

<b>Dokumentenidentifikation</b>	DE19547652C1 06.03.1997
<b>Titel</b>	Kugelhaufenreaktor
<b>Anmelder</b>	<u>Forschungszentrum Jülich GmbH, 52428 Jülich, DE</u>
<b>Erfinder</b>	Gerwin, Helmut, Dr., 52428 Jülich, DE; Scherer, Winfried, Dr., 52428 Jülich, DE
<b>DE-Anmeldedatum</b>	20.12.1995
<b>DE-Aktenzeichen</b>	19547652
<b>Veröffentlichungstag der Patenterteilung</b>	06.03.1997
<b>Veröffentlichungstag im Patentblatt</b>	<u>06.03.1997</u>
<b>IPC-Hauptklasse</b>	<u>G21C 1/07</u>
<b>IPC-Nebenklasse</b>	<u>G21C 3/22</u> <u>G21C 7/22</u>
<b>Zusammenfassung</b>	<p>Die Erfindung bezieht sich auf einen Kugelhaufenreaktor mit einer von Brennelementkugeln gefüllten und von Reflektormaterial begrenzten Corekaverne. Die Corekaverne wird von Brennelementkugeln aufgrund von Scherkräftwirkung durchsetzt. Kühlgas durchströmt die Corekaverne im Abwärts- oder Aufwärtsstrom. Die dafür vorgesehenen Kühlgasleitungen münden seitlich oberhalb der Sohle des Kavernenbodens.</p> <p>Beim erfindungsgemäßen Reaktor ist über lange Betriebszeiten hinweg eine störungsfreie Kühlgasführung durch die Brennelementschüttung hindurch möglich.</p>

<b>Beschreibung[de]</b>
<p>Die Erfindung bezieht sich auf einen Kugelhaufenreaktor mit einer von Brennelementkugeln gefüllten und von Reflektormaterial begrenzten Corekaverne, die von den Brennelementkugeln unter Schwerkraftwirkung durchsetzt und vom Kühlgas im Abwärts- oder Aufwärtsstrom durchströmt wird.</p> <p>Kugelhaufenreaktoren sind bekannt. So ist beispielsweise in DE 31 49 794 C1 ein Kugelhaufenreaktor mit Graphitkern beschrieben. Bei Kugelhaufenreaktoren durchwandert eine Schüttung von Brennelementkugeln, der Kugelhaufen, unter Schwerkraftwirkung eine von Reflektormaterial begrenzte Corekaverne. Die Regelung des Kernreaktors erfolgt durch Neutronenabsorber, beispielsweise Regelstäbe, die entweder in Bohrungen im Reflektormaterial geführt werden oder auch direkt zur Reaktorregelung in die Schüttung der Brennelementkugeln eindringen.</p> <p>Zum Austausch abgebrannter Brennelementkugeln, die aus der Corekaverne abgezogen werden, wird die Schüttung aufgefüllt. Für das Abziehen der Brennelementkugeln sind üblicherweise Kugelabzugsrohre im Boden der Corekaverne vorgesehen. Den Kugelabzugsrohren werden die Brennelemente in trichterartigen Vertiefungen im Bodenreflektor zugeführt. Größere Corekavernen oder Corekavernen mit einer Mittelsäule aus Graphit im Kugelhaufen sind mit mehreren Kugelabzugsrohren ausgerüstet.</p> <p>Die Schüttung der Brennelemente wird üblicherweise in vertikaler Richtung von einem Kühlgas, insbesondere Helium, durchströmt. Die Strömungsrichtung des Kühlgases kann mit der Durchsatzrichtung der Brennelementkugeln in Schwerkraftichtung gleichgerichtet sein (Abwärtsstrom), das Kühlgas kann jedoch die Corekaverne auch entgegengesetzt zur Durchsatzrichtung der Brennelementkugeln, also aufwärts (Aufwärtsstrom) durchströmen. Zum Zu- bzw. Abführen des Kühlgases weist die Corekaverne im Decken- und Bodenreflektor Zufuhr- bzw. Abströmöffnungen für das Kühlgas auf, die üblicherweise jeweils in Gassammelkammern münden, die zur</p>

Vergleichmäßigung des Gasstroms, insbesondere zum Temperatenausgleich im Kühlgas dienen.

Beim Durchsatz der Brennelementkugeln in Schwerkraftrichtung verschleifen die Kugeloberflächen. Es können auch Kugelbruchstücke entstehen, die sich am Boden der Corekaverne sammeln. Kugelbruchstücke treten insbesondere dann auf, wenn in die Schüttung Regelstäbe eingeführt und in der Schüttung bewegt werden. Solche Kugelbruchstücke werden im wesentlichen über die Kugelabzugsrohre aus der Corekaverne entfernt, sie können sich aber auch in den Gasdurchführungen im Bodenreflektor festsetzen und Verstopfungen verursachen. Die Kühlgasströmung kann in solchen Fällen erheblich beeinträchtigt sein.

Aufgabe der Erfindung ist es, bei Kugelhaufenreaktoren eine auch über lange Betriebszeiten hinweg störungsfreie Kühlgasführung durch die Brennelementschüttung in der Corekaverne hindurch zu ermöglichen.

Diese Aufgabe wird bei einem Kugelhaufenreaktor der eingangs genannten Art durch die in Patentanspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst. Danach sind die Anschlüsse für die Kühlgasleitungen zum Zu- bzw. Abführen von Kühlgas in der Corekaverne seitlich oberhalb vom Kavernenboden angebracht. Das Kühlgas strömt somit in die Corekaverne seitlich oberhalb des Kavernenbodens bei Aufwärtsstrom zu bzw. bei Abwärtsstrom ab. In derartige seitliche Öffnungen können Abrieb-Bruchstücke der Brennelementkugeln nicht eindringen.

Ist zum Abzug der Brennelementkugeln eine mulden- oder trichterförmige Ausbildung des Kavernenbodens vorgesehen, oder weist der Kavernenboden mehrere benachbart angeordnete mulden- oder trichterförmige Ausbildungen auf, ist in vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung vorgesehen, daß die Kühlgasleitungen in zumindest zwei übereinanderliegenden Ebenen in den Mulden- oder Trichterwänden münden (Patentanspruch 2). Bevorzugt verlaufen die Kühlgasleitungen horizontal in der Reflektorwand (Patentanspruch 3).

Im Falle einer Mittelsäule in der Corekaverne werden die Kühlgasleitungen unter Ausnutzung des in der Mittelsäule vorhandenen, umbauten Raums mit Vorteil innerhalb der Mittelsäule verlegt und münden im Wandbereich der Mittelsäule (Patentanspruch 4). Um bei einer solchen Führung des Kühlgases alle Brennelemente bis zu ihrem Eintritt in die Kugelabzugsrohre vom Kühlgas umströmen zu lassen, sind die Kugelabzüge nach Patentanspruch 5 zweckmäßig in einem der Mittelsäule nahen Bodenbereich im Kavernenboden angeordnet.

Die Erfindung mit ihren Ausbildungen wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen im einzelnen:

Fig. 1 einen Kugelhaufenreaktor mit trichterförmig ausgebildetem Kavernenboden und in mehreren Ebenen mündenden Kühlgasleitungen im Halbschnitt;

Fig. 2 eine Variante eines Kugelhaufenreaktors nach Fig. 1 im Halbschnitt; und

Fig. 3 einen Kugelhaufenreaktor mit Mittelsäule im Halbschnitt.

In Fig. 1 ist schematisch der untere Bereich einer zylindrischen Corekaverne im Halbschnitt mit der Zylinderachse 1, mit einer Brennelementkugelschüttung 2, mit dem Kugelhaufen, der in Fig. 1 und den nachfolgenden Figuren der Zeichnung nur angedeutet ist, mit die Schüttung 2 umgebendem Reflektor 3 und mit einem Kugelabzug 4 im Kavernenboden 5 dargestellt. Der Kavernenboden 5 weist im Ausführungsbeispiel einen trichterförmigen Innenraum auf, wobei die Trichterspitze bis zur Sohle 6 des Kavernenbodens 5 führt und am Kugelabzug 4 mündet. Innerhalb der Wände des Kavernenbodens 5 verlaufen Kühlgasführungen 7, die in mehreren Ebenen - im Ausführungsbeispiel in zwei in vertikaler Richtung übereinander angeordneten Ebenen - im trichterförmigen Innenraum des Kavernenbodens 5 auf dessen Innenwand 8 münden. In Fig. 1 sind zwei Zweigleitungen 9, 10 der Kühlgasführung 7 schematisch dargestellt, durch die das Kühlgas in die Brennelementkugelschüttung 2 im Trichter des Kavernenbodens durch Öffnungen 11 hindurchgeführt wird. Das Kühlgas durchströmt im

Ausführungsbeispiel die Corekaverne in Aufwärtsrichtung, also in entgegengesetzter Richtung zum Schwerkraftdurchsatz der Brennelementkugeln.

In die Kühlgasführung 7 strömt das Kühlgas aus einer vorgeschalteten Gassammelkammer 12 ein. An der Gassammelkammer 12, die ringförmig um die Zylinderachse 1 verläuft, sind mehrere Kühlgasführungen 7 mit im trichterförmigen Innenraum des Kavernenbodens 5 mündenden Zweigleitungen 9, 10 angeschlossen; im Ausführungsbeispiel sind eine Vielzahl von Kühlgasführungen vorgesehen. In Fig. 1 und in den nachfolgenden Fig. 2 und 3 ist jeweils nur eine dieser Kühlgasführungen wiedergegeben. Die Gaszufuhr in die Gassammelkammer 12 ist in den Figuren der Zeichnung nicht dargestellt.

Eine Variante der Corekaverne nach Fig. 1 ist in Fig. 2 wiedergegeben. Diejenigen Ausbildungsmerkmale der Corekaverne nach Fig. 2, die Merkmalen der Fig. 1 entsprechen, sind in Fig. 2 mit gleichem Bezugszeichen wie in Fig. 1, jedoch zusätzlich mit einem Apostroph markiert, beispielsweise ist die Zylinderachse in Fig. 1 mit "1", in Fig. 2 mit "1'" angegeben.

Der trichterförmige Innenraum des Kavernenbodens 5, ist beim Ausführungsbeispiel nach Fig. 2 in zwei übereinander angeordnete Kegelstumpfteile 13, 14 aufgeteilt, von denen der obere Kegelstumpfteil 13 den gleichen Kegelwinkel 15 wie der untere Kegelstumpfteil 14 und einen Kegelbasisdurchmesser 16 an seinem oberen Kegelende aufweist, der - zum Anschluß an den Innenraum der Corekaverne - mit dem äußeren Durchmesser des die Brennelementkugelschüttung 21 aufnehmenden Innenraums der Corekaverne übereinstimmt. Der untere Kegelstumpfteil 14 weist an seinem oberen Kegelende einen Kegelbasisdurchmesser 17 auf, der dem Kegelstumpfdurchmesser des Kegelstumpfteils 13 an dessen unterer Kegelstumpfseite entspricht; die Kegelstumpfteile 13, 14 sind somit fluchtend übereinander angeordnet. Der untere Kegelstumpfteil 14 führt zum Kugelabzug 4', sein Kegelstumpfdurchmesser am unteren Kegelstumpfeende entspricht somit dem Durchmesser 18' des Kugelabzugs 4'.

Zwischen den Kegelstumpfteilen 13, 14 ist eine obere Zweigleitung 19, die an die Kühlgasführung 7' angeschlossen ist, mit senkrechten Öffnungen 20 zum Ausströmen des Kühlgases in den trichterförmigen Innenraum des Kavernenbodens 5, angeordnet. Eine untere Zweigleitung 21 zur Kühlgasführung verläuft unterhalb des unteren Kegelstumpfteils 14 und mündet mit senkrechten Öffnungen 22 an der Trichterspitze des Kavernenbodens 5, unmittelbar in den Kugelabzug 4'. Das Kühlgas strömt - wie schon im Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 - aus einer Gassammelkammer 12' in die Kühlgasführung 7' und die untere Zweigleitung 21 ein. An der Gassammelkammer 12' sind mehrere Kühlgasführungen 7' angeschlossen; in Fig. 2 ist wie in Fig. 1 nur eine dieser Kühlgasführungen dargestellt.

Der trichterförmige Innenraum des Kavernenbodens 5' nach Fig. 2 besteht somit aus einem horizontal in zwei Kegelstumpfteile 13, 14 getrennten Trichter, wobei die Kegelstumpfteile übereinander liegen und zwischen ihnen ein zylindrischer Teil mit den Öffnungen 20 für die obere Zweigleitung 19 angeordnet ist, sowie einer zylindrisch auslaufenden Trichterspitze, die in den Kugelabzug 4' mündet und im Mündungsbereich die Öffnungen 22 der unteren Zweigleitungen 21 aufweist. Eine solche Ausbildung eignet sich insbesondere für eine Corekaverne mit hinreichend kleinem Druckabfall beim Durchströmen des Kühlgases durch den Kugelhaufen. Durch die horizontal verlaufenden Kühlgasführungen mit in den zylindrischen Teilen senkrecht stehenden, also parallel zur Durchlaufrichtung der Brennelementkugeln ausgerichteten Öffnungen 20, 22 wird ein Verstopfen der Kühlgaszuführungen bzw. ihrer Zweigleitungen vermieden.

Für Kugelhaufenreaktoren höherer Leistung in der Kugelschüttung ist vorgesehen, eine Mittelsäule in der Corekaverne anzuordnen und die Brennelementkugeln ringförmig um die Mittelsäule herum aufzuschütten. Für einen solchen Kugelhaufenreaktor zeigt Fig. 3 eine der Erfindung entsprechende Kühlgaszufuhr seitlich oberhalb der Sohle des Kavernenbodens.

In Fig. 3 ist schematisch, wie in den in Fig. 1 und 2, wieder der untere Bereich einer zylindrischen Corekaverne mit Zylinderachse 23 im Halbschnitt, mit einer Mittelsäule 24, mit im Querschnitt

ringförmig um die Mittelsäule 24 aufgeschütteter Brennelementkugelschüttung 25, mit die Schüttung 25 umgebendem Reflektor 26 und Kugelabzügen 27 wiedergegeben, von denen in Fig. 3 nur einer dargestellt ist. Die Kugelabzüge gehen im Kavernenboden 28 von dessen Sohle 29 aus, sie sind ringförmig um die Zylinderachse 23 unterhalb der Brennelementkugelschüttung 25 angeordnet und befinden sich in einem der äußeren Wand 30 der Mittelsäule 24 nahegelegenen Bodenbereich an der Sohle 29 des Kavernenbodens 28.

Im Ausführungsbeispiel weist der Kavernenboden 28 eine trichterförmige Innenwand 31 auf, über die die Brennelementkugeln zu den Kugelabzügen 27 im Kavernenboden 28 geführt werden.

Die Kühlgaszufuhr 32 befindet sich zentral in der Mittelsäule 24 und weist Zweigleitungen 33 auf, die horizontal durch die Wand der Mittelsäule 24 geführt sind und mit senkrecht verlaufenden Mündungsöffnungen 34, die als Löcher oder Schlitze ausgeführt und in Fig. 3 nicht dargestellt sind, in die Brennelementkugelschüttung 25 münden. Das Kühlgas strömt in die Kugelschüttung in einem Bereich ein, in dem sich die Brennelementkugeln kurz vor ihrem Austritt aus der Corekaverne in die Kugelabzüge 27 befinden.

Eine solche Kühlgasführung mit Auf- oder Abwärtsströmung des Kühlgases im Kugelhaufen weist folgende Vorteile auf:

- - Dem Kühlgas, das im Kugelhaufen entlang der Außenwand der Mittelsäule strömt, in einer Zone also, in der die größte Beistungsdichte gegeben ist, wird ein besonders kurzer Weg durch die Brennelementkugelschüttung geboten.
- - Dem Kühlgas, das an der Innenwand des Außenreflektors strömt, wird der längste Weg durch die Brennelementkugelschüttung aufgezwungen, so daß es sich auch beim Durchströmen von Zonen im Kugelhaufen mit niedriger Leistungsdichte hinreichend aufheizen kann.
- - Der innere Bereich der Mittelsäule kann vorteilhaft für die Unterbringung der Gassammelkammern, der Heißgas- bzw. Kaltgas-Kammer, genutzt werden, wobei bei Aufwärtsstrom des Kühlgases im unteren Bereich der Mittelsäule die Kaltgaskammer, im oberen Bereich die Heißgaskammer angeordnet ist. Bei Abwärtsstrom liegen die Kammern in der Mittelsäule umgekehrt.
- - Der Kavernenboden als Bodenreflektor enthält außer den Kugelabzügen keinerlei Öffnungen und kann mit glatter Oberfläche und als massives Bauelement mit besserer Reflektor- und Abschirmwirkung bei niedriger Bauweise (auch wegen der hier nicht mehr notwendigen Gassammelkammer) gestaltet werden.
- - Bei Abwärtsstrom kann das Heißgas aus der unteren Gassammelkammer in der Mittelsäule in einfacher Weise zu den Dampferzeugern bzw. Wärmetauschern geführt werden. Darüber hinaus ist eine gute Durchmischung des aufgeheizten Kühlgases erreichbar.

Ein Kugelhaufen-Hochtemperaturreaktor mit Mittelsäule und einer Leistung von 400 MW (thermisch), bei dem das Kühlgas im Aufwärtsstrom entsprechend dem Stand der Technik durch Öffnungen auf der Sohle des Kavernenbodens in die Brennelementkugelschüttung eingeführt wird, zeigt Unterschiede für die Austrittstemperatur des Kühlgases aus der Corekaverne von mehr als 150°C. Diese Temperaturdifferenzen reduzieren sich auf weniger als 10°C, wenn die Kugelabzüge an der Wand der Mittelsäule angeordnet sind und das Kühlgas über die Mittelsäule über Schlitze, die am unteren Ende der Mittelsäule angeordnet sind und 30% der Länge der Mittelsäule ausfüllen, in den Kugelhaufen einströmt. Eine weitere Reduktion der Austrittstemperaturdifferenzen könnte mit einem über der Höhe der Mittelsäule varierten Lochanteil erreicht werden, wobei der größere Teil der Kühlgasmenge in den Kugelhaufen im Bereich oberhalb der Kugelabzüge eingeführt wird.

# Hochtemperaturreaktor

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie

Wechseln zu: [Navigation](#), [Suche](#)

Die Artikel [Kernkraftwerk THTR-300](#) und [Hochtemperaturreaktor](#) überschneiden sich thematisch. Hilf mit, die Artikel besser voneinander abzugrenzen oder zu vereinigen. Bitte äußere dich in der [Diskussion über diese Überschneidungen](#), bevor du diesen Baustein entfernst. Plenz 18:08, 10. Nov. 2008 (CET)



**Graphitkugel für Hochtemperaturreaktor**

Der Begriff **Hochtemperaturreaktor (HTR)**, **Kugelhafenreaktor** oder **Kugelbetteaktor** bezeichnet in der Kerntechnik eine Bauart von in der [Bundesrepublik Deutschland](#) entwickelten [Kernreaktoren](#), die durch sparsamen Uranverbrauch, geringe Abwärmeerzeugung und das Potenzial zur [Fernwärmenutzung](#) gekennzeichnet sind. Der Name gründet auf einer relativ hohen Nutzungstemperatur von 300 bis 950 °C, die bei einem HTR entsteht. Dieser Reaktortyp benutzt [Heliumgas](#) als Kühlmittel und [Graphit](#) als [Moderator](#). Aufgrund seiner Bauart gilt der Kugelhafenreaktor als sicherer und effizienter als herkömmliche Reaktortypen. Der [AVR \(Jülich\)](#), der am Kernforschungszentrum in Jülich eingerichtet wurde, diente als Prototyp für dieses System.

## Inhaltsverzeichnis

### [Verbergen!](#)

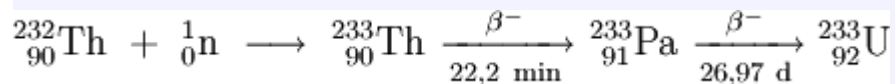
- [1 Funktionsprinzip](#)
- [2 Reaktoraufbau](#)
- [3 Geschichtliche Entwicklung](#)
- [4 Transportable Reaktoren](#)
- [5 Sicherheit](#)
- [6 Referenzen](#)
- [7 Siehe auch](#)
  
- [8 Weblinks](#)

### **Funktionsprinzip** [\[Bearbeiten\]](#)

Im Gegensatz zu den herkömmlichen Reaktoren, wie z. B. dem [Siedewasserreaktor](#), wird beim Thorium-Hochtemperaturreaktor nicht nur das Element [Uran](#) 235 für den nuklearen Spaltungsprozess verwendet, sondern die gesamte Reaktorkonzeption basiert auf der Umwandlung des Elementes [Thorium](#) 232 in Uran 233, das genauso als Kernbrennstoff

verwendbar ist wie Uran 235. Das Uran 233 wird dabei während des laufenden Reaktorbetriebes aus Thorium 232 erbrütet.

Die Voraussetzung für die Erbrütung ist die Umwandlung des Thoriums in Uran 233 nach folgender Formel:



Ein Thoriumatom 232 wird zum Anfang des Umwandlungsprozesses mit einem langsamen, einem sog. thermischen Neutron beschossen und wandelt sich dabei zum Thoriumisotop 233 um. Dieses hat eine Halbwertszeit von 22,2 Minuten und unterliegt einem  $\beta$ -Zerfall, d. h. der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und der Emission eines hochenergetischen Elektrons. Die Folge dieses Zerfalls ist, dass zwar die Atommasse des Thoriumisotops mit 233 gleichbleibt, das Thoriumatom aber in ein Protactiniumatom umgewandelt wird.

Das so neu entstandene Protactinium 233 hat eine Halbwertszeit von 27,0 Tagen und zerfällt durch einen weiteren  $\beta$ -Zerfall mit gleichzeitiger Aussendung von Gammastrahlung zu Uran 233. Dieses Uran 233 ist als Kernbrennstoff bzw. als Grundlage einer technisch nutzbaren Kernspaltung zu gebrauchen und verhält sich dabei genauso wie Uran 235.

Im Thorium-Hochtemperaturreaktor selbst bestehen die Brennelemente, in denen sich das spaltbare Material im Reaktorkern befindet, aus Kugeln mit sechs Zentimetern Durchmesser. Diese kugelförmigen Brennelemente bestehen aus 192 g Kohlenstoff, 0,8928 g Uran 235, 0,0672 g Uran 233 und 10,2 g Thorium 232. Die Brennelemente haben eine äußere brennstofffreie Schale aus Graphit mit einer Dicke von 5 mm. Im Inneren ist der o. g. Brennstoff in Form von beschichteten Teilchen in eine Graphitmatrix eingebettet. Die partikelfreie Schale ist hier zusammen mit der Graphitmatrix für die mechanische Festigkeit des Brennelementes verantwortlich. Zudem sublimiert (verdampft) der Graphit erst bei ca. 3.500 °C ohne vorher zu schmelzen, d. h. bis zu dieser Temperatur bleiben Kernstruktur und Kugelform intakt und damit absorptionsfähig. Deshalb zählt es zu den Vorteilen des Thorium-Hochtemperaturreaktors, dass sich im Reaktorkern selbst nur Konstruktionsmaterialien befinden, die sogar Temperaturen bis weit über der Betriebstemperatur problemlos tolerieren.

Die beschichteten Teilchen im Inneren des Brennelementes bestehen aus  $\text{UO}_2$ - und  $\text{ThO}_2$ -Teilchen, die von drei Pyrocarbonschichten umhüllt sind. Diese Schichten halten zusammen mit der Graphitmatrix die radioaktive Strahlung des Brennstoffes größtenteils zurück, weshalb nur relativ wenig radioaktive Strahlung austritt. Der Kohlenstoff innerhalb des Brennelementes dient hierbei als Moderator. Das Thorium 232 wird ebenfalls direkt in das Brennelemente eingebracht, da es so direkt während der laufenden Kernspaltung(en) in Uran 233 umgewandelt werden und gespalten werden kann.

Die Zahl der Brennelemente im Thorium-Hochtemperaturreaktor beträgt 675.000 Stück. Die durch Kernspaltung freiwerdende Wärmeenergie sorgt für eine Kerntemperatur von ca. 700 °C.

Im Laufe des einjährigen Betriebes des THTR stellte sich jedoch heraus, dass es aufwendig ist, das erbrütete Uran aus seinem Einschluss zu befreien; letztendlich ist diese Methode der Uranherstellung nicht wirtschaftlich, so dass nur die direkte Verwendung der Brennelemente zur Energieerzeugung sinnvoll ist.

Eine spezielle Eigenschaft des in Deutschland entwickelten Hochtemperaturreaktors sind die kugelförmigen Brennelemente im Gegensatz zu Entwicklungen mit prismatischen Brennelementen in den USA. Diese Brennelementkugeln, die im Reaktorkern einen *Kugelhaufen* bilden (daher auch die Bezeichnung *Kugelhaufenreaktor*), erlauben die kontinuierliche Entnahme verbrauchter Brennelemente und deren Ersatz durch frische Brennelemente. Der hauptsächlich verwendete Werkstoff ist Graphit.

## **Reaktoraufbau** [Bearbeiten]

Wie andere Kernreaktoren erzeugt ein HTR im Betrieb Wärme, die über ein Medium (Wasser, Gas) zu einer Wärmesenke gebracht wird, beim Prototyp ist dies eine Turbine, deren angeschlossener Generator Elektrizität erzeugt. Der eigentliche Einsatz sollten ursprünglich allerdings chemische Reaktionen sein, die viel Prozesswärme bei hoher Temperatur (bis zu 1300 °C) benötigen, z. B. die Kohleveredelung zu Kohlenwasserstoffen.

Das spaltbare Material, Uran, Thorium oder Plutonium (in Entwicklung, um den Hochtemperaturreaktor zur Vernichtung von Waffenplutonium einzusetzen), ist als keramisches Oxid in Graphitkugeln eingeschlossen (siehe oben). Im Allgemeinen liegt das Spaltmaterial in Form kleiner Körner vor, die gleichmäßig in der Kugel verteilt sind; zwischen den Körnern befindet sich das Graphit der Kugel. Die Kugeln sind etwa tennisballgroß (Durchmesser 6 cm) und etwa 200 g schwer; davon sind 5 % spaltbares Material. Ein Reaktor mit einer Leistung von 120 Megawatt braucht 380.000 solcher Kugeln.

Der Kernreaktor ist ein großer Raum, der mit den Kugeln aufgefüllt wird. Die Kugeln lassen sich in stationären Reaktoren automatisch zugeben und entnehmen. Ein reaktionsträges Gas, etwa Helium, Stickstoff oder Kohlendioxid, zirkuliert durch die Kugelzwischenräume. Dabei nimmt es die bei der Kernreaktion entstehende Wärme auf und trägt sie im Idealfall direkt zur Turbine.

In der Mehrzahl der stationären und im Gegensatz zu den mobilen KHR lassen sich die Kugeln während des Betriebs ständig oben zugeben und unten entnehmen. Dadurch wird ein ununterbrochener Betrieb möglich, der gleichzeitig einen kontinuierlichen Austausch des Brennmaterials erlaubt. Verbrauchte Kugeln lassen sich so entfernen und durch neue ersetzen.

Ein sich automatisch aus der Bauweise ergebender Vorteil liegt in der Betriebssicherheit. Mit zunehmender Temperatur des Reaktors erhöht sich die thermische Geschwindigkeit der Brennstoffatome, was aufgrund der Dopplerverbreiterung die Wahrscheinlichkeit des Neutroneneinfangs durch <sup>238</sup>Uran erhöht und dadurch die Reaktionsrate reduziert. Bauartbedingt gibt es also eine maximale Reaktortemperatur, und wenn diese unterhalb des Schmelzpunktes des Reaktormaterials liegt, kann keine Kernschmelze stattfinden. Es muss nur sichergestellt sein, dass der Reaktor die entstehende Wärme passiv nach außen abstrahlen kann. Da in dieser Situation auch kein Schaden am Reaktor entsteht, ist nach einem solchen Zustand der Reaktor weiter benutzbar, und das Reaktormaterial kann entnommen werden.

Damit wird auch der Betrieb des Reaktors vereinfacht. Anstatt durch Kontrollstäbe kann der Reaktor durch seine Betriebstemperatur, also durch die Durchflussrate des Kühlmittels, gesteuert werden. Wenn viel Energie entnommen werden soll, fließt mehr Kühlmittel, die Temperatur sinkt, der Reaktor produziert mehr Energie; wenn weniger Energie entnommen werden soll, fließt weniger Kühlmittel, die Temperatur steigt, der Reaktor produziert weniger Energie. Für das vollständige Abstellen des Reaktors ist aber die räumliche Trennung der



Brennelemente oder der Einsatz eines Neutronengifts, etwa des Edelgases Xenon, sowie von Steuerstäben o.ä. notwendig.

Ein weiterer Vorteil des Kugelhaufenreaktors liegt in der im Vergleich zu wassergekühlten Reaktoren hohen Betriebstemperatur, die einen höheren Prozesswirkungsgrad ermöglicht. Wenn Helium als Kühlmittel verwendet wird, ist eine direkte Speisung des Heliums in die Turbine denkbar. Helium absorbiert fast keine Neutronen und wird im Betrieb kaum radioaktiv. Zusätzlich ist allerdings sicherzustellen, dass die Kugeln „dicht“ sind und keine Zerfallsprodukte abgeben. Die hohe Betriebstemperatur hat den zusätzlichen Vorteil, dass sich im Graphit keine Wigner-Energie aufbauen kann.

## Geschichtliche Entwicklung [Bearbeiten]

Die grundlegenden Ideen des Kugelhaufenreaktors wurden in den 1950er Jahren von Rudolf Schulten entwickelt. Der Durchbruch lag in der Idee, dass Kugeln aus Graphit bis zu 15.000 stecknadelkopfgroße Körnchen („*Coated Particles*“) enthalten, in denen der Kernbrennstoffkern durch Schichten aus Siliziumkarbid und pyrolytischem Kohlenstoff geschützt ist. Diese Kugeln werden sowohl hohen Temperaturen (bis 2.000 °C) als auch mechanischen Anforderungen gerecht.

In Deutschland waren zwei Hochtemperaturreaktoren in Betrieb:

- **AVR (Jülich) im Forschungszentrum Jülich (1967–1988)**
- **THTR-300 in Hamm-Uentrop (1983–1988)**

Außerdem war Mitte der 80er Jahre der Bau eines HTR-500 bis 1993 geplant.

Ein *Versuchsreaktor* mit einer elektrischen Leistung von 15 Megawatt wurde von der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) in der Kernforschungsanlage Jülich (Deutschland) gebaut und in Betrieb genommen, um Erfahrungen mit diesem Reaktortyp zu sammeln. Erstmals fand darin am 26. August 1966 eine kontrollierte Kettenreaktion statt. Der Reaktor lief 21 Jahre lang, bis er am 31. Dezember 1988 abgeschaltet wurde. 2012 soll der Reaktorkern zurückgebaut werden.

Ein *kommerzieller Thorium-Hochtemperaturreaktor*, der THTR-300 in Hamm-Uentrop, kam aufgrund materialtechnischer Schwierigkeiten mit den Kugeln nicht über den Probetrieb hinaus, wurde knapp fünf Jahre nach seiner ersten nuklearen Reaktion im September 1988 zur Revision abgeschaltet, ein Jahr später endgültig stillgelegt. Der Reaktorkern selbst kann erst voraussichtlich 2029 abgebaut werden, da die Strahlung noch zu hoch ist. Der Kühlturm, der die gleiche Tragwerkskonstruktion wie das Olympia-Stadion in München aufwies und deshalb von einigen Bürgern als denkmalschutzwürdig eingestuft wurde, wurde am 10. September 1991 gesprengt. Diese im Vergleich mit landesüblichen Verfahrensdauern ungewöhnlich schnelle Abwicklung steht im geschichtlichen Kontext der Tschernobyl-Katastrophe (April 1986) und eines Störfalls in Hamm selbst am 4. Mai 1986, bei dem Radioaktivität austrat und den die Betreiber erst verspätet meldeten. Diese Ereignisse trugen im August 1986 zum SPD-Beschluss eines Atomausstiegs innerhalb von 10 Jahren bei. Die damalige SPD-Landesregierung demonstrierte erstmals ihren neu gewonnenen Ausstiegswillen.

Am Reaktorkonzept des Hochtemperaturreaktors wird in Deutschland nicht mehr geforscht. Stattdessen sind deutsche Unternehmen an Projekten in Japan, Volksrepublik China, Südafrika und Indonesien beteiligt, wo die Technik unter dem internationalen Namen **PBMR** (Pebble



Bed Modular Reactor) bekannt ist. Die Entwicklung geht in Richtung kleinerer, dezentral untergebrachter und inhärent sicherer Reaktoren. Aufgrund der reduzierten Leistung sollen Gefahren abgewehrt werden und durch die Modularität und den gleichen Aufbau der Kleinreaktoren sollen diese zudem sehr billig in größeren Mengen herstellbar sein.

Heute werden Kugelhaufenreaktoren am MIT, von der Eskom (Südafrika), der General Atomic (USA), der Adams Atomic Engines (USA) und der Romaha B. V. (Niederlande) aktiv weiterentwickelt.

2003 gab die chinesische Regierung bekannt, bis zum Jahr 2020 dreißig Kernreaktoren dieses Typs errichten zu wollen.

## **Transportable Reaktoren** [Bearbeiten]

Kugelhaufenreaktoren lassen sich in kleinen Einheiten bauen. Da kein Druckbehälter erforderlich ist, sind auch transportable Reaktoren, etwa für Schiffe oder als Notstromaggregate, denkbar. Ein derartiges Konzept wird vom niederländischen Romawa B.V. Konzern unter dem Namen "Nereus" vorgeschlagen. Mit einer Leistung von 8 Megawatt kann dieser Reaktor in einem üblichen Transportcontainer untergebracht werden. Ein anderes Design wird vom US-amerikanischen Adams Atomic Engines (AAE) Konzern vertreten. Das System ist vollständig abgeschlossen und bietet sich auch für Unterwasser- oder Weltraumprojekte an.

## **Sicherheit** [Bearbeiten]

Ein Kugelhaufenreaktor, dem während des Betriebs Brennstoffkugeln zugegeben und entnommen werden, braucht nicht zu Beginn seines Betriebs mit einem Übermaß an spaltbarem Material versorgt zu werden. Gleichmaßen sammeln sich im Reaktor weniger Spaltprodukte an.

Neben den traditionellen baulichen Sicherheitsmaßnahmen (erdbeben- und flugzeugabsturz-sicheres Gebäude, Reaktorwände) stellen die Kugeln selbst ein wichtiges Sicherheitselement dar. Im Innern der Kugeln sind bis zu 15.000 kleine Körner des spaltbaren Materials gleichmäßig verteilt, die ihrerseits von Schichten aus pyrolytischem Graphit und Siliziumkarbid umgeben sind. Das spaltbare Material im Zentrum liegt in Form keramischer Oxide vor, die einen hohen Schmelzpunkt besitzen.

Die Kernleistungsdichte ist deutlich geringer als bei herkömmlichen Reaktoren (HTR: max.  $6 \text{ MW/m}^3$ , DWR:  $100 \text{ MW/m}^3$ ). Dadurch lässt sich ein HTR so konstruieren, dass auch bei einem Ausfall der aktiven Kühlung die passive Kühlung allein ausreicht, um die Temperatur der Brennelemente unter dem Schmelzpunkt zu halten, eine Kernschmelze also unmöglich ist.

Der Einschluss des spaltbaren Materials bedingt ebenfalls einen Einschluss der Spaltprodukte. Während des Reaktorbetriebs werden nur geringe Mengen der Spaltprodukte an das Kühlmittel abgegeben. Daher kann ein Kugelhaufenreaktor auch ohne Zwischenkreislauf eine Turbine antreiben, falls Helium zum Wärmetransport verwendet wird. Gleichzeitig wäre die Freisetzung radioaktiven Materials bei einem Bruch des Reaktors gering.

In jüngster Zeit ist die Diskussion um die Sicherheit eines Kugelhaufenreaktors durch eine sicherheitstechnische Neubewertung des Kugelhausreaktors „AVR“ <sup>[1]</sup> wieder aufgeflammt.

Bisher kaum beachtete Probleme stehen im Mittelpunkt der Diskussion, die auch Konsequenzen für geplante oder im Bau befindliche Kugelhaufenreaktoren (z. B. PBMR der Eskom, Südafrika) haben können. Wesentliche Punkte mit Konsequenzen für die Planung und den Betrieb eines Kugelhaufenreaktors sind:

- **Kontamination des Kühlkreislaufes mit metallischen Spaltprodukten (Sr-90, Cs-137)**
- **Unzulässig hohe Temperaturen im Reaktorkern (200 °C über berechneten Werten)**
- **Notwendigkeit eines Sicherheitsbehälters**

## Referenzen [Bearbeiten]

1. ↑ **Sicherheitstechnische Neubewertung des AVR-Kugelhaufenreaktors (Moormann, R. (2008): A safety re-evaluation of the AVR pebble bed reactor operation and its consequences for future HTR concepts. Berichte des Forschungszentrums Jülich JUEL-4275, Forschungszentrum Jülich (Hrsg.) (PDF-Datei, englisch)**

## Siehe auch [Bearbeiten]

- Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
- Liste der Kernkraftwerke

# AVR (Jülich)

aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie  
Wechseln zu: Navigation, Suche

<b>AVR (Jülich)</b>	
<span></span> <div>Map of Germany with a red dot indicating the location of AVR (Jülich) in the western part of the country.</div>	
<b>Koordinaten</b>	<span><span><span><span><span>50°54′10,6″N</span>, <span>6°25′16,3″O</span></span></span><span><span>﻿</span> / <span>﻿</span></span><span><span>Koordinaten: <span><span><span><span>50°54′10,6″N</span>, <span>6°25′16,3″O</span></span></span></span></span></span></span></span>
<b>Land:</b>	<span><span><span></span></span><span> </span></span> Deutschland
<b>Daten</b>	
<b>Eigentümer:</b>	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor GmbH
<b>Betreiber:</b>	Arbeitsgemeinschaft

	t	Versuchsreaktor GmbH
Projektbeginn:	1961	
Kommerzieller Betrieb:	19. Mai 1969	
Stilllegung:	31. Dez. 1988	
Stillgelegte Reaktoren (Brutto):	1 (15 MW)	
Eingespeiste Energie seit Inbetriebnahme:	1.506 GWh	
Stand:	25. Juli 2007	

Das Kernkraftwerk **AVR Jülich** (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich) war der erste deutsche Hochtemperaturreaktor. Die Anlage basierte auf einem Konzept der Firmen BBC/Krupp Reaktorbau/Hochtemperatur Reaktorbau (Kugelhaufenreaktor) und hatte eine elektrische Nettoleistung von 13 Megawatt.

Der Standort der Anlage ist Jülich, auf dem Gelände des Forschungszentrums.

1967 wurde das Kraftwerk, welches auch Strom ins öffentliche Netz lieferte, in Betrieb genommen. Nach 21 erfolgreichen Betriebsjahren wurde der Reaktor am 31. Dezember 1988 abgeschaltet.

Das Stilllegungskonzept wurde in den Folgejahren von „Sicherer Einschluss“ über „Entkernung“ in „vollständiger Abbau“ geändert. Dazu wurde die AVR im Jahr 2003 in das bundeseigene Rückbau-Unternehmen Energiewerke Nord integriert. Derzeit laufen Vorbereitungen für die totale Beseitigung der Anlage. Im Jahre 2006 wurde eine 60 x 40 Meter große Materialschleuse aus Stahl vor dem Reaktorgebäude errichtet, um das Ausschleusen des Reaktorbehälters zu ermöglichen. Bis zum Jahre 2013 - 25 Jahre nach Außerbetriebnahme des Kraftwerks - sollen die Rückbauarbeiten beendet und der Zustand „Grüne Wiese“ hergestellt sein, während der Reaktorbehälter 200 m entfernt für gut 60 Jahre zwischengelagert wird.

Inhaltsverzeichnis

s

[\[Verbergen\]](#)

[1 Aufbau](#)

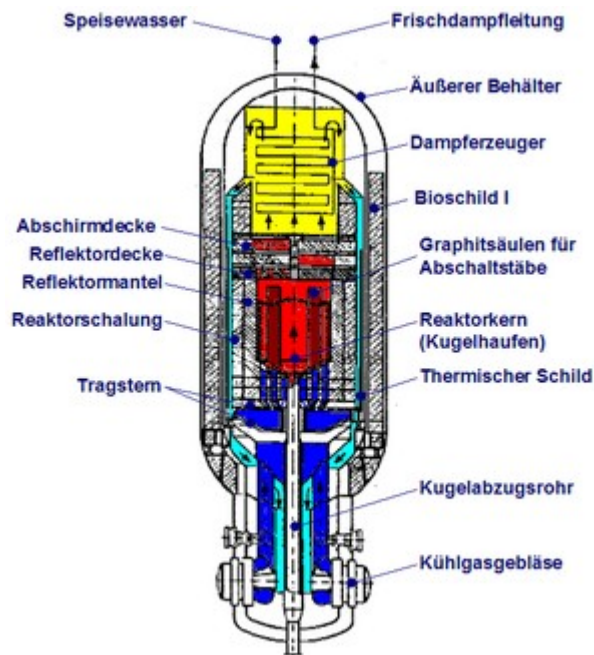
[2 Störfälle](#)

[3 Weblinks](#)

[4](#)

[Einzelansicht](#)

 [Aufbau \[Bearbeiten\]](#)



### Aufbau des AVR-Reaktors

Abweichend von der normalerweise genutzten Anordnung des Dampferzeugers neben dem Reaktorkern wurde der Dampferzeuger beim AVR oberhalb des Reaktorkerns angeordnet, was einen besonders kleinen Flächenverbrauch zur Folge hat. Die Abschaltstäbe werden in separaten Graphitsäulen, die den Reaktorkern durchdringen, von der Unterseite des Reaktors eingefahren. Ebenfalls auf der Unterseite des Reaktors befinden sich die Kühlgebläse und die Kugelabzugsvorrichtung.<sup>[1]</sup> Abgeleitet von der vertikalen Anordnung und dem kleinen Flächenverbrauch gab es bei BBC/HRB Pläne für ein HTR-100-Industriekraftwerk, das direkt in Industrieanlagen für Prozesswärme- und Stromerzeugung genutzt werden sollte. Im Betrieb des AVR zeigte sich jedoch, dass konstruktiv auf jeden Fall verhindert werden muss, dass Wasser in den Reaktorkern dringen kann, eine vertikale Anordnung demzufolge risikobehaftet ist.<sup>[2]</sup> Beim Bau des kommerziellen Prototypes THTR-300 in Hamm-Uentrop wurden die Dampferzeuger daher neben dem Kern angeordnet und die Kernstäbe ohne Graphitsäulen direkt von oben in den Kugelhaufen gefahren, was einen kompakteren Kernaufbau ermöglicht.

Technische Daten <sup>[3]</sup>	AVR-Versuchsreaktor
thermische Leistung	46 MW
elektrische Leistung	13 MW
Mittlere Leistungsdichte	2,6MW/m <sup>3</sup>
Reaktorkern Höhe/Durchmesser	2,8m / 3m
Spaltstoff	U <sup>235</sup>
Höhe Reaktordruckbehälter	24,9m
Durchmesser Reaktordruckbehälter	5,8m
Material Reaktordruckbehälter	Stahl
Kühlmittel	He
Eintrittstemperatur	275 °C
Austrittstemperatur	950 °C
Druck	10,8 bar

Frischdampftemperatur  
r 505 °C

### Störfälle [Bearbeiten]

Am 13. Mai 1978<sup>[4]</sup> trat infolge eines länger unbemerkten Lecks im Überhitzer Teil des Dampferzeugers 27,5 t Wasser in den He-Primärkreislauf und damit in den Reaktorkern ein.<sup>[5]</sup> Obwohl dieser Störfall nur in die Kategorie C eingeordnet wurde, stellt er aufgrund der durch das Wasser im Kern eintretende nachteiligen Änderung des Reaktionskoeffizienten und der Gefahr einer chemischen Reaktion des Wassers mit dem Graphit des Kerns einen der kritischsten Störfälle für einen Hochtemperatur-Reaktor dar. Der Störfall blieb wahrscheinlich nur deshalb ohne schwere Folgen, da der Kern nur Temperaturen kleiner 500 °C aufwies. Trotzdem musste der Reaktor fast ein Jahr lang durch das Fahren mit verringerter Temperatur "getrocknet" werden, um die mit Spaltprodukten Sr, C, I und H<sub>2</sub> kontaminierten Wasserreste zu entfernen.<sup>[6]</sup> Infolge dieses Störfalles wurden bei nachfolgenden Designs von Hochtemperatur-Reaktoren Vorkehrungen getroffen, die eine Flutung des Kerns mit Sekundärkühlmittel verhindern sollen.

### Weblinks [Bearbeiten]

[Forschungszentrum Jülich](#)

[Informationen zum AVR Jülich](#)

[Infos zum Rückbau auf der Website der EWN](#)

### Einzelnachweise [Bearbeiten]

↑ [Broschüre Hochtemperaturreaktoren BBC/HRB Druckschrift Nr. D HRB 1033 87 D](#)

↑ [Sicherheitsrechtliche Neubewertung des AVR-Kugelhaufenreaktors \(Moomann, R. \(2008\): A safety re-evaluation of the AVR pebble bed reactor operation and its consequences for future HTR concepts. Berichte des Forschungszentrums Jülich JUEL-4275, Forschungszentrum Jülich \(Hrsg.\) \(PDF-Datei, englisch\)](#)

↑ [Broschüre Hochtemperaturreaktoren BBC/HRB Druckschrift Nr. D HRB 1033 87 D](#)

↑ [Zusammenfassender Bericht über Meldepflichtige Ereignisse 1977/1978, Bundesministeriums für Strahlensicherheit](#)

↑ [Bericht \*Safety-Related Experiences With The AVR Reactor\* K.J. Krüger, G.P. Irvens, Arbeitsgemeinschaft Versuchs-Reaktor G.m.b.H.](#)

↑ [Bericht \*AVR EXPERIMENTS RELATED TO FISSION PRODUCT TRANSPORT\*, Rainer Moomann, FZJ, Jülich](#)

---

[Museumsinsel](#)

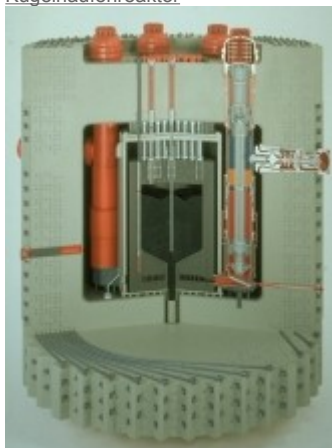
[Verkehrszentrum](#)

[Flugwerft](#)

Sammlungen

Himmel und Hölle

Kugelhaufenreaktor



Kugelhaufenreaktor

### Kugelhaufenreaktor

Modell, Maßstab 1:50

Rudolf Schulten, Kernforschungsanlage Jülich, 1965-1970

Schnitt durch den Tank des Kugelhaufenreaktors THTR. Etwa 670.000 Kugeln füllen die Brennkammer des Reaktors.

Inventarnummer 1994 – 273.000