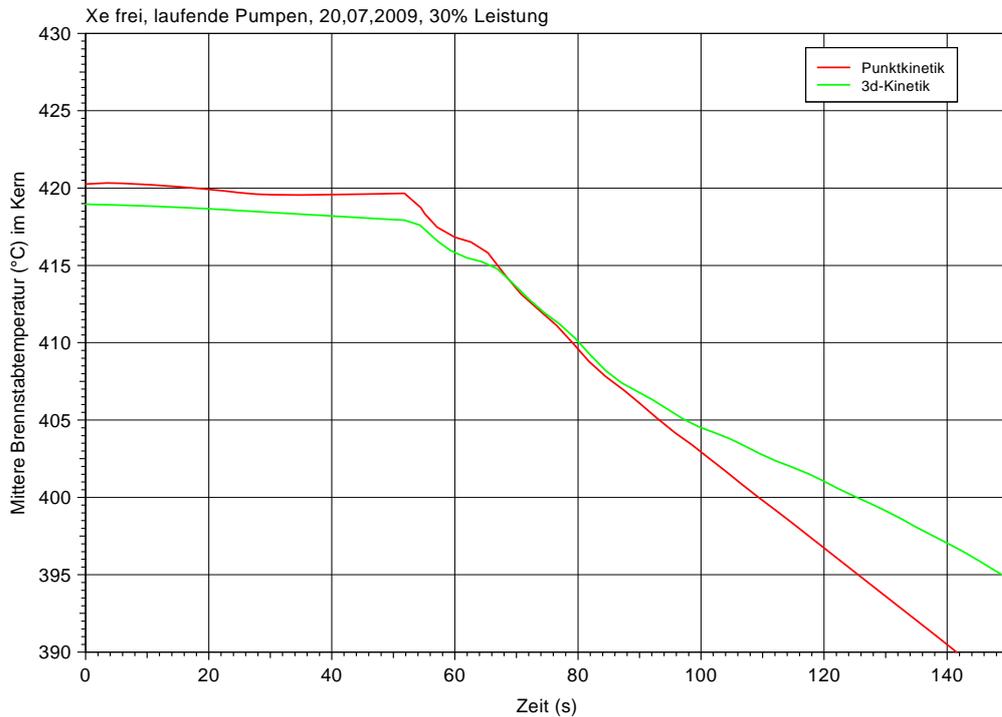


Bild 2-51 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur

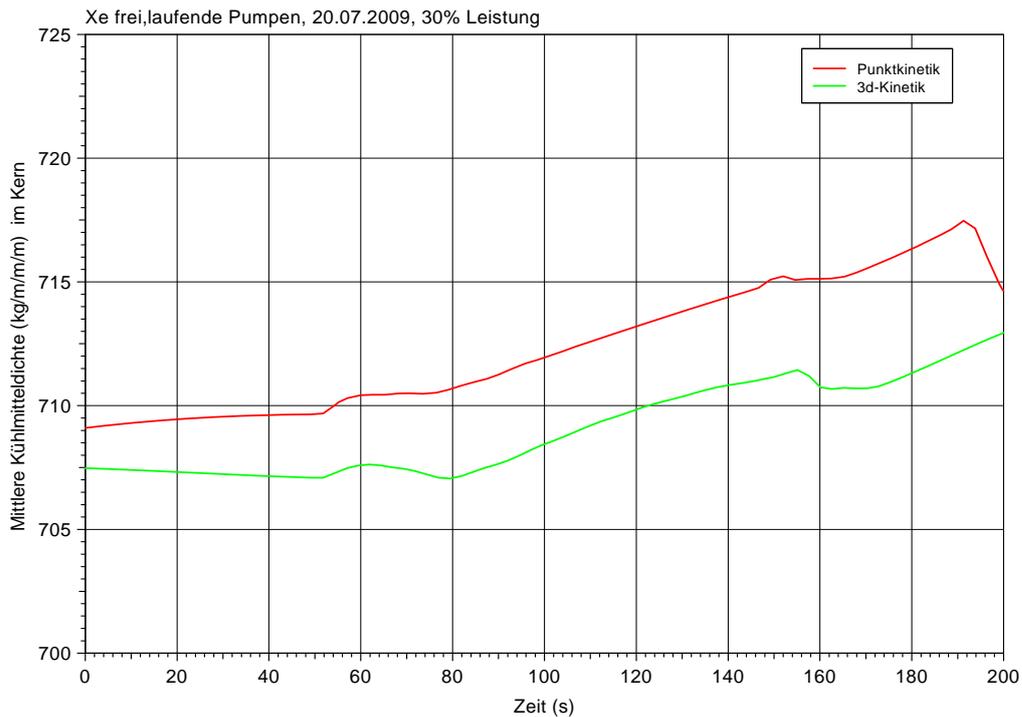


Bild 2-52 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte

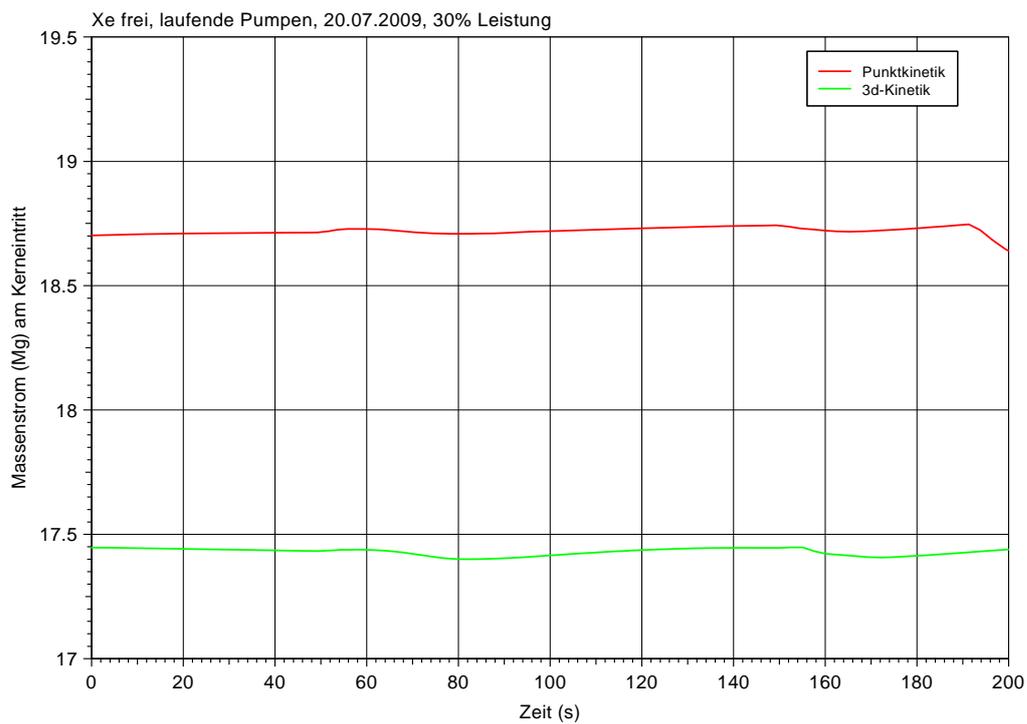


Bild 2-53 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Massenstrom

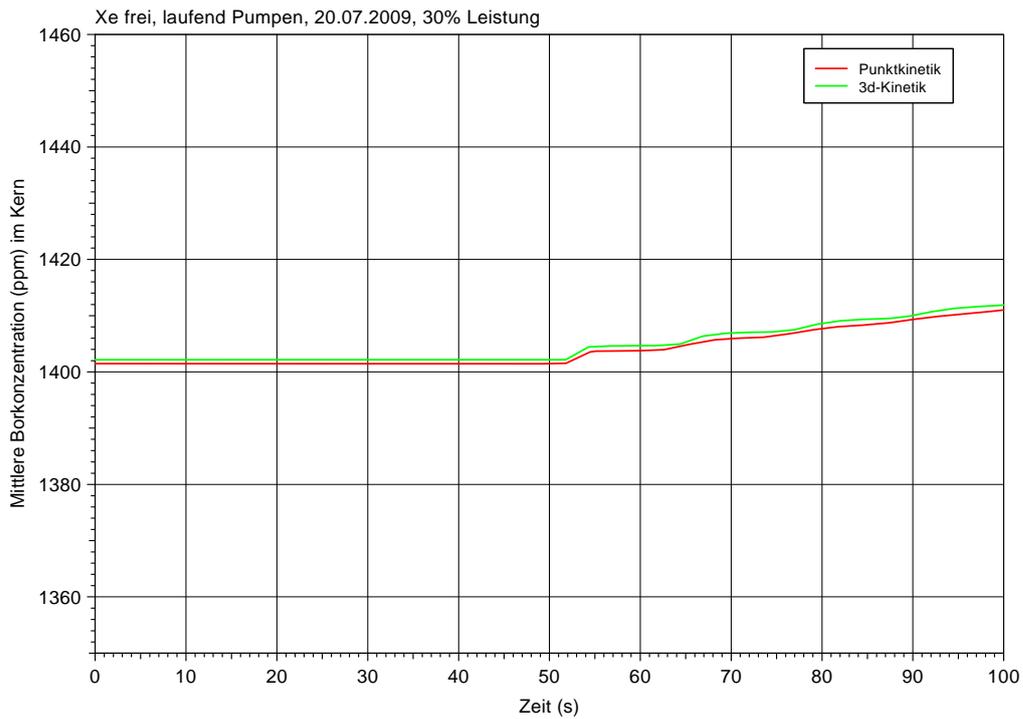


Bild 2-54 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration

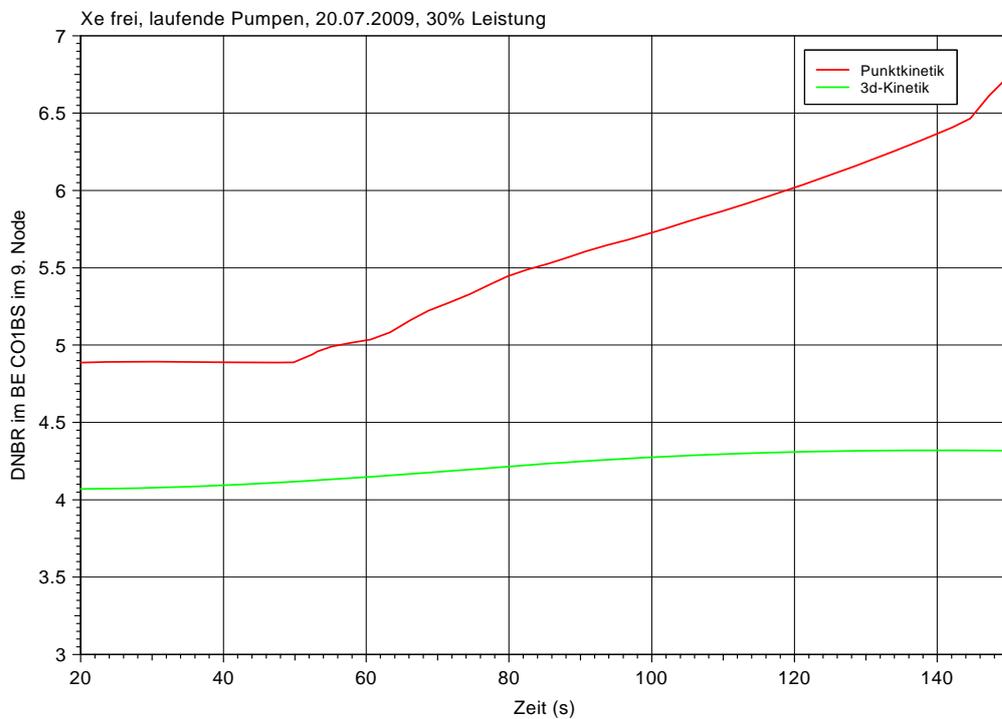


Bild 2-55 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich DNBR

2.4 Vergleich der Transientenverläufe mit „Best-Estimate“ und Xenonfreier Rückwirkung

2.4.1 Vergleiche der Transientenverläufe mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen

Der Vergleich der Rechnungen mit unterschiedlichem Rückwirkungsverhalten, „Best-Estimate“ (d.h. Xenongleichgewicht) und xenonfrei, ist in den Bildern 2-56 bis 2-70 für einen Zeitbereich von 900 s dargestellt. Die Ergebnisse der Rechnungen mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen zeigen gute Übereinstimmung im Verlauf der Reaktorleistung, der Brennstabtemperatur, des Massenstromes, der Kühlmitteldichte und des DNB-Verhältnisses.

Der Druckverlauf ist unterschiedlich und in beiden Fällen durch einen zweimaligen Anstieg gekennzeichnet. Zusätzlich kommt es in der Rechnung mit der xenonfreien Kinetikrechnung zum zweimaligen Öffnen der Druckhalterventile. Der Massenstrom durch die Abblase- und Sicherheitsventile ist im Bild 2-58 dargestellt. Nach dem Druckanstieg zu Beginn der Transiente bleibt der Druck in der xenonfreien Rechnung etwa 3 bar höher. Zwischen 400 s und 750 s ergeben sich für den Druck in der xenonfreien Rechnung etwa 3 bar niedrigere Werte als in der „Best-Estimate“-Rechnung.

Der höhere Druck in der xenonfreien Rechnung führt zu einer höheren Kühlmitteltemperatur. Ebenso haben die beiden Druckanstiege zu Beginn der Transiente und bei etwa 350 s einen Anstieg der Kühlmitteltemperatur zur Folge. Dieser Temperaturanstieg ist mit einer Volumenvergrößerung verbunden, durch die die mittlere Kühlmitteldichte sinkt. Das DNB-Verhältnis ist in der Rechnung mit xenonfreier Rückwirkung etwas geringer, da der Reaktordruck geringer ist. Daraus lässt sich aber keine generelle Aussage formulieren, dass ein xenonfreier Zustand a priori zu ungünstigeren Kühlungsbedingungen im Kern führt. Vielmehr werden die Ergebnisse schon durch den Anfangszustand beeinflusst, in dem das axiale Leistungsprofil des xenonfreien Zustands sich signifikant von dem Leistungsprofil des nominellen Zustands, d.h. im Xenongleichgewicht unterscheidet.

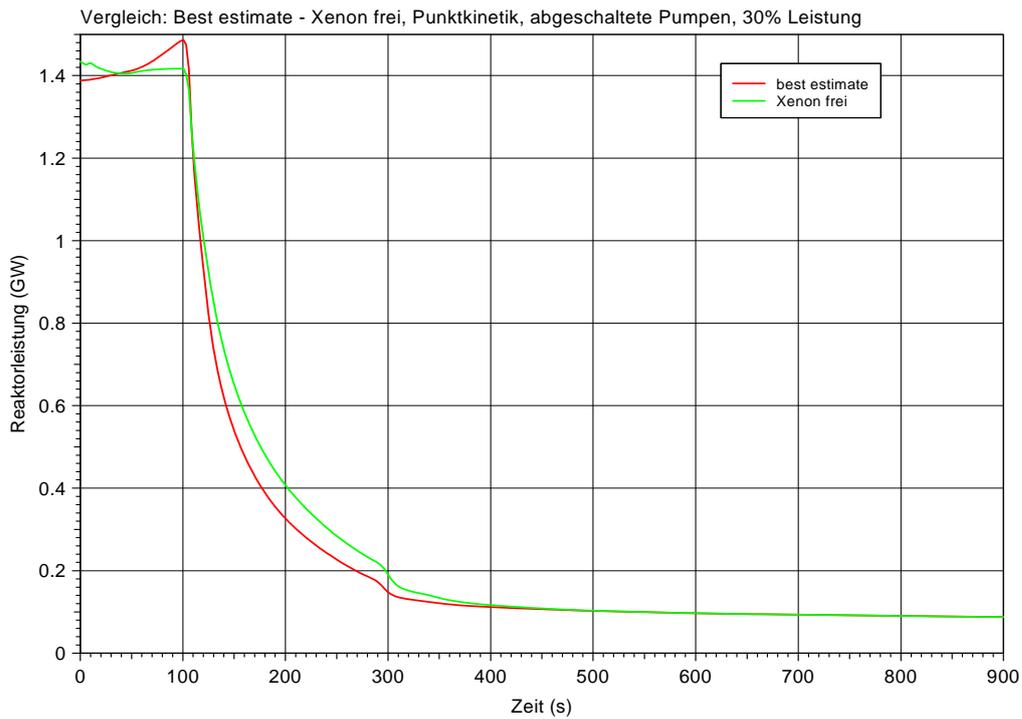


Bild 2-56 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung

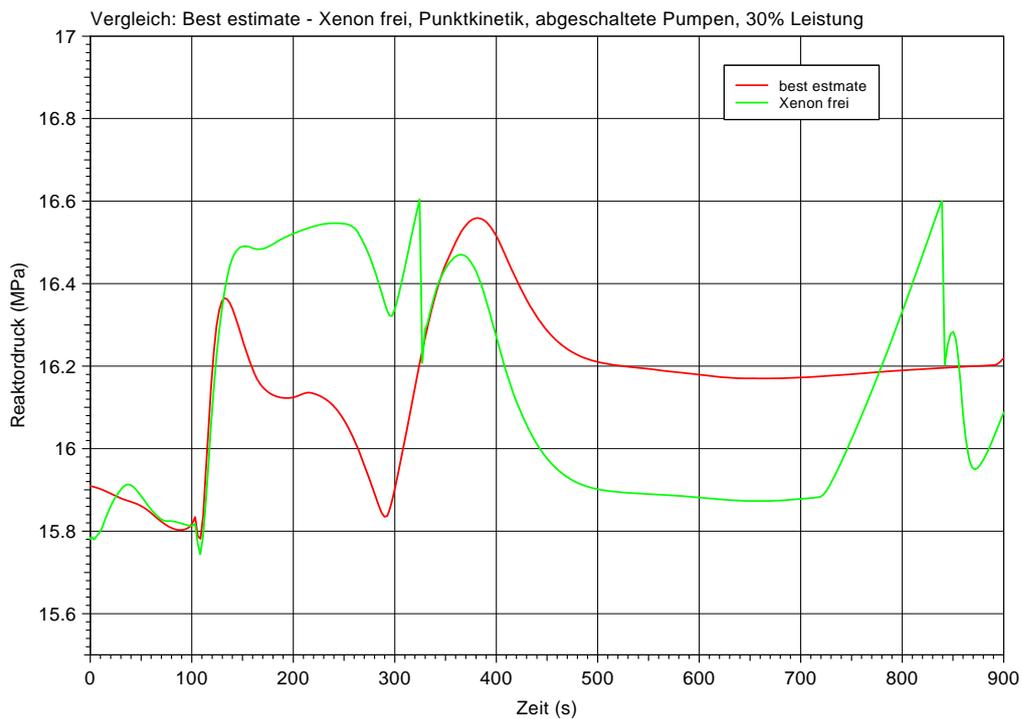


Bild 2-57 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck

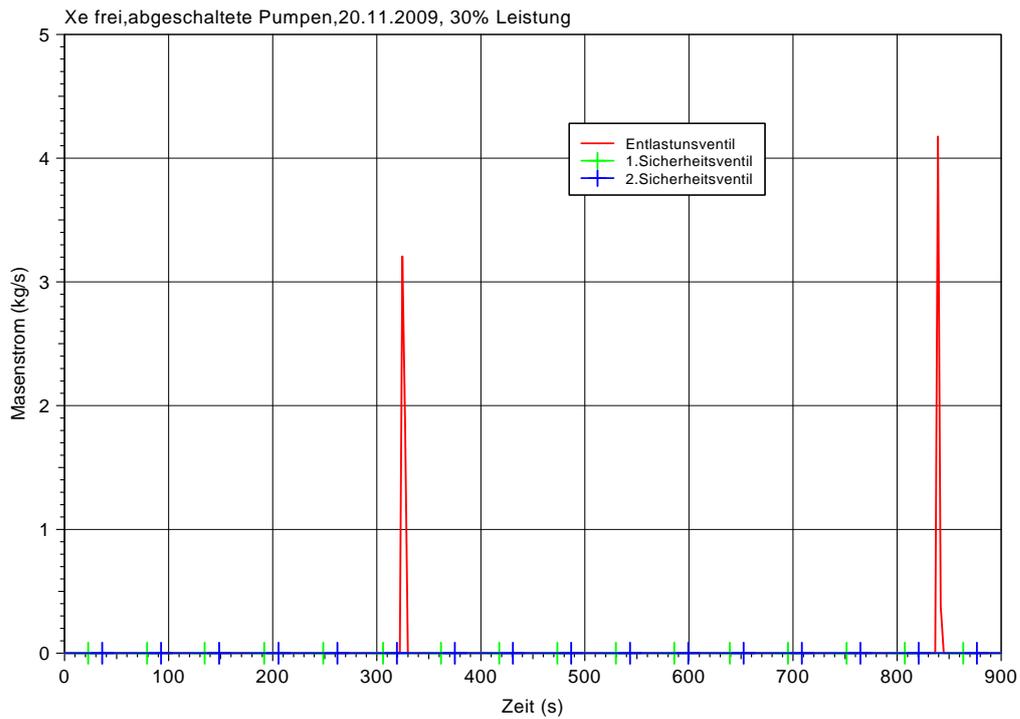


Bild 2-58 Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom durch die Abblase- und Sicherheitsventile

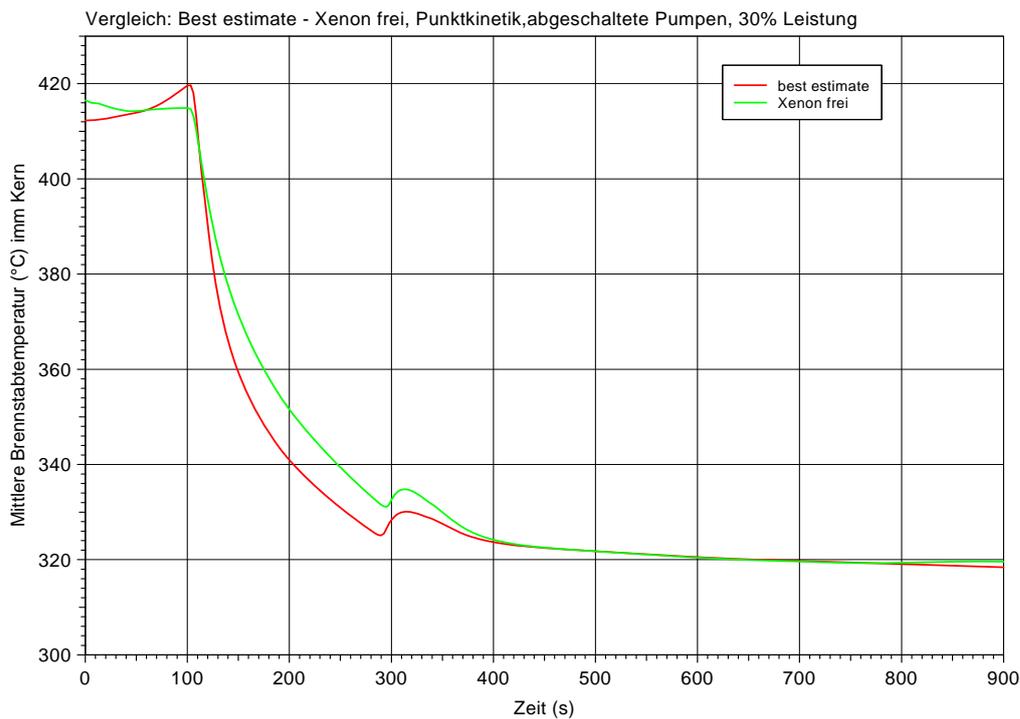


Bild 2-59 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

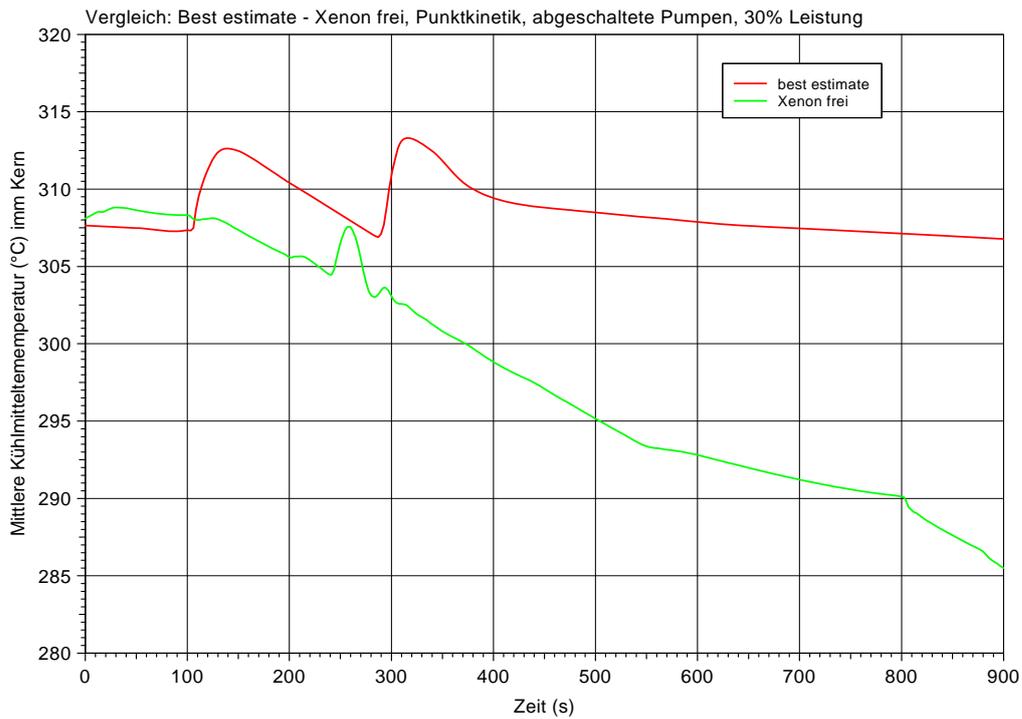


Bild 2-60 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteltemperatur

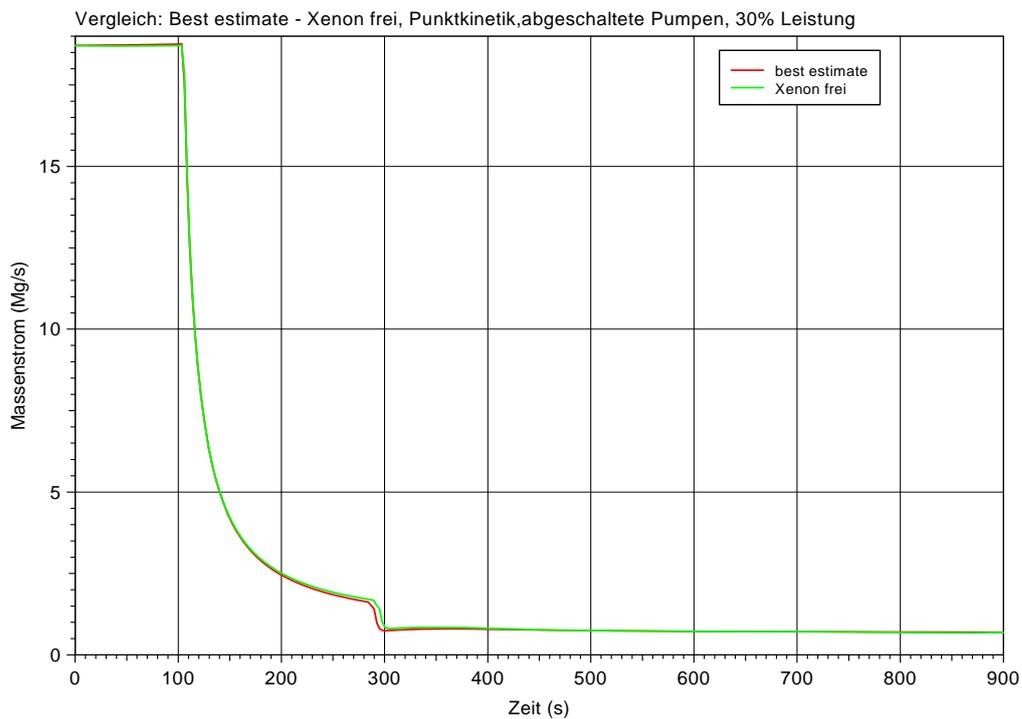


Bild 2-61 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom

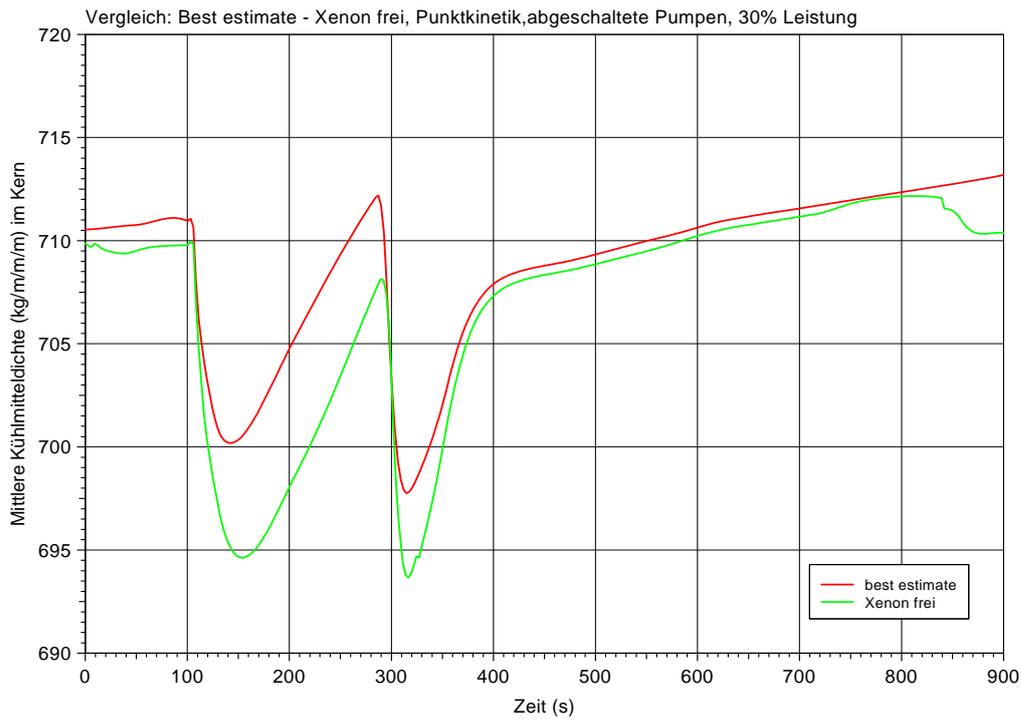


Bild 2-62 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

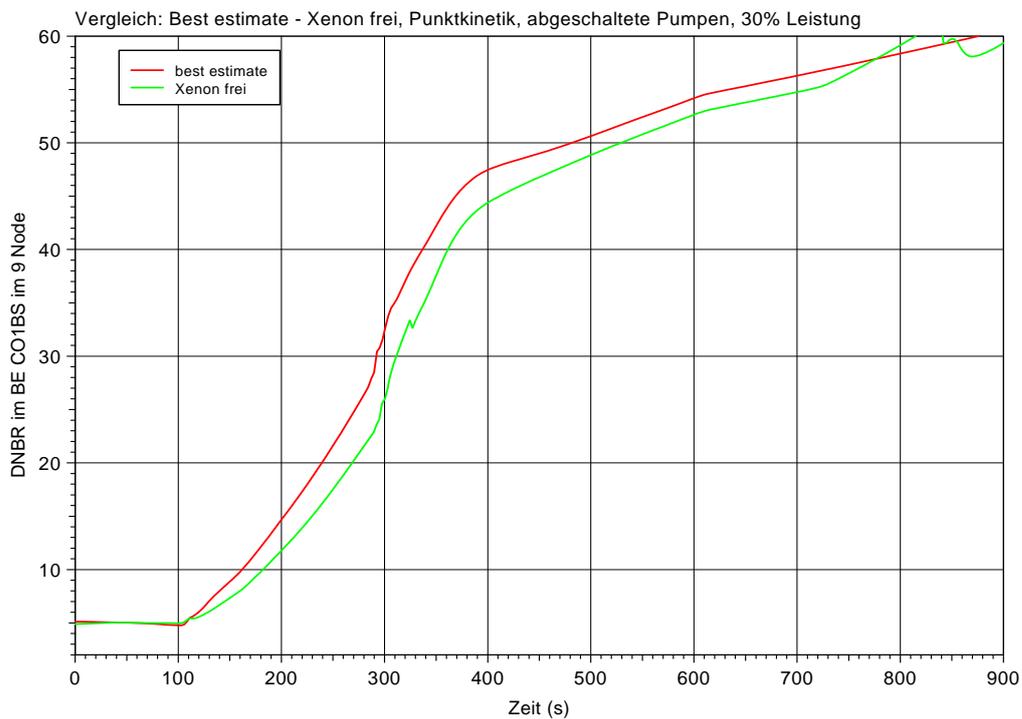


Bild 2-63 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, DNBR

2.4.2 Vergleich: Best-estimate – xenonfrei, laufende Pumpen, Punktkinetik-rechnung mit 30 % Leistung

In der Rechnung mit Xenon-Gleichgewicht und laufenden Hauptkühlmittelpumpen kommt es verspätet nach 450 s zum Absinken der Reaktorleistung, wie im Bild 2-64 dargestellt. Das führt zum Öffnen des Entlastungsventils bei etwa 500 s, wie dem im Bild 2-65 gezeigten Druckverlauf zu entnehmen ist. Der im Bild 2-67 gezeigte Anstieg der Kühlmitteltemperatur bei 410 s und 550 s ist eine Folge des unterschiedlichen Druckverlaufes, der in Bild 2-69 gezeigt wird. Das Fallen der Kühlmitteldichte nach 450 s, wie in Bild 2-69 gezeigt, hängt für den Fall Xenon-Gleichgewicht mit der steigenden Kühlmitteltemperatur zusammen. Die im Bild 2-69 gezeigte mittlere Kühlmitteldichte fällt auch wegen der steigenden Kühlmitteltemperatur. Ferner beeinflusst der Verlauf der mittleren Kühlmitteldichte den im Bild 2-68 gezeigten Verlauf des Massenstromes.

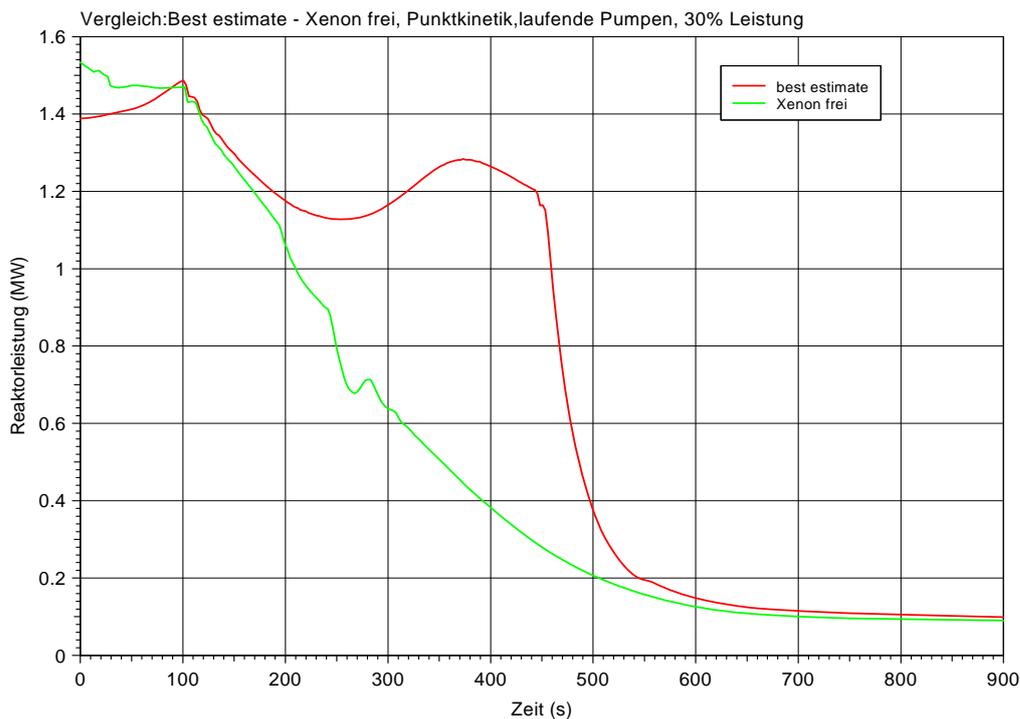


Bild 2-64 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung

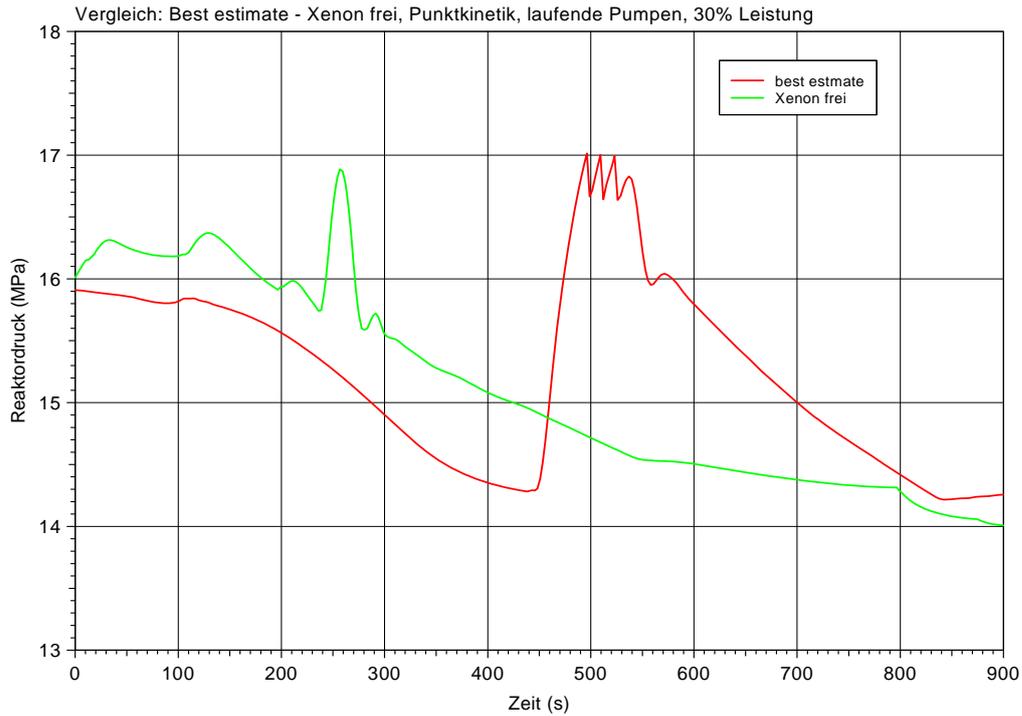


Bild 2-65 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck

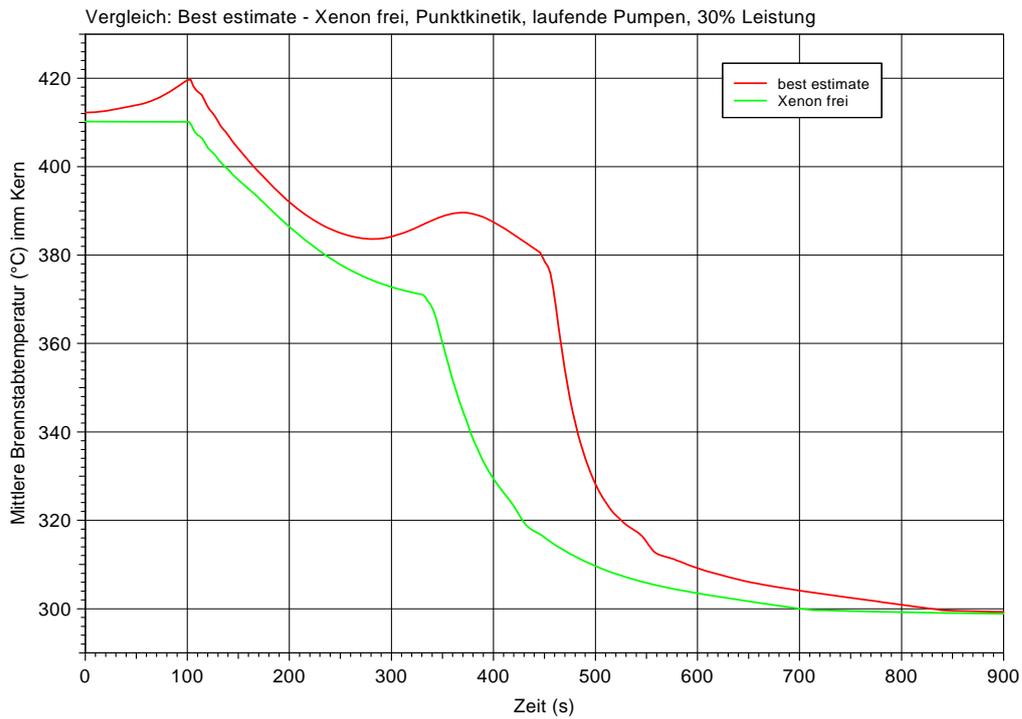


Bild 2-66 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

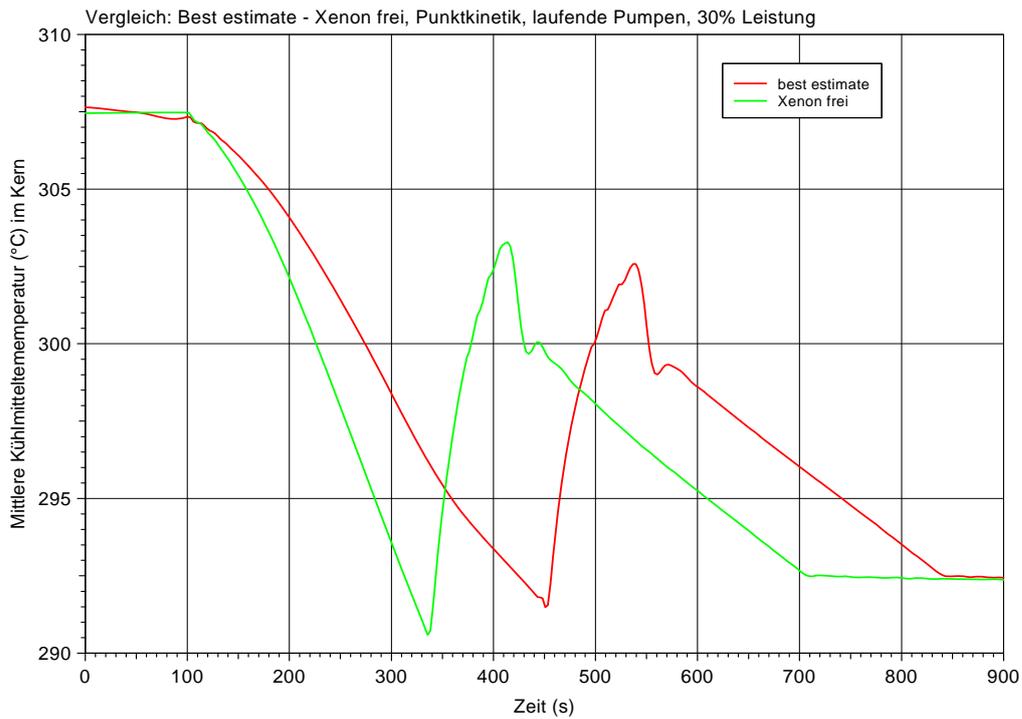


Bild 2-67 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteltemperatur

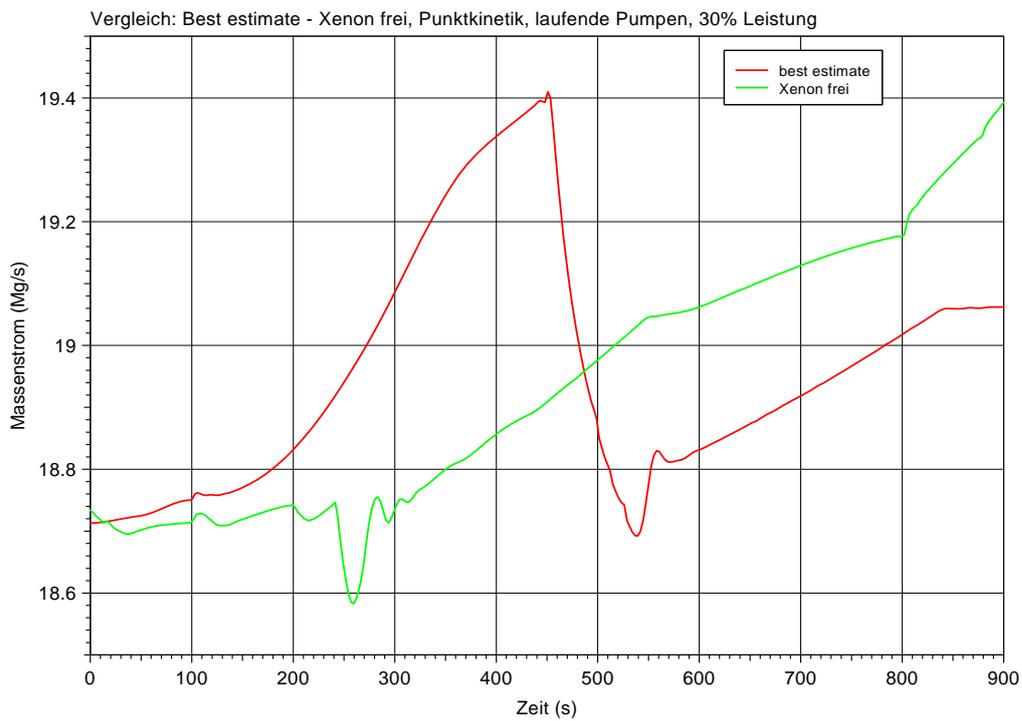


Bild 2-68 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom

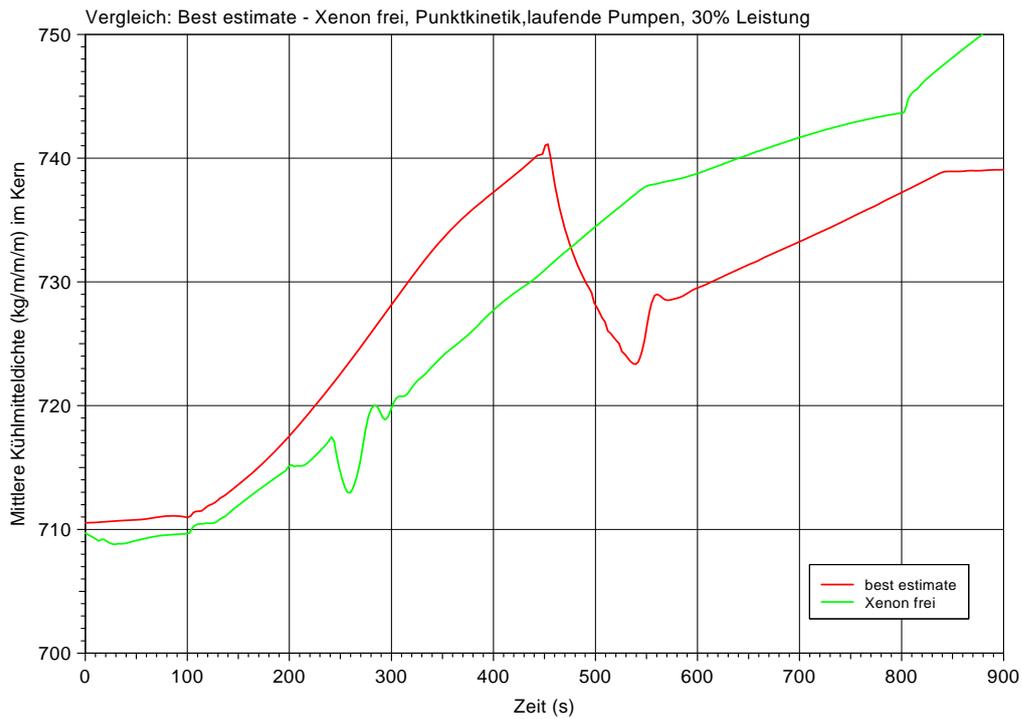


Bild 2-69 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

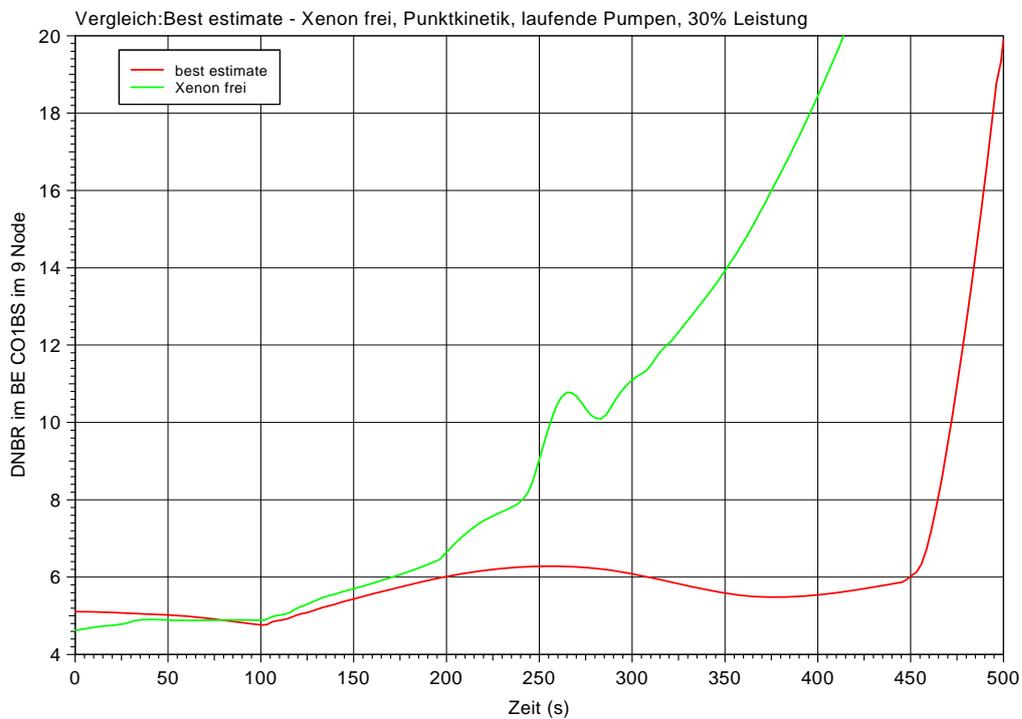


Bild 2-70 Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, DNBR

2.5 ATWS–Transiente für 80 %-Teillastzustände

2.5.1 80 % Leistung, Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen

In den Bildern 2-71 bis 2-77 werden die Ergebnisse zwischen Punktkinetik und 3D-Kinetikrechnungen verglichen. Dargestellt sind die Ergebnisse für eine Ausgangsleistung von 80 % im xenonfreien Kernzustand. Untersucht wird wie auch für 30 % die ATWS- Transiente „Ausfall der Speisewasserpumpen“. In den Bildern wird der zeitliche Verlauf der Variablen:

- der Reaktorleistung,
- des Reaktordruckes,
- der mittleren Brennstabtemperatur,
- der mittleren Kühlmitteldichte,
- der Borkonzentration und
- des DNB- Verhältnisses

gezeigt. Der Transientenverlauf ist ähnlich den Fällen mit 30 % und 100 % Ausgangsleistung. Durch das RESA-K Signal zu Beginn der Transiente wird aus dem Zusatzboilersystem Borsäure in den Primärkreis eingespeist. Die Boreinspeisung und die inhärente negative Rückwirkung führen zu einer Abnahme der Reaktorleistung. .

Der Vergleich mit den Ergebnissen der Rechnung mit 30 % Ausgangsleistung zeigt den Einfluss der Reaktorleistung. Die Ausgangleistung und die Brennstabtemperaturen sind bei 80 % Leistung höher. Das DNB- Verhältnis ist deutlich geringer. Das DNB-Verhältnis unterschreitet aber zu keinem Zeitpunkt der Transiente (weder für Punkt- noch 3D-Kinetik) den stationären minimalen DNB-Wert von etwa 2,25.

2.5.2 Vergleich: Punktkinetik – 3D – Kinetik

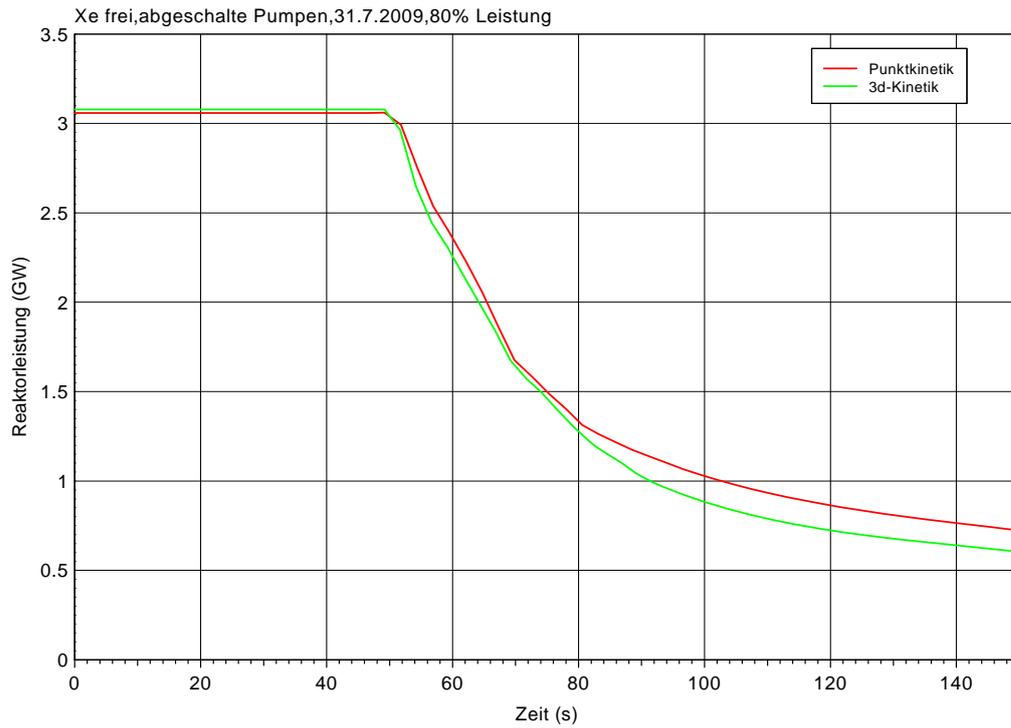


Bild 2-71 Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung

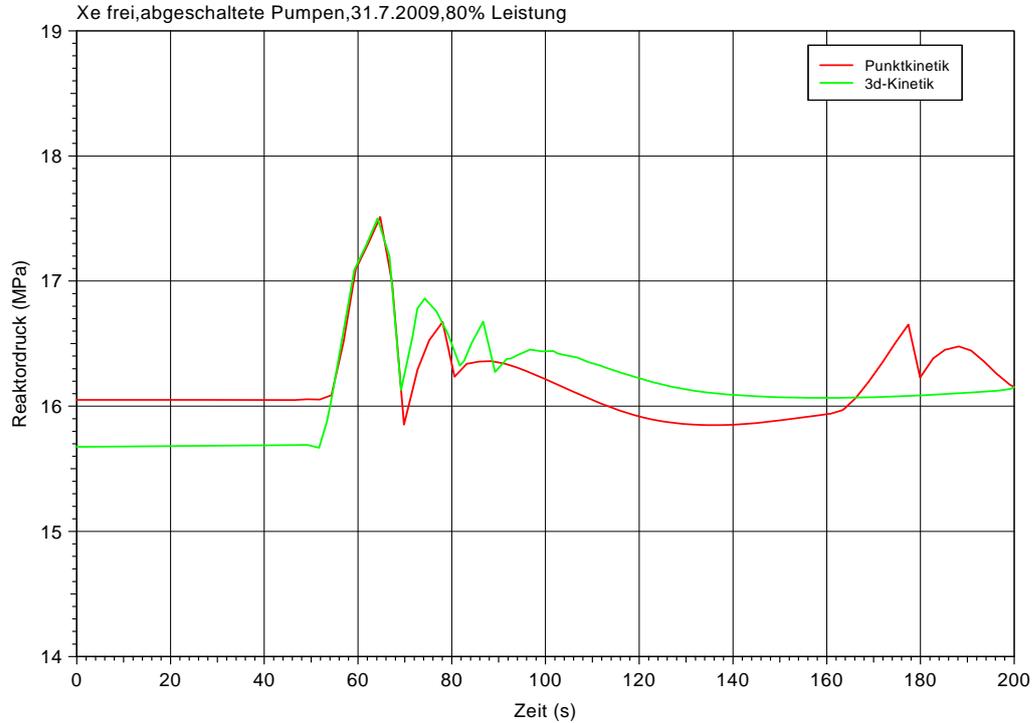


Bild 2-72 Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Reaktordruck

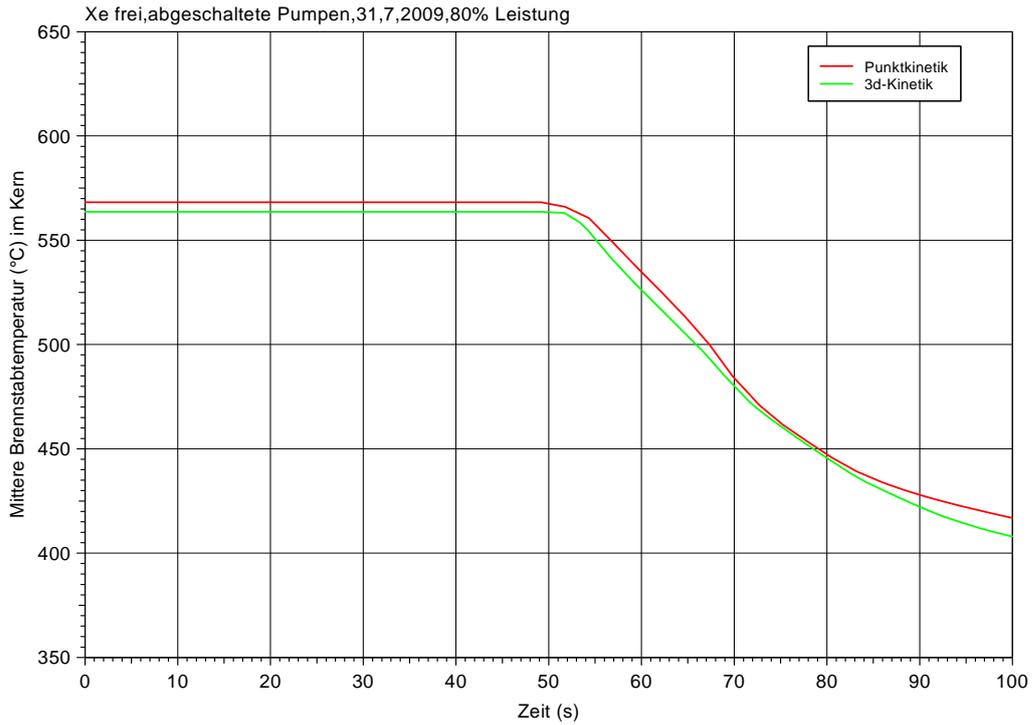


Bild 2-73 Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur

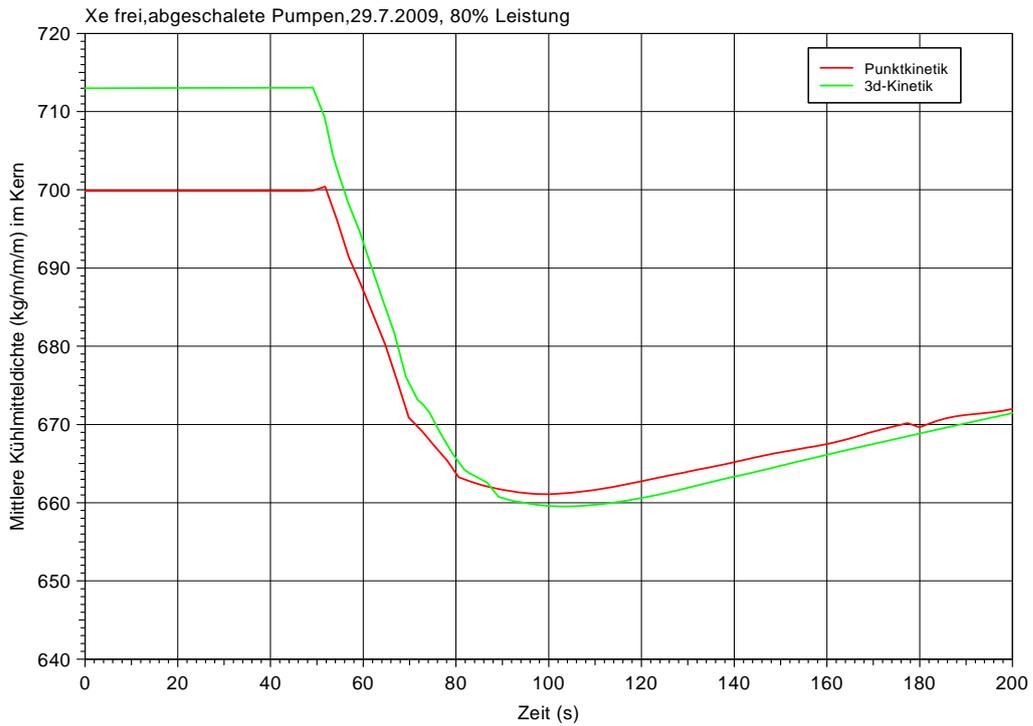


Bild 2-74 Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte

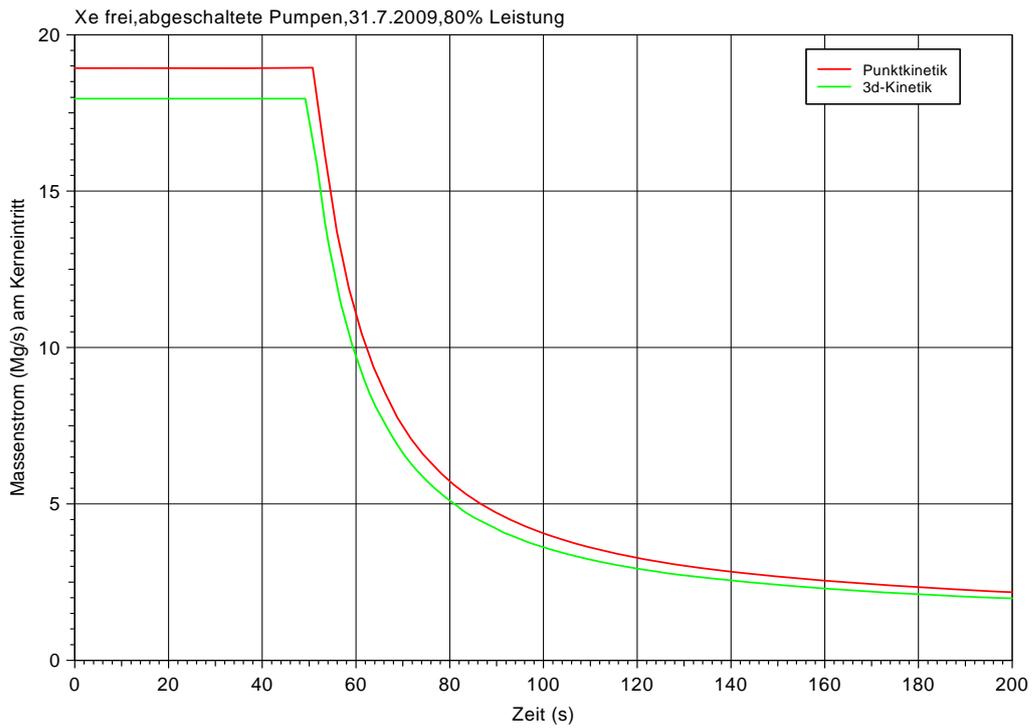


Bild 2-75 Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Massenstrom am Kerneintritt

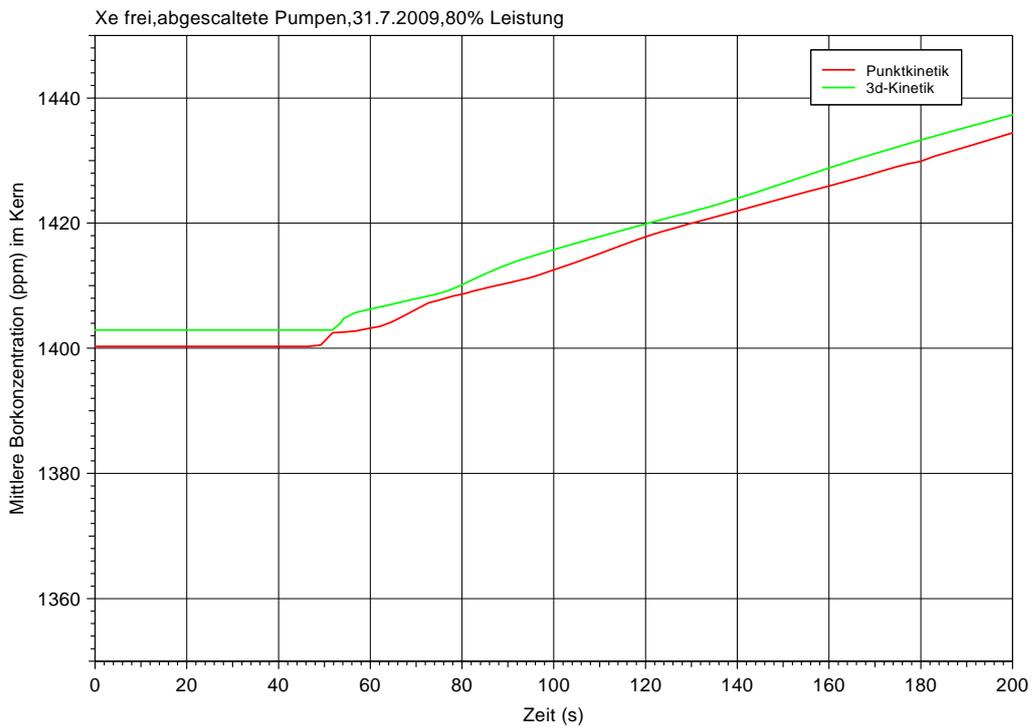


Bild 2-76 Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich der Borkonzentration

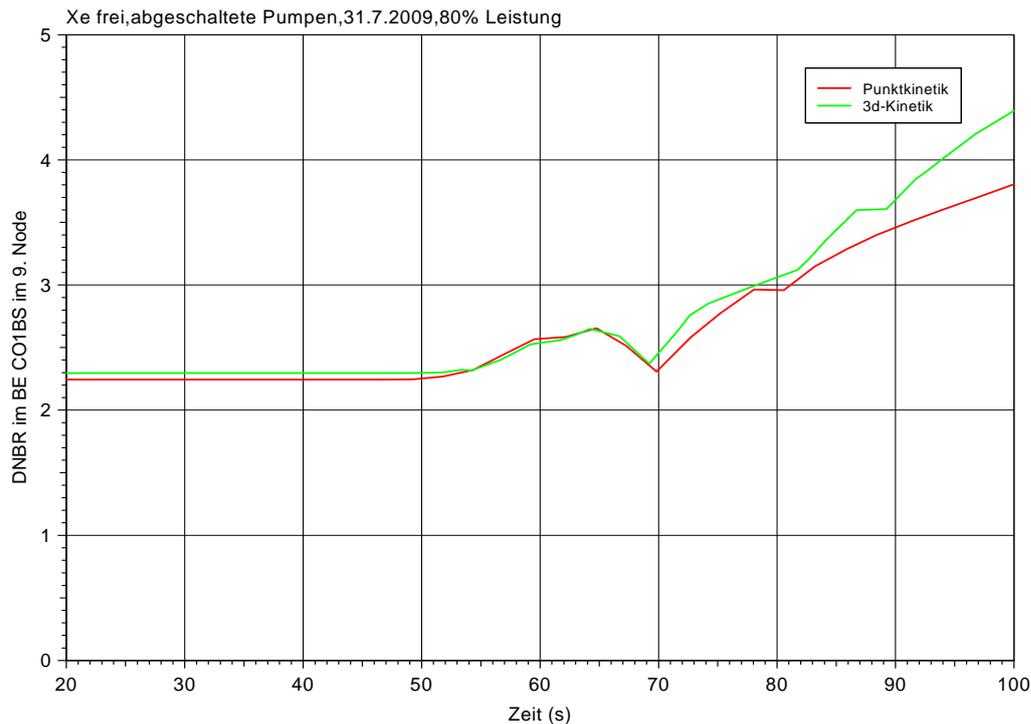


Bild 2-77 Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich der DNBR

2.5.3 80 % Leistung, Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen

In den Bildern 2-78 bis 2-84 wird der zeitliche Verlauf der Variablen der Punktkinetik und 3D-Kinetik für die Transiente mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen verglichen. Der Unterschied zu den Ergebnissen mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen ist die geringere Abnahme der Reaktorleistung. Da bei laufenden Hauptkühlmittelpumpen die Kühlmitteldichte weniger abnimmt, ist die negative Rückwirkung geringer.

Wie im Fall mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen sind die Unterschiede zwischen beiden Lösungsansätzen, Punktkinetik -und 3D-Kinetik, gering. Der Unterschied im Massenstromverlauf erklärt sich wieder mit der unterschiedlichen Bedeutung der Variablen: in der 3D-Rechnung wird der Bypass-Massenstrom durch den Kern nicht zum Kernmassenstrom addiert. Dadurch ist bei Transienten mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen der Massenstrom am Kerneintritt in der 3D-Kinetikrechnung geringer. Das in Bild 2-84 gezeigte DNB-Verhältnis verringert sich wenig. 25 s nach Störfallbeginn fällt der Wert auf ein lokales Minimum von 2,9 in der 3D-Kinetikrechnung und auf 2,7 in der Punktkinetikrechnung. In Rechnungen mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen beträgt der Wert etwa 2,25, ist also deutlich geringer.

2.5.4 Vergleich: Punktkinetik und 3D-Kinetik

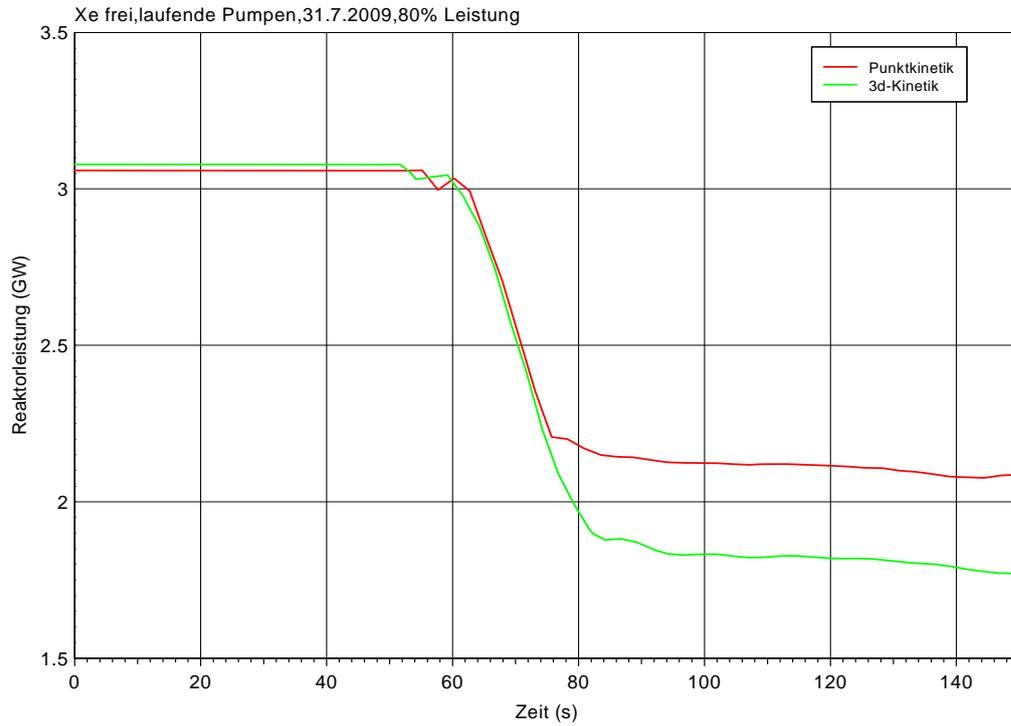


Bild 2-78 Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung

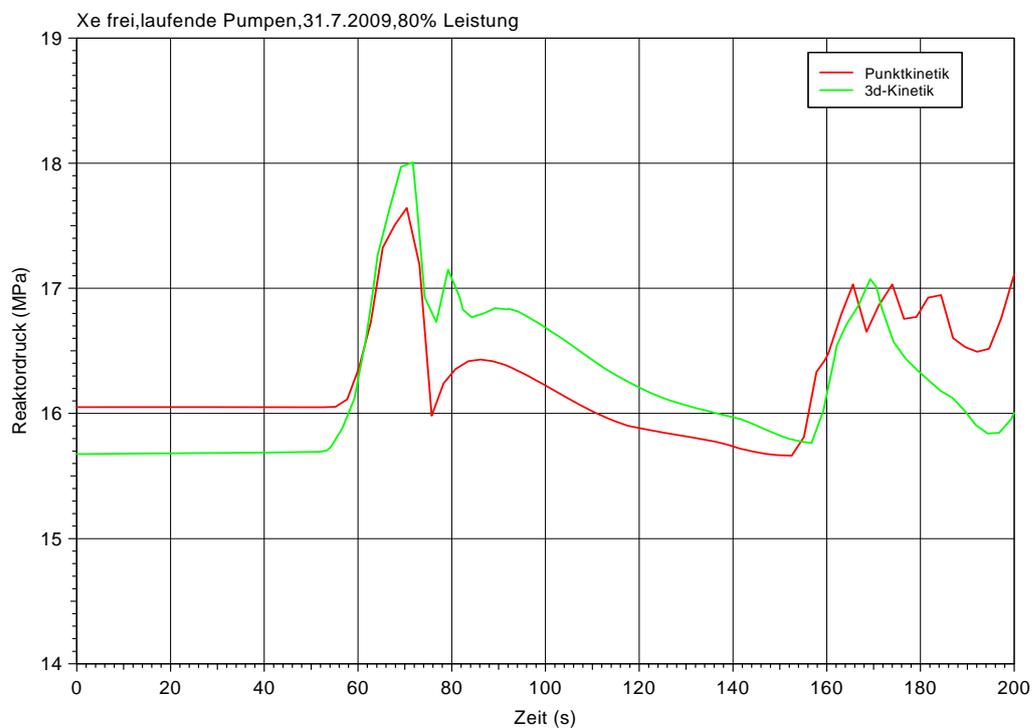


Bild 2-79 Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Reaktordruck

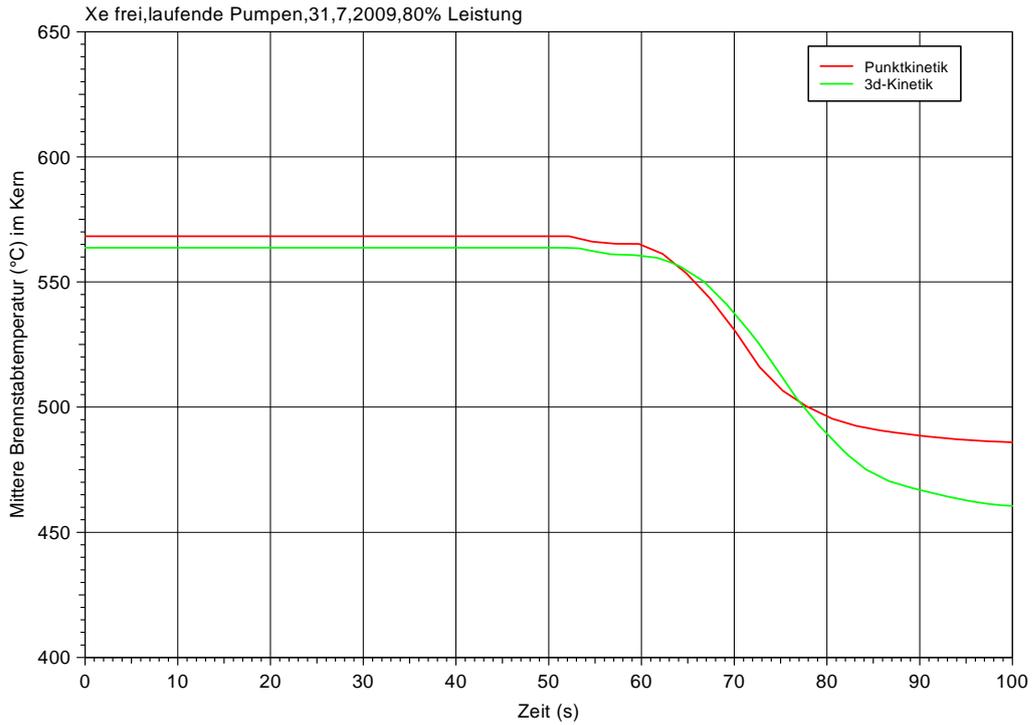


Bild 2-80 Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur

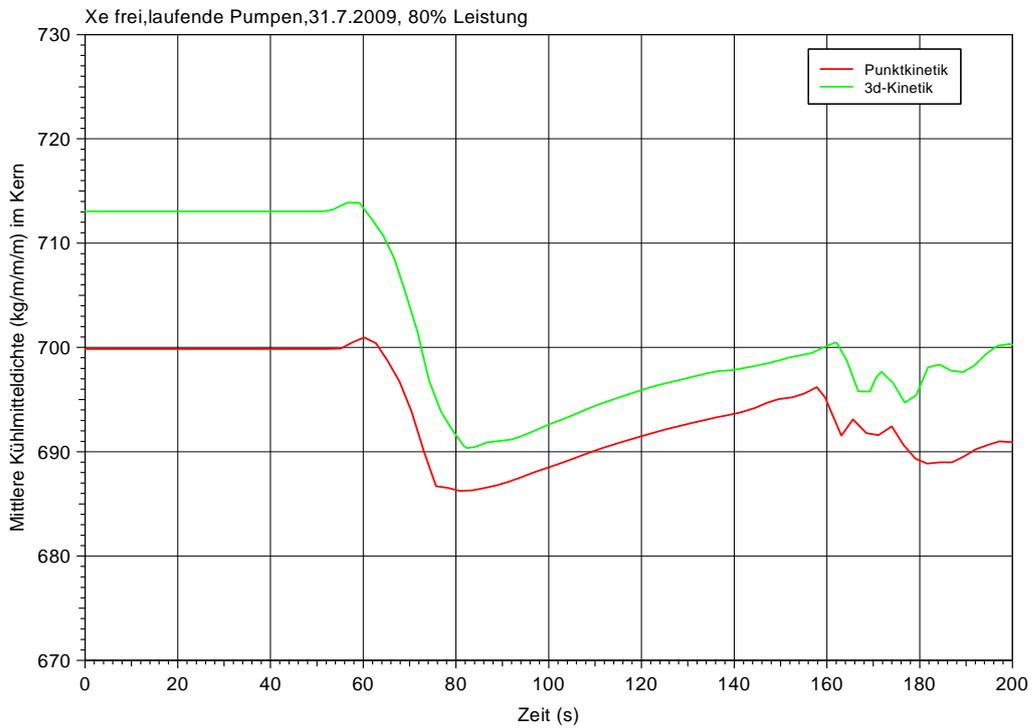


Bild 2-81 Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte

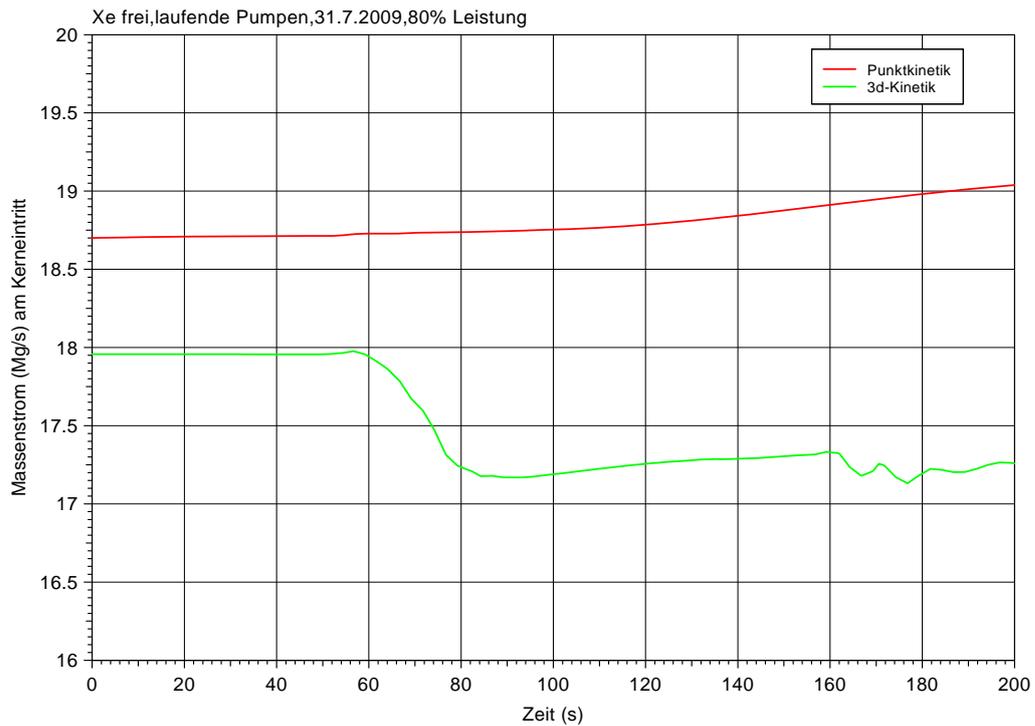


Bild 2-82 Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Massenstrom am Kerneintritt

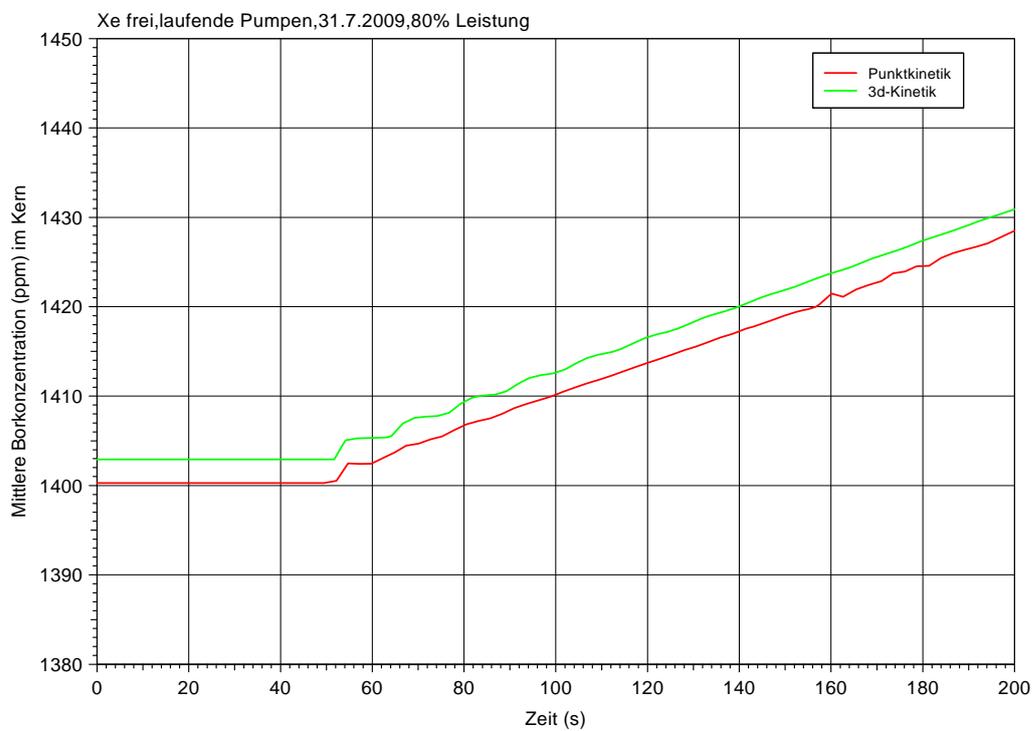


Bild 2-83 Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration

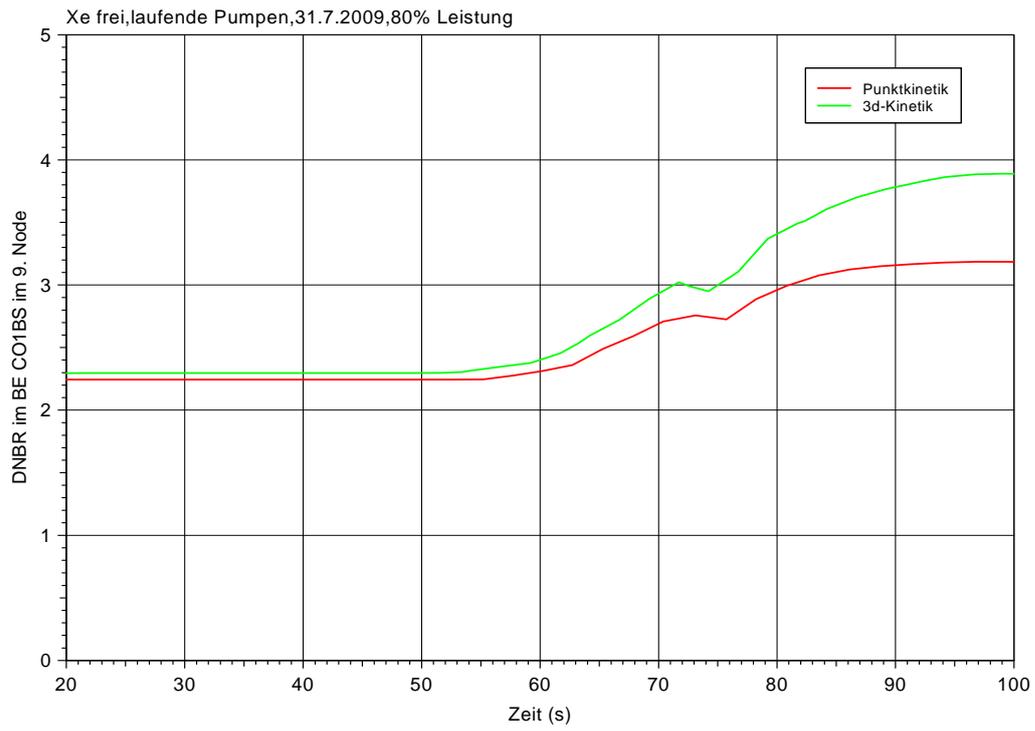


Bild 2-84 Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich DNBR

3 ATWS–Transiente für Volllastzustände

3.1 Ergebnisse der Analysen bei einer Reaktorleistung von 100 % mit xenonfreien Kinetikdaten

3.1.1 Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen

Information zu den durchgeführten Rechnungen:

Punktkinetik

- Borkonzentration: 1400 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- D=20,60 L1=91,66 L2=64,53 L3=21,36 L4=20,60 cm
- Name der Rechnung: p.spumoff110kon4
- Datensatz:gkn2_17K+HBE+9Bs_athlsimdiskon4off
- Beginn der Transiente: 1525

3D – Kinetik

- Borkonzentration: 1400 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- D=0,00 L1=0,00 L2=0,00 L3=0,00 L4=0,00 cm
- Name der Rech.: SMK-given-PWR-ATWS-20-05-09\100PowerXe-free-Poff\Atws100XeNo.B1400PoffJ3
- Beginn der Transiente: 1700 s

Der Transientenverlauf mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen ist durch die steile Abnahme der Reaktorleistung und des Massenstroms am Kerneintritt gekennzeichnet. Die Ergebnisse der Rechnungen mit Punktkinetik sind in den Bildern 3-1 bis 3-6 dargestellt. Nach dem Druckanstieg zu Beginn der Transiente fällt der Druck um etwa 10 bar aufgrund der verminderten Reaktorleistung. Die Brennstabtemperatur sinkt proportional zum Verlauf der Reaktorleistung. Die Kühlmitteldichte fällt im Zusammenhang mit dem abnehmenden Massenstrom am Kerneintritt von 697 kg/m^3 auf 654 kg/m^3 und steigt dann wieder etwas an.

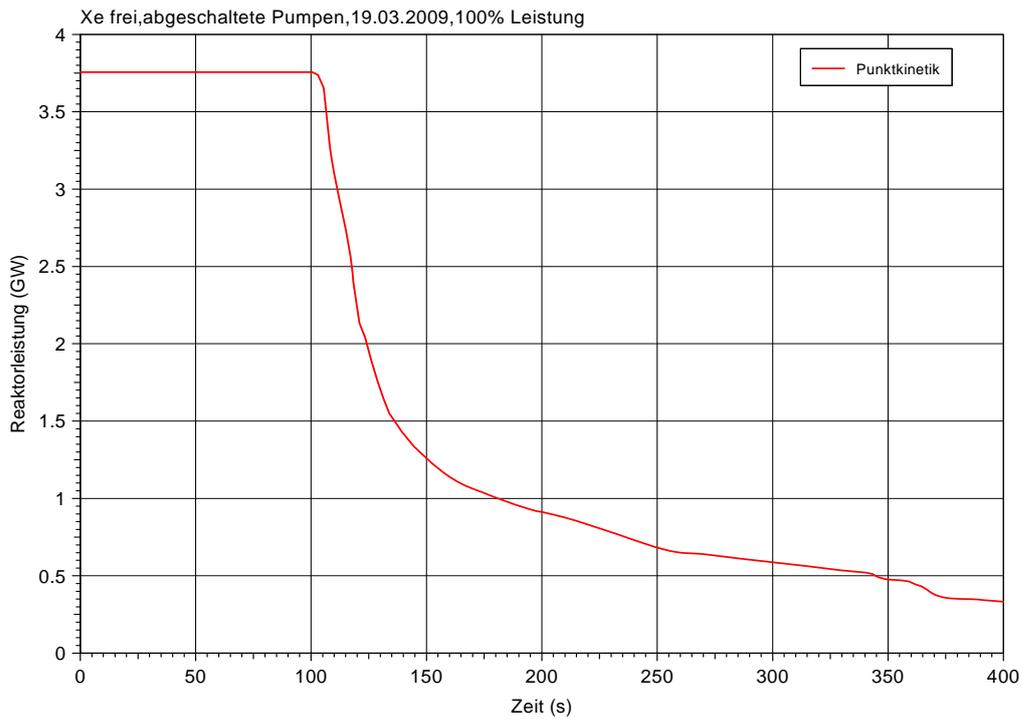


Bild 3-1 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Reaktorleistung

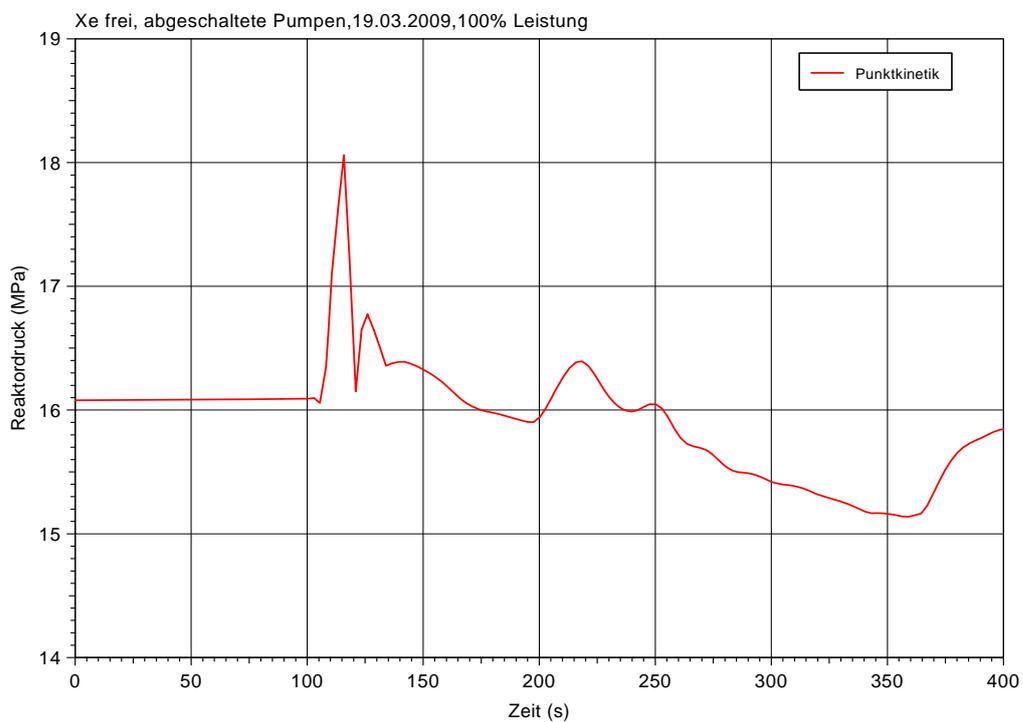


Bild 3-2 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Reaktordruck

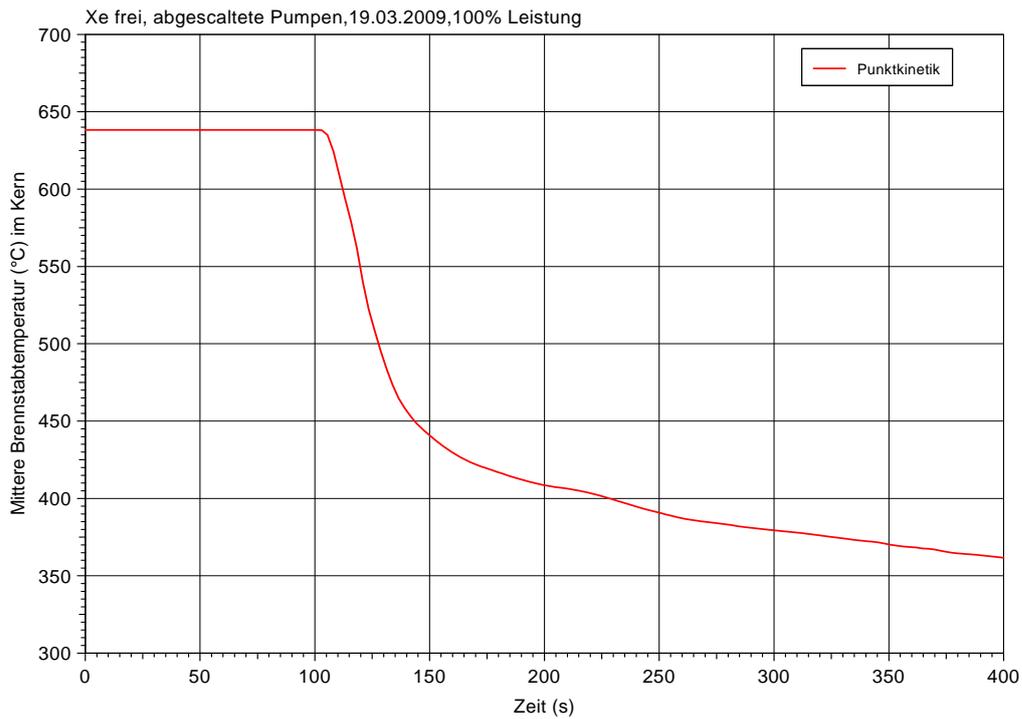


Bild 3-3 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

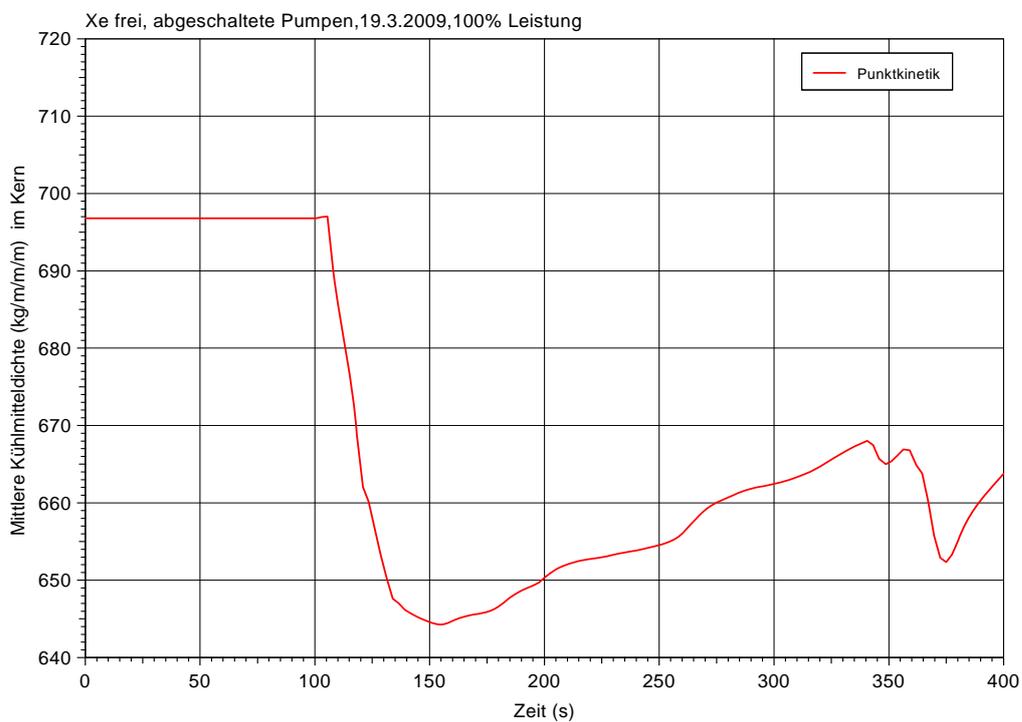


Bild 3-4 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

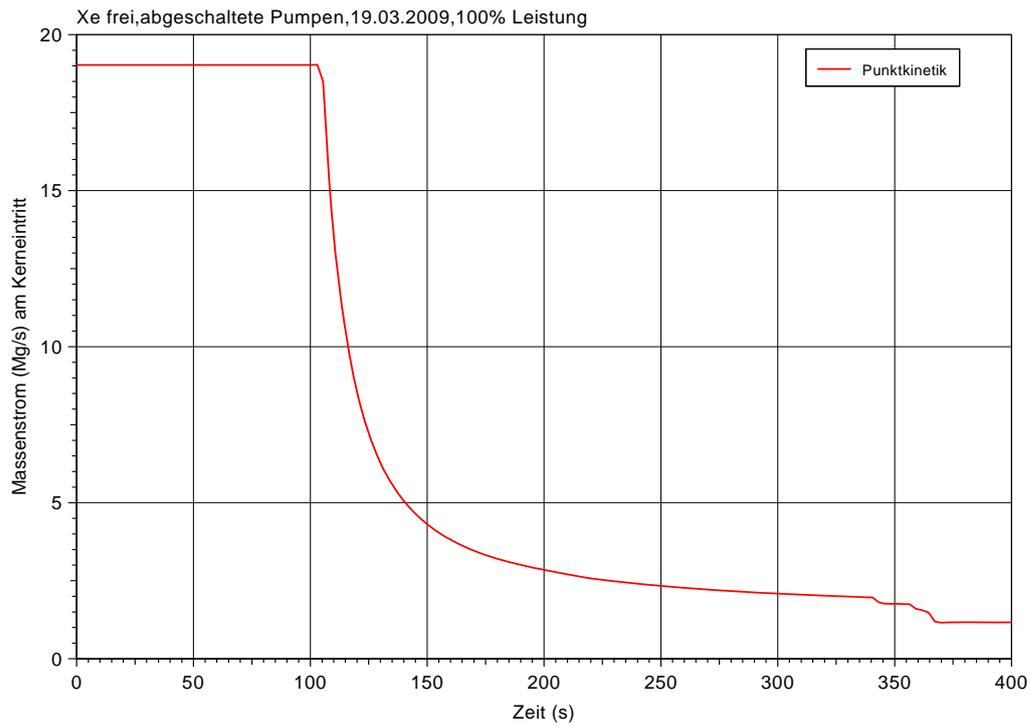


Bild 3-5 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Massenstrom

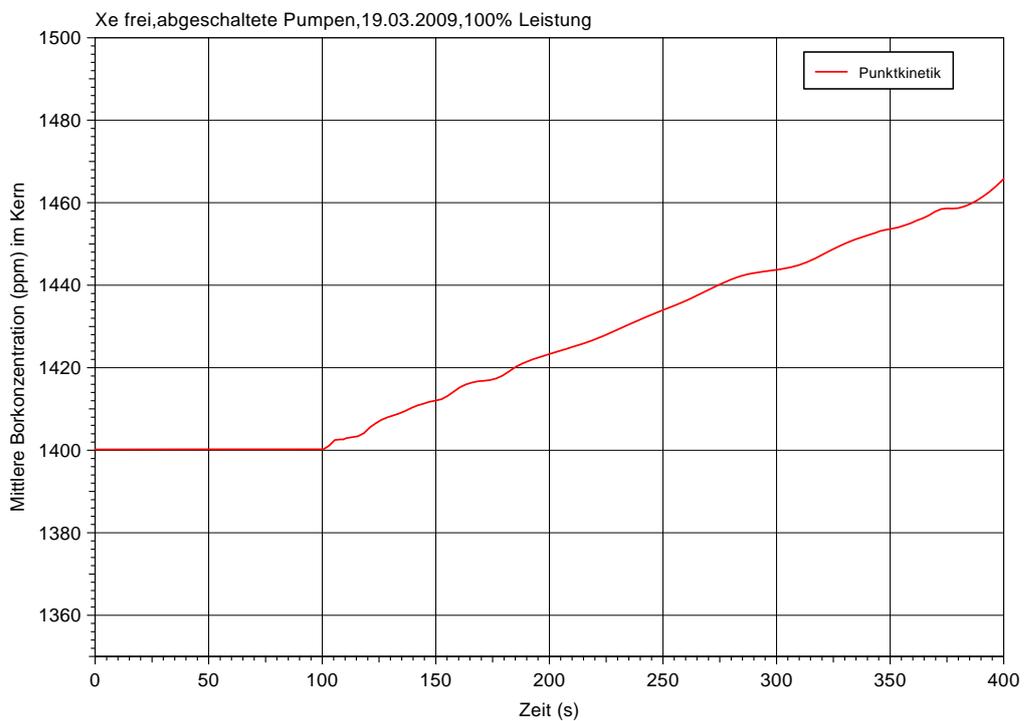


Bild 3-6 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Borkonzentration

3.1.2 Vergleich Punktkinetik – 3D – Kinetik

Der Vergleich von Punkt- und 3D-Kinetikrechnung ist in den Bildern 3-7 bis 3-20 dargestellt. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung beim Verlauf der Reaktorleistung, der Brennstabtemperatur, der mittleren Kühlmitteldichte im Kern, des Massenstromes am Kerneintritt und der mittleren Borkonzentration.

Die Werte des DNB-Verhältnisses fallen 25 s nach Störfallbeginn um etwa 0,4 bis 0,5, bleiben aber größer als 1,8. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen der Punkt und 3D-Kinetikrechnung erklärt sich wieder mit dem Unterschied in der Druckberechnung. Bei geringerem Druck sind die kritische Wärmestromdichte und somit auch das DNB-Verhältnis größer. Bild 3-20 zeigt den zeitlichen Verlauf der DNBR-Werte, die mit unterschiedlichen DNBR-Korrelationen berechnet sind. Folgende Korrelationen werden betrachtet:

- Westinghouse W3,
- Hench-Levy,
- Israel-Casterline
- Biasi-Korrelation und die
- die sog. KWU-Tafeln.

Die Ergebnisse, die mit der Westinghouse-Korrelation berechnet sind, werden für die Punkt- und 3D-Kinetik dargestellt. Die DNBR-Werte, die mit den KWU-Tafeln ermittelt sind, zeigen nach Beginn der Transiente die kleinsten Werte, erweisen sich also als abdeckend für diese Transiente; dies ist relevant, da diese Tafelwerke in der aktuellen Auslegung von DWR-Kernen Verwendung finden und es sichergestellt sein muss, dass sie gegenüber fortgeschrittenen Korrelationen konservative Resultate liefern. Für die verschiedenen Rechnungen, xenonfrei und Xenongleichgewicht mit abgeschalteten und laufenden Hauptkühlmittelpumpen sind die Ergebnisse in Tabelle 4-1 zusammengestellt.

Die KWU-Tafeln zur Brennelementauslegung basieren auf Versuchen zur Bestimmung der kritischen Wärmestromdichte, die an der Columbia University in New York und bei

KAEA in Winfrith durchgeführt wurden. Durch den Vergleich dieser Versuchsergebnisse mit veröffentlichten Ergebnissen mit innendurchströmten Rohren wird von der KWU die Übertragung auf die thermofluidodynamischen Zustände im Brennelement begründet. Die DNB-Versuche mit den innendurchströmten Rohren sind von Doroschuk, Levitan und Lantzman durchgeführt worden. Die Einzelheiten zur Bewertung der KWU-Tafeln und die dazugehörigen Literaturstellen sind in /LAN 84/ gegeben.

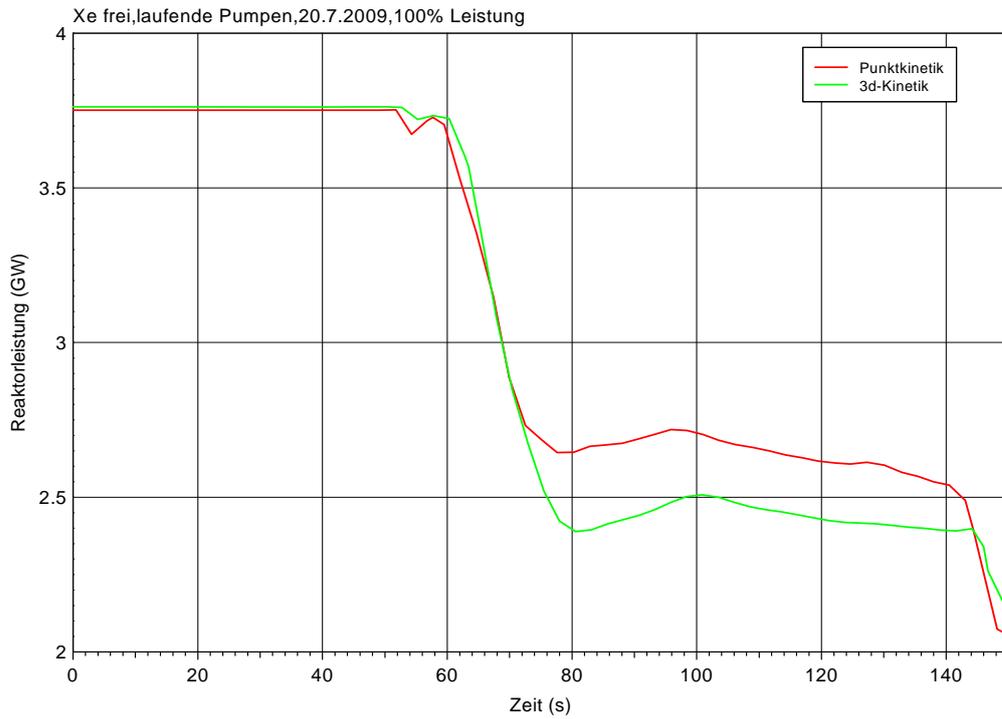


Bild 3-7 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung

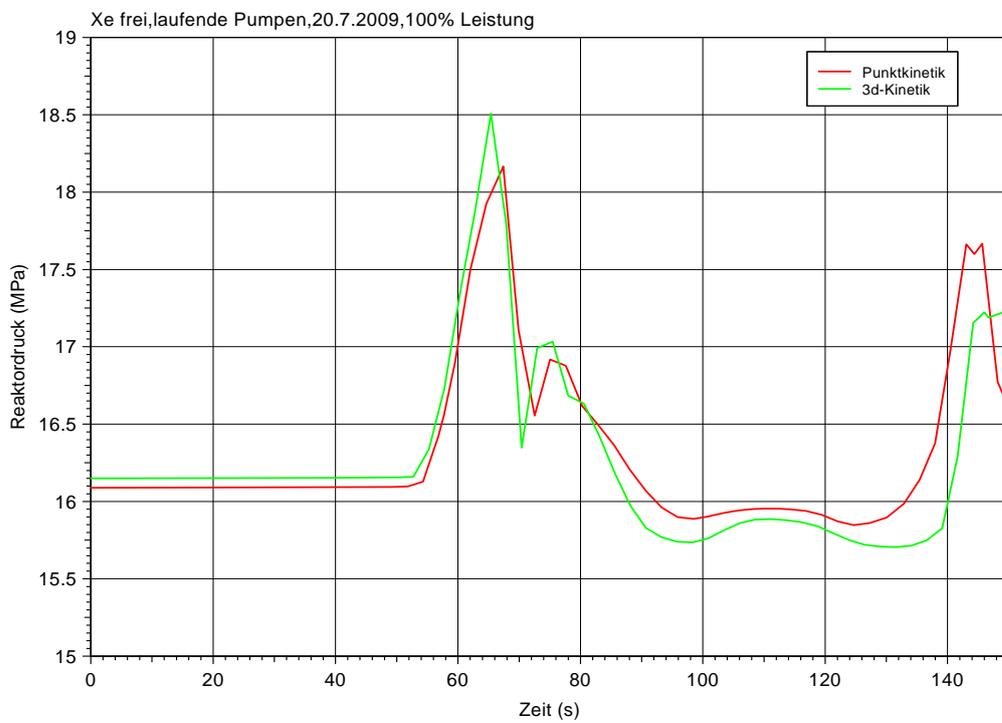


Bild 3-8 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktordruck

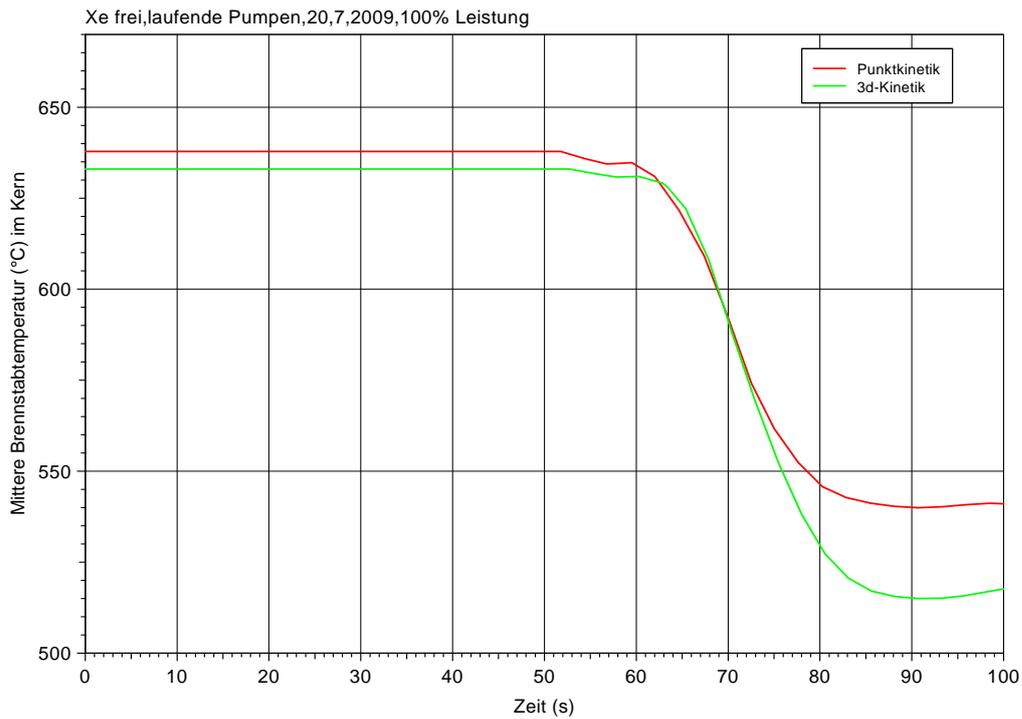


Bild 3-9 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Brennstabtemperatur

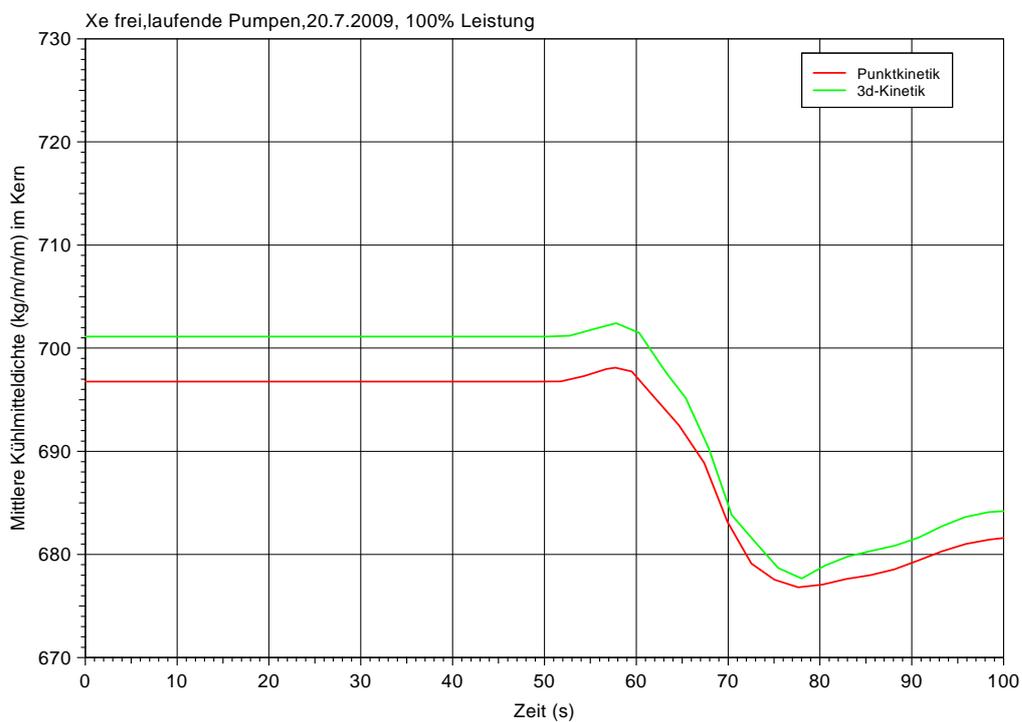


Bild 3-10 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Kühlmitteldichte

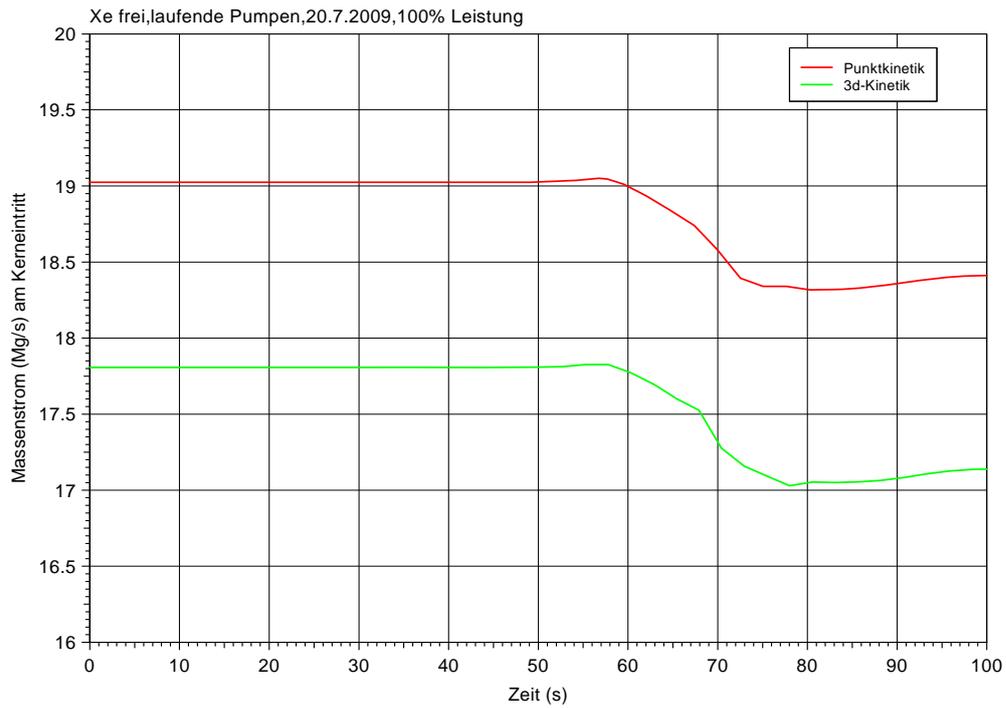


Bild 3-11 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Massenstrom

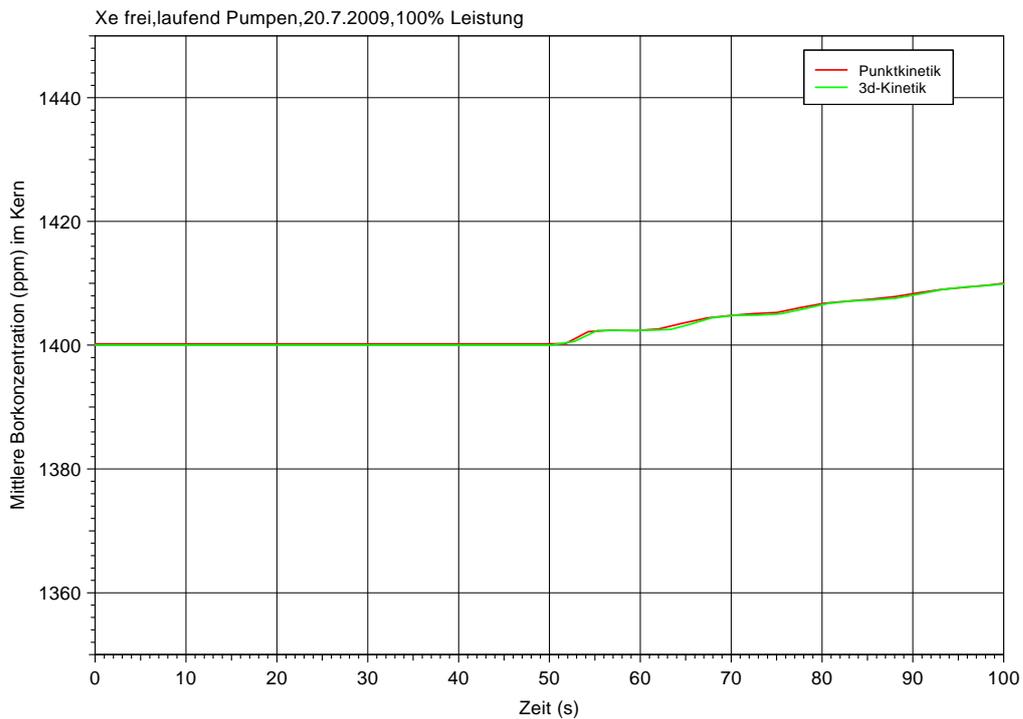


Bild 3-12 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Borkonzentration

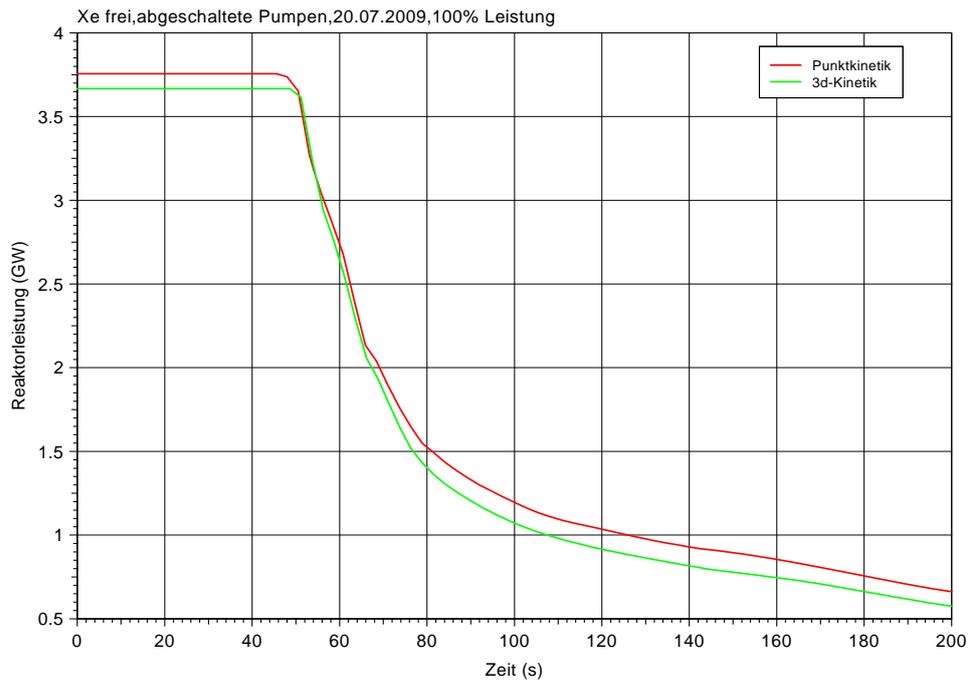


Bild 3-13 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung

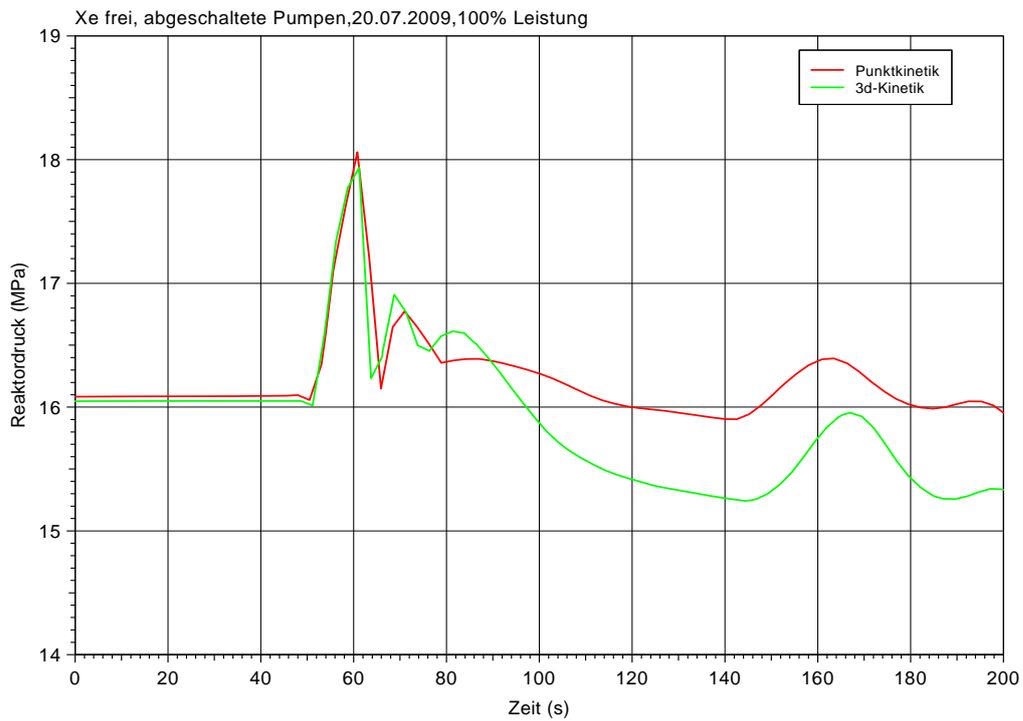


Bild 3-14 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktordruck

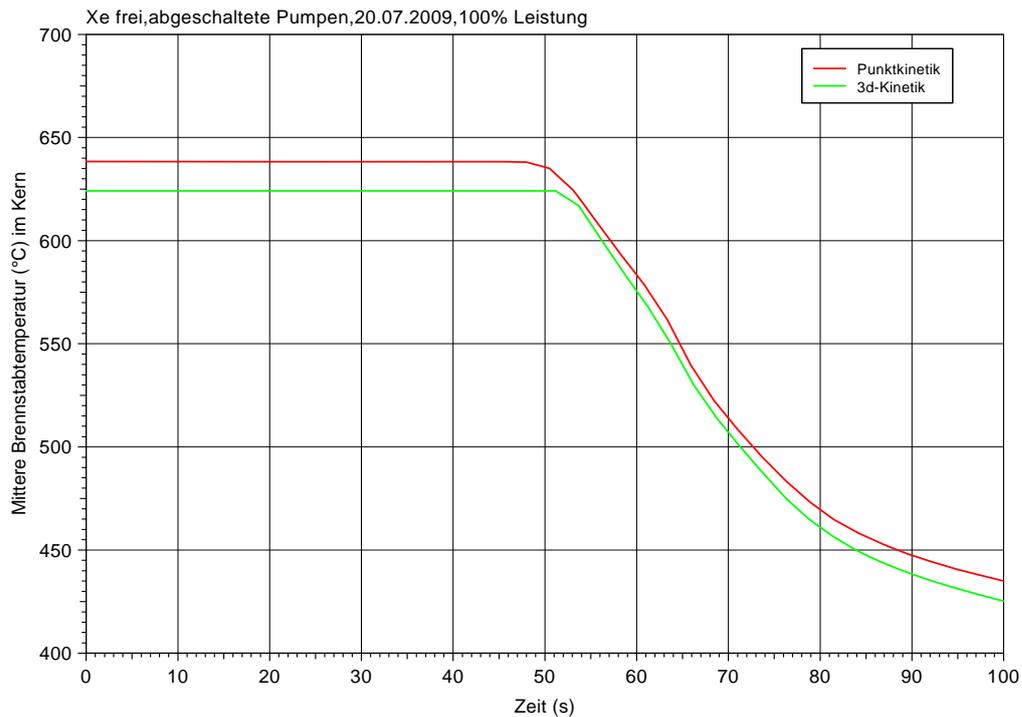


Bild 3-15 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Brennstabtemperatur

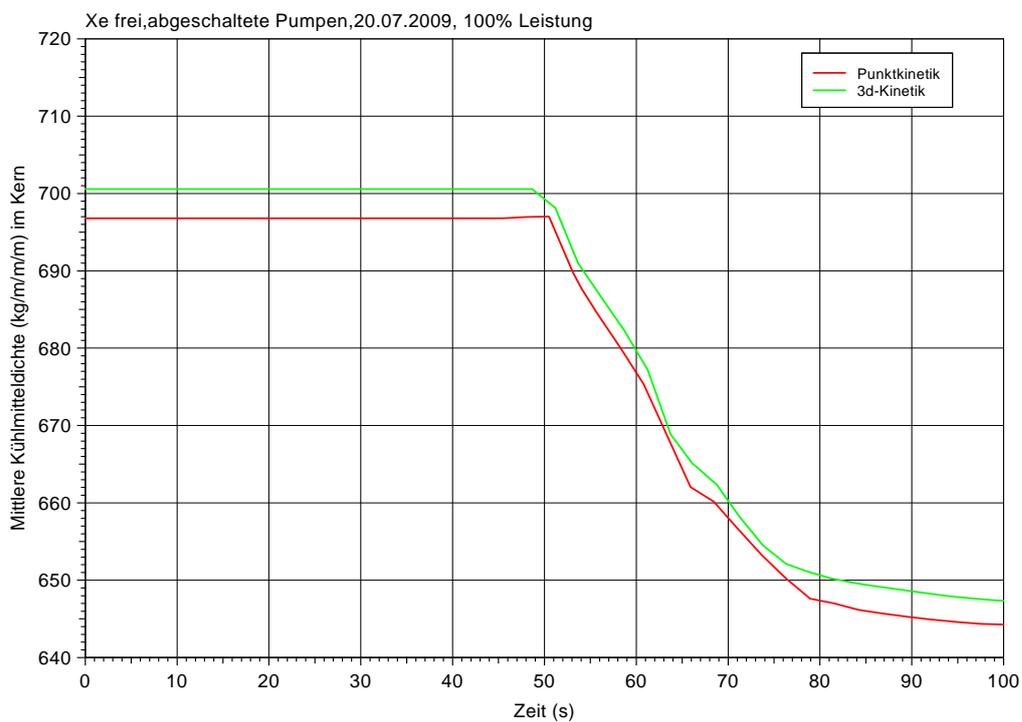


Bild 3-16 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Kühlmitteldichte

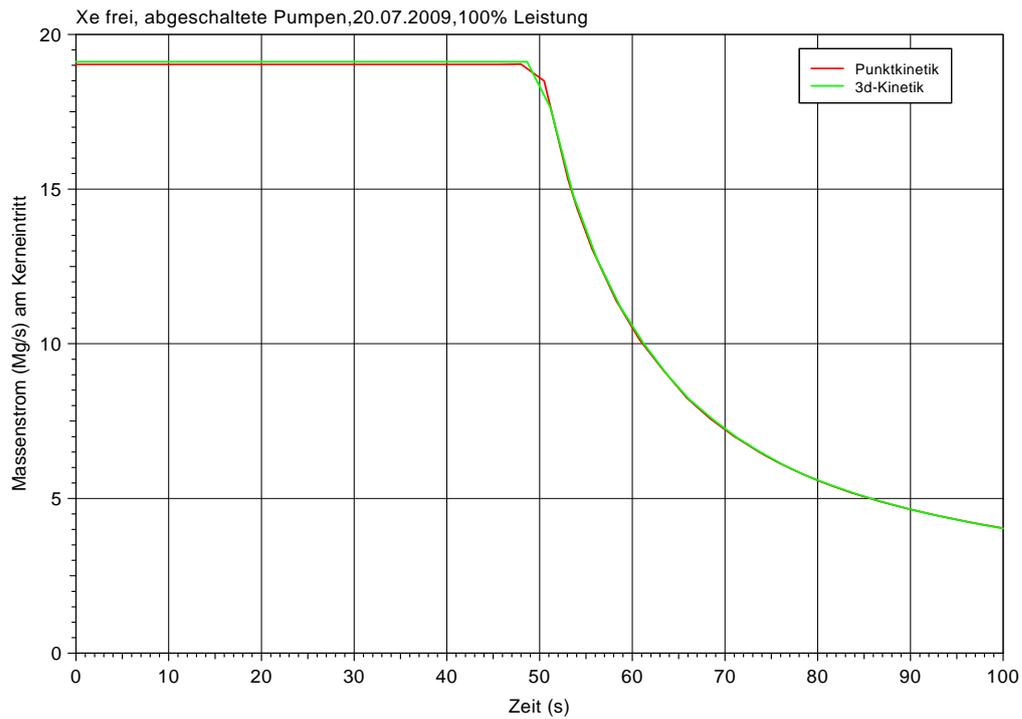


Bild 3-17 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Massenstrom

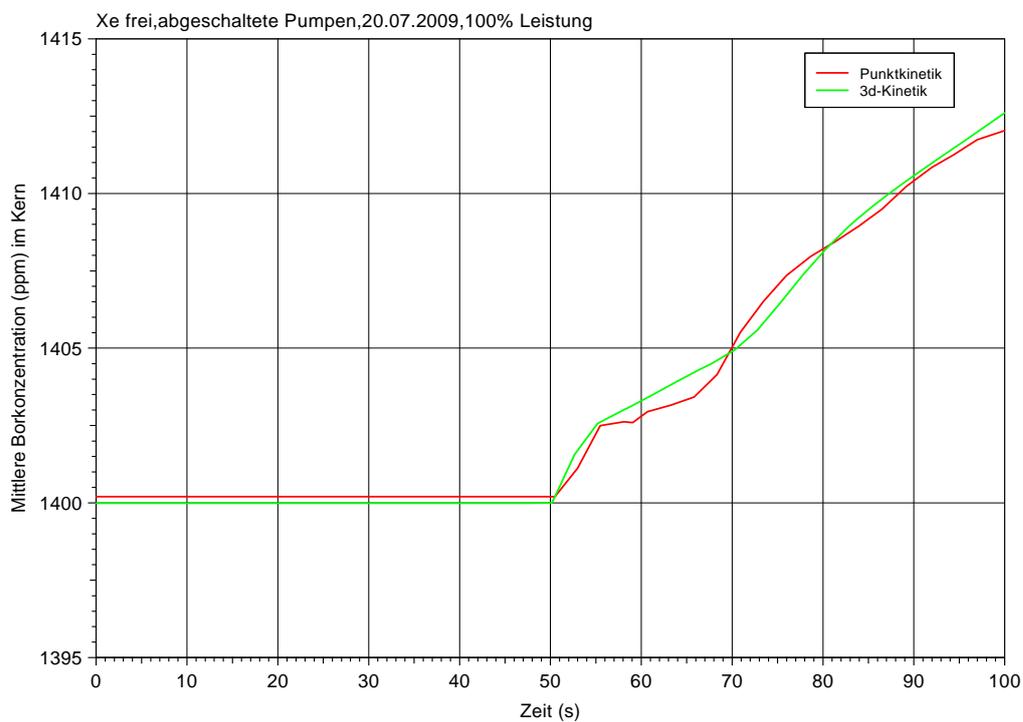


Bild 3-18 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Borkonzentration



Bild 3-19 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich DNBR

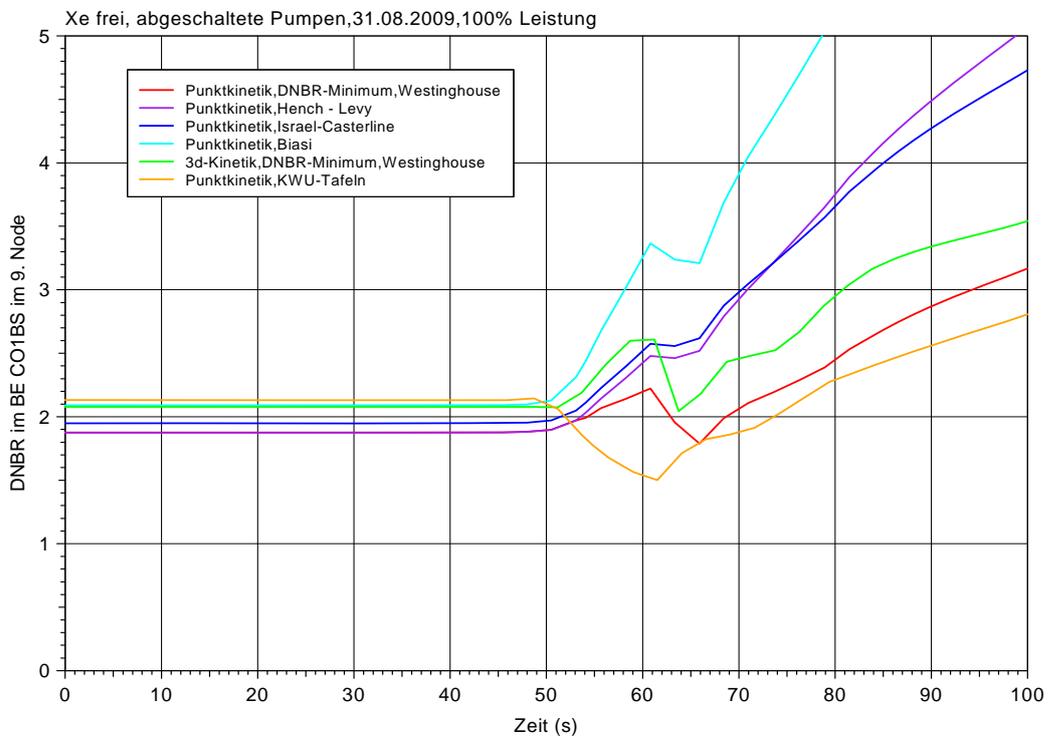


Bild 3-20 Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der verschiedenen DNBR-Korrelationen

3.1.3 Transientenverlauf mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen

Information zu den durchgeführten Rechnungen:

Punktkinetik

- Borkonzentration: 1400 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- D=20,60 L1=91,66 L2=64,53 L3=21,36 L4=20,60 cm
- Name der Rechnung: p.spumon121kon4
- Datensatz:gkn2_17K+HBE+9BS_athlsimdiskon4on
- Beginn der Transiente: 1525 s

3D – Kinetik

- Borkonzentration: 1400 ppm
- Steuerstabstellung zum Beginn der Transiente
- D= 4,01 L1=4,86 L2=1,81 L3=1,81 L4=1,01 cm
- Name der Rechnung:
SMK-given-PWR-ATWS-17.07.20009\ATWS100XeNo.B14000Pon8Z
- Beginn der Transiente: 1525 s

Mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen ist die Abnahme der Reaktorleistung unterschiedlich. Die Ergebnisse dieser Rechnung mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen sind in den Bildern 3-21 bis 3-26 dargestellt. Die Leistung fällt in zwei Stufen, zunächst auf einen Wert von 2,7 GW und bleibt etwa 70 s auf diesen Wert. Dieser Verlauf der Reaktorleistung ergibt sich aus dem Zusammenwirken vom Reaktor-druck, Kühlmitteltemperatur und - dichte. Die negative Dichterückwirkung verzögert sich gegenüber der Rechnung mit abgeschalteten Kühlmittelpumpen aufgrund des unterschiedlichen Druckverlaufes. Nach dem Druckanstieg zu Beginn der Transiente fällt der Druck bei laufenden Pumpen für 60 s auf den Anfangswert und steigt dann noch einmal auf 170 bar an. Der Primärkreislauf wird durch mehrfaches Öffnen des Druckhalterventils entlastet.

Der erhöhte Druck zwischen 200 s und 300 s lässt die mittlere Kühlmitteltemperatur in diesem Zeitbereich steigen. Die damit verbundene Zunahme des Kühlmittelvolumens führt zu einer Abnahme der mittleren Kühlmitteldichte, wie im Bild 3-24 dar-

gestellt. Die Zunahme der mittleren Kühlmitteldichte nach 280 s wird durch die Verringerung des Kühlmittelvolumens infolge der abnehmenden mittleren Kühlmitteltemperatur verursacht.

Die mittlere Brennstabtemperatur folgt der Reaktorleistung. Der Verlauf des Massenstromes am Kerneintritt wird durch den Verlauf der mittleren Kühlmitteldichte bestimmt.

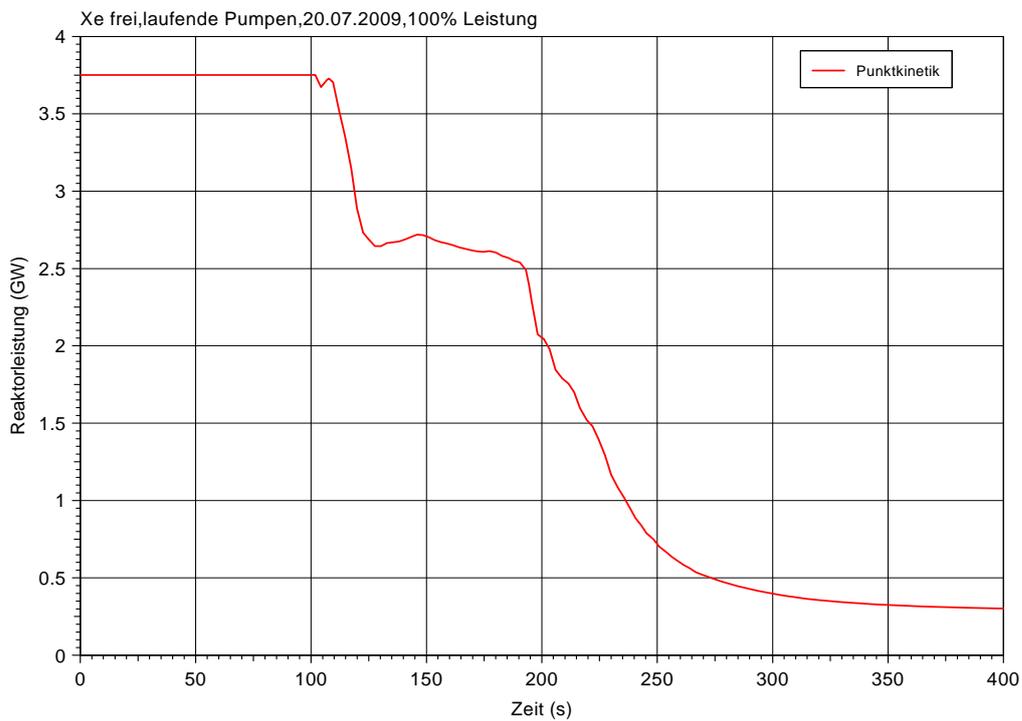


Bild 3-21 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Reaktorleistung

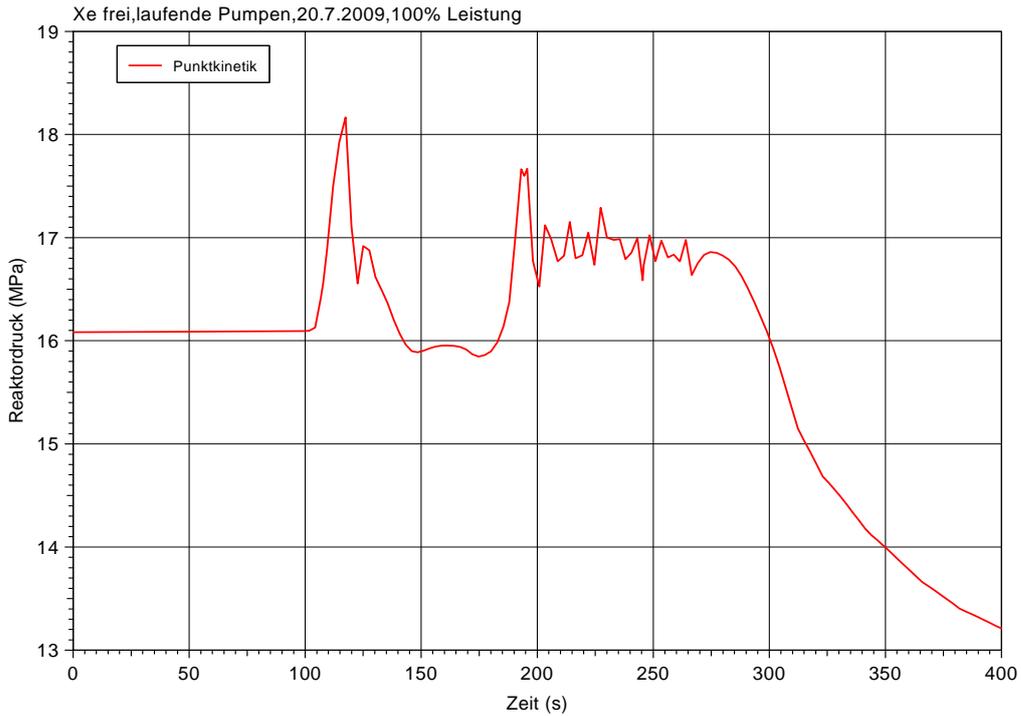


Bild 3-22 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Reaktordruck

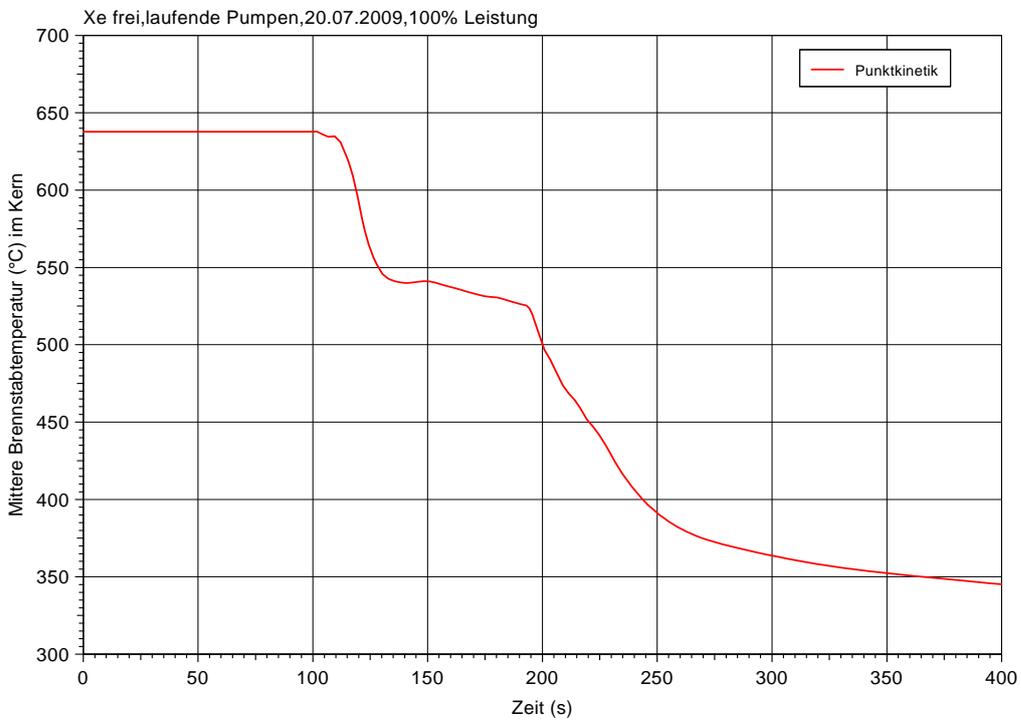


Bild 3-23 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

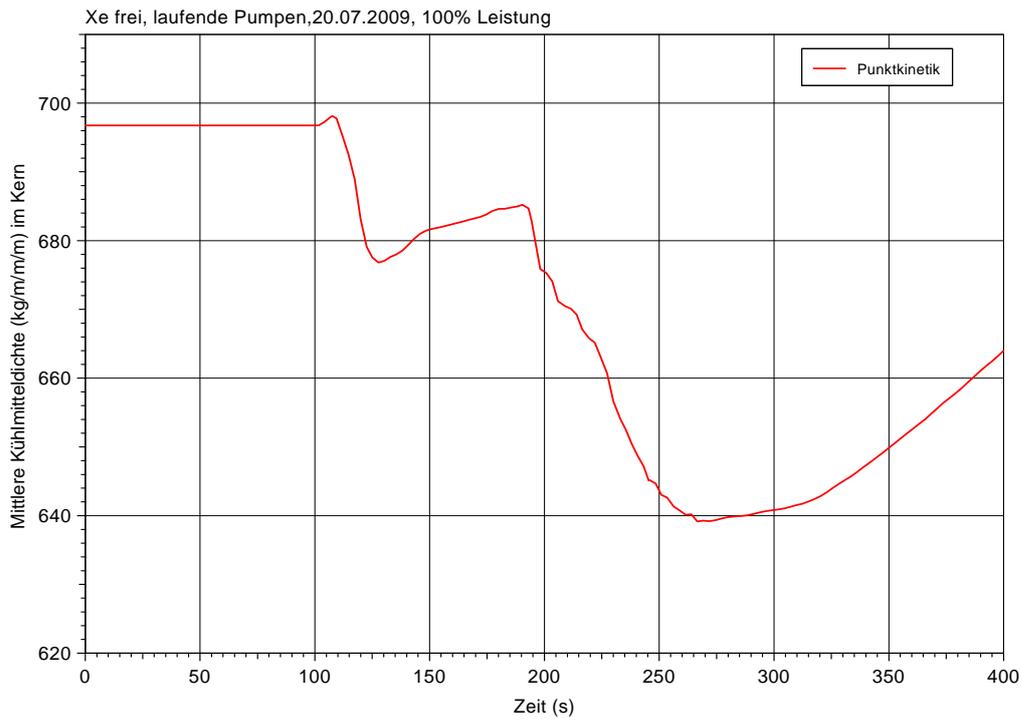


Bild 3-24 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

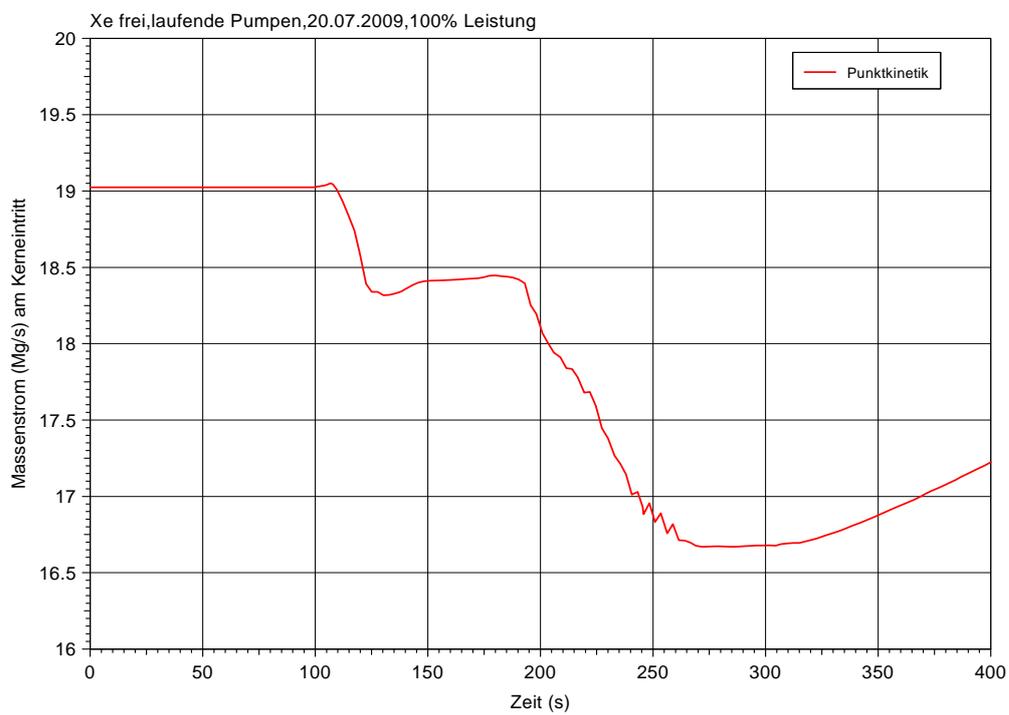


Bild 3-25 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Massenstrom

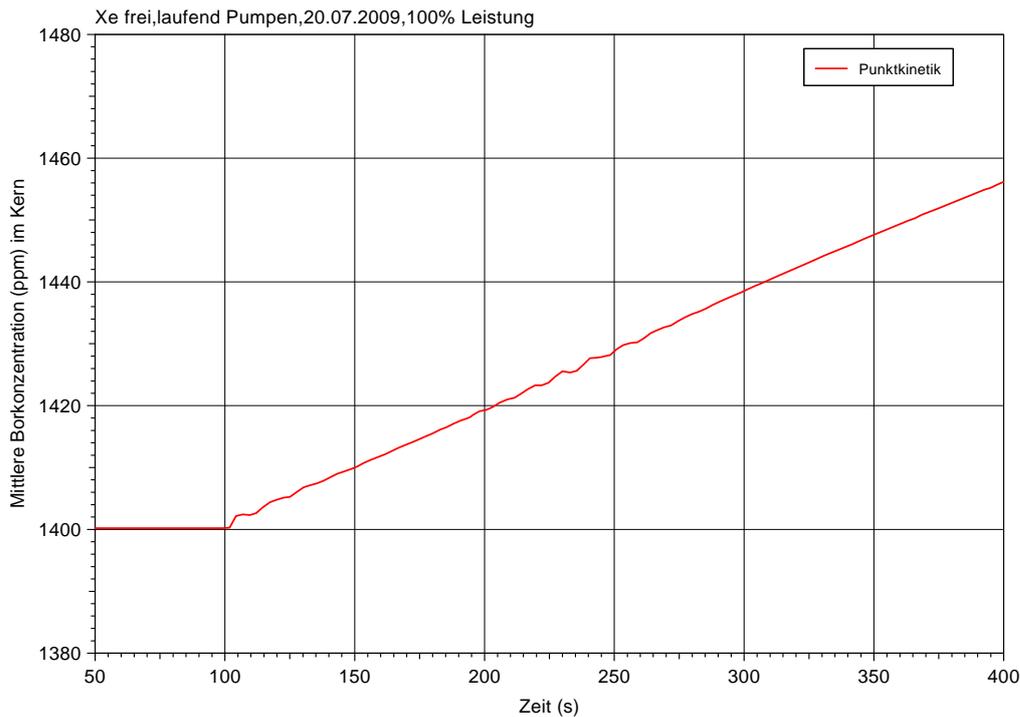


Bild 3-26 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Borkonzentration

3.1.4 Vergleich Punktkinetik – 3D Kinetik

Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen der Punktkinetik und der 3D-Kinetikrechnung, die in den Bildern 3-27 bis 3-33 gezeigt werden, ist die Übereinstimmung beim Verlauf des Reaktordruckes, der mittleren Kühlmitteldichte und der Borkonzentration gut.

Die Reaktorleistung verläuft die ersten 20 s in Übereinstimmung und fällt dann in der 3D-Kinetikrechnung auf etwa 0.2 GW tiefere Werte. Deshalb sinkt auch der Reaktordruck etwa 50 s nach Störfallbeginn auf etwas tiefere Werte. Der etwas tiefere Druck hat größere Werte der kritischen Wärmestromdichte und der DNBR zur Folge. Das DNBR-Verhältnis verringert sich weniger als in der Rechnung mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen und bleibt auch über dem Wert von 2,0.

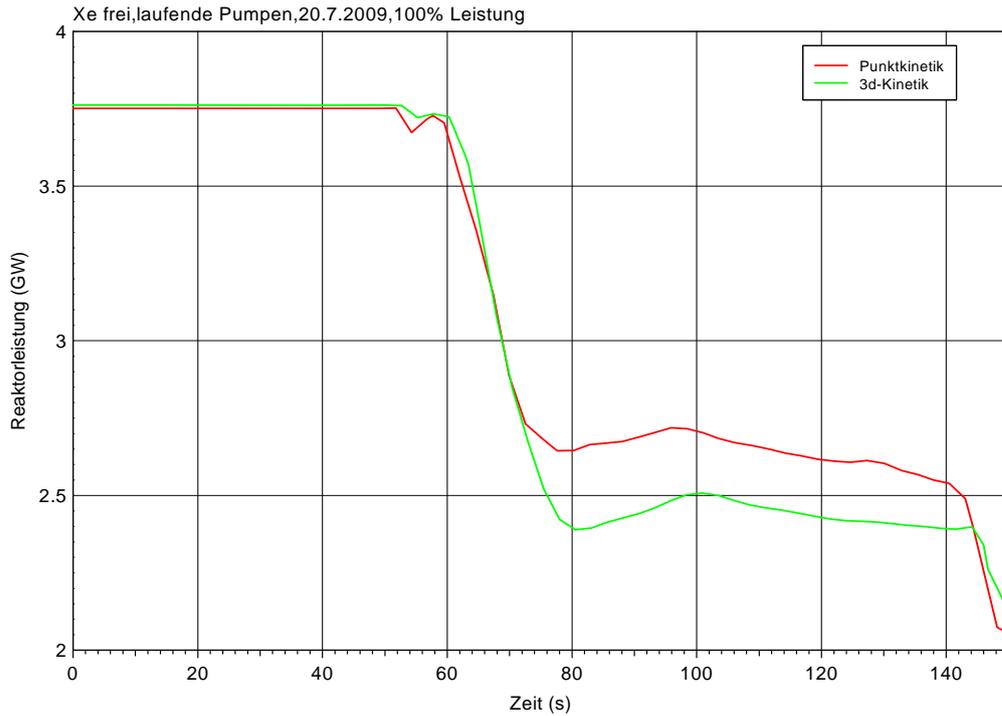


Bild 3-27 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung

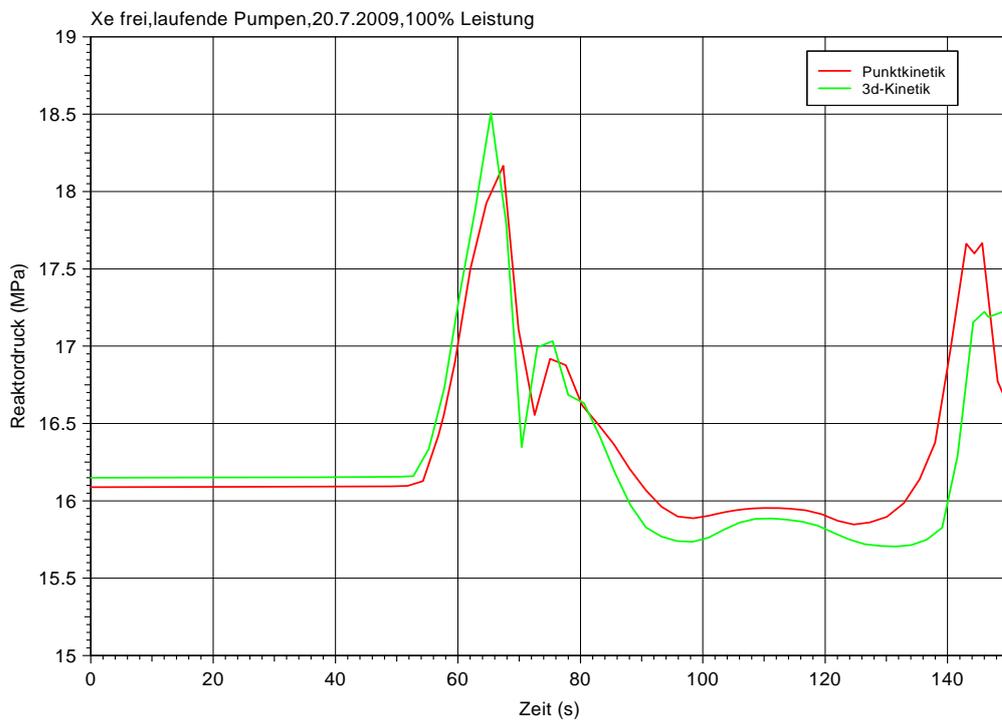


Bild 3-28 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktordruck

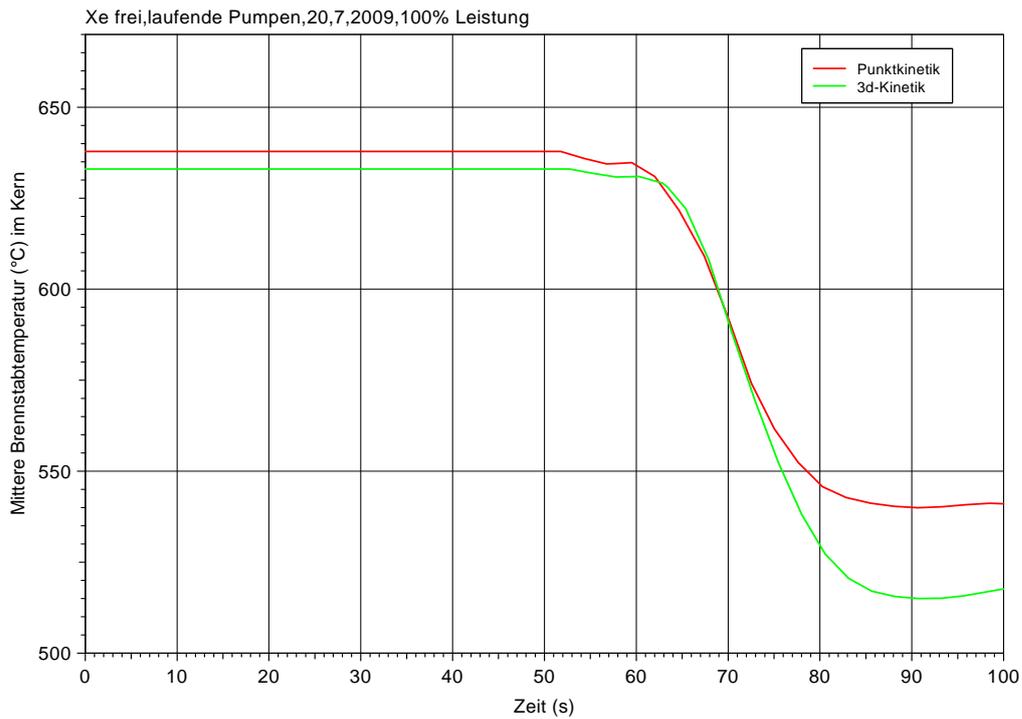


Bild 3-29 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur

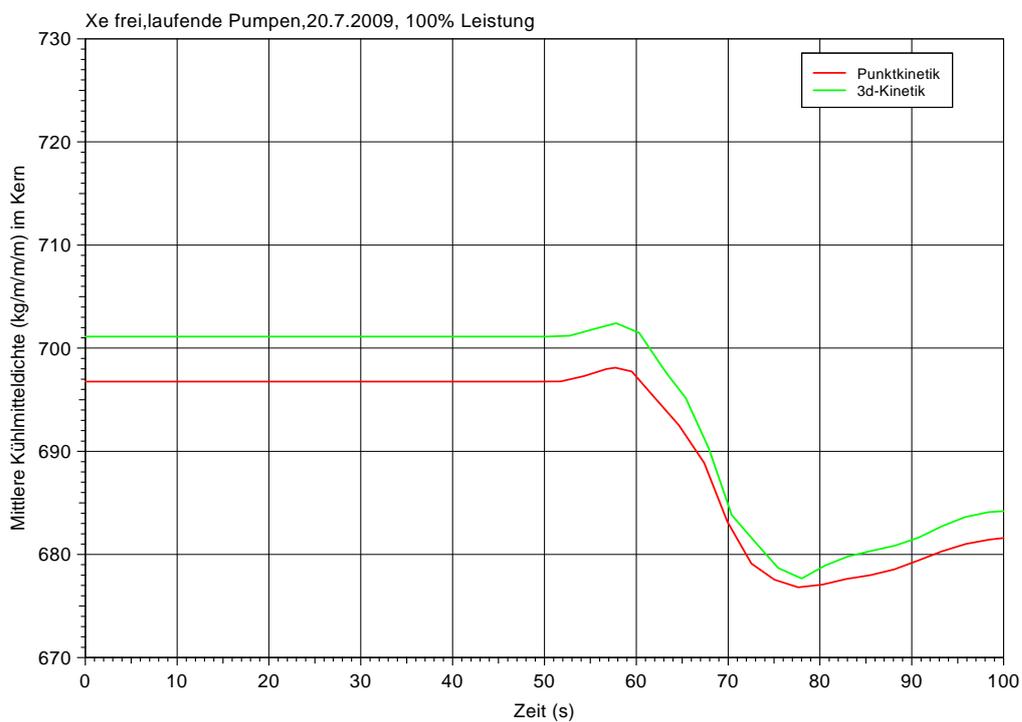


Bild 3-30 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte

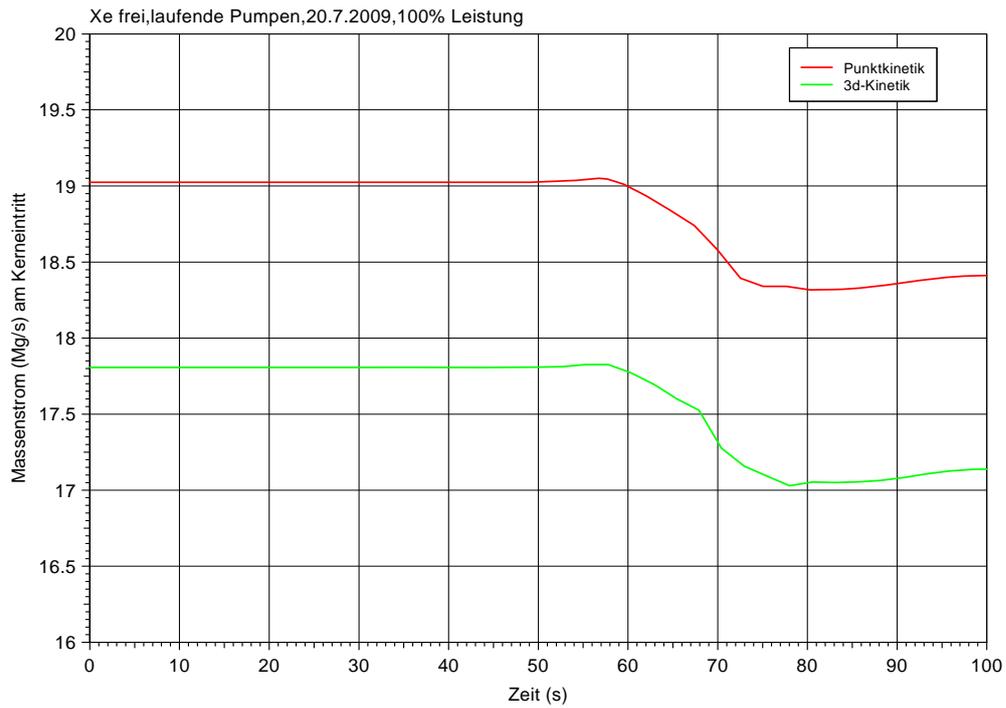


Bild 3-31 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Massenstrom

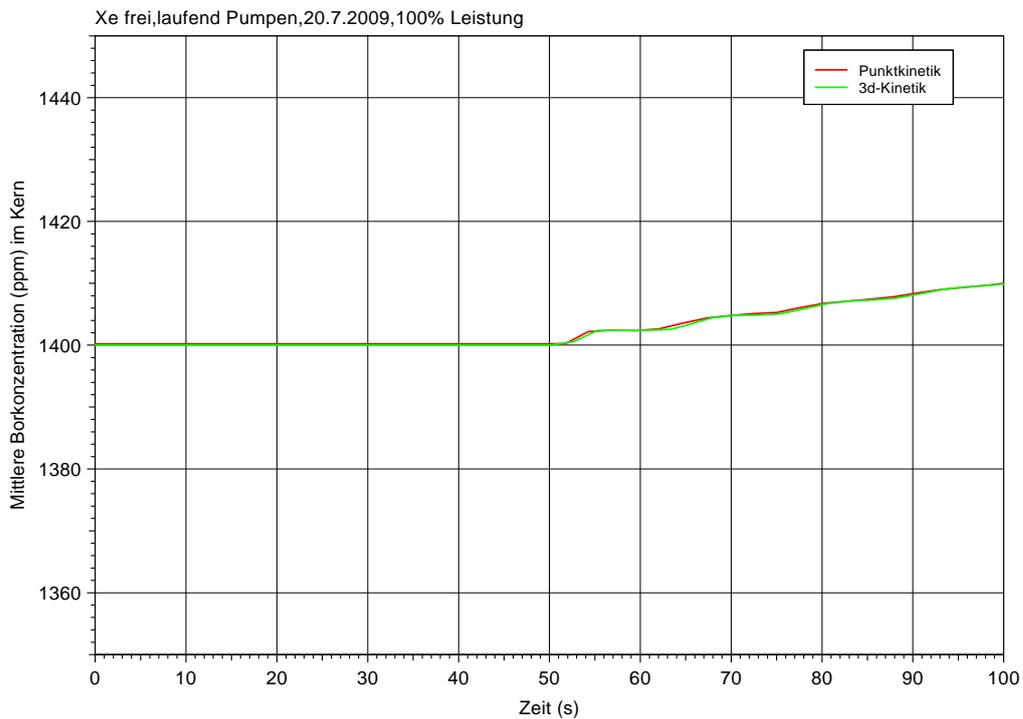


Bild 3-32 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration

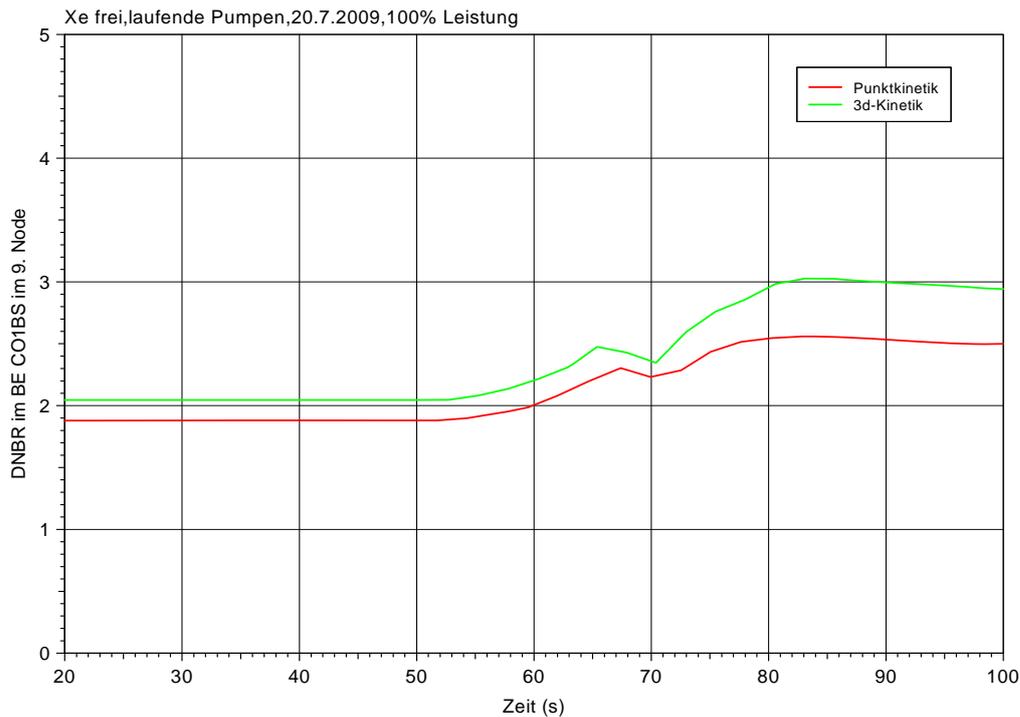


Bild 3-33 Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich DNBR

3.2 Vergleich der Transientenverläufe mit laufenden und abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen bei einer Leistung von 100 %

Der Unterschied zwischen den Ergebnissen mit laufenden und abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen, die in den Bildern 3-34 bis 3-40 für einen Zeitbereich von 900 s dargestellt sind, wird am deutlichsten am Verlauf des Massenstromes am Kerneintritt sichtbar. Bei laufenden Hauptkühlmittelpumpen bleibt der Massenstrom während der Transiente nahezu konstant, während der Massenstrom bei abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen deutlich sinkt.

Dieser Unterschied führt zusammen mit der Leistungserzeugung, dem Druck, - Dichte und Kühlmitteltemperaturverlauf zu unterschiedlichen Ergebnissen, wobei die Dichterrückwirkung den Leistungsverlauf wesentlich beeinflusst. Die Reaktorleistung fällt in der Rechnung mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen aufgrund der negativen Dichterrückwirkung deutlich schneller ab als in der Rechnung mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen.

Die mittlere Kühlmitteldichte sinkt bei abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen zu Beginn der Transiente aufgrund des fallenden Massenstromes schnell ab.

In der Rechnung mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen sinkt die mittlere Kühlmitteldichte in zwei Stufen. Das ergibt sich aus dem Leistungs-, –Druck und Kühlmitteltemperaturverlauf. Dadurch, dass die Leistung nach einem kleinen Abfall für etwa 70 s bei einem Wert von etwa 2,7 GW konstant bleibt, kommt es in der Rechnung mit laufenden Hauptkühlmittelpumpen zu einem zweiten Druckanstieg auf etwa 170 bar. Dieser Druckanstieg ist mit einem Anstieg der mittleren Kühlmitteltemperatur bei etwa 270 s verbunden. Wegen der damit verbundenen Vergrößerung des Kühlmittelvolumens sinkt die mittlere Kühlmitteldichte. Die weiter fallende Kühlmitteltemperatur hat eine Zunahme der mittleren Kühlmitteldichte zur Folge.

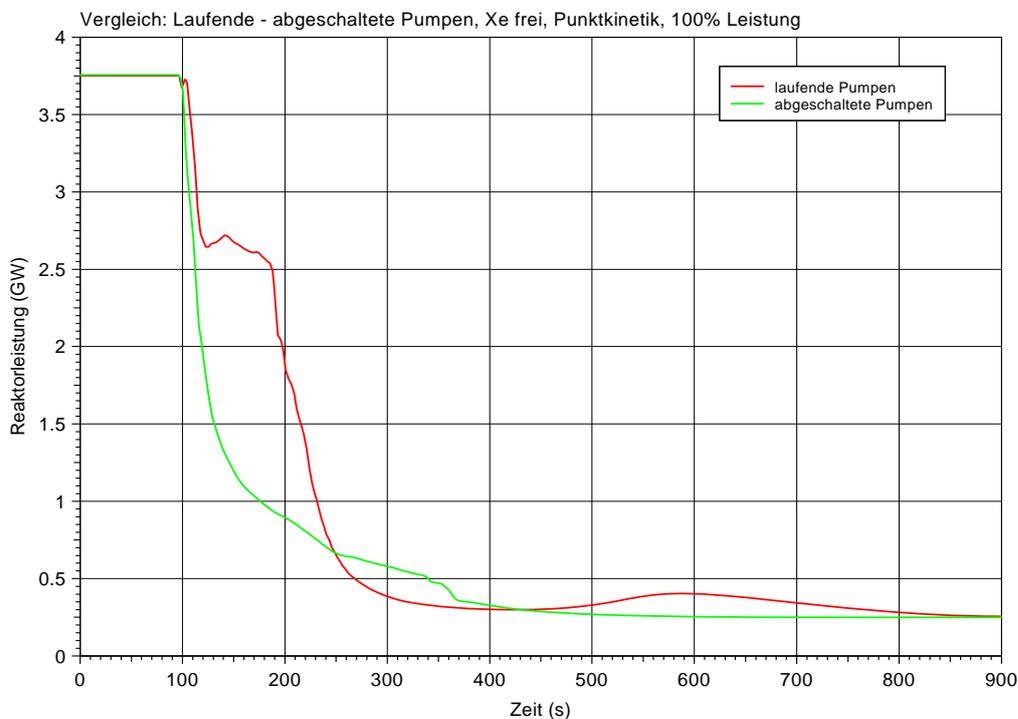


Bild 3-34 Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Reaktorleistung

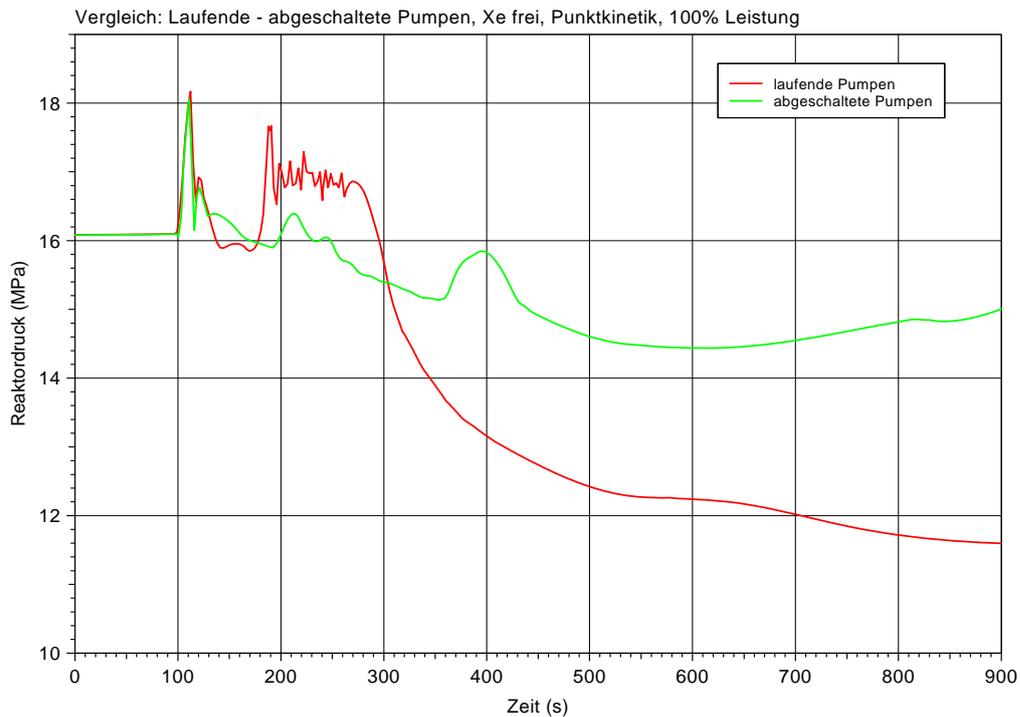


Bild 3-35 Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Reaktordruck

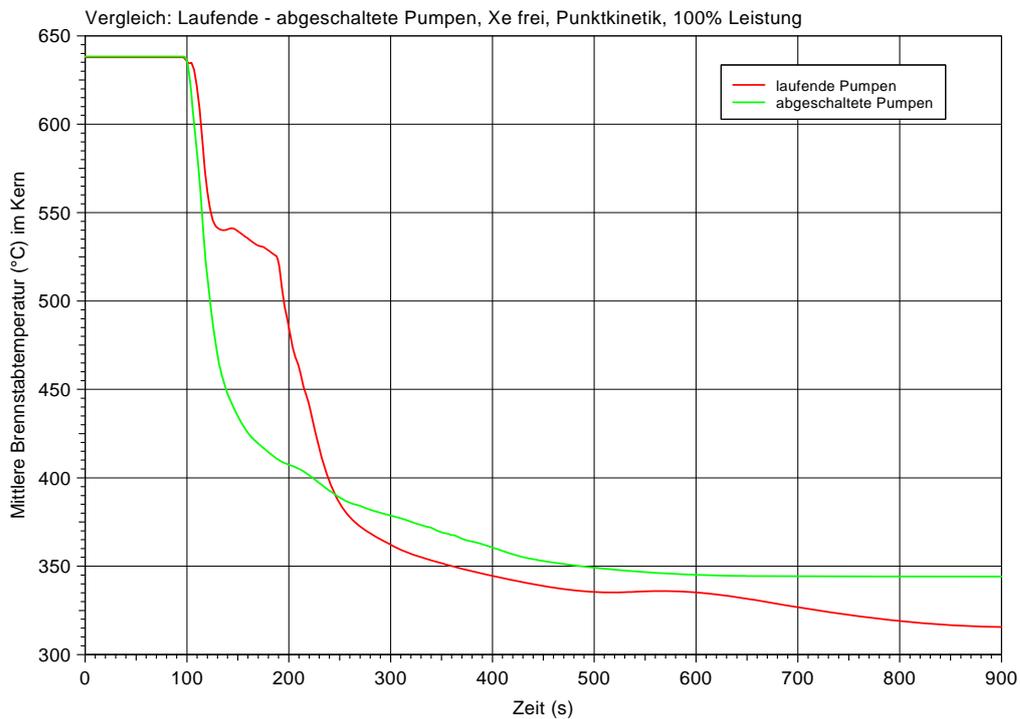


Bild 3-36 Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur

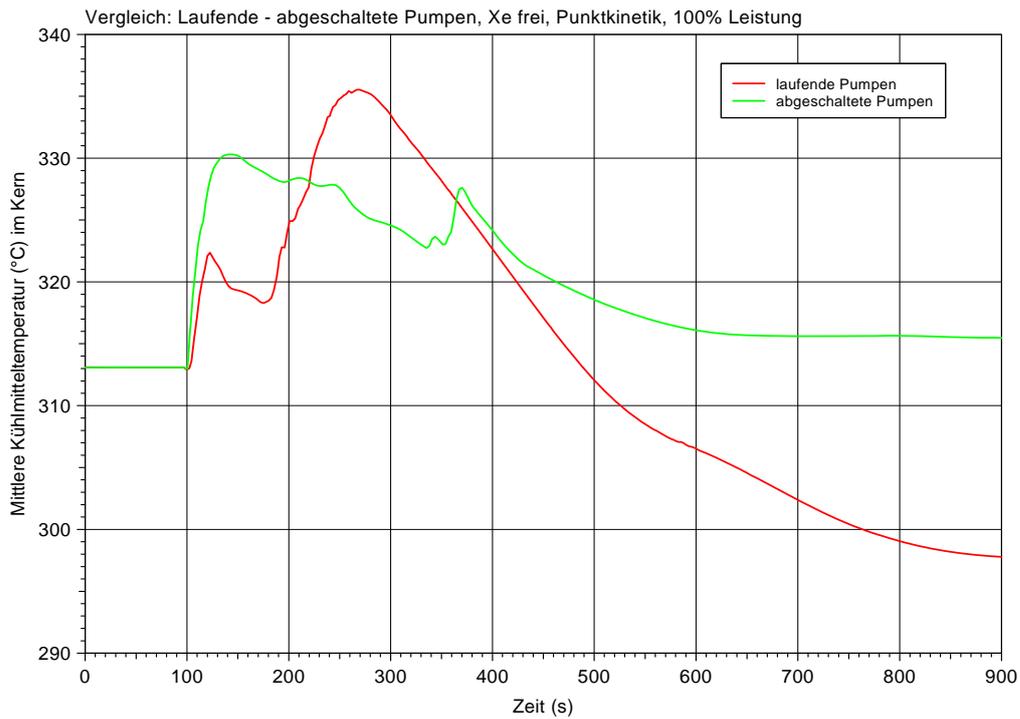


Bild 3-37 Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

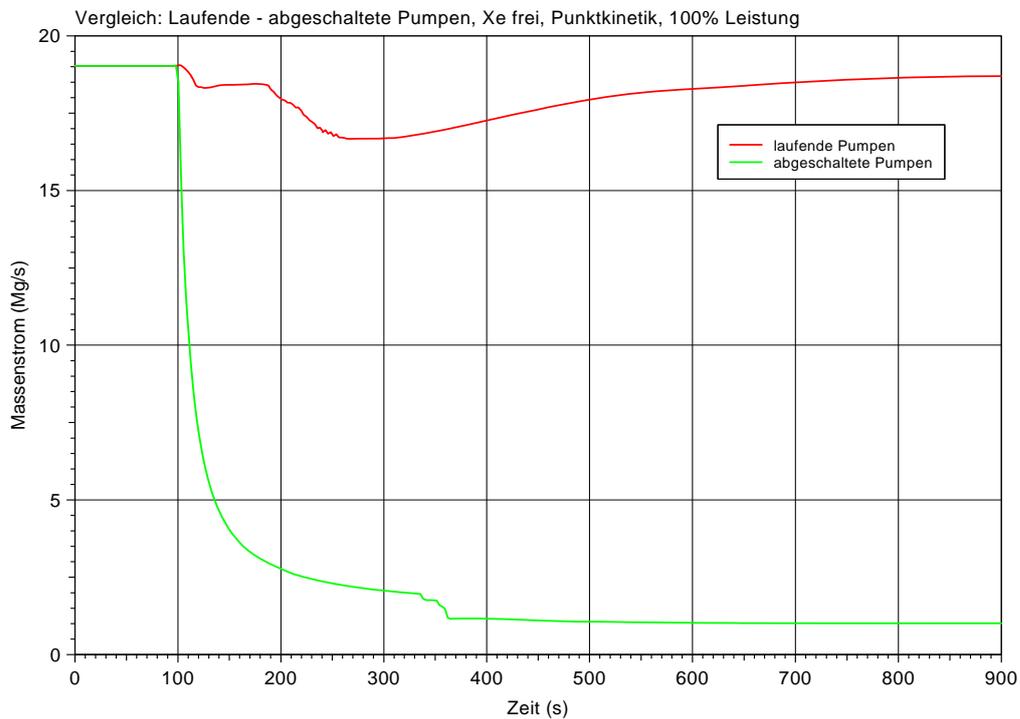


Bild 3-38 Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Massenstrom

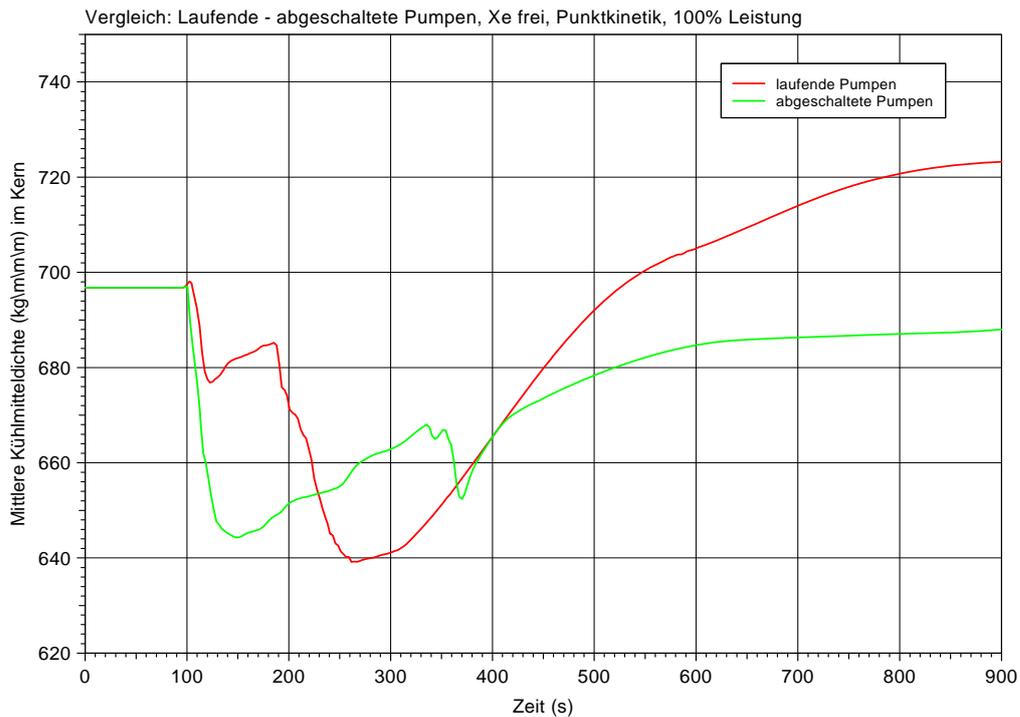


Bild 3-39 Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte

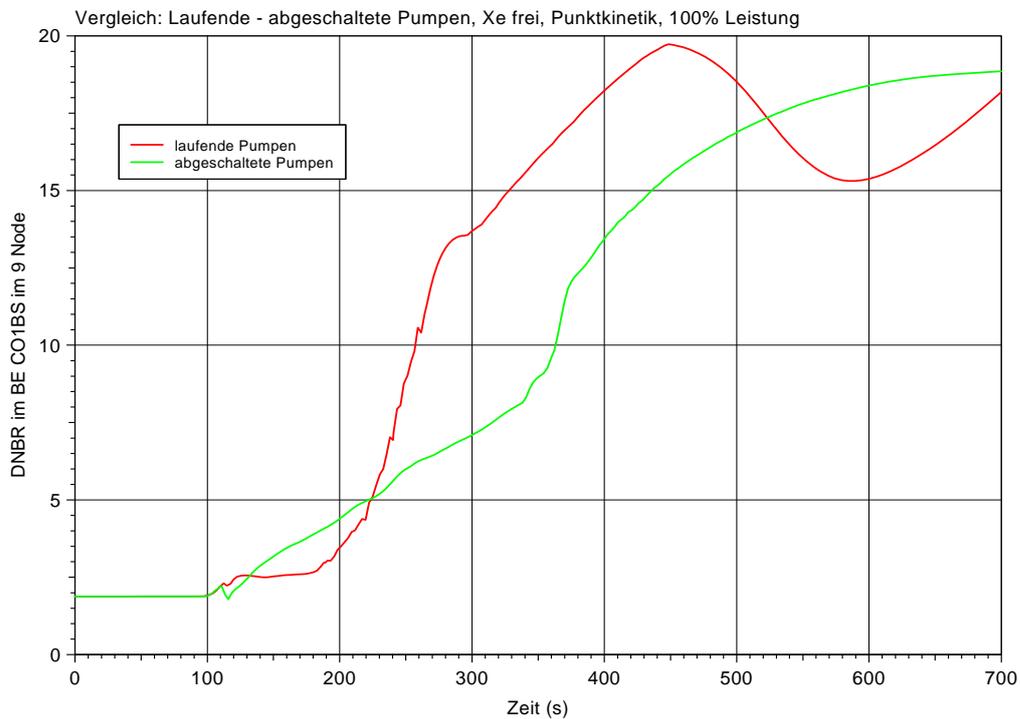


Bild 3-40 Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, DNBR

3.3 Vergleich der Transientenverläufe mit abgeschalteten Hauptkühlmit- telpumpen zwischen Xenongleichgewicht und xenonfrei sowie Punktkinetik und 3D-Kinetik

Der Vergleich dieser Ergebnisse ist in den Bildern 3-41 bis 3-48 dargestellt. Das wesentliche Merkmal der Rechenergebnisse der xenonfreien Rechnung ist die etwas höhere Reaktorleistung. Die höhere Leistung hat einen etwas höheren Reaktordruck, eine etwas höhere Brennstab – und Kühlmitteltemperatur zur Folge. Die Werte der Kühlmitteldichte und der DNBR zeigen etwas geringere Werte. Wie schon erwähnt, ist der DNB-Wert in der xenonfreien Rechnung mit 1,8 am geringsten. Die Werte der Punktkinetikrechnungen sind kleiner als die der 3D-Kinetikrechnung.

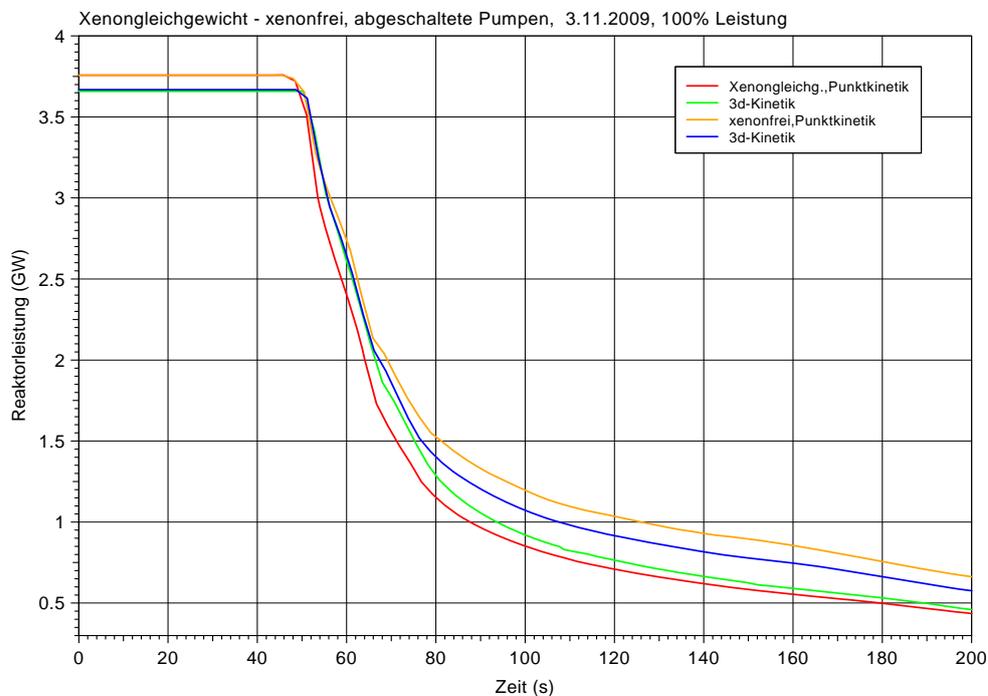


Bild 3-41 Vergleich: Xenongleichgewicht/Xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der Reaktorleistung

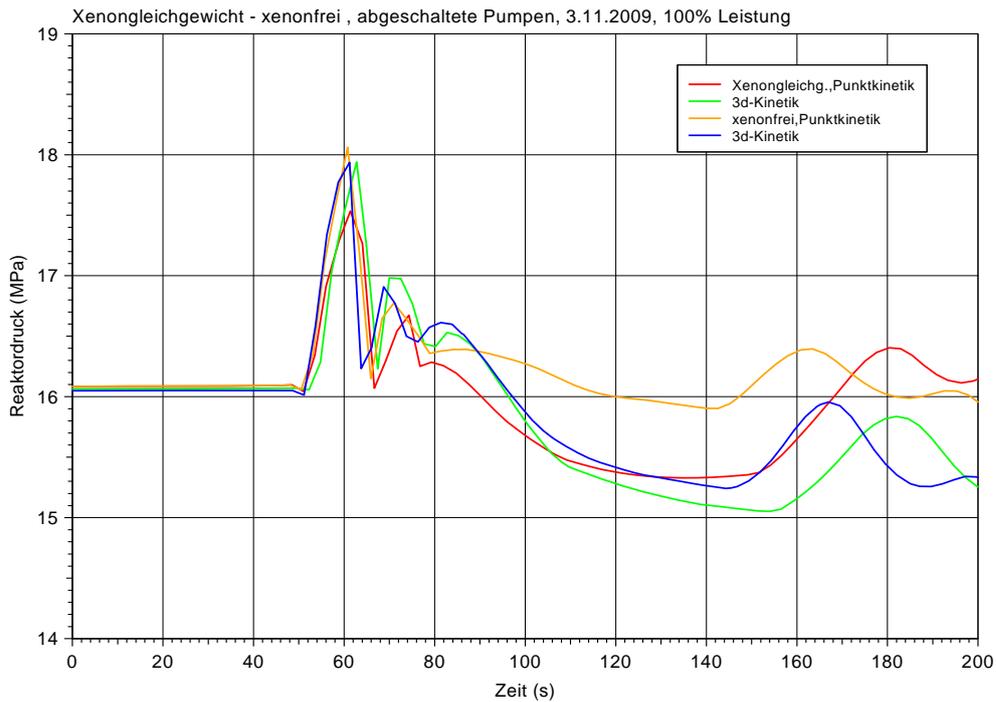


Bild 3-42 Vergleich: Xenongleichgewicht/xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich des Reaktordruckes

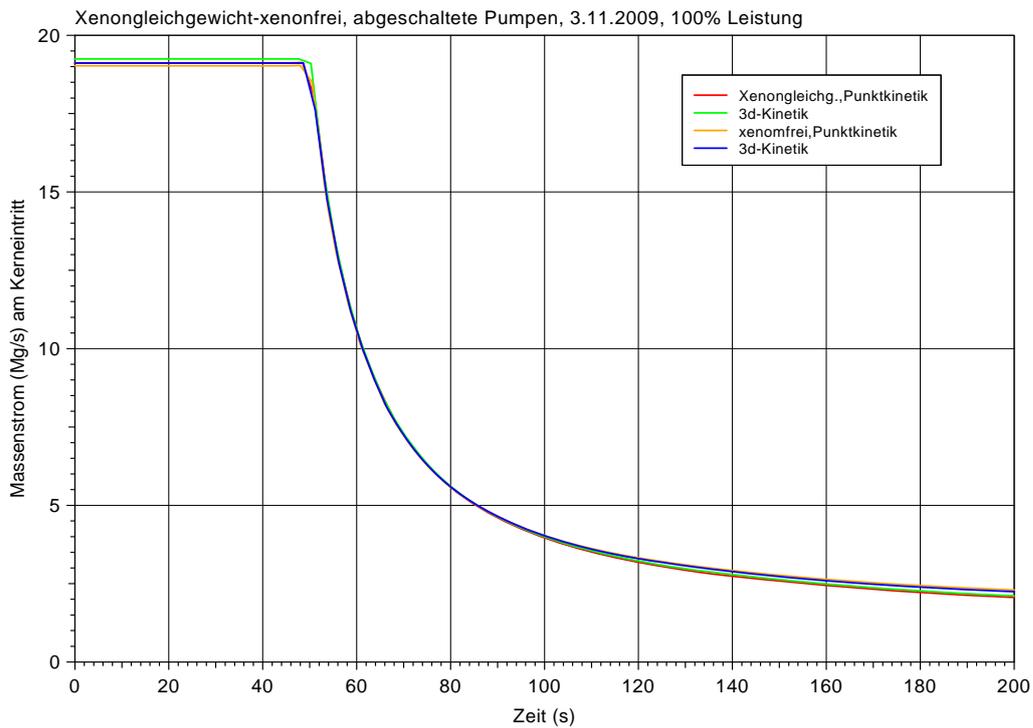


Bild 3-43 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich des Massenstromes am Kerneintritt

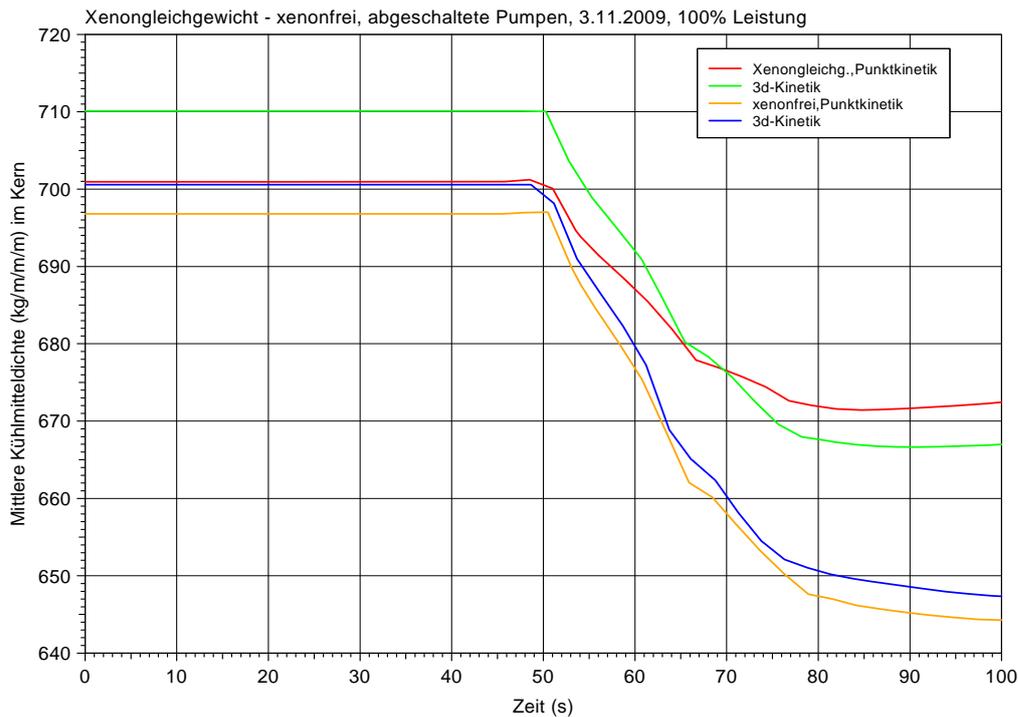


Bild 3-44 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Kühlmitteldichte

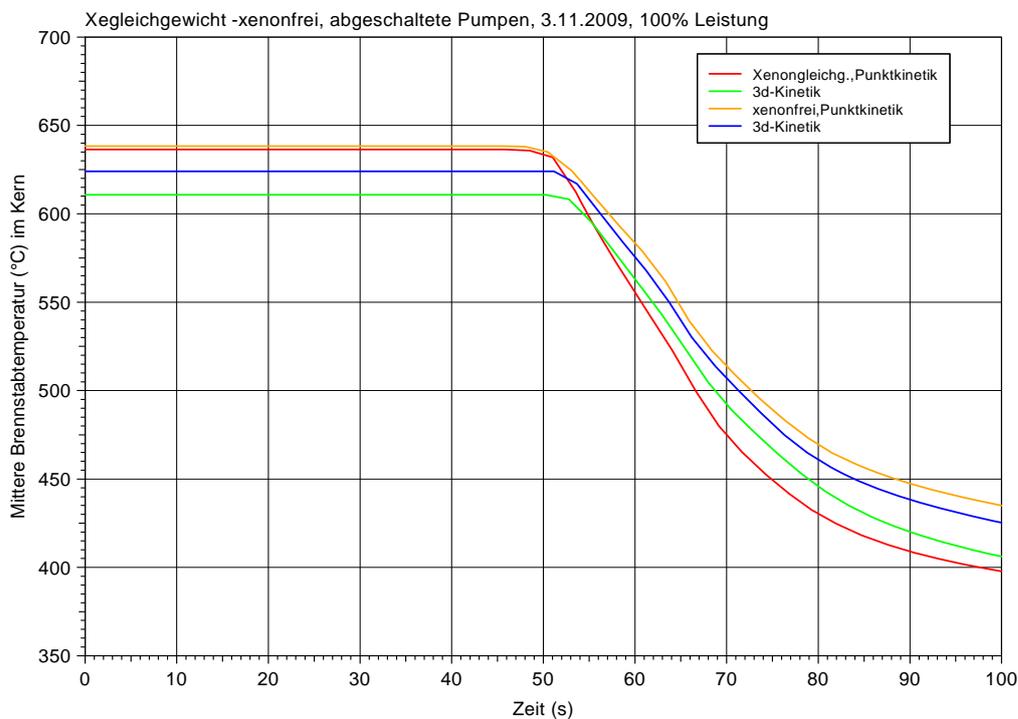


Bild 3-45 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Brennstabtemperaturen

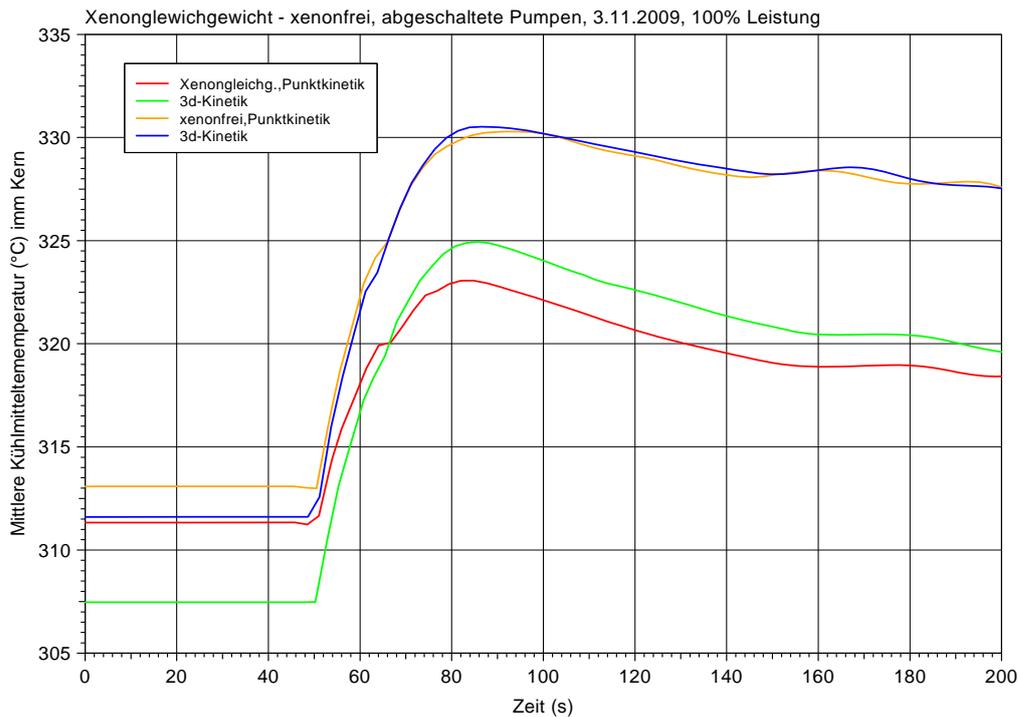


Bild 3-46 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Kühlmitteltemperaturen

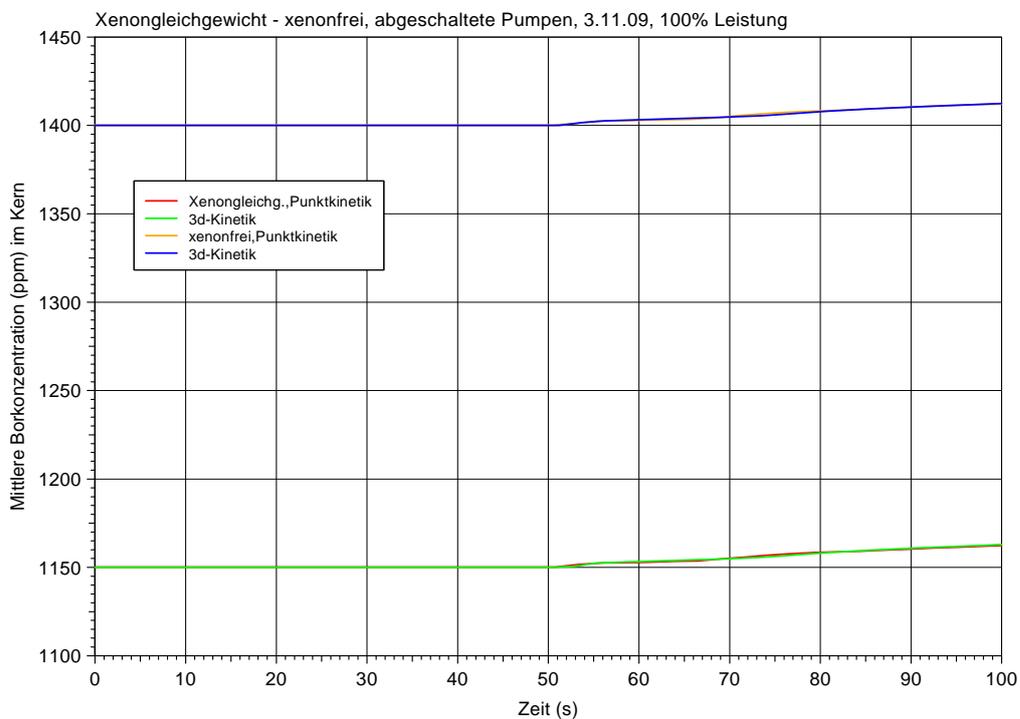


Bild 3-47 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Borkonzentration

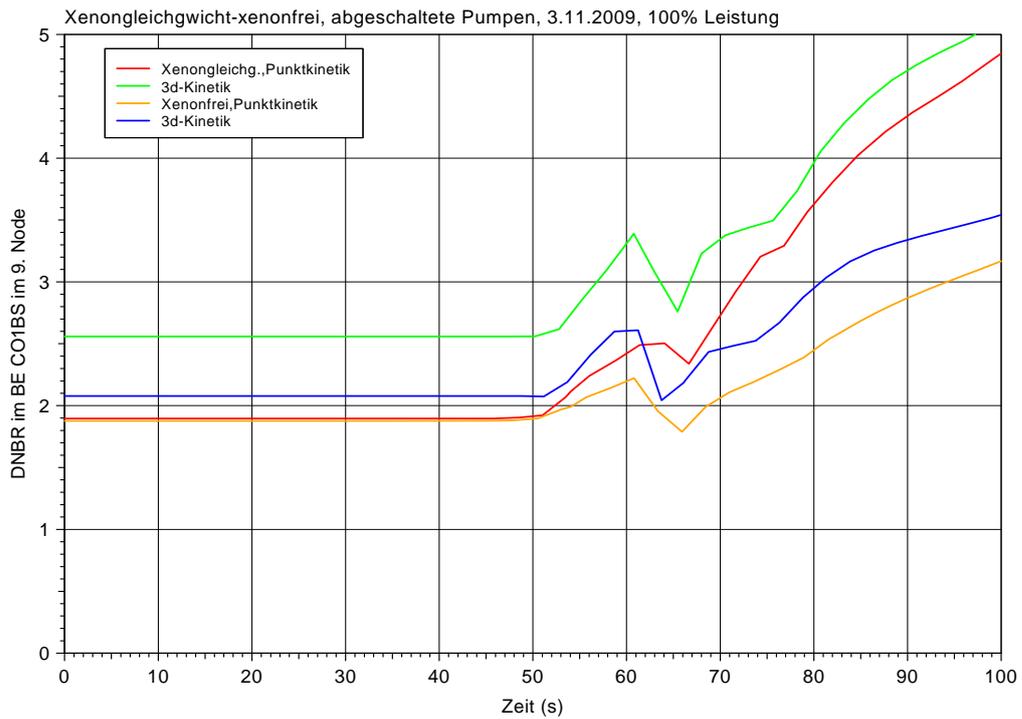


Bild 3-48 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der DNBR

3.4 Vergleich der Transientenverläufe mit laufenden Hauptkühlmittel-pumpen zwischen Xenongleichgewicht und xenonfrei sowie Punkt- und 3D-Kinetik

Der Vergleich dieser Ergebnisse ist in den Bildern 3-49 bis 3-56 dargestellt. Das wesentliche Merkmal der Rechenergebnisse der xenonfreien Rechnung ist wieder die etwas höhere Reaktorleistung. Die höhere Leistung hat einen etwas höheren Reaktor-druck, eine etwas höhere Brennstab – und Kühlmitteltemperatur zur Folge. Die Werte der Kühlmitteldichte und der DNBR zeigen etwas geringere Werte. Wie schon erwähnt, ist der DNB Wert in der xenonfreien Punktkinetikrechnung mit 2,3 am geringsten, aber deutlich höher als in der Rechnung mit abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen.

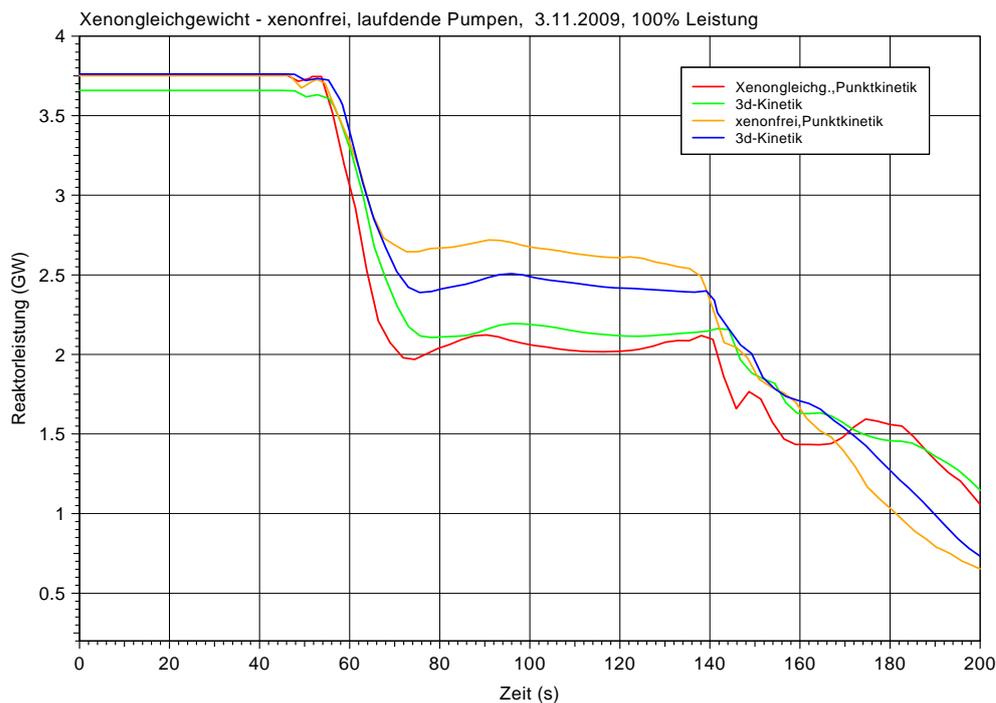


Bild 3-49 Vergleich: Xenongleichgewicht/Xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der Reaktorleistung

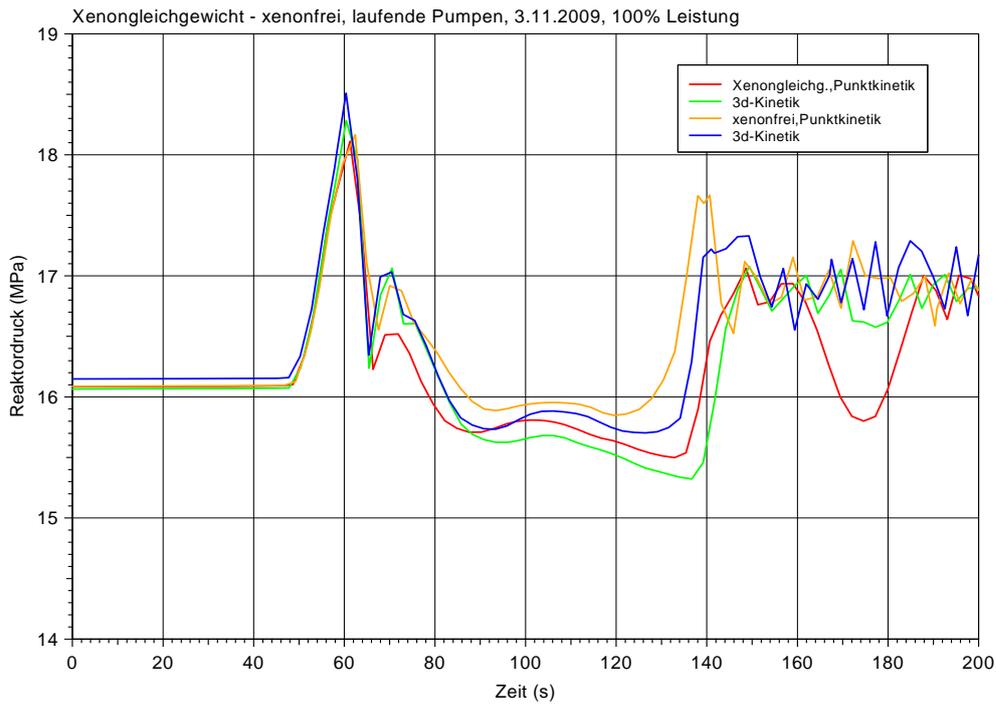


Bild 3-50 Vergleich: Xenongleichgewicht/Xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich des Reaktordruckes

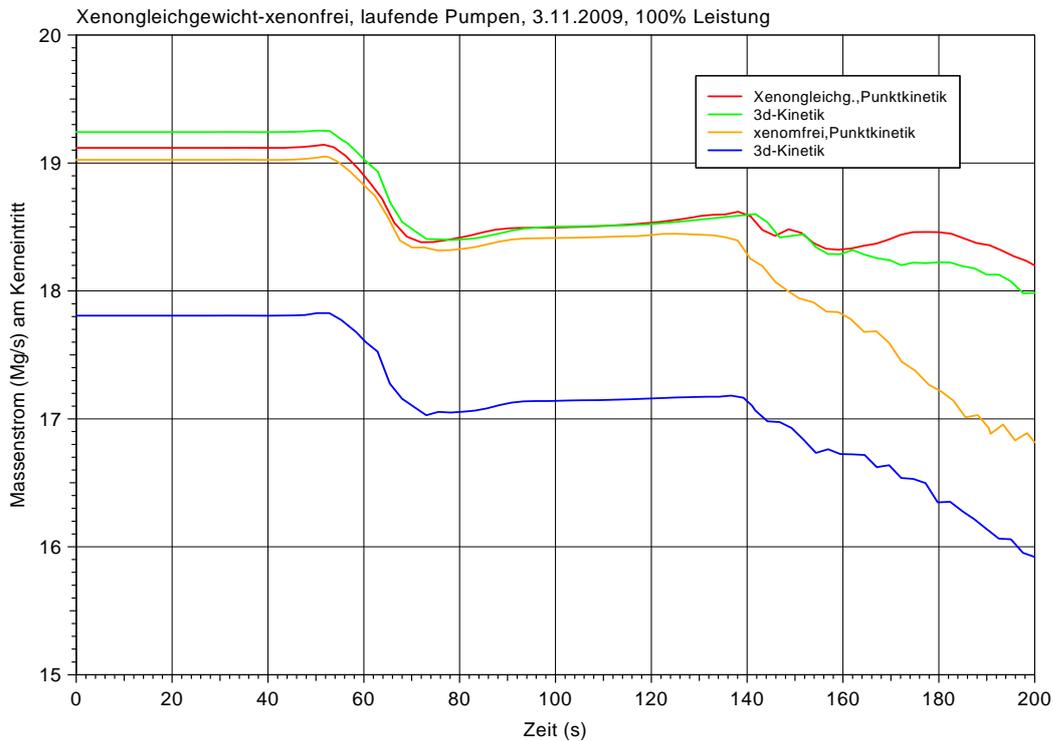


Bild 3-51 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich des Massenstromes am Kerneintritt

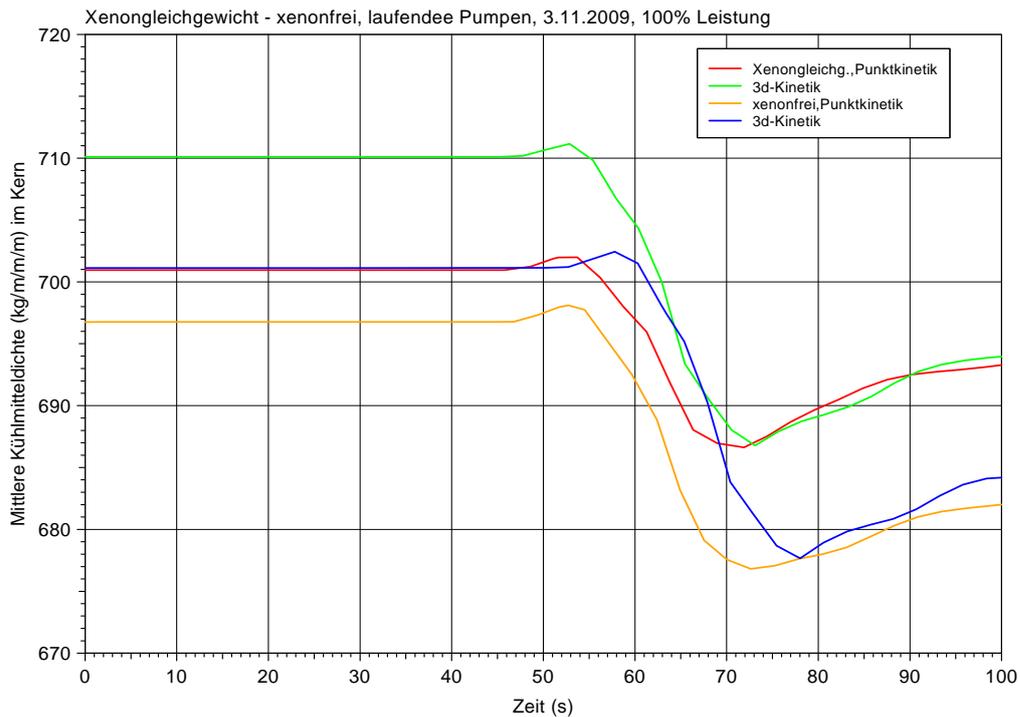


Bild 3-52 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Kühlmitteldichte

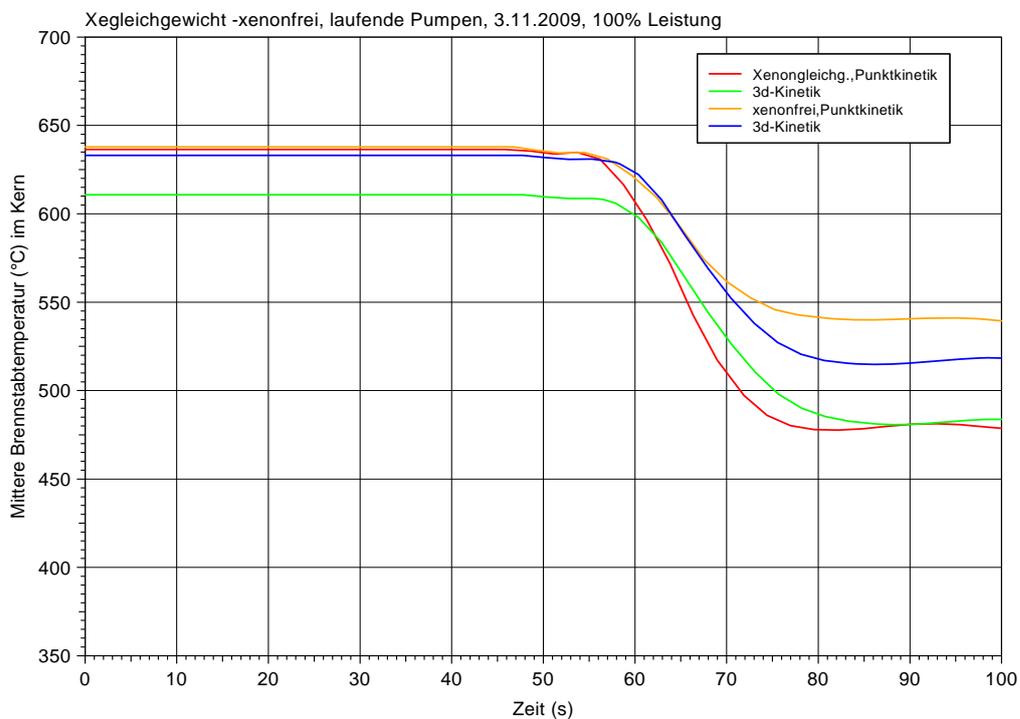


Bild 3-53 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Brennstabtemperatur

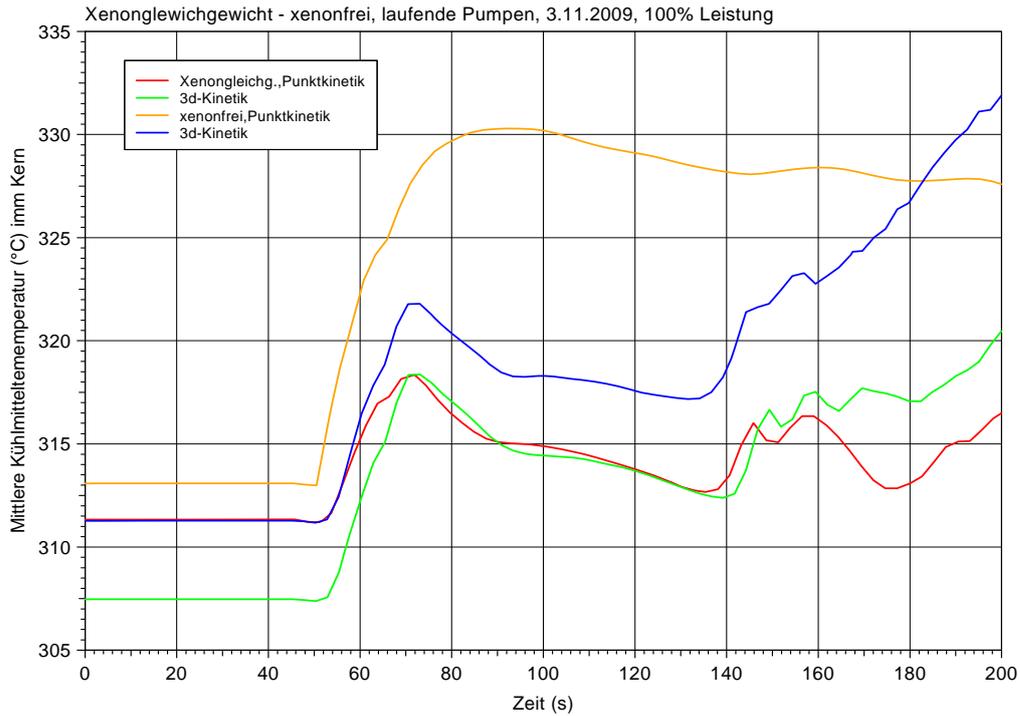


Bild 3-54 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Kühlmitteltemperatur

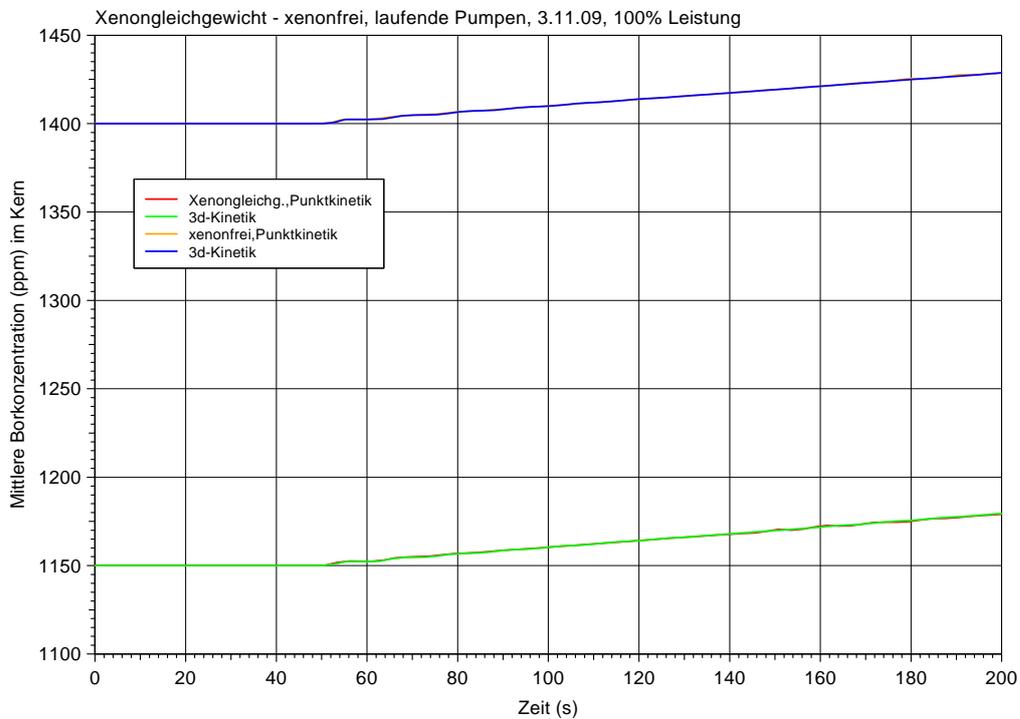


Bild 3-55 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Borkonzentration

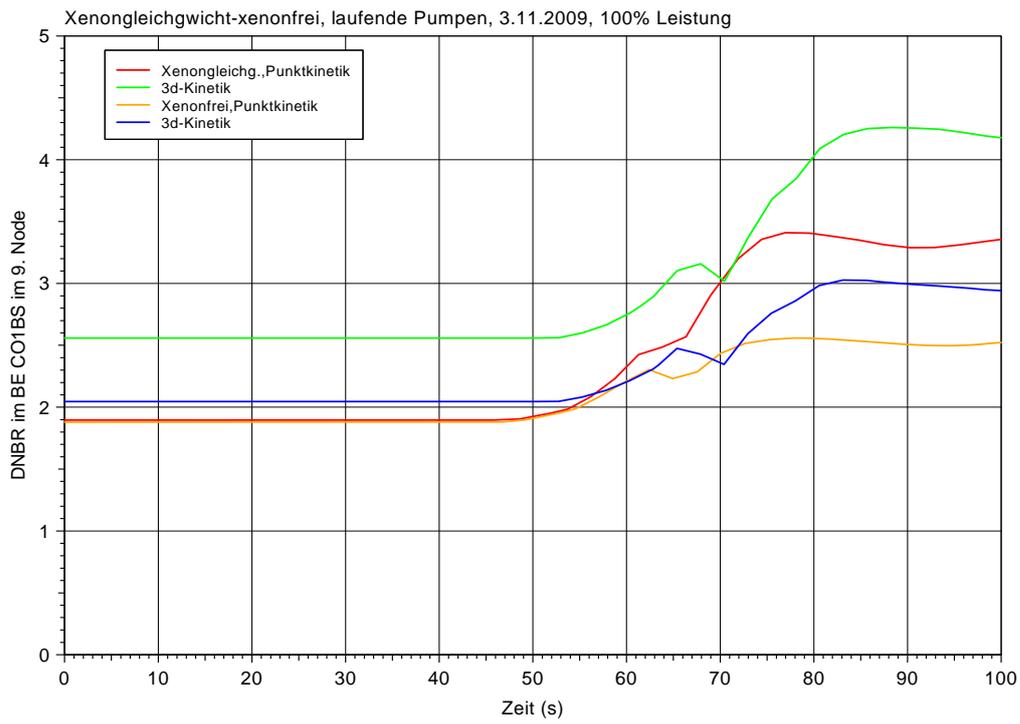


Bild 3-56 Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der DNBR

4 Zusammenfassende Bewertung

Die ATWS-Transiente „Ausfall der Speisewasserpumpen“ ist für die beiden Fälle mit abgeschalteten und laufenden Hauptkühlmittelpumpen für verschiedene Lastzustände (30, 80, 100 %) und jeweils im Xenongleichgewicht und im xenonfreien Zustand berechnet worden. Für die Beurteilung des Transientenverlaufes ist die RSK-Leitlinie /RSK 96/ und die RSK-Stellungnahme /RSK 05/ vom 07.07.2005 maßgebend.

In der Leitlinie wird gefordert, dass bei Ausfall der ersten Anregung zur Schnellabschaltung vorgegebene Kriterien zur Begrenzung des Reaktordruckes eingehalten und die langfristige Abschaltbarkeit erhalten bleibt. In der Stellungnahme vom 07.07.2005 werden die Forderungen aus der Leitlinie präzisiert. Sie wird durch die Forderung nach dem expliziten Nachweis der Kernkühlbarkeit erweitert.

Ferner wird die Forderung erhoben, dass alle Betriebszustände, also auch Teillastzustände nach dem Anfahren zu beachten sind (hier ist von sog. „quasistationären“ Zuständen die Rede). Beim Anfahren hat sich noch kein Xenongleichgewicht eingestellt und demzufolge liegt eine höhere Borkonzentration im Primärkreis vor. Zur Abdeckung der Betriebszustände ist die Transiente

- mit 30 % Leistung im Xenongleichgewicht;
- mit 30 % Leistung xenonfrei sowie;
- mit 80 % Leistung im Xenongleichgewicht;
- mit 80 % Leistung xenonfrei sowie;
- mit 100 % Leistung im Xenongleichgewicht und
- mit 100 % Leistung xenonfrei

berechnet worden.

Die berechneten maximalen Druckunterschiede zwischen stationärem Ausgangszustand (Nenndruck) und dem Druckmaximum während der Transiente sind in Tabelle 4-1 (rechte Spalte) zusammengestellt. Der größten Druckdifferenzen treten bei 100 % Leistung im xenonfreien Zustand bei weiterlaufenden Hauptkühlmittelpumpen auf. Für den Fall der laufenden Pumpen ergeben sich für die Punktkinetikrechnung Werte von 21 bar und für die 3D-Kinetikrechnung Werte von 23,5 bar. Bei der Rechnung mit abgeschalteten Pumpen lauten die Ergebnisse der Punktkinetikrechnung 20,0 bar und der 3D-Kinetikrechnung 19,5 bar.

Die Forderung, die Kühlbarkeit der Brennstäbe zu beurteilen, wird mit dem zeitlichen Verlauf der DNBR–Werte zum Störfallbeginn und dem minimalen DNBR–Wert während der Transiente beantwortet. Die kleinsten Werte treten ebenfalls in der xenonfreien Rechnung mit 100 % Leistung bei abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen auf; der Minimalwert beträgt hier 1,80. Der Wert bei abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen ist durchweg geringer, weil bei abgeschalteten Pumpen der Kerndurchsatz des Reaktors über die gesamte Transiente hinweg geringer ist.

Der DNBR Wert von 1,8 ist aber immer noch deutlich größer als der 95/95 Grenzwert von etwa 1,2 für das DNBR Verhältnis, die Kühlbarkeit bleibt also auch in diesem abdeckenden Fall bestehen.

In Tabelle 4-2 sind, wie im Abschnitt 2.4.1 erwähnt, für die xenonfreie Rechnung mit 100 % Leistung und abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen die Werte für die unterschiedlichen DNB–Korrelationen zu Beginn der Transiente und die Minimalwerte zusammengestellt. Die geringsten Werte ergeben sich bei der Verwendung KWU-Tafeln, so dass die Einhaltung konservativer Werte bei der Auslegung als gewährleistet angenommen werden kann.

Zusammenfassend lässt sich also Folgendes festhalten:

- Für die in dieser Arbeit gewählte exemplarische Kernbeladung wird die ATWS-Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“ hinsichtlich **aller Nachweisziele beherrscht**. Dies sind die Integrität der druckführenden Umschließung, sowie die langfristige Unterkritikalität des Kerns und die Kühlbarkeit.
- **Der Leistungszustand bei Vollast hat sich als abdeckend gegenüber den Teillastzuständen bei 30 % und 80 % der Nennleistung erwiesen**. Selbst wenn bei den genannten Teillastzuständen ein xenonfreier Reaktorkern unter-

stellt wird, lassen sich die Nachweisziele einfacher erfüllen als für den Vollastzustand, da der Druckanstieg geringer ausfällt und das minimale DNB-Verhältnis deutlich höher ist (siehe Tabelle 4-2)

- Die maximale ermittelte Druckerhöhung beträgt 23,5 bar für den xenonfreien Kern bei Vollast und weiterlaufenden Hauptkühlmittelpumpen, das minimale DNB-Verhältnis ist 1,80 für den **xenonfreien Kern bei Vollast und abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen**.
- Nur für den Fall des xenonfreien Kerns bei Vollast sinkt das DNB-Verhältnis während der Transiente geringfügig (auf Werte von 2 bis etwa 1,50 beim Verwenden der offenbar konservativen KWU-Tafeln) unter den stationären Ausgangswert, in allen anderen Fällen bleibt es oberhalb des Ausgangswerts.
- Außer für den Fall „30 %, xenonfrei“ ist der stationäre minimale DNB-Wert für Punktkinetikrechnungen geringer als für 3D-Rechnungen. Dies hängt damit zusammen, dass insbesondere für den „reaktiven“ Kern bei geringer Teillast und xenonfreiem Zustand der Kreislauf aufboriert und mehrere Steuerstabbänke tief eingefahren werden müssen. **Bedingt dadurch stellt sich ein „Peak-unten“-Leistungsprofil mit einem niedrigen stationären DNB-Wert ein**. Allerdings ist die maximale Druckerhöhung im Primärkreislauf für einige 3D-Rechenfälle geringfügig höher als für Punktkinetik, aber auch hier sind vorwiegend Kerne mit tief eingefahrenen Steuerstäben betroffen.
- Generell ist festzuhalten, dass eine **direkte Vergleichbarkeit von xenonfreien und Xenongleichgewichtszuständen schwierig ist**, da der xenonfreie Fall immer erhebliche Maßnahmen zur Reaktivitätsbindung (Steuerstäbe und Aufborierung) notwendig macht. Dadurch wird aber zum einen das **anfängliche Leistungsprofil stark deformiert**, so dass man bereits mit stark unterschiedlichen DNB-Werten in die Transiente startet. Zum anderen besteht eine gewisse Willkür bei der Reaktivitätsbindung, denn diese kann entweder durch verstärkte Aufborierung oder primär durch Stabverfahren erreicht werden. Dies ist aber von den jeweiligen Fahrprogrammen an der Anlage abhängig und möglicherweise durch Einfahr- oder Einspeisebegrenzungen reglementiert, was **die Festlegung eines konsistenten Ausgangszustands im Xenon-Nichtgleichgewicht und den Vergleich mit einem stabfreien Xenongleichgewichtskern bei Vollast erschwert**.
- Bedingt durch die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen (insbesondere hinsichtlich des minimalen stationären DNB-Verhältnisses) ist es schwierig, eine Aussage zu machen, ob ein xenonfreier Kern letztlich zu ungünstigeren (d.h.

abdeckenden) Resultaten führt. Tatsächlich zeigen die vorgelegten Analysen, dass das **DNB-Minimum vorwiegend durch die stationäre Kernausslegung**, viel weniger aber durch die möglicherweise (geringfügig) ungünstigeren dynamischen Rückwirkungsparameter bestimmt wird.

- Um eine Vergleichbarkeit von ATWS-Analysen zu gewährleisten, ist es daher ratsam, einen klar definierten Zustand für den Reaktorkern als Startpunkt für die Transiente zu wählen. Um die Willkür bei der Einstellung des axialen Leistungsprofils so weit wie möglich einzuschränken, sollte **der Kern stabfrei betrachtet und die Kritikalität über Aufborierung hergestellt werden**. Dabei sollte die **maximale Borkonzentration, die im Zyklus erwartet wird, nicht überschritten werden**.
- Die xenonbedingte Änderung der dynamischen Eigenschaften des Kerns (d.h. die Änderung der Reaktivitätskoeffizienten bzw. der Voidkurve beim Übergang von Xenongleichgewicht nach xenonfrei) werden von der GRS als gering eingeschätzt, **der Einfluss auf den Transientenverlauf als praktisch vernachlässigbar**. Eine endgültige Aussage darüber kann aber nur getroffen werden, indem eine Reihe von deutschen Reaktorzyklen z. B. hinsichtlich der Voidkurven und Moderatortemperaturkoeffizienten systematisch ausgewertet und Vergleiche zwischen Xenongleichgewicht und xenonfreiem Kern durchgeführt werden. Eine solche Datenbasis steht aber der GRS nicht zur Verfügung und müsste ggf. durch eine Länderumfrage erreicht werden.

Tab. 4-1 Zusammenstellung für Rechenergebnisse zur ATWS-Transiente

Fall	Pumpen	DNBR () Anfangswert		DNBR Minimum ()		Reaktordruck (bar)		Max. Reaktor- druck (bar)		Max. Druckdiffe- renz (bar)	
		Pk	3D	Pk	3D	Pk	3D	Pk	3D	Pk	3D
30 % Leistung Xenongleichgewicht Punkt-,3D-Kinetik	abgeschaltete Pumpen	4,77	5,48	größer als Anfangswert		158,0	153,0	163,5	165,5	5,5	12,5
Punkt-,3D-Kinetik	laufende Pumpen	4,78	5,48	größer als Anfangswert		158,1	153,0	158,2	154,6	0,1	1,6
30 % Leistung xenonfrei Punkt-,3D-Kinetik	abgeschaltete Pumpen	4,97	4,38	größer als Anfangswert		158,4	161,5	165,0	167,5	6,6	6,0
Punkt-,3D-Kinetik	laufende Pumpen	4,89	4,32	größer als Anfangswert		162,0	162,0	163,5	166,5	1,5	4,5
100 % Leistung Xenongleichgewicht Punkt-,3D-Kinetik Minimum W3	abgeschaltete Pumpe	1,9	2,58	2,4	2,8	160,05	160,04	176	179,9	16,0	19,9
Punkt-,3D-Kinetik Minimum W3	laufende Pumpen	1,9	2,58	2,6	3,0	161,0	161,5	176,0	179,0	15,0	17,5
100 % Leistung xenonfrei Punkt-,3D-Kinetik Minimum W3	abgeschaltete Pumpe	1,88	2,1	1,80	2,1	160	160	180,1	179,9	20,1	19,9
Punkt-,3D-Kinetik xenongleichgewicht Punkt-3D-Kinetik Minimum W3	laufende Pumpen	1,88	2,05	2,05	2,05	161,0	161,5	182,0	185,0	21	24,5

Tab. 4-2 Zusammenstellung der DNBR Werte von unterschiedlichen Korrelationen

Westinghouse W3	Punkt- vs. 3D-kinetik	1,88	2,1	1,80	2,1
Hench-Levy	Punktkinetik	1,94		größer	
Israel-Casterline	Punktkinetik	2,09		größer	
Biasi	Punktkinetik	2,11			
KWU- Tafeln (Doroschuk)	Punktkinetik	1,50			

5 Untersuchungen zur Kühlbarkeit

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden neben der Untersuchung von Teillast- und Xenon-Nichtgleichgewichtszuständen auch detaillierte Untersuchungen zur Kühlbarkeit des Reaktorkerns bei ATWS mit dem gekoppelten Rechenmodell ATHLET-QUABOX/CUBBOX/COBRA-TF durchgeführt. Ziel der Analysen war es, die in COBRA-TF implementierten fortgeschrittenen thermohydraulischen Modelle gezielt für den Nachweis der Kernkühlbarkeit bei ATWS zu nutzen. Im Gegensatz zu den inhärent eindimensionalen Parallelkanalmodellen in ATHLET löst COBRA-TF die dreidimensionalen 2-Fluid-3-Feldgleichungen für zweiphasige Strömungen und kann damit z. B. auch für die akkurate Simulation von Querströmungen in Stabbündeln und die Beschreibung mehrphasiger Vermischungsprozesse eingesetzt werden. Geometrisch können mit COBRA-TF sowohl ganze Brennelemente als auch Einzelstäbe modelliert werden, allerdings beschränken sich die Möglichkeiten des Codes auf die Fluiddynamik im Reaktorkern. Für die Simulation des Primärkreislaufs sowie von Instrumentierung und Regelung muss bei ATWS-Analysen nach wie vor der ATHLET-Code eingesetzt werden. Im Rahmen von an der GRS durchgeführten Reaktorsicherheitsforschungsprojekten wird angestrebt, COBRA-TF als 3D-Kernmodell an ATHLET anzukoppeln und somit den gesamten Codekomplex ATHLET-COBRA-TF-QUABOX/CUBBOX für 3D-gekoppelte Störfallanalysen nutzbar zu machen. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde allerdings lediglich eine sog. *Offline*-Kopplung realisiert, in der die ATWS-Szenarien mit ATHLET bzw. ATHLET-QUABOX/CUBBOX berechnet werden und lediglich die Kernkühlbarkeitsanalyse mit COBRA-TF durchgeführt wird. Dazu werden die Kerneintritts- und Austrittsbedingungen (Eintrittsmassenstrom, Eintrittsenthalpie, Druck im oberen Plenum) sowie das axiale Leistungsprofil nach der ATHLET-Analyse ausgelesen und dem COBRA-TF-Code als zeitliche Randbedingungen aufgeprägt, siehe Bild 5-1. Die wesentliche Schwäche der *Offline*-

Kopplung ist das Fehlen möglicher Rückwirkungen des COBRA-TF-Modells auf das ATHLET-Modell (aufgrund eines unter Umständen unterschiedlichen thermohydraulischen Kernverhaltens der beiden Rechencodes).

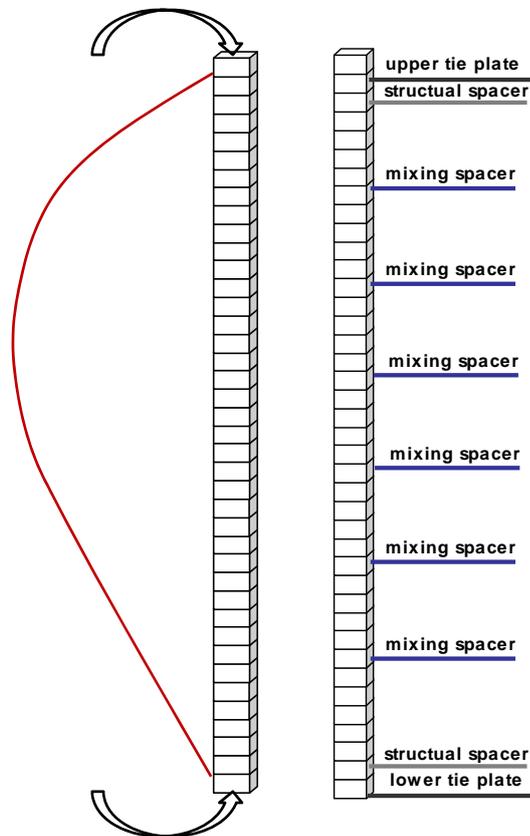


Bild 5-1 Übergabe der zeitlichen Randbedingungen aus ATHLET an das COBRA-TF-Rechenmodell

Eine solche Unterkanalanalyse ist von besonderem Interesse für den Heißstab bzw. das heiße Bündel des Kernmodells, da dort das minimale DNB-Verhältnis während der Transiente auftritt, das über das mögliche Auftreten einer Siedekrise und somit über die Kernkühlbarkeit entscheidet. Grundsätzlich können mit COBRA-TF aber nicht nur einzelne Stäbe oder kleinere Kernausschnitte simuliert werden. So ist es mittlerweile an der GRS auch gelungen, ganze Reaktorkerne auf Brennelementbasis mit COBRA-TF aufzusetzen. Im aktuellen Projekt beschränken sich die Analysen allerdings auf die Untersuchung des Heißstabes.

Als erster Schritt in der Modellierung wurde verifiziert, dass die zeitlichen Randbedingungen korrekt von ATHLET nach COBRA-TF übertragen werden; daraus unmittelbar

abgeleitete Größen wie der Eintrittsenthalpie und Eintrittsmassenstrom können direkt zwischen beiden Codes verglichen werden und dienen somit als Verifikation, dass die Datenschnittstelle korrekt implementiert ist. Die genannten Größen Eintrittsenthalpie und Eintrittsmassenstrom sind in den Bildern 5-1 bis 5-3 exemplarisch gezeigt.

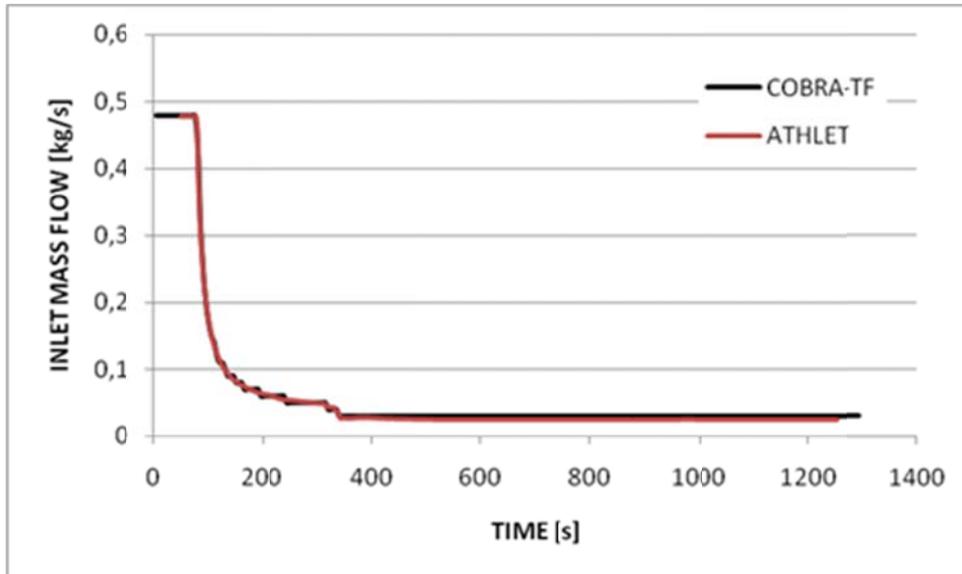


Bild 5-2 Konsistenzprüfung des Eintrittsmassenstroms von ATHLET und COBRA-TF für die Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“

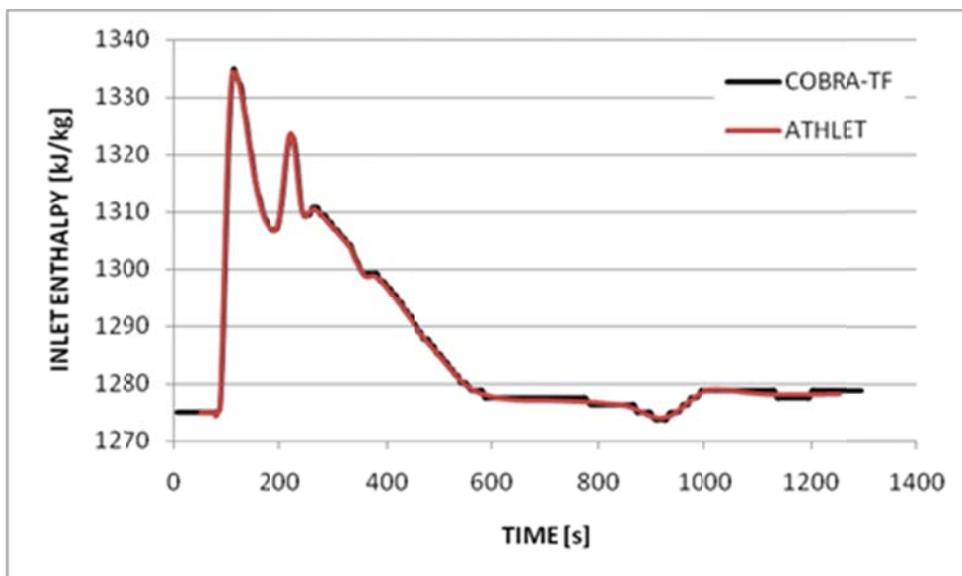


Bild 5-3 Konsistenzprüfung der Eintrittsenthalpie von ATHLET und COBRA-TF für die Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“

Aus den obigen Abbildungen geht hervor, dass die Übergabe der zeitlichen Randbedingungen von ATHLET an COBRA-TF offenbar korrekt implementiert ist.

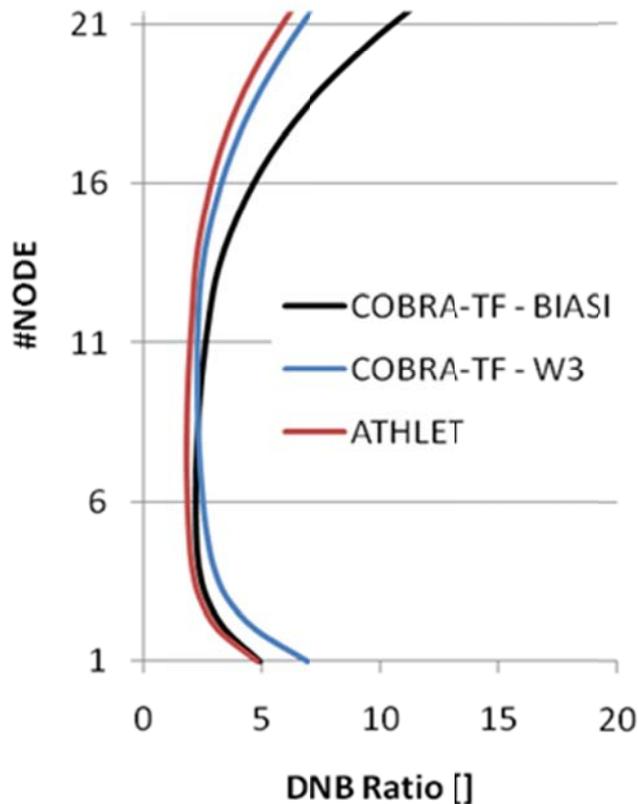


Bild 5-4 Axiales DNB-Profil des Heißstabes im ATWS-Modell im stationären Ausgangszustand. Die Übereinstimmung zwischen dem W3- und dem ATHLET-Modell zur Siedekrise ist ausgezeichnet.

Für die Vorhersage der Siedekrise werden in ATHLET und COBRA-TF sog. Korrelationen für die kritischen Wärmestromdichten verwendet. In COBRA-TF sind z. B. die Westinghouse-(W3)-Korrelation und die Biasi-Korrelation implementiert. Ein wesentliches Ziel des Projekts ist es zu zeigen, ob bzw. wie gut der Nachweis der Kühlbarkeit mit ATHLET geführt werden kann, indem die in ATHLET implementierten Modelle zum kritischen Wärmestrom mit den (höherwertigen) Ergebnissen von COBRA-TF verglichen werden. Diese Analyse wurde zunächst für den stationären Ausgangszustand der untersuchten ATWS-Transiente durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Vorhersage des räumlichen Profils des DNB-Verhältnisses mit ATHLET recht gut gelingt. Tatsächlich wird mit der in COBRA-TF implementierten W3-Korrelation eine recht gute Übereinstimmung mit den in ATHLET eingebauten Modellen erreicht. Das axiale DNB-Profil des Heißstabes ist in Bild 5-4 gezeigt. Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung der Biasi-Korrelation zu recht großen Unterschieden bei der DNB-Bestimmung führt, die zudem nicht konservativ sind.

Neben dem Abstand zur Siedekrise, d. h. dem minimalen DNB-Verhältnis, wurden weitere lokale Größen (Moderatordichte, Brennstofftemperatur) in den Heißkanälen mit ATHLET und COBRA-TF ermittelt und verglichen. Zum einen sind diese Vergleiche wichtig, um die Gültigkeit der *Offline*-Kopplung zu verifizieren; außerdem beeinflussen diese Größen das neutronenphysikalische Rückwirkungsverhalten des Reaktorkerns. Größere Abweichungen zwischen beiden Codes können so u. U. auch den Verlauf der Transiente wesentlich ändern. Aus diesem Grund wurden die Heißkanalprofile dieser Größen verglichen. Zwei Ergebnisse für den stationären Zustand sind exemplarisch in Bild 5-5 dargestellt.

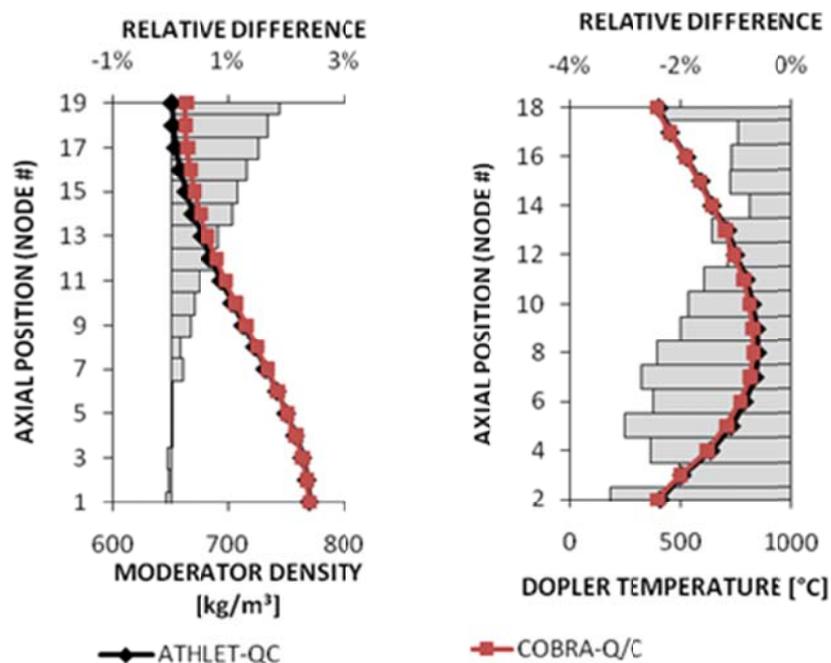


Bild 5-5 Vergleich von Moderatordichte (links) und Doppler/Brennstofftemperatur (rechts) zwischen ATHLET und COBRA-TF

Für die Moderatordichte erkennt man in der linken Grafik, dass die über den Heißkanal auftretenden Abweichungen etwa 1,0-1,5 % betragen und damit als gering einzuschätzen sind. Für die Brennstofftemperatur ergibt sich eine durchgängig negative Abweichung von COBRA-TF gegenüber ATHLET, was vor allem auf die in COBRA-TF implementierte Korrelation für die spezifische Wärmekapazität für Uran zurückzuführen ist. Insgesamt ergibt sich aber ein konsistentes Bild in diesem Vergleich, womit für einphasige Strömungen die „Offline“-Kopplung als gültig angenommen werden kann.

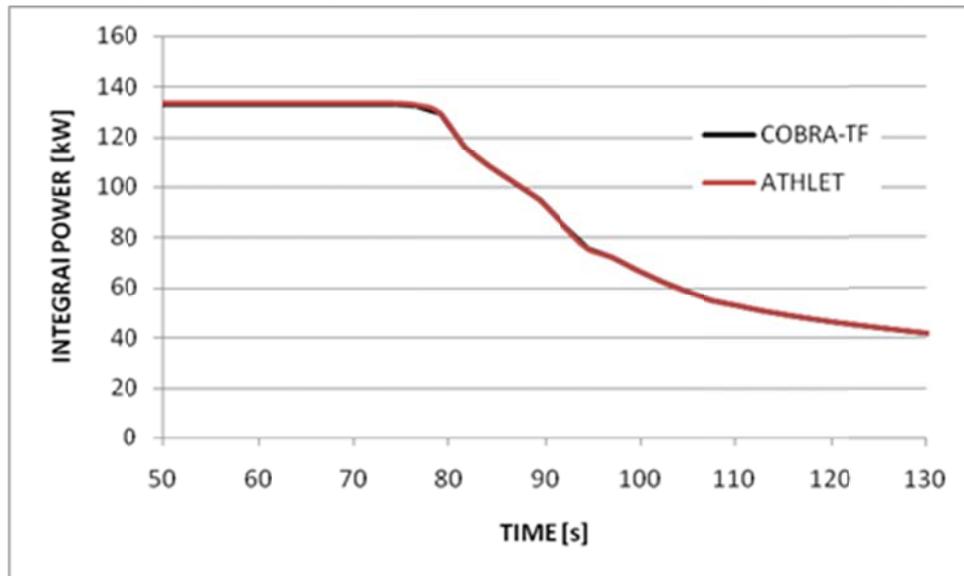


Bild 5-6 Vergleich der integralen Reaktorleistung zwischen dem gekoppelten Rechenmodell mit ATHLET und ATHLET/COBRA-TF

Nach der oben beschriebenen Verifikation des Gesamtsystems wurde die vollständige Simulation der ATWS-Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“ angegangen. Aus den vorhergegangenen Untersuchungen zu Teillast- und xenonfreien Zuständen (siehe die vorhergehenden Kapitel) wurde der xenonfreie Vollastzustand als ungünstigster Ausgangszustand angenommen. Zu zeigen ist nun, dass auch mit dem gekoppelten Code COBRA-TF der Nachweis der Kühlbarkeit gelingt. In Bild 5-6 wird zunächst der Verlauf der integralen Reaktorleistung gezeigt, wie er vom ATHLET-QUABOX/CUBBOX *Standalone*-Modell und in der Kopplung mit COBRA-TF vorhergesagt wird. Wie man erkennt, sind die beiden Kurven in ausgezeichneter Übereinstimmung. Ähnlich verhält es sich für den Primärkreisdruck, wie in Bild 5-7 gezeigt, am Eintritt des Reaktordruckbehälters, wo auch nur marginale Unterschiede zwischen beiden Rechenmodellen festzustellen sind.

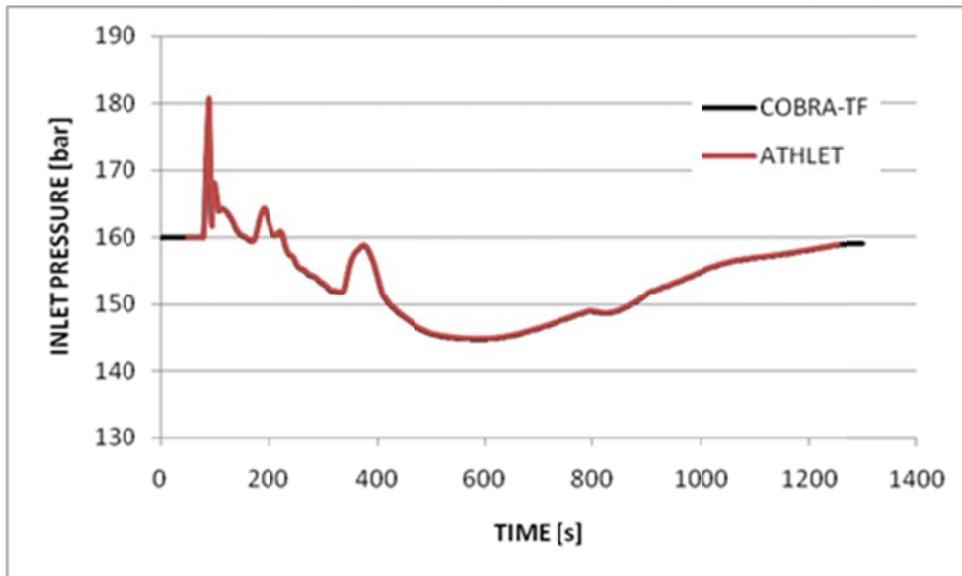


Bild 5-7 Vergleich des Primärkreisdrucks zwischen dem gekoppelten Rechenmodell mit ATHLET-QUABOX/CUBBOX und ATHLET-QUABOX-CUBBOX/COBRA-TF

Hinsichtlich eines der wesentlichen Akzeptanzkriterien für ATWS-Ereignisse „Primärkreisdruck unterhalb des 1,3 (1,2)-fachen des Auslegungsdrucks“ liefert also die neue gekoppelte Rechenmethodik ähnliche Ergebnisse wie das bewährte Codesystem ATHLET-QUABOX/CUBBOX.

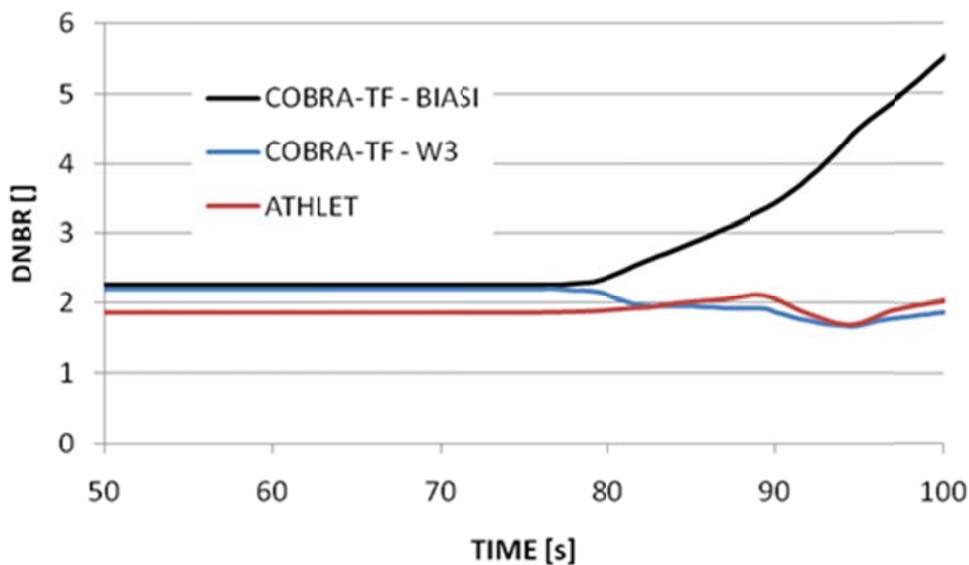


Bild 5-8 Minimales DNB-Verhältnis während der ATWS-Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“, gerechnet mit unterschiedlichen Korrelationen

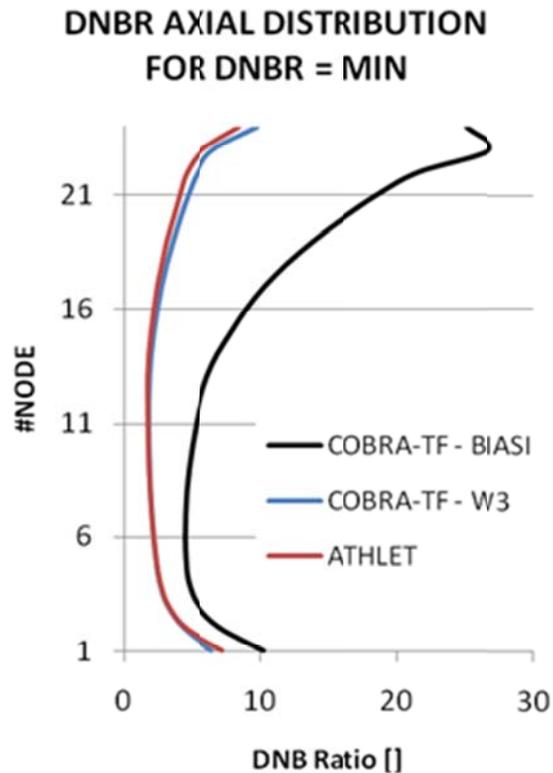


Bild 5-9 Axiales DNB-Profil zum Zeitpunkt des Auftretens des minimalen DNB-Verhältnisses während der ATWS-Transiente

Außerdem wurde für den o. g. ATWS-Fall das minimale DNB-Verhältnis über den gesamten Zeitraum der Transiente bestimmt. Der Verlauf ist in Bild 5-8 für den zeitlichen Ausschnitt von 50 bis 100 Sekunden gezeigt, wobei etwa zum Zeitpunkt 94,5 s das absolute DNB-Minimum der Transiente erreicht wird. Zwar berechnen COBRA-TF und ATHLET generell leicht unterschiedliche Minimalwerte, im absoluten Minimum während dieser Transiente stimmen sie aber ausgezeichnet überein. Wie bereits im stationären Zustand, so überschätzt auch hier die Biasi-Korrelation den DNB-Wert massiv. Somit ergibt sich insgesamt eine (insbesondere in den ersten 100 Sekunden) gute Übereinstimmung zwischen ATHLET- und COBRA-TF/W3-Korrelation. Das minimale vorhergesagte DNB-Verhältnis tritt etwa zum Zeitpunkt $t=100$ Sekunden auf und wird von ATHLET zu 1,64 und von COBRA-TF zu 1,77 berechnet. Damit ist die ATHLET-Vorhersage geringfügig konservativer. Auf jeden Fall verbleibt das DNB-Verhältnis während dieser Transiente aber deutlich oberhalb von Werten, bei denen mit dem Einsetzen von Filmsieden zu rechnen ist. Die Biasi-Korrelation scheint insbesondere zu späteren Zeitpunkten der Transiente gänzlich ungeeignet zu sein, allerdings sind diese Abschnitte aufgrund des hohen DNB-Verhältnisses für die Bewertung der Kühlbarkeit

auch nicht mehr relevant. Ähnliches gilt auch für die ab ca. $t=400$ Sekunden sichtbaren Unterschiede zwischen ATHLET und W3-Korrelation, wie Bild 5-10 zeigt.

Betrachtet man das axiale DNB-Profil im heißen Kanal zu diesem Zeitpunkt, so erweisen sich ATHLET und COBRA-TF (mit W3-Korrelation) als ausgezeichnet in der Übereinstimmung, wie Bild 5-9 zeigt. Außerdem zeigt sich, dass ATHLET mit einem Minimalwert von 1,64 geringfügig niedriger liegt als COBRA-TF mit 1,77. Dies stützt die Vermutung, dass ATHLET konservative Aussagen zum Auftreten der Siedekrise bei ATWS liefert und somit zur Analyse der Kernkühlbarkeit grundsätzlich verwendet werden kann. Nun steht aber mit COBRA-TF ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem unterstützende bzw. Referenzrechnungen zu den ATHLET-Berechnungen durchgeführt werden können, und mit dem der Grad der Konservativität von ATHLET abgeschätzt werden kann.

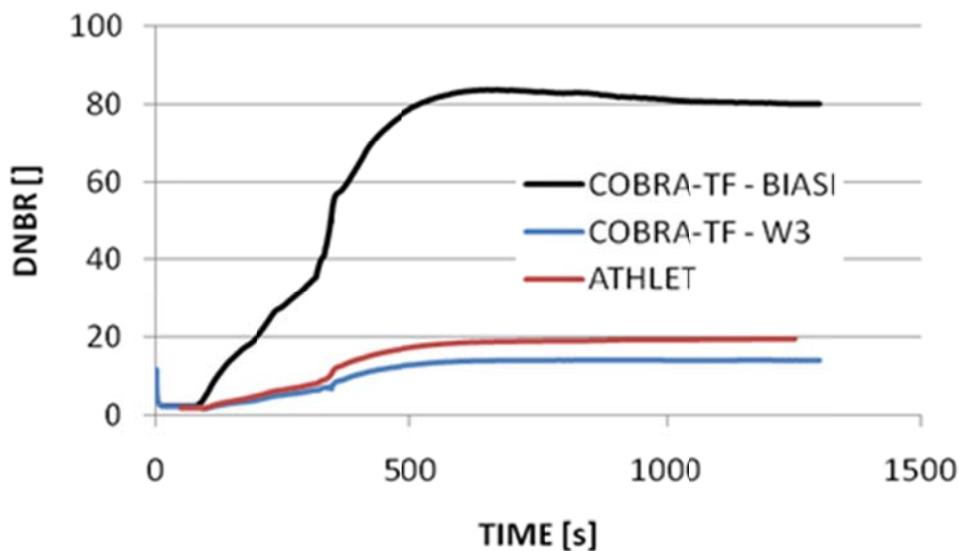


Bild 5-10 Verlauf des DNB-Verhältnisses während der ATWS-Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“, berechnet mit unterschiedlichen Korrelationen

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt wurden Untersuchungen zur Präzisierung der Nachweisführung bei der Analyse von ATWS-Störfällen durchgeführt. Diese konzentrieren sich insbesondere auf die Festlegung des Anfangszustandes (Teillast/Volllast, Xenongleichgewicht/xenonfrei) und die Analyse der Kühlbarkeit des Reaktorkerns. Dazu wurden zunächst verschiedene Teil- und Volllastzustände mit unterschiedlichen Rückwirkungsmodellen mit dem gekoppelten Codesystem ATHLET/QUABOX-CUBBOX für die Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“ analysiert. Die Ergebnisse lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen (für eine umfassendere Bewertung siehe Abschnitt 4):

- Für die in dieser Arbeit gewählte exemplarische Kernbeladung wird die ATWS-Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“ hinsichtlich aller Nachweisziele beherrscht.
- Der Leistungszustand bei Volllast hat sich als abdeckend gegenüber den Teillastzuständen bei 30% und 80% der Nennleistung erwiesen.
- Die maximale ermittelte Druckerhöhung beträgt 23,5 bar für den xenonfreien Kern bei Volllast und weiterlaufenden Hauptkühlmittelpumpen, das minimale DNB-Verhältnis ist 1,64 bzw. 1,50 (unter Verwendung der ATHLET bzw. der sehr konservativen KWU-Korrelationen) für den xenonfreien Kern bei Volllast und abgeschalteten Hauptkühlmittelpumpen.
- Nur für den Fall des xenonfreien Kerns bei Volllast sinkt das DNB-Verhältnis während der Transiente (von 2,0 bis zu 1,64, s.o.) unter den stationären Ausgangswert, in allen anderen Fällen bleibt es oberhalb des Startwerts.
- Außer für den Fall „30 %, xenonfrei“ ist der stationäre minimale DNB-Wert für Punktkinetikrechnungen geringer als für 3D-Rechnungen. Diese Ausnahme hängt damit zusammen, dass insbesondere für den „reaktiven“ Kern bei geringer Teillast und xenonfreiem Zustand der Kreislauf aufboriert und mehrere Steuerstabbänke tief eingefahren werden müssen.
- Generell ist festzuhalten, dass eine direkte Vergleichbarkeit von xenonfreien und Xenongleichgewichtszuständen schwierig ist, da der xenonfreie Fall immer erhebliche Maßnahmen zur Reaktivitätsbindung (Steuerstäbe und Aufborierung) notwendig macht, was die Festlegung eines konsistenten Ausgangszustands im Xenonnichtgleichgewicht und den Vergleich mit einem stabfreien Xenongleichgewichtskern bei Volllast erschwert und bis zu einem gewissen Maße willkürlich macht.

- Bedingt durch die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen (insbesondere hinsichtlich des minimalen stationären DNB-Verhältnisses) ist es schwierig, eine Aussage zu machen, ob ein xenonfreier Kern letztlich zu ungünstigeren (d. h. abdeckenden) Resultaten führt. Tatsächlich zeigen die vorgelegten Analysen, dass das DNB-Minimum in erster Linie durch die stationäre Kernausslegung, aber weniger durch die Änderungen im dynamischen Rückwirkungsverhalten bestimmt wird.
- Um eine Vergleichbarkeit von ATWS-Analysen zu gewährleisten, ist es daher ratsam, einen klar definierten Zustand für den Reaktorkern als Startpunkt für die Transiente zu wählen. Um die Willkür bei der Einstellung des axialen Leistungsprofils so weit wie möglich einzuschränken, sollte der Kern stabfrei betrachtet und die Kritikalität über Aufborierung hergestellt werden. Dabei sollte die maximale Borkonzentration, die im Zyklus erwartet wird, nicht überschritten werden.
- Die xenonbedingte Änderung der dynamischen Eigenschaften des Kerns (d. h. die Änderung der Reaktivitätskoeffizienten bzw. der Voidkurve beim Übergang von Xenongleichgewicht nach xenonfrei) werden von der GRS als gering eingeschätzt, der Einfluss auf den Transientenverlauf als praktisch vernachlässigbar.

In einem weiteren Themenblock dieses Projekts wurde ein fortgeschrittenes Unterkanalprogramm COBRA-TF in die ATWS-Rechenmethodik implementiert, um die Aussagen von ATHLET/QUABOX-CUBBOX zur Kühlbarkeit des Kerns durch ein höherwertiges Rechenmodell zu stützen. Dabei wurde das Programm COBRA-TF in einer sog. *Offline*-Kopplung an ATHLET/QUABOX-CUBBOX angebunden, in der COBRA-TF lediglich von ATHLET in einer nachgelagerten Rechnung mit den korrekten zeitlichen Randbedingungen versorgt wird. Diese Art der Kopplung wurde mit unterschiedlichen Maßnahmen verifiziert und anschließend auf den o. g. Fall der ATWS-Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“ angewendet. Hierbei zeigte sich, dass die Übereinstimmung zwischen ATHLET und COBRA-TF generell gut ist, wobei die in ATHLET implementierten Korrelationen zur Ermittlung der Siedekrise offenbar als konservativ einzustufen sind. Dadurch ist gewährleistet, dass eine Analyse mit ATHLET eher einen zu frühen Übergang in die Siedekrise vorhersagt. Sollte ein solcher Fall auftreten, steht nun mit COBRA-TF ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die Kühlbarkeitsanalyse auch bei Übergang ins Filmsiederegime durchgeführt werden kann. Dies ist durch die umfassende Validierung von COBRA-TF an vielen zweiphasigen Experimenten hinreichend gewährleistet. Die Arbeiten an COBRA-TF werden an der GRS auch im Rah-

men von Reaktorsicherheitsforschungsprojekten weiter vorangetrieben, z. B. bei der Implementierung einer Online-Kopplung und bei der Validierung für Siedewasserreaktoren.

7 Literatur

- /HOR08/ W. Horche, K. Velkov; Kühlbarkeit des Kerns bei ATWS-Ereignissen beim DWR, Technische Notiz, Jan 2008
- /LAN 08/ S. Langenbuch, S. P. Nikonov, M. P. Lizorkin, K. Velkov; ATHLET/BIBR - VVER an Advanced Code System for VVER Safety Analysis, PHYSOR – 2008, Interlaken, Switzerland, Sep. 14-19, 2008
- /LAN 84/ S. Langenbuch, K. – D. Schmidt, J. P. Weber; Bewertung der CHF – Tafeln für die KWU – Brennelemente in Druckwasserreaktoren, GRS Report GRS A-963, Mai 1984
- /PAU 08/ A. Pautz, J. Rose; Untersuchung von ATWS-Ereignissen zur Präzisierung der Nachweisforderung, R080 11334, Anlage A, Vorhabensbeschreibung
- /POI 03/ W. Pointner, H. Glaeser et al., Thermohydraulische Analysen im Rahmen der Bundesaufsicht, Abschlussbericht, GRS – A -3154, Dezember 2003
- /POI03/ W. Pointner, H. Glaeser et al., Thermohydraulische Analysen im Rahmen der Bundesaufsicht, Abschlussbericht, GRS – A -3154, Dezember 2003
- /REG 08/ „Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke“, Aktualisierung des deutschen Regelwerks, Module 1-12, Rev. C, abrufbar unter:
<http://regelwerk.grs.de/>
- /RSK 05/ Stellungnahme der RSK zum Abschalten der Hauptkühlmittelpumpen bei ATWS-Ereignissen in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor, Anlage 1 zum Ergebnisprotokoll der 384. Sitzung am 7.7.2005
- /RSK 96/ RSK-Leitlinien für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor, Fassung 01.97, vom 5.11.1996

8 **Abbildungsverzeichnis**

Bild 1-1	Voidreaktivitätskurven für konservativ abdeckende Rückwirkungen (blau) und für die in dieser Arbeit exemplarisch verwendete konkrete Kernbeladung (rot)	2
Bild 1-2	Das thermohydraulische Kernmodell für die ATWS-Untersuchungen	4
Bild 1-3	Die Unterkanalmodellierung mit dem Brennstab-Heißkanal	5
Bild 1-4	Axiale Nodalisierung der Brennstäbe	6
Bild 1-5	Kernbeladung mit Reflektor, R=194 symbolisiert den Reflektor.....	6
Bild 1-6	Unterschiedliche Brennstofftypen	7
Bild 1-7	Anordnung der Steuerstabgruppen	7
Bild 1-8	Xenonkonzentration innerhalb der ersten 5 Tage Volllastbetrieb.....	9
Bild 1-9	Änderung der Xenonvergiftung nach sprunghafter Leistungsabnahme	10
Bild 2-1	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung..	15
Bild 2-2	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck	16
Bild 2-3	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur	16
Bild 2-4	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	17
Bild 2-5	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom	17
Bild 2-6	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Borkonzentration	18

Bild 2-7	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	19
Bild 2-8	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktordruck.....	20
Bild 2-9	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur	20
Bild 2-10	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte	21
Bild 2-11	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteltemperatur.....	21
Bild 2-12	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Steuerstabstellung bei der Punktkinetikrechnung.....	22
Bild 2-13	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Steuerstabstellung bei der 3D-Kinetikrechnung.....	22
Bild 2-14	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Massenstrom.....	23
Bild 2-15	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration	23
Bild 2-16	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich DNBR.	24
Bild 2-17	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung	26
Bild 2-18	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck.....	26
Bild 2-19	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur	27
Bild 2-20	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte .	27

Bild 2-21	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom.....	28
Bild 2-22	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Borkonzentration	28
Bild 2-23	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	29
Bild 2-24	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktordruck	30
Bild 2-25	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur	30
Bild 2-26	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	31
Bild 2-27	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Massenstrom	31
Bild 2-28	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration	32
Bild 2-29	Best-estimate, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich DNBR	32
Bild 2-30	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung	34
Bild 2-31	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck.....	34
Bild 2-32	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur.....	35
Bild 2-33	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	35

Bild 2-34	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom.....	36
Bild 2-35	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Borkonzentration	36
Bild 2-36	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	37
Bild 2-37	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktordruck.....	37
Bild 2-38	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur.....	38
Bild 2-39	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte	38
Bild 2-40	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Massenstrom.....	39
Bild 2-41	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration	39
Bild 2-42	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich DNBR	40
Bild 2-43	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung	42
Bild 2-44	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck.....	42
Bild 2-45	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur	43
Bild 2-46	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	43

Bild 2-47	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom.....	44
Bild 2-48	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Borkonzentration	44
Bild 2-49	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	45
Bild 2-50	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Reaktordruck.....	46
Bild 2-51	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur.....	46
Bild 2-52	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte	47
Bild 2-53	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Massenstrom.....	47
Bild 2-54	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration	48
Bild 2-55	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Vergleich DNBR	48
Bild 2-56	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung	50
Bild 2-57	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck	50
Bild 2-58	Best-estimate, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom durch die Abblase-und Sicherheitsventile	51
Bild 2-59	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur.....	51

Bild 2-60	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteltemperatur	52
Bild 2-61	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom	52
Bild 2-62	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	53
Bild 2-63	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, abgeschaltete Pumpen, 30 % Leistung, DNBR	53
Bild 2-64	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktorleistung.....	54
Bild 2-65	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Reaktordruck	55
Bild 2-66	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur	55
Bild 2-67	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteltemperatur.....	56
Bild 2-68	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Massenstrom	56
Bild 2-69	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	57
Bild 2-70	Vergleich Best-estimate-xenonfrei, Punktkinetik, laufende Pumpen, 30 % Leistung, DNBR	57
Bild 2-71	Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	59
Bild 2-72	Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Reaktordruck.....	59

Bild 2-73	Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur.....	60
Bild 2-74	Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte	60
Bild 2-75	Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Massenstrom am Kerneintritt	61
Bild 2-76	Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich der Borkonzentration	61
Bild 2-77	Xenon-freie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich der DNBR	62
Bild 2-78	Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	63
Bild 2-79	Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Reaktordruck.....	63
Bild 2-80	Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur.....	64
Bild 2-81	Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte	64
Bild 2-82	Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Massenstrom am Kerneintritt	65
Bild 2-83	Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration	65
Bild 2-84	Xenon-freie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 80 % Leistung, Vergleich DNBR	66
Bild 3-1	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Reaktorleistung	68

Bild 3-2	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Reaktordruck	68
Bild 3-3	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur	69
Bild 3-4	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	69
Bild 3-5	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Massenstrom	70
Bild 3-6	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Borkonzentration	70
Bild 3-7	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	73
Bild 3-8	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktordruck	73
Bild 3-9	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Brennstabtemperatur	74
Bild 3-10	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Kühlmitteldichte	74
Bild 3-11	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Massenstrom	75
Bild 3-12	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Borkonzentration	75
Bild 3-13	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	76
Bild 3-14	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktordruck	76

Bild 3-15	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Brennstabtemperatur.....	77
Bild 3-16	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Kühlmitteldichte	77
Bild 3-17	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Massenstrom.....	78
Bild 3-18	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich mittlere Borkonzentration	78
Bild 3-19	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich DNBR	79
Bild 3-20	Xenonfreie Rückwirkungen, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der verschiedenen DNBR-Korrelationen	79
Bild 3-21	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Reaktorleistung	81
Bild 3-22	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Reaktordruck.....	82
Bild 3-23	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur	82
Bild 3-24	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	83
Bild 3-25	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Massenstrom.....	83
Bild 3-26	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Mittlere Borkonzentration	84
Bild 3-27	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktorleistung	85

Bild 3-28	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Reaktordruck	85
Bild 3-29	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Mittlere Brennstabtemperatur.....	86
Bild 3-30	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Mittlere Kühlmitteldichte	86
Bild 3-31	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Massenstrom.....	87
Bild 3-32	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich Mittlere Borkonzentration	87
Bild 3-33	Xenonfreie Rückwirkungen, laufende Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich DNBR	88
Bild 3-34	Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Reaktorleistung	89
Bild 3-35	Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Reaktordruck	90
Bild 3-36	Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Mittlere Brennstabtemperatur.....	90
Bild 3-37	Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	91
Bild 3-38	Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Massenstrom.....	91
Bild 3-39	Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, Mittlere Kühlmitteldichte	92
Bild 3-40	Vergleich Laufende - abgeschaltete Pumpen, Punktkinetikrechnung mit 100 % Leistung, DNBR	92

Bild 3-41	Vergleich: Xenongleichgewicht/Xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der Reaktorleistung..	93
Bild 3-42	Vergleich: Xenongleichgewicht/xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich des Reaktordruckes.	94
Bild 3-43	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich des Massenstromes am Kerneintritt.....	94
Bild 3-44	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Kühlmitteldichte.....	95
Bild 3-45	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Brennstabtemperaturen	95
Bild 3-46	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Kühlmitteltemperaturen	96
Bild 3-47	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Borkonzentration	96
Bild 3-48	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der DNBR	97
Bild 3-49	Vergleich: Xenongleichgewicht/Xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der Reaktorleistung..	98
Bild 3-50	Vergleich: Xenongleichgewicht/Xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich des Reaktordruckes.	99
Bild 3-51	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich des Massenstromes am Kerneintritt.....	99

Bild 3-52	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Kühlmitteldichte	100
Bild 3-53	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Brennstabtemperatur	100
Bild 3-54	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Kühlmitteltemperatur	101
Bild 3-55	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der mittleren Borkonzentration	101
Bild 3-56	Vergleich: Xenongleichgewicht -xenonfrei, sowie Punkt-, und -3D-Kinetik, abgeschaltete Pumpen, 100 % Leistung, Vergleich der DNBR	102
Bild 5-1	Übergabe der zeitlichen Randbedingungen aus ATHLET an das COBRA-TF-Rechenmodell.....	109
Bild 5-2	Konsistenzprüfung des Eintrittsmassenstroms von ATHLET und COBRA-TF für die Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“.....	110
Bild 5-3	Konsistenzprüfung der Eintrittsenthalpie von ATHLET und COBRA-TF für die Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“	110
Bild 5-4	Axiales DNB-Profil des Heißstabes im ATWS-Modell im stationären Ausgangszustand. Die Übereinstimmung zwischen dem W3- und dem ATHLET-Modell zur Siedekrise ist ausgezeichnet.	111
Bild 5-5	Vergleich von Moderatorndichte (links) und Doppler/Brennstofftemperatur (rechts) zwischen ATHLET und COBRA-TF	112
Bild 5-6	Vergleich der integralen Reaktorleistung zwischen dem gekoppelten Rechenmodell mit ATHLET und ATHLET/COBRA-TF.....	113

Bild 5-7	Vergleich des Primärkreisdrucks zwischen dem gekoppelten Rechenmodell mit ATHLET-QUABOX/CUBBOX und ATHLET-QUABOX-CUBBOX/COBRA-TF.....	114
Bild 5-8	Minimales DNB-Verhältnis während der ATWS-Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“, gerechnet mit unterschiedlichen Korrelationen.....	114
Bild 5-9	Axiales DNB-Profil zum Zeitpunkt des Auftretens des minimalen DNB-Verhältnisses während der ATWS-Transiente	115
Bild 5-10	Verlauf des DNB-Verhältnisses während der ATWS-Transiente „Ausfall der Hauptwärmesenke“, berechnet mit unterschiedlichen Korrelationen.....	116

Tabellenverzeichnis

Tab. 8-1	Zusammenstellung der Rechenergebnisse zur ATWS-Transiente	107
Tab. 8-2	Zusammenstellung der DNBR Werte von unterschiedlichen Korrelationen	108

9 Verteiler

Druckexemplare

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

AG RS I 3, Dr. Mergel 1 x

GRS

Autoren (paa, vek) 2 x

Gesamtauflage 3 x

PDF-Version

BMU AG RS I 3, Dr. Mergel

GRS

Geschäftsführer (wfp, stj)

Bereichsleiter (erv, paa, prg, rot, stc, ver, zir)

Projektcontrolling (roo)

Abteilungsleiter /
Projektleiter (paa)

Autoren (vek)

TECDO (rop)

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
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