

# Nukleare Hochtemperaturtechnik zur Erzeugung flüssiger Brennstoffe, von Wasserstoff und elektrischer Energie.

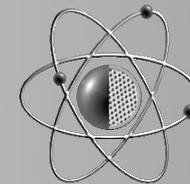
Keine Kernschmelze – integrierte Endlagerung – keine Nukleartransporte – sicher gegen Terrorangriffe



Dr. Ing. Urban Cleve

NHTT

Nukleare Hochtemperaturtechnik  
Nuclear High Temperature Technology



## Grundüberlegungen zum Kugelbettreaktor

- ❖ Kugelförmige Brennelemente;
- ❖ Umwälzung der BE während des Betriebes;
- ❖ Helium als Kühlmittel;
- ❖ Grafit als Hauptwerkstoff für das Core, für Brennelemente und als Moderator;
- ❖ Integriertes Primär-Kühl-Kreissystem;
- ❖ Hohe Primärgastemperaturen ermöglichen hohe thermodynamische Wirkungsgrade;
- ❖ Inhärente Sicherheit durch negativen Temperaturkoeffizienten;
- ❖ Keine Kernschmelze möglich;



## Erfahrungen beim Betrieb des AVR

- ❖ Kein Strahlenunfall in 21 Betriebsjahren;
- ❖ Ausbautechnik ermöglichte Reparatur und Austausch defekter Komponenten ohne zu hohe Strahlenbelastung des Bedienungspersonals;
- ❖ Ein Störfall mit Dampferzeuger durch eine undichte Nahtstelle von mehreren tausend Schweißnähten. Dadurch ein Störung nach Kategorie „1“ der INES-Skala: „Abweichung von zulässigen Bereichen für den sicheren Betrieb der Anlage“;
- ❖ Sonstige Ereignisse alle nach Bewertung „0“ der INES-Skala: „keine oder sehr geringe sicherheitstechnische Bedeutung“;
- ❖ Zweimalige Erprobung eines sonst als „GAU“ bezeichneten „schwersten katastrophalen Reaktorunfalls“ der Bewertung „7“ wurde problemlos durchgeführt: INES-Bewertung für nukleare Ereignisse „0“;



## Brennelemente mit Kohlenstoffhülle und Coated Particles „CP“

- ❖ **Abmessungen:**

- ❖ Kugelelement Durchmesser: 60 mm; „CP“ 0,5 mm;
- ❖ davon Brennstoffmatrix mit Uran 235 und Thorium 232 0,3mm; Rest gasdichte, sehr harte dreifache Hülle aus pyrolytischem Kohlenstoff und Silizium-Carbid „SiC“;
- ❖ 35.000 „CP“ sind in einem BE enthalten;

- ❖ **Sicherheit:**

- ❖ Bei Bruch einer BE-Kugel treten keine Spaltprodukte in das Kühlgas über da die kleinen „CP“ bis zu 1.600 Grad C gasdicht bleiben;
- ❖ Die Gesamtaktivität des Primärgases ist mit 360 Curie beim AVR so gering, dass bei Primärgas Helium Verlust keine größere Strahlenbelastung der Umgebung eintreten kann;



## Grafit – und Kohlenstoffeinbauten

- ❖ Grafit war ein vollkommen neuer und unerprobte Baustoff beim AVR;
- ❖ Verwendet als Material und gleichzeitig Moderator beim Aufbau des Reaktorcores;
- ❖ Grafit hält Temperaturen bis zu 3.000 grad Celsius aus;
- ❖ Hochkritisches Bauelement ist der Deckenreflektor;
- ❖ Alle Bausteine wurden einfach ohne Bindemittel zusammengesetzt;
- ❖ **Ergebnis nach 21 Betriebsjahren:**
- ❖ Alle Elemente waren in einwandfreiem Zustand, nur geringer Abrieb, keine Verschiebung der Steine untereinander, keine Risse, keine Korrosionen;
- ❖ **Fazit:**
- ❖ Grafit hat sich als Baustoff für Hochtemperaturreaktoren hervorragend bewährt und kann problemlos angewendet werden.



## Erfahrungen mit den wichtigsten Komponenten

- ❖ Betriebserfahrungen in 21 Betriebsjahren mit neu konstruierten Komponenten zum Betrieb in trockener Helium Atmosphäre:
- ❖ Dampferzeuger: 1 undichte Schweißnaht, sonst problemlos;
- ❖ Gebläse: Ein Lagerwechsel mit Ausbau und Austausch unter nuklearen Bedingungen erfolgt;
- ❖ Abschalt- und Regelstäbe im Grafit-Seitenreflektor: einwandfrei gearbeitet;
- ❖ Brennelement Beschickungs- und Umwälzanlage: Einige Reparaturen vor allem an Lagern, sonst problemlos mit extrem niedriger Bruchrate von 0,0092% der umgewälzten Kugeln, das sind 220 Elemente in 21 Betriebsjahren;
- ❖ Sonstige Anlagen alle ohne nennenswerte Probleme;



## Konstruktionsänderungen beim THTR-300 gegenüber dem AVR

- ❖ Spannbetonbehälter anstelle Stahldruckbehälter;
- ❖ Gasdichtes druckloses Containment anstelle eines Schutzbehälters;
- ❖ Führung des Helium Gaskreislaufes von oben nach unten;
- ❖ Einfahren neu konstruierter Abschaltstäbe direkt in das Kugelbett;
- ❖ Regelstäbe werden in den seitlichen Grafitreflektoren geführt;
- ❖ Neukonstruktion eines kombinierten Verwenigers/Vereinzelners beim Brennelementabzug;
- ❖ 6 Dampferzeuger mit gewickelter Konstruktion seitlich neben dem äußeren Grafitreflektor;
- ❖ 6 He-Gebläse mit größerer Leistung;
- ❖ Keine doppelt ummantelten Rohrleitungen und Armaturen in den Helium-Gaskreisläufen;
- ❖ Sonstige Bauelemente im Prinzip wie beim AVR;



## Betriebserfahrungen mit dem 300 MW THTR

- ❖ Erhebliche Probleme beim Einfahren der Abschaltstäbe in das Kugelbett mit der Folge hoher Bruchrate;
- ❖ Diese Problematik war Gegenstand einer Besprechung in 1967;
- ❖ Neu konstruierter kombinierter Verweniger/Vereinzelter mit Schwierigkeiten, mit bedingt durch den höheren Gasdruck mit der Folge höherer Bruchrate;
- ❖ **Die Bruchrate der BE betrug beim THTR auch nach konstruktiver Verbesserung 0,6% der abgezogenen BE, gegenüber AVR mit 0,0092%;**
- ❖ **Konsequenz:** In ein Kugelbett dürfen keine Abschaltstäbe eingefahren werden; Brennelement Abzug muss konstruktiv verbessert werden;
- ❖ Sonst keine Probleme, alle Komponenten arbeiteten einwandfrei;
- ❖ Trotz der kurzen Betriebszeit von nur 3 Jahren wurden alle Erfahrungen zum Bau von künftigen HTR-Anlagen erworben.



## Strahlenbelastung des Personals und Umgebung beim Betrieb von AVR und THTR

- ❖ Beim Betrieb von AVR und THTR kam es zu keiner unzulässig hohen Strahlenbelastung des Bedienungspersonals trotz Arbeiten am „strahlenden“ Primärteil;
- ❖ In 21 Betriebsjahren des AVR sind keine radioaktiven Spaltprodukte in die Umgebung ausgetreten;
- ❖ Beim THTR kam es bei der Inbetriebnahme durch eine Fehlschaltung zu einem geringen Austritt von Spaltprodukten, die die Umgebung mit 0,1 Bq. belastet haben. Der zufälligerweise gleichzeitige Reaktorunfall in Tschernobyl belastete die Umgebung in Schmehausen mit 50.000 Bq.
- ❖ Die Betriebsverfügbarkeit des AVR lag im Durchschnitt von 21 Betriebsjahren bei 67%, trotz Stillstandszeiten für Experimente und Reparaturen.
- ❖ In 1976 erreichte der Versuchsreaktor eine Verfügbarkeit von 92%, das dürfte „**Weltrekord**“ für einen völlig neu konstruierten Reaktor sein.



## Erfahrungsstand aus Betrieb von AVR und THTR

- ❖ Nach mehr als 20 jähriger Unterbrechung der Arbeiten an der nuklearen Hochtemperaturtechnik stellt sich die Frage, ob die noch vorhandenen Erfahrungen zum Bau neuer Anlagen ausreichen.
- ❖ Hierzu folgendes Statement:
- ❖ „Die Ingenieurtechnik in Deutschland ist auch heute noch in der Lage, nach Auswertung und Verwendung der vorhandenen Konstruktions- und Genehmigungsunterlagen mit einem neu einzuarbeitenden Team neue und größere Anlagen unter Verwertung der Erfahrungen aus Betrieb des AVR und des THTR zusammen mit den in den letzten Jahren durchgeführten sicherheitstechnischen Untersuchungen an der RWTH Aachen und dem FZ Jülich zu planen, zu konstruieren und zu betreiben.“



## NHTT als Weiterentwicklung des AVR und THTR 300

- ❖ Ziel und Aufgabe der NHTT Baureihe ist es, mit einem einheitlichen Konzept bei Nutzung der erworbenen negativen und positiven Erfahrungen einen nuklearen Hochtemperaturwärmeerzeuger für alle wirtschaftlich und technisch möglichen Anwendungsfälle und mit verschiedenen Brennelementen zu konstruieren und zu bauen.
- ❖ **Hierzu folgende Aufgabenstellung:**
- ❖ Einheitlicher Aufbau der Anlage im Leistungsbereich von 200 MW thermisch bis 4.000 MW thermisch;
- ❖ Spannbetonbehälter als sicherheitstechnisch bestmögliche Konstruktion;
- ❖ Berechnung bis zu Erdbebensicherheit Stufe „6“ nach Richter Skala;
- ❖ Integriertes, in sich geschlossenes Konzept für den gesamten nuklearen Teil mit dem Ziel, keine „strahlenden“ Bauteile außerhalb der Anlage transportieren zu müssen.
- ❖ Lösung der Endlagerung nach Betriebsende im Bereich der Anlage;



# Der Bauteil

- ❖ In kerntechnischen Anlagen ist Beton ein besonders gut geeigneter Werkstoff. Neben seinen bautechnischen Vorteilen hat er eine besondere Bedeutung für Sicherheit und Strahlenschutz. Für eine NHTT-Anlage ist er daher besonders gut geeignet.
- ❖ Der Bauteil einer NHTT-Anlage besteht im wesentlichen aus:
  - Dem Spannbetondruckbehälter;
  - Der ringförmigen Stützkonstruktion für den Druckbehälter;
  - Einem starken, großflächigen, erdbebensicheren Fundament;
  - Einem bunkerähnlichen großen, gasdichten Unterbau mit Betonwänden und Decken zur Unterbringung eines gesondert abgeschirmten Lagers für abgebrannte Brennelemente und des BE-Bruchs; der BE-Beschickungsanlage; einen Notfallbunker; einer Dekontaminationsanlage; einem Lager für ausgebaute „strahlende“ Teile und Komponenten; einer eventuellen späteren Wiederaufbereitungsanlage für BE und einer eigenen Belüftungsanlage.



## Der Aufbau des Cores und das Innere des Spannbetonbehälters

- ❖ Der Aufbau des Cores und der Komponenten innerhalb des Spannbetondruckbehälters erfolgt ringförmig von innen nach außen wie folgt:
- ❖ Zentraler Grafitblock als innerem Moderator mit darin geführten Abschalt- und Regelstäben und als Stützkonstruktion für die obere Reflektordecke;
- ❖ Ringförmiges Core mit mehreren Abzügen für die Brennelemente;
- ❖ Äußerer Reflektor und Moderator mit darin geführten Abschalt- und Regelstäben;
- ❖ Thermischer Schild;
- ❖ Ringraum zur Aufnahme der He/He Wärmetauscher;
- ❖ Spannbetonbehälter mit innen liegender Isolierung, Liner und wassergekühltem Linerkühlsystem;



## Anforderungen an die Sicherheit der NHTT Anlagen

- ❖ Keine Kernschmelze und damit kein „GAU“;
- ❖ Sichere Nachwärmeabfuhr;
- ❖ Keine Gefährdung der Umgebung auch bei fiktiven Bruch des Spannbetonbehälters;
- ❖ Containment zur doppelten Sicherheit;
- ❖ Beherrschung bzw. Vermeidung einer Gefährdung durch Fremdmedieneinbruch in das Primärsystem;
- ❖ Höchste Sicherheit auch bei kriegerischen oder terroristischen Ereignissen;
- ❖ Keine Gefährdung der Umgebung bei Flugzeugabsturz und ggfs. großflächigen Kerosinbränden;
- ❖ Keine Störfälle durch Sabotage;
- ❖ Keine Unfälle oder Störfälle entsprechend INES-Skala „2 -7“;



## Maßnahmen zur Vermeidung und Beherrschung von Störfällen

- ❖ **Kernschmelze** ist aus nuklear physikalischen Gründen ausgeschlossen;
- ❖ Entstehende **Nachwärme** wird abgeführt durch He-Kühlgasgebläse, durch Linerkühlsystem oder durch natürliche Wärmeableitung durch den Spannbetonbehälter;
- ❖ **Bruch des Spannbetonbehälters** ist ausgeschlossen durch hohe Überdimensionierung und hohe Zahl von Spannkabeln; er wird nach Druckentlastung durch Spannkabel gasdicht geschlossen;
- ❖ **Fremdmedieneinbruch** ist ausgeschlossen durch He/He-Wärmetauscher; durch gasdichten Abschluss und Restüberdruck ist ein Eindringen von Luft in das Innere des Cores ausgeschlossen;
- ❖ Bei **kriegerischen oder terroristischen Ereignissen** wird das Core in wenigen Minuten in den Notfallbunker entleert;
- ❖ **Containment** zur doppelten Absicherung gegen Austritt von Spaltprodukten;



## Bewertung der Sicherheitsmaßnahmen

- ❖ Der geringe Gehalt an radioaktiven Spaltprodukten im Primär-Helium-Gassystem zusammen mit den Sicherheitsmaßnahmen ermöglicht ein fast vollständiges Verbleiben der radioaktiven Gasanteile innerhalb der Gesamtanlage;
- ❖ Selbst im extremsten Fall können nur geringe Mengen an Caesium 137 (<1Curie) und/oder Jod 13 aus der Anlage freigesetzt werden;
- ❖ Die radiologischen Auswirkungen derartiger Freisetzungen in der Umgebung der Anlage sind sehr gering;
- ❖ Die getroffenen konstruktiven Maßnahmen beschränken das Risiko des Betriebes nach INES-Bewertung auf max. „1“ Störung: „Abweichung von den zulässigen Bereichen für den sicheren Betrieb der Anlage ohne Gefährdung des Betriebspersonals“, sonst Stufe „0“: „keine oder sehr geringen sicherheitstechnische Bedeutung“;
- ❖ **Damit ist der Anspruch an eine katastrophenfreie Kerntechnische Anlage erfüllt.**
- ❖ Damit können diese Anlagen einen Versicherungsschutz erhalten.



## Zwischen- und Endlagerung radioaktiv belasteter Komponenten

- ❖ Alle radioaktiv belasteten Teile werden ausschließlich im Betonbunker unterhalb des Spannbetonbehälters dekontaminiert, behandelt und gelagert;
- ❖ Die BE-Beschickungsanlage wird innerhalb der Stützkonstruktion eingebaut;
- ❖ Das Volumen der abgebrannten oder beschädigten Brennelemente ist sehr gering, daher ist nur ein relativ kleiner strahlungsgesicherter Raum zur Lagerung erforderlich;
- ❖ Es wird ein speziell strahlenabgeschirmter Raum zur Lagerung von defekten ausgebauten Komponenten vorgesehen;
- ❖ Damit verbleiben alle radiologisch bestrahlten Teile innerhalb der Gesamtanlage;
- ❖ Castor-Transporte für Brennelemente und externer Transporte sonstiger „strahlender“ Komponenten sind nicht erforderlich;
- ❖ Nach Stilllegung der Gesamtanlage wird der Spannbetonbehälter zum Endlager, so wie seit 21 Jahren beim THTR-300 in Schmehausen erprobt.
- ❖ **Ein sichereres Endlager ist technisch nicht realisierbar.**



## Wirtschaftlichkeitskriterien

- ❖ Die hohen Betriebstemperaturen ermöglichen höchste thermodynamische Wirkungsgrade, der nukleare Brennstoff wird etwa um 30-40% besser ausgenutzt.
- ❖ Kraftwerke zur kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme können auch in Stadtnähe gebaut werden, mit einfacher und doppelter Zwischenüberhitzung.
- ❖ Bei Einsatz von Uran 235 und Thorium 232 kann Uran 233 als neuem spaltbaren Brennstoff erbrütet werden.
- ❖ Die erzeugte Hochtemperaturwärme kann in allen verfahrenstechnischen Prozessen als wirtschaftliche Sekundärenergie zur Minderung der Energiekosten genutzt werden.
- ❖ Die kontinuierliche Beschickung mit BE ermöglicht die Nutzung der vollen jährlichen Betriebsstunden, also 8760 h/a auch in aufeinander folgenden Jahren.
- ❖ Alle wesentlichen Komponenten sind mehrfach vorhanden. Sie können während des laufenden Betriebes repariert oder ausgetauscht werden.
- ❖ Das geringen Volumen abgebrannter BE ermöglicht deren Lagerung im Anlagenbereich. Castor Transporte für BE sind nicht erforderlich.
- ❖ Radioaktiv strahlende Teile müssen nicht mehr außerhalb der Anlage transportiert werden.
- ❖ **Diese Vorteile hat kein anderes Reaktorkonzept. Daher wird diese Technik allen anderen Anlagen wirtschaftlich überlegen sein.**

