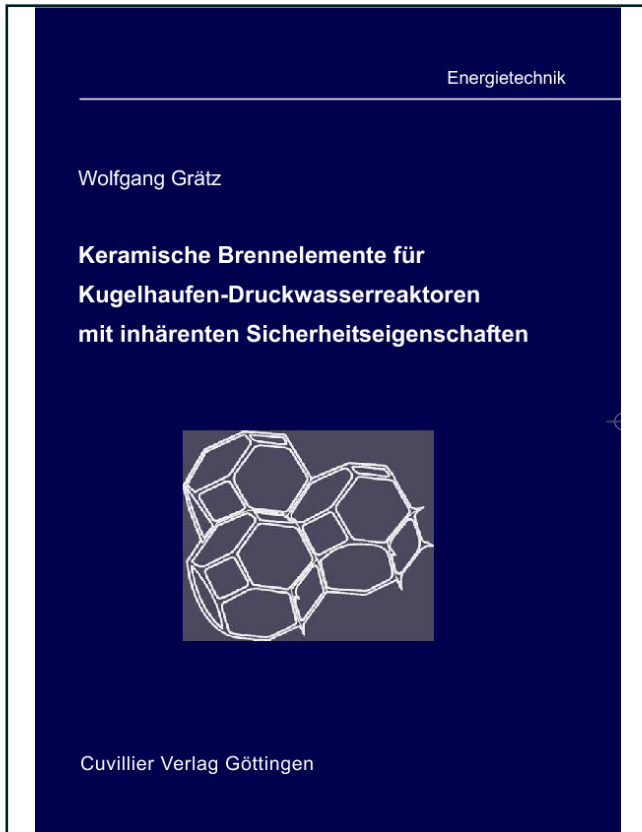




Wolfgang Grätz (Autor)
**Keramische Brennelemente für Kugelhaufen-
Druckwasserreaktoren mit inhärenten
Sicherheitseigenschaften**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2228>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung und Motivation

Die Kohlendioxid (CO_2) Konzentration in der Atmosphäre steigt stetig an, ohne erkennbare Anzeichen einer Trendumkehr. Um Veränderungen des globalen Klimas und seine Auswirkungen einzudämmen, muss der weltweite CO_2 -Ausstoß in Zukunft drastisch reduziert werden. Das Kyoto-Protokoll von 1997 wird als das bedeutendste internationale Abkommen bezeichnet, welches im Zusammenhang mit der Reduktion von CO_2 -Emissionen bis heute erreicht worden ist. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich darin international verpflichtet, den Ausstoß an Kohlendioxid bis zum Jahr 2010 um 21% zu reduzieren. Der Ausstieg aus der Kernenergie wird hier zu Lande meist aus Gründen des Umweltschutzes gefordert. Das Endprodukt der Verbrennung fossiler Brennstoffe ist jedoch Kohlendioxid (CO_2). Solange also als Alternativen für Kernkraftwerke hauptsächlich Gas- oder Kohlekraftwerke zur Verfügung stehen, verschärft der erzwungene Ausstieg aus der Kernenergie ein bisher ungelöstes Problem, bei dessen Lösung Deutschland seiner globalen Verantwortung gerecht werden muss.

Auch in Zukunft wird die Stromerzeugung durch Kernenergie, entsprechend den Erwartungen der Energiewirtschaft, weltweit in großem Umfang genutzt werden. Ausgelöst durch die schwerwiegenden Störfälle in Three Mile Island (Harrisburg), wo es durch Kühlmittelverlust zu einem partiell geschmolzenen Reaktorkern kam und in Tschernobyl, wo ein Reaktivitätsunfall zur vollständigen Zerstörung der Anlage führte, müssen jedoch in Zukunft strengere Anforderungen hinsichtlich der Sicherheitstechnik erfüllt werden. Weltweit wird nach neuen sicherheitstechnischen Lösungen in der Kerntechnik gesucht, wobei die Beherrschung von Störfällen aufgrund mechanischer, thermischer, chemischer und nuklearer Instabilitäten der Systeme eine entscheidende Rolle spielt.

Der deutsche Gesetzgeber verlangte, kurzzeitig im Atomgesetz beschrieben, von den Betreibern kerntechnischer Anlagen, dass das gesamte Spaltproduktinventar, bei einem möglichen Kernschmelzunfall, sicher in der Reaktoranlage zurückgehalten werden müsste. Idealerweise erfolgt die Rückhaltung der Spaltprodukte während eines Störfalls bereits im Brennelement selbst. Dies setzt jedoch voraus, dass bei vollständigem Ausfall der aktiven Kühlsysteme zur Abfuhr der Nachzerfallswärme die Integrität der Brennelemente als erste Spaltproduktbarriere gewährleistet bleibt und keine unzulässig hohen Brennstofftemperaturen erreicht werden.

Eine mögliche Lösung in diesem Zusammenhang ist die Realisierung der so genannten katastrophenfremen Kernenergie. Unter diesem Begriff werden Reaktorkonzepte verstanden, welche höheren Sicherheitsanforderungen gerecht werden und eine Kernschmelze unter allen möglichen Betriebszuständen ausschließen.

In dieser Arbeit wird ein innovativer schwerwassergekühlter und -moderierter Kugelhaufendruckwasserreaktor mit inhärenten Sicherheitseigenschaften vorgestellt. Dieses Reaktorkonzept zeigt eine hohe Verwandtschaft zum Hochtemperaturreaktor. Es wird gezeigt, welchen Beitrag keramische Werkstoffe bei der Realisierung des Konzeptes leisten können. Das Kernstück dieser Arbeit bezieht sich auf die Herstellung und die Charakterisierung von keramisch beschichteten, graphitischen Brennelementen für dieses Reaktorkonzept. Als geeignetes Beschichtungsmaterial hat sich die technische Keramik Siliciumcarbid (SiC) erwiesen. Dieser Werkstoff verfügt über eine gute Hochtemperaturfestigkeit, eine hohe Wärmeleitfähigkeit, sehr gute Korrosionsbeständigkeit und einen geringen Neutronenabsorptionsquerschnitt. Die kugelförmigen Brennelemente aus Reaktorgraphit wurden mit einem speziell hierfür entwickelten Beschichtungsverfahren mit siliciuminfiltriertem Siliciumcarbid (SiSiC) in einem Hochtemperaturprozess beschichtet.

In einem nachfolgenden Schritt galt es nachzuweisen, dass diese beschichteten Brennelemente den zu Recht anspruchsvollen Anforderungen der katastrophenfremen Kernenergie genügen. Dies bedeutet, den Nachweis zu erbringen, dass die Brennelemente mechanisch, thermisch, chemisch und nuklear stabil ausgelegt sind. Hierzu wurden zahlreiche verschiedene Versuche und theoretische Betrachtungen bezüglich der Stabilitäten des Reaktorkonzeptes und der Brennelemente durchgeführt. Den Abschluss dieser Arbeit bildet eine zusammenfassende Bewertung sowie einen Ausblick auf weiterführende Untersuchungen.

2 Entwicklungsstand und neue Sicherheitsanforderungen

Der weltweite Energieverbrauch wird aufgrund der zunehmenden wirtschaftlichen Bedeutung der Entwicklungs- und Schwellenländer weiter wachsen. In großen Teilen der Welt wird die Kernenergie weiter ausgebaut. In Deutschland hat der Gesetzgeber 1994 einen Rahmen, für neu zu errichtende kerntechnische Anlagen geschaffen¹, der weltweit ein Höchstmaß an technischer Sicherheit forderte.

Das Gesetz über die friedliche Nutzung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz AtG) besagt in der Form vom 03. Mai 2000 [3] im § 7 Absatz 2a:

Bei Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen, die der Erzeugung von Elektrizität dienen, gilt die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist, mit der Maßgabe, dass zur weiteren Vorsorge gegen Risiken für die Allgemeinheit die Genehmigung nur erteilt werden darf, wenn auf Grund der Beschaffenheit und des Betriebs der Anlage auch Ereignisse, deren Eintritt durch die zu treffende Vorsorge gegen Schäden praktisch ausgeschlossen ist, einschneidende Maßnahmen zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen außerhalb des abgeschlossenen Geländes der Anlage nicht erforderlich machen würden; die bei der Auslegung der Anlage zugrunde zu legenden Ereignisse sind in Leitlinien näher zu bestimmen, die das für die kerntechnische Sicherheit und den Strahlenschutz zuständige Bundesministerium nach Anhörung der zuständigen obersten Landesbehörden im Bundesanzeiger veröffentlicht. [3]

In der Einzelbegründung der Vorlage für die parlamentarische Beratung wurden Begriffe aus dem Text des Absatzes 2a näher bestimmt. Es wurde gefordert, dass Kernschmelzunfälle zukünftig innerhalb der Reaktoranlage beherrscht werden und die Evakuierungen der Bevölkerung nicht notwendig sein würde bzw. keine Katastrophenschutzmaßnahmen außerhalb der Anlage erforderlich wären.

¹ Der § 7 Absatz 2a wurde formuliert für die Änderung des Atomgesetzes, die der Bundestag am 29. April 1994 beschloss und der der Bundesrat am 20. Mai 1994 zustimmte. Die Änderung des Atomgesetzes trat am 28. Juli 1994 in Kraft.

Dies beinhaltete, dass bei allen möglichen Störereignissen die radioaktiven Spaltprodukte sowie das gesamte Spaltproduktinventar vollständig innerhalb der Reaktoranlage verbliebe, bzw. ein Anteil von $< 10^{-5}$ des Spaltproduktinventars der Anlage in die Umgebung freigesetzt werden dürfte. Die Störfallfolgen blieben somit praktisch auf die Reaktoranlage beschränkt.

Diese Änderung im Atomgesetz bedeutete erhebliche Konsequenzen für bereits bestehende und zukünftig in Deutschland zu errichtende kerntechnische Anlagen und deren Störfallverhalten. Mit dem Gesetzentwurf zur Änderung des Atomgesetzes vom 11. September 2001 [4] wurde der §7 Absatz 2a aus dem Atomgesetz gestrichen. In der aktuellen Form des Atomgesetzes vom 06. Januar 2004 [5] ist der §7 Absatz 2a somit nicht mehr enthalten.

2.1 Kernenergie in Deutschland und weltweit

In der Bundesrepublik Deutschland waren in Jahr 2004 insgesamt 12 Druckwasserreaktoren sowie 6 Siedewasserreaktoren mit einer Gesamt-Bruttoleistung von 21,82 GW_{el} in Betrieb. Im weltweiten Vergleich weisen die Deutschen Kraftwerke eine sehr hohe Verfügbarkeit auf.

Weltweit waren im Jahr 2004 in 31 Ländern 441 Kernkraftwerke, mit einer Gesamt-Nettoleistung von 362 GW_{el}, in Betrieb. In neun Ländern befanden sich Ende 2004 22 Kernkraftwerksblöcke mit einer Gesamt-Bruttoleistung von 19 GW_{el} im Bau.

2.2 Störfallverhalten nuklearer Anlagen und die vier Stabilitätskriterien

Aufgrund des steigenden Weltenergiebedarfs und vor dem Hintergrund der zu erwartenden CO₂-Emissionen, sollte die Kernenergie als eine zukünftig weiterhin zu nutzende Energiequelle diskutiert werden.

Um eine größere Akzeptanz seitens der Bevölkerung und der politischen Parteien zu erreichen, müssen Konzepte für eine nachweisbar katastrophenfremde Kerntechnik erarbeitet werden. Solche Konzepte müssen eine Freisetzung radioaktiver Spaltprodukte aus der Reaktoranlage unter allen Betriebszuständen völlig ausschließen.

Für die zurzeit in Deutschland in Betrieb befindlichen Reaktorsysteme kann eine Freisetzung radioaktiver Spaltprodukte aus der Reaktoranlage im Falle eines katastrophalen hypothetischen Störfalls nicht vollständig ausgeschlossen

2.2 Störfallverhalten nuklearer Anlagen und die vier Stabilitätskriterien

werden. Die konsequenteste Realisierung einer katastrophenfremen Kerntechnik besteht in der Rückhaltung der Spaltprodukte bereits im Brennelement [36], dessen Integrität auch nach extremen Störfällen gewahrt bleiben muss. Dazu müssen neue Reaktorsysteme entwickelt werden, die die folgenden vier Stabilitätskriterien erfüllen.

Um eine Spaltproduktrückhaltung gewährleisten zu können, müssen diese Reaktorsysteme mechanisch, thermisch, chemisch und nuklear stabil ausgelegt sein:

Die mechanische Stabilität setzt zum Beispiel voraus, dass die Integrität der Brennelemente sowie der gesamten Kerneinbauten in jeder möglichen Betriebs- oder Störfallphase gewährleistet ist. Ein katastrophales Reaktordruckbehälterversagen muss völlig ausgeschlossen werden können.

Die thermische Stabilität gilt als erfüllt, wenn bei einem Kühlmittelverluststörfall und Ausfall aller aktiven Kühlsysteme, in den Brennelementen die Temperaturen so gering gehalten werden können, dass die erste Spaltproduktbarriere aufrecht erhalten bleibt und die zulässige Brennstofftemperatur nicht überschritten wird. Dies bedeutet, dass die Nachzerfallswärme im Reaktor inhärent sicher abgeführt werden kann, also selbsttätig, ohne Zuhilfenahme aktiver Systeme, durch die Wärmetransportmechanismen Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Naturkonvektion. Eine entsprechende Reaktorauslegung ist möglich.

Für die chemische Stabilität wird gefordert, dass die im Reaktorkern eingesetzten Materialien ausreichende Korrosionsbeständigkeit gegenüber den Betriebsmedien und möglichen Störfall- und Fremdmedien aufweisen. Chemische Wechselwirkungen bei erhöhten Temperaturen zwischen den verwendeten Strukturmaterialien im Reaktorkern müssen hinsichtlich des gesamten Einsatzzeitraumes berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang, sollte auch an die Zeit nach dem Reaktorbetrieb, also die Lagerung bzw. Endlagerung der Brennelemente gedacht werden. Für das Brennelement bedeutet die chemische Stabilität ferner die Aufrechterhaltung der Geometrie unter Neutronenbestrahlung.

Die nukleare Stabilität des Reaktorsystems wird erreicht, wenn eingebrachte Reaktivitätswerte durch negative Rückkopplungskoeffizienten selbsttätig kompensiert werden [36]. Für den Fall extremer nuklearer Transienten muss das Temperaturniveau des Reaktors und der Brennelemente die geforderten Grenzen einhalten.

Ein mögliches Reaktorkonzept, welches die hier beschriebenen Stabilitätskriterien

en erfüllt, ist das im folgenden diskutierte Reaktorsystem mit keramischen kugelförmigen Brennelementen. Es handelt sich um einen schwerwassergekühlten und -moderierten Kugelhaufendruckwasserreaktor (Pebble Bed Pressurized Water Reactor) PBPR mit inhärenten Sicherheitseigenschaften.

3 Inhärent sicheres Reaktorsystem mit keramischen Brennelementen

In diesem Kapitel werden zunächst die bereits existierenden Reaktorsysteme eines konventionellen Druckwasserreaktors und eines gasgekühlten Hochtemperaturreaktors vorgestellt. Das Reaktorkonzept des schwerwassergekühlten und -moderierten Kugelhaufendruckwasserreaktors mit inhärenten Sicherheitseigenschaften wird im Anschluss vorgestellt und die wesentlichen Besonderheiten des kugelförmigen Brennelements erläutert.

3.1 Druckwasserreaktor DWR

Der Druckwasserreaktor mit Leichtwasser als Kühlmittel (DWR), wie in Abbildung 3.1 im Schnitt dargestellt, ist der weltweit verbreitetste Reaktortyp. Er besitzt ein Kühlsystem, bestehend aus mehreren Kühlkreisläufen. Im Primärkreis durchströmt Leichtwasser den Reaktordruckbehälter (RDB) mit den stabförmigen Brennelementen zur Abfuhr der thermischen Energie aus der Kernspaltung.

Bei einem modernen Druckwasserreaktor westlicher Bauart wird das Kühlmittel im Reaktordruckbehälter von 291°C auf 326°C aufgeheizt. Gemäß der Dampfdruckkurve wird ein Primärkreisdruck von 160 bar erreicht. Über einen Dampferzeuger wird sekundärseitig Satttdampf mit einer Temperatur von 280°C und einem Druck von 63 bar erzeugt und nach mehrmaliger Zwischenüberhitzung in einem mehrstufigen Turbosatz entspannt.

Dieser Reaktortyp hat typische Leistungen von 1300 bis 1400 MW_{el}. Aufgrund der kompakten Anordnung der Brennelemente erreicht ein Druckwasserreaktor mittlere Kernleistungsdichten von 90 bis 100 MW/m³. Technisch inhärent sicher ist solch ein Druckwasserreaktor nicht, der Hypothetische Störfall ist bei einem 2F-Bruch der Hauptkühlmittelleitung und Ausfall aller aktiver Kühlsysteme möglich. Die Häufigkeit derartiger Störfälle wird als sehr gering eingeschätzt; es werden Wahrscheinlichkeiten von $H < 10^{-6}/a$ genannt.

Will man die schweren Folgewirkungen eines Kühlmittelverlustes vermeiden, muss der Reaktorkern mit zusätzlichen technischen Einrichtungen, den redundant ausgeführten aktiven Notkühlssystemen, auf einem unkritischen Temperaturniveau gehalten werden, bis die Nachwärmeleistung auf ein erträgliches Maß

gesunken ist oder die Leckagen im Primärkreislauf beseitigt wurden.

Der gesamte Primärkreis ist bei modernen Druckwasserreaktoren in einem kugelförmigen Sicherheitsbehälter aus Stahl untergebracht, der von einem zylindrischen Betongebäude mit halbkugelförmigem Deckel umgeben ist.

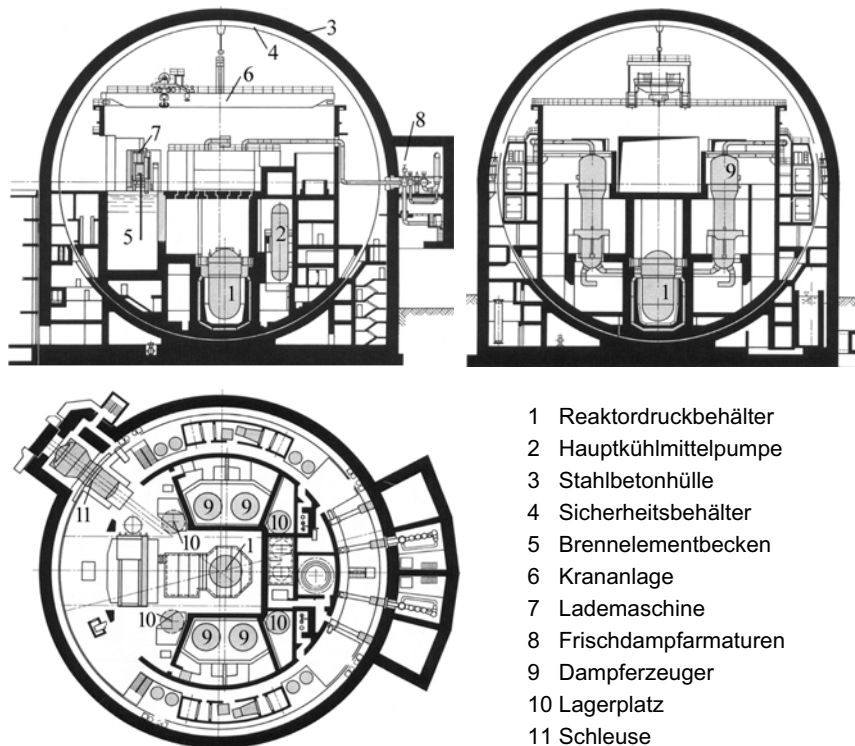


Abbildung 3.1 Schnittdarstellung eines Druckwasserreaktors [32]

Es bestehen Entwicklungstendenzen, Druckwasserreaktoren mit Elementen zu versehen, die eine Beherrschung einer möglichen Kernschmelze vorsehen. Ein Kernschmelzen kann bei derartigen Systemen zwar nicht ausgeschlossen werden, jedoch sollen die Auswirkungen eines derartigen Unfalls auf das Reaktor-schutzgebäude beschränkt bleiben.

Bei diesen Konzepten soll die Kernschmelze in einer entsprechend gestalteten Kernschmelzrückhaltevorrichtung, einem sogenannten Corecatcher, aufgefangen und ausgebreitet sowie durch passive Mechanismen gekühlt werden. Ein Beispiel für diese Entwicklungstendenz ist der in Abbildung 3.2 im Schnitt dargestellte European Pressurized Water Reactor (EPR).

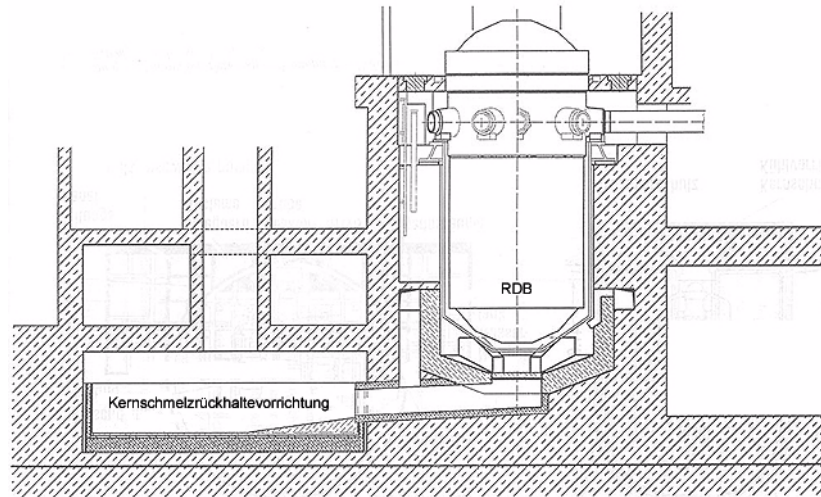


Abbildung 3.2 Schnittdarstellung eines European Pressurized Water Reactor (EPR) mit einer Kernschmelzrückhaltevorrichtung

3.2 Gasgekühlter Hochtemperaturreaktor HTR

Der Hochtemperaturreaktor (HTR) wurde als fortschrittlicher Reaktortyp zur Erzeugung von elektrischer Energie sowie zur Bereitstellung von Wärme seit Ende der fünfziger Jahre in drei unterschiedlichen Varianten entwickelt.

- Europäisches Gemeinschaftsprojekt DRAGON. Der mit prismatischen, stabförmigen graphitischen Brennelementen ausgestatteter Versuchsreaktor mit $20 \text{ MW}_{\text{th}}$ wurde in Winfrith (GB) gebaut und im August 1964 kritisch.
- Prototypreaktor Fort St. Vrain und die größeren Leistungsreaktoren der Firma General Atomic Company (GAC), mit hexagonalen Block-Brennelementen.
- Kugelhaufen- oder auch Schulten-Reaktor; der Reaktorkern besteht aus einer Schüttung kugelförmiger Brennelemente. Von der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) entwickelte und gebaute $50 \text{ MW}_{\text{th}}$ Versuchsreaktor in Jülich (D) wurde im August 1966 kritisch, außer Betrieb gestellt wurde dieser Reaktor im Jahre 1988.

Der Kugelhaufenreaktor besteht aus einer losen Schüttung kugelförmiger Brennelemente und wird mit Helium gekühlt. Er wird von einem als Neutronenreflektor wirkenden zylindrischen Graphitaufbau umschlossen. Die Brennelemente werden während des Leistungsbetriebs kontinuierlich von oben zugegeben, durchwan-