

Hochtemperaturreaktor (Wikipedia 24. Jan 2015)	Korrigierende Kommentare
 <p>die gelben Markierungen zeigen Stellen, die eine abwertende Tendenz aufweisen, offensichtlich falsch sind oder auf falschen Angaben beruhen. Rechts daneben sind Korrekturen.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. von Jochen Michels aufgrund Info von Dr. U. Cleve und Dr. G. Dietrich - 22. Febr. 2015 2. Unten findet sich eine Zusammenfassung der Erfahrungen von Herrn Dr. U. Cleve, 24. Feb. 3. weitere sind angefragt
Moderatorkugel aus Graphit für Kugelhaufenreaktoren	
<p>Als Hochtemperaturreaktor (HTR) werden Kernreaktoren bezeichnet, die wesentlich höhere Arbeitstemperaturen ermöglichen als andere bekannte Reaktortypen. Erreicht wird dies durch die Verwendung eines gasförmigen Kühlmittels und keramischer statt metallischer Werkstoffe im Reaktorkern (Graphit als Moderator).</p>	
<p>Die Bezeichnung Hochtemperaturreaktor wird im Deutschen oft gleichbedeutend mit Kugelhaufenreaktor benutzt. Dieser ist jedoch nur eine von verschiedenen möglichen Bauformen des HTR (siehe unten).</p>	
<p>Verschiedene kleine Hochtemperaturreaktoren wurden zwar seit den 1960er Jahren als Versuchsreaktoren jahrelang betrieben, aber dieser Dauerbetrieb wird im Rückblick unter anderem wegen ungewöhnlich großer Entsorgungsprobleme kritisch gesehen. Zwei größere Prototypen mussten schon nach kurzer Betriebszeit aufgegeben werden. Insgesamt hat sich das Konzept bis heute wegen verschiedener Schwierigkeiten und Pannen sowie aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit nicht durchgesetzt.</p>	<p>Es gab im Wesentlichen den AVR in Jülich und den THTR in Hamm von den 60-ern bis 1988. Die Entsorgung ist im Vergleich zu allen bestehenden LWR wesentlich einfacher und kostet nur ein Bruchteil als bei allen. Siehe Details bei der Brennelemente-Technik.</p> <p>Zieht man die Subventionen und das gesamte End-To-End Verfahren mit ein, so ist die Wirtschaftlichkeit deutlich höher, unter anderem weil das GAU Risiko entfällt</p>
Inhaltsverzeichnis	
1 Zweck der höheren Temperatur	
2 Ausführung	
2.1 Kühlmittel	
2.2 Brennstoff, Moderator und Strukturmaterial	

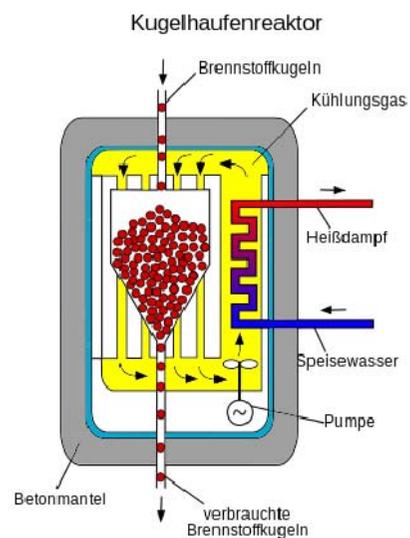
2.3 Leistungsdichte und Sicherheitseigenschaften	
2.4 Einsatz und Verbleib des abgebrannten Brennstoffs	
2.5 Proliferationsgefahr	
3 Versuchs- und Prototypanlagen in Europa, den USA und Asien	
4 Störfälle und Probleme	
5 Krebshäufigkeit in der Umgebung von HTR	
6 Entwicklung des Kugelhaufenkonzepts	
6.1 bis 1990	
6.2 ab 2000	
6.2.1 Südafrika	
6.2.2 USA	
6.2.3 China	
6.2.4 Polen	
6.2.5 Deutschland	
7 Militärische Anwendung	
8 Siehe auch	
9 Literatur	
10 Weblinks	
11 Einzelnachweise	
Zweck der höheren Temperatur	
Eine möglichst hohe <i>Kühlmittelaustrittstemperatur</i> (also die Temperatur , mit der das Kühlmittel den Reaktorkern verlässt) ist aus zwei Gründen erwünscht:	
Falls der Reaktor zur Stromerzeugung dient, macht eine höhere Kühlmittelaustrittstemperatur – wie bei jedem anderen Wärme kraftwerk – die Energiegewinnung wirtschaftlicher, da sie bei der Umwandlung der Wärmeleistung in mechanische Leistung einen höheren thermischen Wirkungsgrad ermöglicht. Allerdings gestattet der zum Turbinenantrieb übliche Wasser/Dampfkreislauf aufgrund von Materialeigenschaften keine höheren Temperaturen als ca. 550 °C, sodass ein Wirkungsgradgewinn nur bis hin zu Primärkühlmitteltemperaturen von ca. 650 bis	

<p>700 °C auftritt. Die Tabelle zeigt auch, dass der reale Wirkungsgrad nicht nur von der Kühlmitteltemperatur abhängt. Gasturbinen als Alternative für höhere Temperaturen werden zwar seit Jahrzehnten intensiv untersucht, konnten aber im nuklearen Umfeld nicht zur Anwendungsreife geführt werden. Gasturbinen hätten den zusätzlichen Vorteil, dass sie mit nachgeschalteten Dampfturbinen Wirkungsgrade von bis zu 60% erreichen könnten (siehe Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk).</p>																																	
<p>Reaktoren können nicht nur zur Stromerzeugung, sondern auch zur Lieferung von Prozesswärme genutzt werden. Besonders wertvoll ist Hochtemperaturwärme (> 1000 °C), deren Erzeugung mit Very High Temperature Reactors VHTR angedacht ist. Allerdings bedeutet die Kombination einer chemischen mit einer Nuklearanlage ein erhöhtes Sicherheitsrisiko.</p>																																	
<p>Maximale Kühlmitteltemperaturen^[1] und damit theoretisch erreichbarer Carnotwirkungsgrad (bei 25 °C Umgebungstemperatur) sowie real erreichte Wirkungsgrade</p> <table border="1" data-bbox="183 651 1518 979"> <thead> <tr> <th>Reaktortyp</th> <th>Temperatur in °C</th> <th>Carnot-Wirkungsgrad</th> <th>Realer Wirkungsgrad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Siedewasserreaktor</td> <td>285</td> <td>47 %</td> <td>34 %</td> </tr> <tr> <td>RBMK</td> <td>285</td> <td>47 %</td> <td>31 %</td> </tr> <tr> <td>CANDU-Reaktor</td> <td>300</td> <td>48 %</td> <td>31 %</td> </tr> <tr> <td>Druckwasserreaktor</td> <td>320</td> <td>50 %</td> <td>33 % (EPR: 37 %)</td> </tr> <tr> <td>Brutreaktor, natriumgekühlt</td> <td>550</td> <td>64 %</td> <td>39 %</td> </tr> <tr> <td>Advanced Gas-cooled Reactor</td> <td>650</td> <td>68 %</td> <td>42 %</td> </tr> <tr> <td>Hochtemperaturreaktor</td> <td>750</td> <td>71 %</td> <td>40 %</td> </tr> </tbody> </table> <p>Ausführung</p> <p>Kühlmittel</p>	Reaktortyp	Temperatur in °C	Carnot-Wirkungsgrad	Realer Wirkungsgrad	Siedewasserreaktor	285	47 %	34 %	RBMK	285	47 %	31 %	CANDU-Reaktor	300	48 %	31 %	Druckwasserreaktor	320	50 %	33 % (EPR : 37 %)	Brutreaktor , natriumgekühlt	550	64 %	39 %	Advanced Gas-cooled Reactor	650	68 %	42 %	Hochtemperaturreaktor	750	71 %	40 %	
Reaktortyp	Temperatur in °C	Carnot-Wirkungsgrad	Realer Wirkungsgrad																														
Siedewasserreaktor	285	47 %	34 %																														
RBMK	285	47 %	31 %																														
CANDU-Reaktor	300	48 %	31 %																														
Druckwasserreaktor	320	50 %	33 % (EPR : 37 %)																														
Brutreaktor , natriumgekühlt	550	64 %	39 %																														
Advanced Gas-cooled Reactor	650	68 %	42 %																														
Hochtemperaturreaktor	750	71 %	40 %																														
<p>Die bisher bekannt gewordenen HTR-Konstruktionen verwenden das Edelgas Helium. Die potentiellen Vorteile der durch Gaskühlung möglichen höheren Temperaturen werden in Abschnitt 1 diskutiert. Die Verwendung von Gas statt einer Flüssigkeit als Kühlmittel soll die mechanische Abnutzung und die Korrosion der umströmten Teile verringern. Bei Kugelhaufen-HTR kommt es durch Abrieb jedoch zu so hohem Abtrag und Staubbildung, dass dieser theoretische Vorteil nicht ins Gewicht fällt.</p>	<p>Die Praxis hat genau das Gegenteil gezeigt: Abrieb verbleibt, sofern vorhanden, im ersten Kreislauf und wird dort entsorgt. Für Staub gilt das Gleiche.</p>																																
<p>Helium bietet im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid (CO₂), das in anderen gasgekühlten Reaktoren verwendet wird, die zusätzlichen Vorteile, dass es nicht chemisch verändert</p>																																	

<p>oder zersetzt werden kann und das Hauptisotop ^4He durch Neutronenbestrahlung nicht aktiviert wird. Allerdings entsteht aus dem kleinen ^3He-Anteil von 0,00014 % fast quantitativ Tritium. Außerdem werden in reinem Helium die Oxid-Schutzschichten auf Metallen zerstört. Geringe Mengen an Korrosionsmittel wie Wasserdampf im Helium können dies zwar beheben, aber nur auf Kosten einer ständigen Korrosion der Graphitkomponenten durch den Wasserdampf. Versuche, diesem Problem durch Einsatz korrosionsbeständiger keramischer Werkstoffe (z. B. Siliciumcarbid) zu begegnen, verliefen bisher selbst im Labormaßstab erfolglos. Helium diffundiert als einatomiges Gas sehr leicht durch feste Materialien, so dass eine Dichtigkeit gegen Helium schwer erreichbar ist. Der AVR-Reaktor (siehe unten) verlor 1 % seines Kühlmittels pro Tag, für neuere Reaktoren rechnet man mit 0,3 % pro Tag.</p>	<p>Die Graphit-Auskleidung des Core war nach 22 Jahren Betrieb ohne jede Veränderung. Die beschichteten BE und auch die CP darin hielten jedem Korrosionsmittel stand. Es fand keine Korrosion statt.</p> <p>Die Leitungen und Armaturen bei beiden HTR wurden durch neue Entwicklungen während der Test- und Betriebsphasen heliumdicht entwickelt. Verluste traten nur vernachlässigbar auf.</p>
<p>Ein weiterer Nachteil von Helium liegt darin, dass seine Viskosität mit steigender Temperatur zunimmt. Das kann dazu führen, dass heiße Bereiche weniger durchströmt und damit schlechter gekühlt werden. Dieser Effekt wurde als eine mögliche Ursache für die im AVR (Jülich) gefundenen überhitzten Bereiche diskutiert.</p>	
<p>Heliumkühlung in Verbindung mit einem keramischen Core erhöht das Risiko von Kühlgasbypässen, da die verwendeten keramischen Komponenten – anders als Metalle – keine Helium-dichte Umschließung garantieren können und da ein Kugelhaufen einen hohen Strömungswiderstand aufweist. Solche Bypässe um das Core wurden ebenfalls als eine Ursache der überhitzten AVR-Bereiche diskutiert.</p>	<p>Die Graphit-Auskleidung (nicht Keramik) hielt allen Beanspruchungen stand. Überhitzung wurde diskutiert, trat aber nicht auf.</p>
<p>Heliumkühlung erfordert – wie jede Gaskühlung – hohe Systemdrücke für eine ausreichende Wärmeabfuhr. Damit werden Druckentlastungsstörfälle durch Lecks im Primärkreislauf zu einem deutlichen Risiko in aktuellen Kugelhaufenreaktorkonzepten, die alle kein Volldruckcontainment als zusätzliche Barriere enthalten. Um diesem Risiko zu entgehen, wurde als Alternative zu Helium eine Flüssigsalzkuhlung vorgeschlagen, die einen drucklosen Betrieb ermöglicht.^[2] Entsprechende Untersuchungen zum <i>Fluoride Cooled High Temperature Reactor</i> (FHR) laufen im Rahmen des Generation IV Entwicklungsprogramms des Generation IV International Forum.^[3]</p>	<p>Das Risiko war schon frühzeitig erkannt und wurde technisch und baulich abgesichert.</p> <p>Für künftige HTR wird das Beton-Containment eingesetzt, das erwiesenermassen ausreichend dicht ist.</p> <p>Zu weiteren Konzepten wird hier nichts gesagt, da wir uns auf die praktisch getesteten Techniken konzentrieren.</p>
<p>Brennstoff, Moderator und Strukturmaterial</p> <p>Der Kernbrennstoff wird in Form von <i>coated particles</i> (siehe Pac-Kügelchen) verwendet, deren Pyrokohlenstoff- und (bei späteren Varianten) Siliciumcarbid-Hüllen den Austritt von Spaltprodukten verhindern sollen. Damit werden die sonst üblichen Brennstabhüllen</p>	

<p>ersetzt. Zudem soll durch entsprechendes Hüllmaterial die Gefahr der Korrosion verringert werden. Der Durchmesser eines coated particles liegt bei etwas weniger als 1 mm. Die Dicke der Hüllschichten liegt bei < 0.1 mm, was im Dauerbetrieb schon bei Temperaturen um 800°C Spaltproduktfreisetzung durch Diffusion zu einem Problem werden lässt. Die Kügelchen werden mit weiterem Graphit, also reinem Kohlenstoff, als Strukturmaterial und Moderator umhüllt: Zur Brennelementherstellung werden die Brennstoffkügelchen in eine Masse aus Graphitpulver und Kunstharz eingebracht. Diese wird dann in der gewünschten Form des Brennelements durch Druck verfestigt und das Harz bei hoher Temperatur unter Luftabschluss ebenfalls in koksähnlichen Kohlenstoff umgewandelt. Graphit ist porös (20 %) und leistet daher nur einen geringen Beitrag zur Rückhaltung der Spaltprodukte.</p>	<p>Tatsache ist aber, dass die CP und auch die BE genügend gasdicht sind, um keine ernsthaften Ableitungen zu erlauben.</p>
<p>Zwei verschiedene geometrische Formen der Brennelemente sind erprobt worden:</p>	
<p>in Großbritannien, Japan und USA prismatische Blöcke,</p>	
<p>in Deutschland tennisballgroße Kugeln, die im Reaktorbehälter eine lose Schüttung bilden (Kugelhaufenreaktor).</p>	
<p>Ein kugelförmiges Brennelement von 6 cm Durchmesser enthält, abhängig von der Auslegung, zwischen 10.000 und 30.000 coated particles.</p>	
<p>Mit derartigen Brennelementen sind theoretisch höhere Abbrände als bei Standard-Leichtwasserreaktoren erreichbar.^[4] Der Wegfall der metallischen Hüllrohre verbessert die Neutronenbilanz im Reaktor, denn die Neutronenabsorption im Graphit ist geringer als in den Hüllrohrwerkstoffen.^[4] Allerdings sind die bisher verwendeten Kugel-Brennelemente aus materialtechnischen Gründen (Dichtigkeit für Spaltprodukte) für hohe Abbrände nicht geeignet. Die real erreichbaren und aktuell (z. B. im Chinesischen HTR-PM^[5]) angestrebten Abbrände liegen mit ca. 100 % FFA kaum über denjenigen von konventionellen Leichtwasserreaktoren, sodass sich auch keine bessere Brennstoffnutzung ergibt. Zudem konnte der HTR nicht als thermischer Thorium-Brüter realisiert werden, wie es ursprünglich geplant war,^{[6][7]} d. h., er erbrütete weniger Spaltstoff als er verbrauchte, während ein thermischer Brüter mit dem speziell dafür ausgelegten Leichtwasserreaktor Shippingport gelang. Mit einem aktuell erreichbaren Brutverhältnis von nur < 0,5 ist die für Kugelhaufenreaktoren verwendete Bezeichnung als Nahebrüter oder Hochkonverter daher kaum gerechtfertigt.</p>	<p>Die BE haben schon jetzt in Hamm sehr gute Abbrände erreicht, die natürlich ständig verbessert werden.</p> <p>Auch das Brutverhalten wird weiter optimiert. Da es sich um FOAK handelt, wäre es billig, hier schon ausgereifte Verhältnisse zu fordern</p>
<p>In allen Prototyp-HTR enthielten die überwiegende Zahl der Brennstoffkügelchen hochangereichertes, also waffenfähiges Uran und natürliches Thorium im Verhältnis 1:5 bis 1:10. Aus dem Thorium wird durch Neutroneneinfang und anschließende Betazerfälle ²³³U erbrütet. Das ²³³U wird teilweise zusätzlich zum ²³⁵U gespalten und so</p>	<p>Entgegen dieser Behauptung war das Verhältnis 93 % = 0,95976 g ²³⁵Uran, 7% = 0,07224 g ²³⁸Uran = insges. 1,032 g Uran</p>

<p>direkt zur Energiegewinnung mit ausgenutzt; das entspricht dem Erbrüten und der Verbrennung des Plutoniums bei Verwendung von ^{238}U als Brutmaterial im Standardbrennstoff.</p>	<p>zu 10,20000 g ^{232}Th in jedem CP.</p> <p>Auch wenn dabei kleine Mengen waffenfähiges U sind, so sind die Mengen insgesamt derart gering, dass sie weder für Regierungen noch für Terroristen interessant und schon gar nicht wirtschaftlich sind.</p>
$^{232}_{90}\text{Th} + \frac{1}{0}\text{n} \longrightarrow ^{232}_{90}\text{Th} \xrightarrow[22,2 \text{ min}]{\beta^-} ^{232}_{91}\text{Pa} \xrightarrow[26,97 \text{ d}]{\beta^-} ^{232}_{92}\text{U}$	
<p>Nachdem die US-Regierung 1977 die Ausfuhr von waffenfähigem Uran für HTR verboten hatte, wurde die Entwicklung vom Uran/Thorium- auf den klassischen niedrig angereicherten Uranbrennstoff (LEU, Anreicherung ca. 10 %) umgestellt. Letzterer ist auch bei derzeit aktuellen HTR als Referenzbrennstoff vorgesehen. Derzeit wird Thorium international zwar wieder stärker als Brutstoff diskutiert; allerdings sind Kugelhaufenreaktoren dabei kaum noch involviert, da eine effiziente Thoriumnutzung sowohl einen Brutreaktor als auch eine Wiederaufarbeitung erfordert. Beides ist bei Kugelhaufenreaktoren faktisch nicht zu gewährleisten. Aktuell wird daher insbesondere der Flüssigsalzreaktor zur Thoriumnutzung genannt. Insgesamt erwies sich die Thoriumnutzung bei Kugelhaufenreaktoren also als Sackgasse.</p>	<p>Thorium ist damals und in Zukunft der optimale Brennstoff für den Kugelbett-Reaktor, weil auch die Nutzung und bei großen Mengen die Wiederaufarbeitung wirtschaftlich ist. Es ist allgemein bekannt, dass FOAK noch nicht die optimierten Verhältnisse erlauben, wie Masseneinsatz.</p>



Schema eines Kugelhaufenreaktors

Die Kugel-Brennelemente können während des laufenden Betriebes von oben nachgefüllt und unten entnommen werden. Ist der Brennstoff noch unverbraucht, werden die Brennelemente oben wieder zugegeben, andernfalls aus dem Reaktor ausgeschleust. Der Kugelhaufenreaktor hat dadurch den Sicherheitsvorteil, dass er nicht wie andere Reaktoren mit einem größeren Brennstoffvorrat für z. B. ein ganzes Betriebsjahr beladen werden muss. Wird diese Möglichkeit ausgenutzt, müssen allerdings Zufuhr und Entnahme der Brennelemente ständig funktionieren, damit der Reaktor nicht unterkritisch wird. Ein Nachteil liegt darin, dass Reaktoren mit einer solchen Betriebsweise (ähnlich auch CANDU und RBMK) grundsätzlich zur Erzeugung von waffengeeignetem Plutonium oder ^{233}U zugleich mit der Stromerzeugung genutzt werden können (siehe unten, Proliferationsgefahr). Ein weiterer wesentlicher Nachteil liegt darin, dass sich bei einem ständig bewegten Reaktorkern mit Brennelementen von unterschiedlichem Abbrand Unsicherheiten hinsichtlich der Brennstoffverteilung ergeben.

Im Betrieb der bisherigen Kugelhaufenreaktoren haben sich dieses „Kugelfließen“ und die Kugelentnahme als Schwachstellen herausgestellt. Über der Entnahmestelle bildeten sich häufig stabile, gewölbeartige Kugelpackungen, die das Fließen der Schüttung

„grundsätzliche“ Eignung besagt noch nichts, denn die Mengen sind so gering, dass eine waffentaugliche Anreicherung ausserhalb jeder Realität liegt

Zwar traten solche Ereignisse auf, wurden aber –wie

<p>verhinderten und so die planmäßige Entnahme unmöglich machten. Außerdem fließen die Kugeln sehr ungleichmäßig^[8], was zu zusätzlichen Störungen in der Kernbrennstoffverteilung führt.</p>	<p>bei FOK üblich – dann technisch beherrscht, erst recht bei dem nächsten zu errichtenden NHTR (Cleve, Kugeler)</p>
<p>Derzeitige Kugel-Brennelemente erlauben, wie Auswertungen von AVR-Erfahrungen^[9] sowie Nachuntersuchungen von bestrahlten modernen Brennelementen^[10] 2008–2010 ergeben haben, nur Nutztemperaturen von unter 750 °C, da sonst zu viele radioaktive metallische Spaltprodukte aus den Brennelementen freigesetzt werden. Ursache dieser Freisetzung ist Diffusion durch die nur weniger als 0,1 mm dicken Hüllschichten um den Kernbrennstoff. Damit sind die bisher anvisierten innovativen Prozesswärmeanwendungen wie Kohlevergasung zur Treibstoffherzeugung oder Wasserstoffherzeugung durch chemische Wasserspaltung außerhalb der aktuellen Möglichkeiten von Kugelhaufenreaktoren, da sie Nutztemperaturen von ca. 1000 °C erfordern. Gleiches gilt für Stromerzeugung mit Helium-Gasturbinen, die nur bei Temperaturen > 850 °C Wirkungsgradvorteile bietet. Wichtige Alleinstellungsmerkmale der Kugelhaufentechnologie sind damit in Frage gestellt, und der VHTR (Very High Temperature Reactor), der im Rahmen des Generation-IV Nuklearverbands entwickelt werden sollte, ist in weitere Ferne gerückt. Ob Prozesswärmeanwendungen bei niedrigen Temperaturen (wie z. B. Prozessdampfnutzung zur Ausbeutung von Ölschiefern) mit Kugelhaufenreaktoren wirtschaftlich sein können, ist noch unklar.</p>	<p>Kugel-BE wurden und werden ständig weiter optimiert. Aber schon damals verblieben die Ausgasungen im ersten Kreislauf. Dieser wird bei dem 2-Kreis-System des NHTR mit keinem anderen Material in Berührung kommen und stellt daher keine Gefahr dar. Höhere Temperaturen bis 1.200 und darüber sind daher realistisch</p>
<p>Leistungsdichte und Sicherheitseigenschaften</p>	
<p>Die beim HTR, wie bei allen Graphitreaktoren, niedrige Leistungsdichte im Kern (max. etwa 6 MW/m³ gegenüber 100 MW/m³ bei Druckwasserreaktoren) beeinflusst dessen Sicherheitseigenschaften sowohl negativ als auch positiv. Die niedrige Leistungsdichte ist wegen der schlechteren Moderationseigenschaften von Graphit gegenüber Wasser nicht zu umgehen, denn es werden größere Moderatorportionen benötigt. Der Vorteil von Leichtwasserreaktoren, in denen Wasser zugleich Kühlmittel und Moderator darstellt, kann nicht genutzt werden, was die Leistungsdichte weiter vermindert. Dies bedeutet einerseits, dass der HTR-Kern und der gesamte Reaktor für eine vorgegebene Reaktorleistung viel größer sind als ein vergleichbarer Reaktor anderen Typs und damit die Bau- und die Entsorgungskosten entsprechend höher liegen. Um den hohen Kosten zu begegnen, wird auf wichtige Sicherheitseinrichtungen verzichtet: So fehlt in aktuellen HTR-Konzepten ein druckhaltendes Containment, wie es in herkömmlichen Reaktoren standardmäßig vorhanden ist. Andererseits liegt in der geringen Leistungsdichte ein Sicherheitsvorteil: Die Wärmekapazität der großen Graphitmasse zusammen mit der Temperaturbeständigkeit von Graphit bewirkt, dass ein kleiner HTR sich bei</p>	<p>Die niedere Leistungsdichte ist nur in enger technischer Betrachtung negativ. Nimmt man den größeren Zusammenhang, insbesondere Sicherheit und damit Baukosten etc. so sind die Vorteile derart überwiegend, dass Negative unbeachtlich sind.</p> <p>Das Beton-Containment ist druckhaltend</p>

<p>Kühlungsverluststörfällen und einigen Typen von Reaktivitätsstörfällen („Leistungsexkursionen“) unempfindlich verhält.^[14] Ein zu schneller Reaktivitätsanstieg hätte aber auch beim HTR gravierende Folgen wie etwa ein Platzen der Brennelemente eventuell sogar gefolgt von einem Behälterbersten.</p>	<p>Ist zwar richtig, aber genau das kommt eben nicht vor („Ein Auto würde bei 1.000 kmh mit Sicherheit explodieren, kommt aber nicht vor“).</p>
<p>Von Seiten der Kugelhaufen-HTR-Befürworter wird wegen der vorgenannten positiven Sicherheitseigenschaften bei Kernkühlungsstörfällen und einigen Reaktivitätsstörfällen häufig angeführt, dass kleine Kugelhaufenreaktoren sich <i>inhärent sicher</i> und sogar <i>katastrophenfrei</i> konstruieren lassen.^{[11][12]} Dieser Anspruch ist selbst bei den Befürwortern der Nukleartechnologienutzung umstritten: Häufiges Gegenargument ist, dass ein Kugelhaufen-HTR zwar keine Kernschmelze kennt, aber dafür andere sehr schwere Störfälle vorkommen können, die es wiederum in Leichtwasserreaktoren nicht gibt.^[13] Unfallrisiken bestehen insbesondere durch Luft- und Wassereintritte (siehe Störfall im AVR Jülich). Ein bei Luftzutritt denkbarer Brand der großen Graphitmenge ähnlich wie bei der Katastrophe von Tschernobyl könnte zur weiträumigen Verteilung gefährlicher Radioaktivitätsmengen führen. Wassereintritte können unter Umständen zur prompten Überkritikalität führen, ähnlich wie ein positiver Kühlmittelverlustkoeffizient in Reaktoren mit flüssigem Kühlmittel, oder zu chemischen Explosionen.^{[14][9]} Prompte Überkritikalität beim Wassereintritt im Kugelhaufenreaktor wurde nach dem Tschernobyl-Unfall verstärkt untersucht, da es Ähnlichkeiten von RBMK-Reaktor einerseits und Kugelhaufenreaktor bei Wassereintritt andererseits gibt.^{[15][16][17]} Die Ergebnisse zeigen, dass es oberhalb eines Wassergehaltes von 50 kg/m³ im Leervolumen des Reaktorkerns zu einem positiven Temperaturkoeffizienten kommt. Solche Wasserdichten sind bei Kugelhaufenreaktoren nur mit flüssigem Wasser im Kern möglich. Weiterhin reicht die dabei mögliche Reaktivitätszunahme tief in den prompt überkritischen Bereich hinein (k_{eff} bis 1,04), sodass eine nukleare Leistungsexkursion eintreten kann. Die Dopplerverbreiterung würde zwar die nukleare Leistungsexkursion bremsen, aber ein vor Zerstörung des Reaktors wirksamer Effekt wäre in vielen Fällen nicht zu erwarten: Unter ungünstigen Bedingungen würde nämlich erst ein Temperaturanstieg im Brennstoff um ca. 2500 °C die Leistungsexkursion stoppen.^[15] Dabei spielt eine Rolle, dass in Gegenwart von Wasser das Neutronenspektrum weicher wird, was die bremsende Wirkung der Dopplerverbreiterung vermindert. Ein Sicherheitsgutachten von 1988 spricht daher vom <i>Chernobyl-Syndrom</i> des Kugelhaufenreaktors.^[16] Zur Wahrscheinlichkeit solcher Unfallszenarien gilt einerseits, dass Feuchtedetektion im Helium vom Reaktorschutzsystem mit Schnellabschaltung</p>	<p>Störfälle sind nach INES genormt und bei keinem HTR jemals aufgetreten.</p> <p>Solche „anderen“ Störfälle sind bisher weder vorgekommen noch realistisch simuliert worden.</p> <p>Der AVR-Expertenbericht hat im Frühjahr 2014 gezeigt, dass dieses Szenario ebenso unrealistisch ist wie anderen „Als-Ob-Behauptungen“. Die Sicherheit der CP, BE und der Bauweise schaffen eine 5 bis 6 fache Sicherheits-Schicht, die allen denkbaren Einflüssen widersteht.</p> <p>???</p> <p>Auch diese Szenarien sind im AVR-Bericht und anderen Untersuchungen ad absurdum geführt worden. Praktische Versuche mit künstlichen GAU-Provokationen haben dies erwiesen.</p>

beantwortet wird. Andererseits hat es 1978 beim Jülicher Kugelhaufenreaktor AVR durch menschliches Versagen (ungenehmigte Manipulation am Reaktorschutzsystem, um den Reaktor trotz Feuchte in Betrieb nehmen zu können) für ca. drei Tage einen nuklearen Betrieb gegeben, während flüssiges Wasser in den Reaktor strömte. ^[16] Ein anderes untersuchtes Störfallszenario mit dem Potential einer prompten Überkritikalität betrifft das Anfahren des Reaktors mit Brennelementen, die störfallbedingt mit Wasser vollgesogen sind.	
Als grundsätzliche Sicherheitsprobleme von Kugelhaufenreaktoren nennt Moormann (s. auch hier) unter anderem: ^[9]	
Die nicht mögliche Online-Kerninstrumentierung (<i>black box</i> -Charakter der Reaktorkerns)	
Die unzureichende Rückhaltung von radioaktivem Cäsium und Silber durch die dünne Siliciumcarbidschicht der Brennstoffpartikel	
Die unzureichende Effizienz der Gasreinigungsmaßnahmen, die zu hohen Kontaminationen der Kühlkreislaufoberflächen führt	
Die starke Bildung von radioaktivem Staub	Kommt nicht vor, siehe oben
Die hohe Reaktionsfähigkeit des Graphits gegenüber Luft und Wasserdampf	
Potentielle Überkritikalität bei Wassereinbruchstörfällen	
Das nicht hinreichend verstandene Kugelfließverhalten im Betrieb, das zu Unsicherheiten bei der Spaltstoffverteilung führt	
Das aus Kostengründen fehlende druckhaltende Containment	
Die unvorteilhaft großen Volumina an radioaktivem Abfall	
Moormann hält die Charakterisierung des Kugelhaufenreaktors als <i>katastrophenfrei</i> und <i>inhärent sicher</i> für wissenschaftlich unredlich, unter anderem da die oben dargestellten Risiken durch Wasser- und Lufteinbrüche dabei außer Acht gelassen werden. Auch von anderen deutschen Nuklearwissenschaftlern wurden Zweifel am Sicherheitskonzept der Kugelhaufenreaktoren artikuliert. ^[18] Ebenso wird das Konzept der angeblichen inhärenten Sicherheit und Katastrophenfreiheit von weiten Teilen der Nuklearcommunity als nicht zielführend angesehen. ^[19] Lothar Hahn äußerte schon 1986 zur angeblichen inhärenten Sicherheit des HTR: <i>Diese geschickt eingefädelte Werbestrategie hat ohne Zweifel einen gewissen Erfolg gehabt, denn sie hat zu einer – selbst in der Atomenergiedebatte – beispiellosen Desinformation geführt. Wie kaum eine andere Behauptung der Atomindustrie beruht sie auf wissenschaftlich nicht haltbaren Annahmen und auf unzutreffenden Schlussfolgerungen.</i> ^[20]	
Einsatz und Verbleib des abgebrannten Brennstoffs	

<p>Die einzelnen Schritte zur Behandlung des eigentlichen Brennstoffs hängen vom Anreicherungsgrad des verwendeten Urans ab, der zwischen 10 % und 93 % des Isotops 235 liegen kann. Bei dem heute favorisierten LEU-Brennstoff (10 % Anreicherung) entspräche die Wiederaufarbeitung weitgehend der von LWR-Brennelementen.</p>	
<p>Eine Wiederaufarbeitung von HTR-Brennelementen würde als ersten Schritt die Verbrennung des Graphits erfordern, wobei das gesamte entstehende radioaktive CO₂ aufgefangen, als CaCO₃ verfestigt und endgelagert werden müsste. Pro Brennelement von ca. 200 g Masse (davon ca. 7 bis 11 g Kernbrennstoff) würden allein aus dem Graphitanteil mehr als 1,1 kg endzulagerndes CaCO₃ mit einem hohen Anteil an langlebigem ¹⁴C entstehen.^[21] Ein solches Verbrennungsverfahren wurde zwar entwickelt^[22], wegen der hohen Kosten aber nie angewandt.</p>	
<p>Eine Wiederaufarbeitung von HTR-Brennelementen gilt bisher insgesamt als unwirtschaftlich und derzeit wird daher die direkte Endlagerung des Atommülls favorisiert. Da die überwiegend aus Graphitmoderator bestehenden Brennelemente dann als Ganzes endgelagert würden, fällt jedoch mehr als das Zwanzigfache des Volumens an hochradioaktivem Abfall verglichen mit konventionellen Reaktoren an, was die Endlagerkosten im Vergleich zu konventionellen Reaktoren erheblich erhöht.</p>	
<p>Proliferationsgefahr</p>	
<p>Speziell beim Kugelhaufenreaktor kann durch geringe Verweildauer des einzelnen Brennelements erreicht werden, dass relativ reines Plutonium-239 oder (bei Verwendung von Thorium als Brutstoff) Uran-233, also für Kernwaffen geeignetes Spaltmaterial entsteht. Somit kann dieser Reaktortyp ähnlich den CANDU- und RBMK-Reaktoren ein Proliferationsrisiko darstellen.^[23] D.A. Powers, Mitglied des US-Aufsichtsgremiums ACRS für Proliferationsfragen, kam 2001 zu dem Schluss, dass „Kugelhaufenreaktoren nicht proliferationsresistent sind“ und als „maßgeschneidert zur leichten Herstellung von Waffenplutonium“ anzusehen sind.^[24]</p>	<p>Das Prolif.-Risiko wurde schon von Prof Schulden in eindeutiger Weise widerlegt. Auch die hier behaupteten Szenarien übersehen, dass schon die Mengenverhältnisse keine attraktive Plutoniumquelle für Terroristen und Regierungen darstellen.</p> <p>Auf jeden Fall sind alle heutigen Reaktoren deutlich geeigneter für Proliferation, wenn sie denn durch die Berichts- und Kontrollverfahren überhaupt möglich wären</p>
<p>Der bei Thoriumverwendung in HTR erforderliche Einsatz von hochangereichertem Uran resultiert ebenfalls in größeren Proliferationsrisiken: So stellen die in Ahaus befindlichen, nur teilweise abgebrannten ca. 600.000 Brennelementkugeln des nach kurzem Betrieb stillgelegten THTR-300 vermutlich ein deutliches Proliferationsrisiko dar, weil sie noch einen hohen Anteil an waffenfähigem Uran enthalten.</p>	<p>Ein Besuch in Ahaus wird jedem – selbst Laien – absoltu klar machen, dass von dort keinerlei Prolif.-Gefahr ausgeht. Die Massnahmen dort grenzen schon teils an unsinnigen Sicherheitswahn (manche Mauern, ständig kreisende Wachautos usw.)</p>

Versuchs- und Prototypanlagen in Europa, den USA und Asien	
	
Hochtemperaturreaktor AVR im Forschungszentrum Jülich 2009 mit Materialschleuse zum Rückbau	
In den 1960er Jahren ging der Versuchs-HTR DRAGON in Winfrith, Großbritannien, in Betrieb. Er hatte prismatische Brennelemente und 20 MW Wärmeleistung.	
Es folgten vier HTR-Prototypkraftwerke:	
Kernkraftwerk Peach Bottom in USA (prismatische Brennelemente, elektrische Leistung 42 MW),	
AVR in Jülich, Deutschland (Kugelbrennelemente, elektrische Leistung 15 MW)	
und in den 1970er Jahren	
Kernkraftwerk Fort St. Vrain in Colorado, USA (prismatische Brennelemente, elektrische Leistung 342 MW)	
Kernkraftwerk THTR-300 in Deutschland (Kugelbrennelemente, elektrische Leistung 300 MW).	
Die vorgenannten Anlagen wurden schon zwischen 1974 und 1989 wieder stillgelegt. Danach gab es nur noch kleine Versuchsanlagen: In Japan ist seit 1999 der HTTR (thermische Leistung 30 MW) mit prismatischen Brennelementen im Testbetrieb. In China wurde der HTR-10 (thermische Leistung 10 MW) mit Kugelhaufencore 2003 kritisch.	
Eine Rückschau auf den Versuchsbetrieb des AVR aus Sicht der Befürworter legte der Verein Deutscher Ingenieure VDI im Jahre 1990 vor. ^[25]	
Störfälle und Probleme	
→ Hauptartikel: AVR (Jülich)	
Beim AVR in Jülich kam es am 13. Mai 1978 ^[26] zu einem gefährlichen Störfall: infolge	Wie gesagt: Störfälle hat es nie gegeben, auch keine

<p>eines länger unbeachteten Lecks im Überhitzerteil des Dampferzeugers traten 27,5 t Wasser in den He-Primärkreislauf und damit in den Reaktorkern ein.^[27] Dies ist einer der gefährlichsten Störfälle für einen Hochtemperaturreaktor: Wegen des positiven Reaktivitätseffektes des Wassers (Möglichkeit einer prompten Überkritikalität des Reaktors) und der möglichen chemischen Reaktion des Wassers mit dem Graphit können explosionsfähige Gase entstehen. Der Störfall blieb wahrscheinlich nur deshalb ohne schwere Folgen, weil der Kern nur Temperaturen unter 900 °C aufwies und weil das Leck klein blieb.</p>	<p>gefährlichen Ereignisse, lediglich meldepflichtige Ereignisse sind vorgekommen, wie bei jedem technischen Bauwerk.</p>
<p>Im Jahr 1999 wurde entdeckt, dass der AVR-Bodenreflektor, auf dem der Kugelhaufen ruht, im Betrieb zerbrochen war und dass sich einige hundert Brennelemente im entstandenen Riss verklemmt haben bzw. hindurchgefallen sind.^[28] Die Brennelemente konnten größtenteils nicht entfernt werden.</p>	<p>Schäden dort und in der Umwelt wurden nicht festgestellt</p>
<p>2008 erschien ein Bericht von Rainer Moormann, Mitarbeiter im Forschungszentrum Jülich, in dem die übermäßige radioaktive Kontamination des Reaktors auf die bei diesem Reaktortyp prinzipiell unzureichende Überwachung des Reaktorkerns sowie einen länger andauernden Betrieb bei unzulässig hohen Temperaturen zurückgeführt wird. Dies habe u. a. dazu geführt, dass Spaltprodukte aus den Graphitkugeln austreten konnten. Moormann stellt die Frage, ob das Kugelhaufenprinzip überhaupt verantwortlich ist: Er sieht grundsätzliche Probleme von Kugelhaufenreaktoren, nicht nur ein AVR-Problem (s. auch Leistungsdichte und Sicherheitseigenschaften).^{[29][30][9][31]} Für seine gegen erheblichen Widerstand der Kugelhaufenbefürworter vorgenommenen Enthüllungen erhielt Moormann den Whistleblowerpreis 2011. Moormanns Veröffentlichungen haben zu dem ab 2010 zu verzeichnenden Niedergang in den internationalen Bemühungen um die Entwicklung von Kugelhaufenreaktoren, die es seit 2000 verstärkt gegeben hatte, beigetragen.</p>	<p>Die verleihende Gesellschaft hat sich mit dieser Vergabe eher keinen Dienst getann. Sie hat sich von Panikmache blenden lassen und um der Publizität willen prämiert, was „Schnee von gestern“ war</p>
<p>Der ehemalige leitende Mitarbeiter des damaligen Bau-Konsortiums Urban Cleve, der heute der umstrittenen LaRouche-Bewegung nahesteht^[32], verweist hingegen auf den ursprünglichen AVR-Sicherheitsbericht, der diese Störfälle seiner Aussage nach bereits mit betrachtete und verneint daher jegliche Gefährdung bei den früheren deutschen Reaktoren.^[33] Cleve sieht allerdings die derzeitigen Konzepte von Kugelhaufenreaktoren, wie sie in Südafrika und China entwickelt wurden, ähnlich wie Moormann als wenig erfolgversprechend an.^[34] Während die Kritik von Rainer Moormann aus der deutschen Kugelhaufencommunity als Äußerungen eines „Demagogen, der den sichersten Reaktor der Welt in den Schmutz gezogen hat“ bezeichnet wurden^[35], sehen einzelne HTR-Unterstützer, wie etwa die amerikanische LaRouche-Bewegung, auch positive Aspekte</p>	

<p>mit der Begründung, dass alle Erkenntnisse zum Versuchskernkraftwerk AVR zukünftig zu einer besseren Konzeption des Hochtemperaturreaktors führen könnten.^[36]</p>	
<p>Der Bericht einer unabhängigen Expertengruppe zum AVR bestätigte 2014 die Einschätzungen von Moormann.</p>	<p>Am. 10. Juni in Jülich wurden bei dieser Vorstellung des Berichtes einige Moormann Feststellungen bestätigt, die Folgerungen daraus jedoch allesamt verworfen.</p>
<p>Krebshäufigkeit in der Umgebung von HTR</p>	
<p>Ein signifikantes Leukämiecluster um den AVR Jülich gab es ca. 1990. Die Häufigkeit von Schilddrüsenkrebs um den THTR-300 ist bei Frauen um ca. 64 % erhöht. In beiden Fällen ist strittig, ob die Ursache in radioaktiven Emissionen aus den HTR besteht.</p>	
<p>Entwicklung des Kugelhaufenkonzepts</p>	
<p>bis 1990</p>	
	
<p>Rudolf Schulten</p>	
<p>Die ersten grundlegenden Arbeiten und Patente zu Kugelhaufenreaktoren gehen auf den US-Wissenschaftler Farrington Daniels aus den 1940er Jahren zurück.^{[37][38]} Er initiierte zu dem damals auch <i>Daniels pile</i> genannten Kugelhaufenreaktor Forschungsarbeiten im Oak Ridge National Laboratory, die jedoch von Alvin Weinberg bald zugunsten der als aussichtsreicher eingeschätzten Leichtwasserreaktoren und Flüssigsalzreaktoren beendet wurden.^[13] In Australien wurde bis 1970 ebenfalls an Kugelhaufenreaktoren gearbeitet. Auf die Priorität von Daniels als Erfinder von Kugelhaufenreaktoren wird in Deutschland bisher kaum hingewiesen, vielmehr wird der Kugelhaufenreaktor fälschlicherweise überwiegend als Erfindung von Rudolf Schulten und als einziges allein in Deutschland entwickeltes Reaktorkonzept angesehen.</p>	
<p>Entwicklungsarbeiten zum Kugelhaufenkonzept stammen von Rudolf Schulten und Mitarbeitern: Ab 1956 wurde von der Kraftwerksindustrie unter Schultens Leitung der</p>	

<p>AVR geplant und gebaut. Ab 1964 beschäftigte sich auch das Forschungszentrum Jülich, nachdem Schulten dort Institutsleiter geworden war, mit dem Kugelhaufenreaktor, der hier bis 1989 das zentrale Forschungsgebiet blieb. Erste Jülicher Planungen sahen Kugelhaufenreaktoren gekoppelt mit einer Magnetohydrodynamischen Stromerzeugung (MHD) vor. Dazu wurde in Jülich das Großexperiment ARGAS aufgebaut. Da MHD-Anlagen Heliumtemperaturen von mehr als 1500 °C voraussetzen, die bei weitem nicht bereitgestellt werden konnten, verlief diese Entwicklungslinie im Sande.</p>	
<p>Einen ersten schweren Rückschlag erlitt das deutsche HTR-Projekt schon 1971, als sich die Firma Krupp, die zusammen mit BBC und NUKEM die industrielle Basis für HTR bildete, wegen ernster Zweifel am Kugelhaufenkonzept fünf Tage vor dem geplanten ersten Spatenstich für den THTR-300 vollständig aus der HTR-Technologieentwicklung zurückzog. Einen weiteren Rückschlag auch für Kugelhaufenreaktoren bedeutete die Entwicklung in den USA: Dort erlebten HTR im Zuge der ersten Ölkrise einen außerordentlich starken Aufschwung, da große Ölkonzerne wie Gulf und Shell sich auch finanziell massiv für HTR engagierten und auf deren Markteinführung drängten. So gelang es bis 1974, Aufträge und Optionen für HTR mit prismatischen Brennelementen mit einer elektrischen Leistung von insgesamt 10 GW zu erhalten, was unter den damaligen Verhältnissen als Durchbruch der HTR-Linie zu werten war. Wegen diverser ungelöster technischer HTR-Probleme mussten diese Aufträge unter Zahlung hoher Konventionalstrafen 1975 jedoch zurückgegeben werden, was zum vollständigen Ausstieg der Ölkonzerne aus der HTR-Technik führte. Diesen Rückschlag, der das Ende des Wettlaufs um die dominierende Reaktortechnik markierte und die Vorherrschaft von Leichtwasserreaktoren festschrieb, hat die HTR-Technologie nicht mehr überwinden können; die HTR-Technologie hatte sich im Vergleich zu Leichtwasserreaktoren als nicht ausreichend marktfähig erwiesen.^{[13][39]} Nach Einschätzung von Klaus Traube ist der HTR-Misserfolg auch darauf zurückzuführen, dass die HTR-Technologie auf militärischen Gas-Graphit-Reaktoren basierte, die zur Erzeugung von Waffenplutonium, aber nicht als Kraftwerk konzipiert waren, während die LWR-Technologie von Anfang an als Kraftwerk geplant war.^[39]</p>	
<p>Die HTR-Entwicklungsarbeiten gingen in Deutschland dennoch bis zur vorzeitigen THTR-Stilllegung 1989 fast unvermindert, d. h. mit einer Personalkapazität von insgesamt 2000 bis 3000 Tätigen, weiter: Neben den Standardkonzepten zur Stromerzeugung über einen Wasser/Dampfkreislauf konzentrierte sich Jülich mit seinen Industriepartnern ab etwa 1970 auf die Entwicklung von Reaktoren mit Gasturbine (HHT-Projekt) sowie zur Kohlevergasung (PNP-Projekt).^[13] Zusätzlich gab es ein</p>	

<p>kleineres 1984 eingestelltes Projekt zur nuklearen Fernwärmeversorgung mit Kugelhaufenreaktoren (NFE-Projekt).^{[40][41]} Das HHT-Projekt wurde 1983 aufgegeben, da eine funktionsfähige Heliumturbine für höhere Temperaturen nicht entwickelt werden konnte: Die Jülicher Testanlage HHV wurde nach nur 14 Tagen Hochtemperaturbetrieb stillgelegt.^[42] Außerdem blieb das Problem der Kontamination der Gasturbine ungelöst, wodurch die erforderliche Turbinenwartung faktisch nicht möglich war.^[43] Die Prozesswärmeentwicklung krankte einerseits an für nukleare Anforderungen nicht ausreichend temperaturbeständigen metallischen Materialien: Eine hinreichende Langzeit-Beständigkeit war nur bis 900 °C garantiert, während eine effiziente Kohlevergasung 1000 °C erfordert hätte. Als weiteres Problem erwies sich starke Tritiumdiffusion aus dem Primärkreislauf in das Prozessgas bei hohen Temperaturen.^[44]</p>	
<p>In den USA wurde der dem THTR-300 ähnliche Fort St. Vrain HTGR (prismatische Brennelemente, 330 MW_e) nach insgesamt erfolglosem, kurzen Betrieb 1988 stillgelegt, was die US-Bemühungen um HTR weiter reduzierte. Nach der 1989 erfolgten Stilllegung des THTR-300 in Hamm nach nur 14 Monaten von Problemen begleitetem Volllastbetrieb wurde die staatliche Förderung für Kugelhaufenreaktoren auch in Deutschland stark eingeschränkt. Auch reaktorbauende Industrie und Elektrizitätsversorger zeigten nach 1990 kein Interesse mehr an Kugelhaufenreaktoren. Daher suchte die deutsche Kugelhaufencommunity die Unterstützung der umstrittenen internationalen LaRouche-Bewegung, die sich für visionäre technische Konzepte einsetzt: So schrieb Rudolf Schulten 1990 einen Artikel für ein LaRouche-Magazin.^[45] Die LaRouche-Bewegung wirbt seitdem bis heute intensiv für Kugelhaufenreaktoren.^{[36][46]} Die von den deutschen Kugelhaufenbefürwortern propagierte These vom Kugelhaufenreaktor als dem einzigen in Deutschland entwickelten Kernreaktor und seinem angeblich politisch, nicht technisch bedingtem Scheitern führte zu einer bis heute (2013) anhaltenden publizistischen Unterstützung aus dem ultrarechten politischen Spektrum.^[47]</p>	
<p>ab 2000</p>	
<p>Deutsche Forschungszentren und Unternehmen sind oder waren an Projekten in der Volksrepublik China, sowie den mittlerweile eingestellten Projekten in Südafrika und Indonesien beteiligt, wo die Technik unter dem internationalen Namen PBMR (<i>Pebble Bed Modular Reactor</i>) bekannt ist und ab ca. 2000 eine Wiedergeburt erlebte. Die Entwicklung geht in Richtung kleinerer, dezentral untergebrachter und angeblich inhärent sicherer Reaktoren. Durch besonders geringe Leistung und Leistungsdichte sollen Gefahren vermieden werden, und durch die Modularität und den gleichen Aufbau</p>	

<p>der Kleinreaktoren sollen diese billig in größeren Mengen herstellbar werden. Geringe Leistungsdichte vergrößert jedoch die Baukosten und die Entsorgungsprobleme durch das zwangsläufig größere Abfallvolumen. Entwicklungsarbeiten zu Hochtemperaturreaktoren (vor allem zu HTR mit prismatischen Brennelementen) werden noch beim MIT, der General Atomics (USA) und bei AREVA in Frankreich^{[48][49]} durchgeführt.</p>	
<p>Südafrika</p>	
<p>Die südafrikanische Regierung beendete im September 2010 das mit Unterstützung aus dem Forschungszentrum Jülich etablierte PBMR-Kugelhaufenreaktorprojekt (165 MW_{el}) nach Investitionen von mehr als ca. 1 Mrd. Euro, da sich weder weitere Investoren noch Kunden finden ließen, und löste die Firma PBMR Ltd. weitgehend auf. Es wären weitere Investitionen in Höhe von mindestens 3,2 Mrd. Euro erforderlich gewesen.^[50] Ungelöste technische und sicherheitstechnische Probleme sowie ausufernde Kosten hatten Investoren und Kunden abgeschreckt.^[51] Ein weiterer Grund für das Scheitern des PBMR dürfte gewesen sein, dass die 2001 begonnenen Bemühungen um Zertifizierung des PBMR durch die US-Aufsichtsbehörde NRC erfolglos blieben. Das kann so interpretiert werden, dass der PBMR den US-Sicherheitsstandards nicht genüge; damit wären Exporte des PBMR generell kaum möglich gewesen. Die NRC hatte u.a. das Fehlen eines Volldruckcontainments bemängelt. Auch werden die Enthüllungen von Rainer Moormann zu Problemen der deutschen Kugelhaufenreaktoren häufig als ein Anstoß für das Scheitern des PBMR genannt. Die Beendigung dieses schon weit fortgeschrittenen Projekts führte zu einem deutlichen Rückgang der internationalen Bemühungen um die Entwicklung von Kugelhaufenreaktoren.</p>	
<p>USA</p>	
<p>In den USA wurde seit 2005 an einem fortgeschrittenen Kugelhaufenreaktor (PB-AHTR) gearbeitet, der einige sicherheitstechnische Nachteile des Standardkonzepts beseitigen soll: Der PB-AHTR sollte nicht mit Helium, sondern mit einer Salzschnmelze gekühlt werden, was nahezu drucklosen Betrieb ermöglicht. Außerdem sollten die Kugeln in Kanälen geführt werden, was ein geregelteres Fließverhalten gestattet. Zudem lassen sich Kühlkreisläufe mit flüssigem Kühlmittel relativ leicht reinigen, anders als im Falle von Gaskühlung.^[2] In den USA wurde Anfang 2012 jedoch entschieden, die Entwicklungsarbeiten für das NGNP-Projekt, welches einen Hochtemperaturreaktor der 4. Generation zur Wasserstoffherzeugung zum Ziel hat, auf der Basis des französischen ANTARES-Konzepts mit prismatischen Brennelementen fortzuführen und die Kugelhaufenreaktoroption zurückzustellen.^[52] Der für ca. 2027 geplante NGNP-Reaktor</p>	

<p>soll, um nicht zu viele radioaktive metallische Spaltprodukte aus den Brennelementen freizusetzen, im ersten Schritt auf eine Nutztemperatur von 750 °C beschränkt bleiben und damit noch keine Wasserstofferzeugung durch Wasserspaltung ermöglichen.</p>	
<p>China</p>	
<p>2003 gab die chinesische Regierung bekannt, bis zum Jahr 2020 dreißig Kernreaktoren des Kugelhaufentyps am Standort Shiadowan errichten zu wollen. 2010 wurde dieses Ziel auf vorerst nur einen Kugelhaufenreaktor HTR-PM der elektrischen Leistung 200 MW_{el} reduziert; die damit entfallenden Kugelhaufenreaktoren sollen durch fünf zusätzliche LWR großer Leistung ausgeglichen werden, von denen zwei Anfang 2014 genehmigt wurden.^[53] Die Vorbereitungen zum Bau eines Prototyp-Kraftwerks (HTR-PM)^[54] mit einer thermischen Leistung von 250 MW begannen 2008. Als Folge der Nuklearkatastrophe von Fukushima wurde die schon erteilte erste Teilerrichtungsgenehmigung für den HTR-PM jedoch zurückgezogen und weitere Sicherheitsanalysen wurden angefordert.^[55] Im Dezember 2012 wurde der Bau gestattet.^{[56][57]} Die Entsorgungsproblematik von Kugelhaufenreaktoren wird von den chinesischen Projektverantwortlichen als mit geringem Aufwand lösbar dargestellt.^[58] Experimente am kleinen Kugelhaufenreaktor HTR-10 nahe Peking, der seit 2003 in Betrieb ist, sind Gegenstand einiger Veröffentlichungen.^[59] Seit 2005 ist der HTR-10 nur noch selten in Betrieb, was von Kugelhaufenbefürwortern auf die Priorisierung des HTR-PM zurückgeführt wird, von Kritikern aber mit technischen Problemen beim Kugelumwälzen in Verbindung gebracht wird. Der HTR-PM gilt vielfach als sicherheitstechnisch veraltet und als in westlichen Hochtechnologieländern wegen diverser Sicherheitsmängel, unter anderem wegen des Fehlens einer Volldruck-Containments, nicht genehmigungsfähig. Ähnliches gilt für die in China geplante Entsorgungsstrategie zum HTR-PM.</p>	
<p>Polen</p>	
<p>Im April 2011, also kurz nach der Nuklearkatastrophe von Fukushima, gab der Nuklearwissenschaftler Antonio Hurtado von der TU Dresden bekannt, dass es in Polen Überlegungen gibt, an der Grenze zu Deutschland einen Kugelhaufenreaktor zu bauen. Die <i>Leipziger Volkszeitung</i> berichtete von Gesprächen zwischen der TU Dresden und polnischen Vertretern.^[60] Das sächsische Umweltministerium erklärte im Oktober 2011, es lägen ihm keine Informationen zu solchen polnischen Plänen vor.^[61] Nach polnischen Angaben beziehen sich diese vagen Überlegungen auch erst auf einen Zeitraum ab 2045. Die Ankündigung von Hurtado dürfte daher als Bestandteil der Werbekampagne <i>Umsteigen statt Aussteigen</i> der deutschen Kugelhaufencommunity nach der Fukushima-</p>	

Katastrophe zu werten sein.	
Deutschland	
Derzeit (2013) wird am Kugelhaufen-HTR-Konzept in Deutschland nur noch in kleinem Umfang geforscht, und zwar an der TU Dresden , der GRS , der Universität Stuttgart sowie an RWTH Aachen/ Forschungszentrum Jülich (FZJ): So wird am FZJ unter anderem der Großversuchsstand NACOK zur Untersuchung von Kugelhaufenreaktor-Problemen betrieben. ^{[62][63]} Neben der Grundfinanzierung der beteiligten Institutionen stehen dafür unter Anderem ca. 1 Mio €/Jahr vom Bundeswirtschaftsministerium sowie EU-Drittmittel zur Verfügung. Eine detaillierte Beschreibung der Situation in Deutschland nach 1990 findet sich hier . Der Kerntechnikprofessor Günter Lohnert von der Universität Stuttgart, ein führender Vertreter der deutschen Kugelhaufen-HTR-Lobby, geriet 2008 unter Druck, nachdem er sich massiv auch für die umstrittene Kalte Fusion eingesetzt hatte (siehe insbesondere Kalte Fusion#Sonofusion). Nach längerer öffentlicher Diskussion beschloss der Aufsichtsrat des FZJ im Mai 2014, die HTR-Forschung in Jülich Ende 2014 einzustellen und die Versuchsstände stillzulegen. ^[64]	
Militärische Anwendung	
Es sind einige militärische Kugelhaufenreaktorprojekte bekannt geworden:	Nur in Jülich, Hamm und Peking sind bisher solche Reaktoren auch tatsächlich gelaufen.
Von 1983 bis 1992 gab es im Rahmen des projektierten US-Raketenabwehrsystems SDI unter dem Namen <i>Timberwind</i> Arbeiten zur Entwicklung eines nuklearen Raketenantriebs mit Kugelhaufenreaktor. Mit dem Ende von SDI wurde Timberwind ebenfalls eingestellt. ^{[65][66]}	
Kugelhaufenreaktoren gelten als besonders geeignet zur Erzeugung von Tritium für nukleare Wasserstoffbomben. Siemens und die US-Firma General Atomics erarbeiteten bis 1989 ein Angebot eines Tritium-Produktionsreaktors für das US-Verteidigungsministerium auf der Basis des HTR-Modul200-Kugelhaufenreaktorkonzepts. Nach Presseberichten wurde das Projekt unter anderem deshalb nicht akzeptiert, weil Siemens zeitgleich einen zivilen HTR-Modul200 in der Sowjetunion anbot. ^[67]	?????
Die südafrikanische Apartheid -Regierung plante 1991 die Aufrüstung von U-Booten mit einem Kugelhaufenreaktor-Antrieb zu Atom-U-Booten zum Zwecke der sicheren Aufbewahrung der vorhandenen sechs Atombomben . ^{[68][69][70]} Die Wahl war trotz der niedrigen Leistungsdichte auf Kugelhaufenreaktoren gefallen, weil andere Nukleartechnik wegen des internationalen Embargos nicht verfügbar war. Dieses militärische Projekt wurde nach Demontage der sechs südafrikanischen Atombomben	

1993 in das vorgenannte, mittlerweile aufgegebene, zivile PBMR-Projekt übergeleitet, auch um den an der Atomwaffenherstellung beteiligten Personen eine berufliche Perspektive zu geben.	
--	--

Herr Dr. Cleve, verantwortlicher Ingenieur beim Bau der beiden Reaktoren in Jülich und Hamm, sagt dazu:

Die angesprochenen Fragen zur eventuellen Problemen sind im Prinzip richtig. Alle dieser Frage wurden, falls erforderlich und möglich, im Versuchsfeld erprobt, untersucht und
es wurden konstruktive Lösungen gefunden.

All diese gingen in die Konstruktion ein. Es ist die Aufgabe eines Versuchsreaktors, offene betriebliche Fragen auf Realisierbarkeit zu überprüfen. Beim AVR sind alle erforderlichen Konstruktionsdetails, zum Teil nach Erfahrungen aus den Versuchsanlagen, in der Konstruktion erkannt und berücksichtigt worden. Nur so war der Riesen-Erfolg des AVR-Betriebes möglich. Dazu, kurz zusammengefasst, folgende Erfahrungen:

- Der AVR hatte als völlige Neukonstruktion eine Jahresverfügbarkeit von über 92% bis zu 100%. Das ist für eine Neukonstruktion ein Weltrekord;
- Die Radioaktivität des gesamten Primär-Helium-Gases war so gering, daß eine plötzliche Totalentladung keine Folgen für Umwelt und Menschen gehabt hätte, sie wäre bedeutend geringer gewesen als der in Jülich/Schmehausen erfolgte radioaktive Niederschlag aus Tschernobyl;
- In 23 Betriebsjahren gab es nicht den kleinsten Strahlenunfall für Mensch oder Umgebung;
- Alle defekten Komponenten oder sonstige Störungen konnten z. T. während des laufenden Betriebes behoben werden, ohne Gefahr ein zu hohen Strahlenbelastung für das Betriebspersonal;
- Eine einzige ernstere Betriebsstörung, Leckage einer Schweißnaht des Dampferzeugers, wurde exakt wie in der Betriebsvorschrift zuvor niedergelegt, behoben. Es bestand zu keiner Zeit eine Gefährdung für das Betriebspersonal oder gar der Umgebung;
- In 23 Betriebsjahren sind, trotz zahlreicher Versuche mit neuen, noch in der Entwicklung befindliche Brennelementen, nur 220 Kugeln gebrochen. Dieser Bruch hatte keine Erhöhung der Primärgasaktivität zur Folge. Dies war ein Ergebnis, das niemand erwartet hatte.
- Das bislang unbekannt Verhalten der Grafit-Core-Konstruktion war so gut, wie es nicht erwartet werden konnte. Nach 23 Betriebsjahren hatte sich kein Grafitblock auch nur um 1mm verschoben, das gesamte Core, abgesehen von einigen kleineren undedeutenden Bruchstücken und überraschend geringen Ablagerungen an Grafitstaub, sah das Core wie neu aus.

- Alle Erfahrungen aus dem AVR dienen zu nahezu 100% als Erfahrungsgrundlagen zum Neubau größerer HTR-KKW.
- Die Erfahrungen mit dem THTR-300 sind negativ beeinflusst worden durch den Kugelbruch, bedingt durch das Einfahren der Abschaltstäbe in das Kugelbett. Hätten die Erfahrungen mit dem Verhalten der Kraftblöcke zu Beginn der Konstruktionsarbeiten vorgelegen, hätte eine alternative Konstruktion schon beim THTR gebaut werden können, bei der das Einfahren der Abschaltstäbe in des Kugelbett nicht erforderlich ist;
- Alle weiteren Erfahrungen mit dem THTR-300, so die völlig neue Konstruktion eine Spannbetonbehälters, die direkte Dampferzeugung zum Betrieb der 300MW Dampfturbogruppe, erstmals weltweit erprobt, deren Regelbarkeit und Eignung zur Frequenzregelung der Netze usw. usw. waren hervorragend. Damit wurde alle Ziele, Erfahrungen und Erkenntnisse, die mit diesem Demonstrations-KKW erreicht werden sollte, realisiert.
- Kurz, trotz der relativ kurzen Laufzeit konnten alle Erfahrungen zum Bau neuer, größerer Anlagen gewonnen werden. Das HTR-KKW hatte also seinen Hauptzweck erfüllt.

Detailfragen sind im Zukunftsdialog der Bundeskanzlerin: siehe [www---](#) beschrieben, erläutert und begründet.

Siehe auch	
Generation IV International Forum	
Literatur	
Ulrich Kirchner, <i>Der Hochtemperaturreaktor : Konflikte, Interessen, Entscheidungen</i> . Campus Forschung Bd. 667, Frankfurt / Main; New York, 1991, ISBN 3-593-34538-2	
Luigi Massimo, <i>Physics of High-Temperature Reactors</i> . Oxford usw.: Pergamon, 1976	
Kurt Kugeler und Rudolf Schulten , <i>Hochtemperaturreaktortechnik</i> . Berlin usw.: Springer, 1989*	
Weblinks	
 Wiktionary: Hochtemperaturreaktor – Bedeutungserklärungen, Wortherkunft, Synonyme, Übersetzungen	
Funktionsweise eines grafitmoderierten gasgekühlten Reaktors	
Informationen zum HTR-10 Reaktor, Tsinghua University/China*	
David Fig zum südafrikanischen Kugelhaufen-HTR-Projekt: The rise and demise of South Africa's Pebble Bed Modular Reactor (2010) (PDF; 802 kB)	
Kugelhaufenreaktoren. Desaster oder Zukunftsoption ? (PDF; 4,5 MB) Verständlich	

geschriebene, sehr kritische Stellungnahme des BUND	
Spiegel Online Politik, Rückbau des Reaktors Jülich: heißer Meiler (24. Juli 2009)	
A safety re-evaluation of the AVR pebble bed reactor operation and its consequences for future HTR concepts (PDF; 12,2 MB), Rainer Moormann , Forschungszentrum Jülich,	
ISSN 0944-2952. (englisch) Ausführliche Darstellung des Versuchsbetriebs des AVR und kritische Bewertung in Hinblick auf zukünftige Kugelhaufenreaktorkonzepte.	
Einzelnachweise	
<ul style="list-style-type: none"> • Kugeler u. Schulten (s. Literaturliste) S. 2 	
<ul style="list-style-type: none"> • • A MODULAR PEBBLE-BED ADVANCED HIGH TEMPERATURE REACTOR, Bericht University of Berkely (2008), http://pb-ahtr.nuc.berkeley.edu/08-001%20PB-AHTR%20NE170%20Design%20Project%20Rpt.pdf (abgerufen 28. März 2012) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.gen-4.org/Technology/systems/msr.htm toter Link 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Massimo (s. Literaturliste) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Zuoyi Zhang et al.: Current status and technical description of Chinese 2×250MWth HTR-PM demonstration plant Nuclear Engineering and Design 239 (2009) 1212–1219 	
<ul style="list-style-type: none"> • • S. Brandes: DER KUGELHAUFENREAKTOR ALS THERMISCHER THORIUMBRUETER. KFA-Bericht Jül-474-RG (1967) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Die Zeit 19. Juli 1968 Heißer deutscher Brüter http://www.zeit.de/1968/29/heisser-deutscher-brueter 	
<ul style="list-style-type: none"> • • W.Scherer, Die zähe Flüssigkeit als Modell für das Kugelfließen in Hochtemperaturreaktoren, Bericht Jül-2331 (1989) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • R. Moormann: AVR prototype pebble bed reactor 	
<ul style="list-style-type: none"> • • D. Freis, http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2010/3307/pdf/3307.pdf 	
<ul style="list-style-type: none"> • • <i>Gibt es sichere Kernkraftwerke?</i> Die Welt 18. März 2011 http://www.welt.de/print/die_welt/wissen/article12871902/Gibt-es-sichere-Kernkraftwerke.html 	
<ul style="list-style-type: none"> • • K. Kugeler: <i>Gibt es den katastrophenfremen Kernreaktor?</i> In: Physikalische Blätter 57 (2001) No 11 S. 34 ff (Online) (abgerufen 18. Februar 2012; PDF; 795 kB) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • U. Kirchner (s. Literaturliste) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • R. Moormann: PBR safety revisited 	
<ul style="list-style-type: none"> • • J.Szabo et al.: Reactivity effects of water ingress in HTGRs - a review. In: Technical 	

committee on reactivity transient accidents. Proc. of the first technical committee meeting organized by the IAEA and held in Vienna, 17.–20. November 1987. Document IAEA-TC-610	
<ul style="list-style-type: none"> • • J.Benecke, P.Breitenlohner, D.Maison, M.Reimann, E.Sailer: Überprüfung kerntechnischer Anlagen in NRW: Kritik der Sicherheitseinrichtungen und der Sicherheitskonzepte des THTR-300 und des Versuchsreaktors Jülich (AVR), Gutachten für die NRW Landesregierung, März (1988). <i>Das Gutachten war lange Zeit vertraulich, kann aber jetzt gemäß Umweltinformationsgesetz bei der Atomaufsicht im NRW-Wirtschaftsministerium in Düsseldorf eingesehen werden. Die Zusammenfassung ist abgedruckt in http://bwv-verlag.de/shop/bwv/index.php?page=detail&match=LISA_NR2=3021</i> 	
<ul style="list-style-type: none"> • • J.Szabo et al., Nuclear safety implications of water ingress accidents in HTGRs, Nuclear Society of Israel, Transactions 1987, IV-13 ff 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Wolfgang Stoll, Kraft aus der Kugel? Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 22. Oktober 2006, S. 70 	
<ul style="list-style-type: none"> • • W.Braun,W.Bürkle: Can inherent safety replace active and passive safety systems ? Kerntechnik 51 (1987) 169 ff 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Lothar Hahn: Grundsätzliche Sicherheitsprobleme beim Hochtemperaturreaktor und besondere Defizite beim THTR-300. Gutachten zum THTR-300 (Juni 1986) http://www.reaktorpleite.de/htr-sicherheit-1986-l-hahn.html abgerufen 26. März 2014 	
<ul style="list-style-type: none"> • • P.C. Schmidt, Alternativen zur Verminderung der C-14-Emission bei der Wiederaufbereitung von HTR-Brennelementen. KFA-Bericht Jül-1567 (1979) und Diss. RWTH Aachen 	
<ul style="list-style-type: none"> • • H. Tischer, H.G. Aschoff: Chemie und Verfahrenstechnik des Head Ends bei der Wiederaufarbeitung von HTR Brennelementen, Bericht Jül-Spez-130 (1981) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Armin Tenner, Development of Nuclear Energy (2007) http://www.inesglobal.com/Conferences/2007/Moscow/Moscow.htm 	
<ul style="list-style-type: none"> • • D.A.Powers in Dokument ML020450645, einsehbar im Adams webserver der US-Atomaufsicht NRC http://adams.nrc.gov/wba/ 	
<ul style="list-style-type: none"> • • VDI-Society for Energy Technologies (Publ.), AVR-Experimental High-Temperature Reaktor - 21 years of successful operation for a future technology, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1990 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Zusammenfassender Bericht über Meldepflichtige Ereignisse 1977/1978 (PDF; 1,2 MB), Bundesministeriums für Strahlensicherheit 	

<ul style="list-style-type: none"> • • Bericht Safety-Related Experiences With The AVR Reactor K.J. Krüger, G.P. Invens, Arbeitsgemeinschaft Versuchs-Reaktor G.m.b.H. 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.wmsym.org/archives/2000/pdf/36/36-5.pdf 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.spiegel.de/politik/deutschland/0,1518,637916,00.html 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Präsentation Graphite Dust in AVR (PDF; 2,6 MB), Bärbel Schlögl, FZJ, Jülich 	
<ul style="list-style-type: none"> • • R.Moormann: <i>Katastrophenfreie Jülicher Kugelhaufenreaktoren, Chance oder Mythos ?</i> in: 8. Offene Akademie 2013, Tagungsband ISBN 978-3-941194-113 S. 75-80 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.solidaritaet.com/neuesol/2013/17/konferenz.htm 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Die Technik der Hochtemperaturreaktoren, beschrieben von Dr.-Ing. Urban Cleve, Dortmund 	
<ul style="list-style-type: none"> • • „Die Technik der Hochtemperaturreaktoren“ – Redevortrag von Urban Cleve am Institut für Eisenhüttenkunde an der RWTH Aachen. Festkolloquium zum 75. Geburtstag von Prof. Gudenau, 15. Juli 2011. 	
<ul style="list-style-type: none"> • • M.Täubner, Kann denn Wahrheit Sünde sein ? Brand Eins, Mai 2012 S. 106-109 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Majorie Mazel Hecht, <i>Modular High-Temperature-Reactors Can Change The World</i>, 21st Century Science & Technology, Fall 2008, Seite 20: http://www.scribd.com/doc/11349160/High-Temperature-Reactor 	
<ul style="list-style-type: none"> • • F. Daniels. Suggestions for a High Temperature Pebble Pile. Technical Report MUC-FD-8, Oak Ridge National Lab. (1944) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • F. Daniels, Neutronic reactor system, Patent US2809931, angemeldet 1945, erteilt 1957, http://www.freepatentsonline.com/2809931.pdf 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Klaus Traube: Müssen wir umschalten ? Rowohlt 1978. Unterkapitel S. 196: Der Erfolg der Leichtwasserreaktoren; Unterkapitel S.206: Das vollkommene Chaos: Der Hochtemperaturreaktor 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Kernforschungsanlage Juelich GmbH und Rheinische Braunkohlenwerke, AG Nukleare Fernenergie: <i>Zusammenfassender Bericht zum Projekt Nukleare Fernenergie (NFE)</i>, KFA-Bericht Juel-Spez-303 (1985) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.zeit.de/1974/13/was-eva-trennt-heizt-adam-an 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Colin F. McDonald: <i>Helium turbomachinery operating experience from gas turbine power plants and test facilities</i>. In: <i>Applied Thermal Engineering</i>. 44, 2012, S. 108–142, doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.02.041. 	
<ul style="list-style-type: none"> • • N. Iniotakis et al.: <i>Plate-out of fission products and its effect on maintenance and repair</i>. In: <i>Nuclear Engineering and Design</i>. 78, 1984, S. 273–284, doi:10.1016/0029-5493(84)90311-X. 	

<ul style="list-style-type: none"> • • J. Blumensaat, H.D. Roehrig: <i>Hydrogen and tritium permeation through helium-heated tube walls</i>. Trans. Am. Nucl. Soc. 20 (1975) 728–730 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Rudolf Schulten: Alte und neue Wege der Kerntechnik. Fusion 1/1990, nochmals veröffentlicht in Heft 1/2010 S. 20ff http://www.solidaritaet.com/fusion/2010/1/index.htm 	
<ul style="list-style-type: none"> • • <i>Who is trying to strangle the Pebble-Bed Reactor?</i> http://www.larouchepub.com/eiw/public/2008/2008_50-52/2008_50-52/2008-50/pdf/66-71_3548.pdf 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Helmut Schröcke, Theodor Schmidt-Kaler, Sigurd Schulien in <i>Stimme des Reichs</i> Heft 2 (2013) S.17 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://areva.com/mediatheque/liblocal/docs/pdf/activites/reacteurs-services/reacteurs/pdf-plaq-antares-va/index.html 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Jean-Claude Gauthier, Gerd Brinkmann, Bernie Copsey, Michel Lecomte: <i>ANTARES: The HTR/VHTR project at Framatome ANP</i>. In: <i>2nd International Topical Meeting on HIGH TEMPERATURE REACTOR TECHNOLOGY, Beijing, CHINA,, September 22-24, 2004</i>. Abgerufen am 19. November 2011 (PDF 178kB). 	
<ul style="list-style-type: none"> • • South Africa cancels PBMR funding http://www.neimagazine.com/story.asp?storyCode=2057624 	
<ul style="list-style-type: none"> • • ADDRESS BY THE MINISTER OF PUBLIC ENTERPRISES, BARBARA HOGAN, TO THE NATIONAL ASSEMBLY, ON THE PEBBLE BED MODULAR REACTOR 16. September 2010 http://www.dpe.gov.za/news-971 	
<ul style="list-style-type: none"> • • "Areva prismatic HTGR is 'optimum' technology for next generation plant, says US alliance", Nuclear Engineering International 15. Februar 2012, http://www.neimagazine.com/story.asp?sectioncode=132&storyCode=2061766 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.nuklearforum.ch/de/aktuell/e-bulletin/china-neuartige-reaktorauslegung-genehmigt 	
<ul style="list-style-type: none"> • • SUN Yuliang: <i>HTR-PM Project Status and Test Program</i>. Abgerufen am 9. November 2011 (PDF 3.8MB). 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.nytimes.com/2011/10/11/business/energy-environment/china-marches-on-with-nuclear-energy-in-spite-of-fukushima.html?_r=1&pagewanted=all 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.nuklearforum.ch/de/aktuell/e-bulletin/baubeginn-fuer-hochtemperatur-demonstrationsreaktor-china 	
<ul style="list-style-type: none"> • • In Deutschland gescheitert, in China neu gebaut (Juli 2013) http://www.tagesspiegel.de/politik/atomkraft-in-deutschland-gescheitert-in-china-neu- 	

gebaut/8478502.html	
<ul style="list-style-type: none"> • • https://www.nytimes.com/2011/03/25/business/energy-environment/25chinanuke.html?pagewanted=all&_r=0%0A 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10 (PDF; 2,9 MB) 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Polen plant Kugelhaufenreaktor an der deutschen Grenze. In: <i>contratom.de</i>. Abgerufen am 19. November 2011. 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.sueddeutsche.de/politik/politik-kompakt-ingenieure-warnen-vor-statischen-problemen-bei-stuttgart--1.1083748-3 	
<ul style="list-style-type: none"> • • s.S. 19 in https://services.nordrheinwestfalendirekt.de/broschuerenservice/download/70495/rz_cef_internet_final.pdf 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-03-05-03-07-TWG-NPTD/Day_1/2.Allelein.pdf 	
<ul style="list-style-type: none"> • • Rene Benden: Forschung an HT-Reaktoren vor dem Aus. 14. Mai 2014 http://www.aachener-nachrichten.de/lokales/region/forschung-an-ht-reaktoren-vor-dem-aus-1.826886 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.astronautix.com/lvs/timrwind.htm#more 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://nvahof.org/?page_id=1689 	
<ul style="list-style-type: none"> • • D. Charles, Nuclear safety: some like it hot. <i>New Scientist</i>, no. 1689, pp. 58–61, 1989 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.eepublishers.co.za/images/upload/Generation1a.pdf 	
<ul style="list-style-type: none"> • • http://www.pbmr.co.za/contenthtml/files/File/Chronology.pdf 	
<ul style="list-style-type: none"> • http://www.issafrica.org/uploads/210.pdf 	
Kategorien:	
Reaktortyp	
Nuklearantrieb	
Navigationsmenü	
Benutzerkonto erstellen	
Anmelden	
Artikel	
Diskussion	
Lesen	
Bearbeiten	

Versionsgeschichte	
Formularbeginn	
Formularende	