

Die Technologie der TVHTR-Kernkraftwerke mit Kugelbrennelementen.

Strom und Wärme zur Trinkwassergewinnung aus Meerwasser und/oder Wasserstoff in Kombination mit Solaranlagen

Urban Cleve (Übersetzung ins Deutsche durch Dipl.Ing. Jochen Michels, Neuss)

Grundlegende Konstruktionsmerkmale und Betriebserfahrungen

Konstruktionsprinzipien von TVHT¹-Reaktoren

Die deutsche Entwicklung der TVHTR-Kraftwerke [4, 5, 6] wurde vor allem durch die Ideen von Prof. Dr. Rudolf Schulten initiiert. Er entwickelte diese Technologie in den 1950ern, während er bei Brown Boveri beschäftigt war. Dr. Schulten wurde CTO² bei der neuen BBC/Krupp Reaktorbau GmbH in Mannheim und später Professor und Leiter der KFA-Jülich Kernforschung [6]. Dr. Schulten sagte:

„Im Bereich der Kernenergie nimmt der AVR-Reaktor eine besondere Stellung ein. Heliumgasgekühlt, graphitmoderiert, inhärent sicher und der heißeste Reaktor weltweit. Es ist die Geschichte der einzigen rein deutschen Entwicklung der Kernkraftwerkstechnik.“

Die wichtigsten Konstruktionsmerkmale des AVR-Reaktors sind:

- Kugel-Brennelemente aus Graphit, die Spaltmaterial enthalten.
- Graphit als Hauptbaustoff für den Reflektor als Moderator.
- Ein sicheres integriertes Konzept mit Helium als Kühl-Gas
- Geschlossener primärer Heliumkreislauf im Reaktorbehälter.

Dies sind die wichtigsten Grundlagen für einen sicheren Betrieb. Ziel war der Bau eines inhärent sicheren Kernkraftwerks mit hervorragender nuklearer und konstruktiver Sicherheit [6, 19].

AVR-Kraftwerk

Die Technologie des AVR wurde von „Null“ an aufgebaut: Abbildung 1, da es keine Erfahrung mit der Konstruktion und dem Design von Komponenten gab, die in einer Heliumumgebung arbeiten.

Die komplette Neuentwicklung aller Komponenten war eine große Herausforderung und führte zu routinemäßigen Verzögerungen und Kostensteigerungen. Zusätzlich durchlief auch der TÜV³ mehrere Lernphasen und musste bessere Testmethoden für Kernkraftwerke entwickeln. Bei Kalttests unter normalen Umgebungstemperaturen und -drücken wurden alle Komponenten ausgiebig und erfolgreich getestet.

- Der Dampferzeuger, Bild 2, wurde mehrfach gebaut und während der Produktion mussten neue Testverfahren entwickelt werden. Nach seiner Fertigstellung wurde er dem weltweit ersten Drucktest mit Helium unterzogen.
- Die Absorberstäbe funktionierten zunächst hunderte Male ohne Probleme. Nach dem Einbau in den Reaktor und der Prüfung in Helium-Atmosphäre

fielen sie komplett aus. Es bedurfte umfangreicher Designverbesserungen bis sie einwandfrei funktionierten.

- Alle Komponenten des Kugel-Beschickungssystems wurden über Jahre hinweg getestet. Sie zeigten nur einige Probleme während des Betriebs. Verbesserungen konnten unter radioaktiven Bedingungen mit speziell entwickelten Geräten durchgeführt werden.
- Fast 600 Heliumventile von Zulieferern sind komplett ausgefallen und mussten neu konstruiert und unter Heliumbedingungen getestet werden. Das neue Design (von BBK) war ein großer Erfolg. Nach der Prüfung in Heliumatmosphäre wurden keine weiteren Probleme festgestellt.

So wurden alle Probleme gelöst. Damit erreichten wir während 23 Betriebsjahren eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 66,4 % und ein Maximum von 92 % pro Jahr. Die Zeiträume für die zahlreichen Experimente sind darin enthalten.

Damit wurde wahrscheinlich ein Weltrekord für ein völlig neues Reaktordesign aufgestellt.

Der Schnitt durch den AVR mit Core⁴, Graphitreflektor⁵, Hitzeschild, dem inneren Reaktorbehälter, dem biologischen Schild 1 und dem äußeren Druckbehälter ist in Abbildung 3 dargestellt.

¹ Thorium very high temperature

² Chief technology officer

³ Technischer Überwachungsverein, das aufsichtsrechtliche Unternehmen

⁴ Core ist die Bezeichnung sowohl für den lichten Innenraum des Reaktorbehälters wie auch für die Anhäufung der Brennelemente, die sich darin befinden.

⁵ Dies ist die innere Auskleidung des Druckbehälters, in dem die Kugelschüttung liegt.

Wir hatten nur ein größeres Problem, einen Vorfall nach INES 1. Eine einzige der vielen tausend Schweißnähten des Dampferzeugers war undicht. Nach mehrmonatiger Reparatur funktionierte er wieder sehr gut und mit voller Leistung. [6, 7].

Die innere Struktur des Core, Bild 4, hat einen Durchmesser von 3 m und ist 4,5 m hoch.

Das von BBK entworfene und entwickelte Brennelemente-Transportsystem [7, 8], Bild 5, mit seinen zahlreichen Komponenten funktionierte sensationell gut. In 23 Jahren Betrieb wurden nur 220 Kugeln ausgesteuert. Das sind 0,0092 Prozent der 2.400.000 bewegten Kugeln. Ein Basisdiagramm des Brennstoffkreislaufs zeigt Abbildung 6, [7, 8, 9].

Nach der Stilllegung 1989 wurde festgestellt, dass sich der gesamte Graphitinnenraum nicht um einen Millimeter verschoben hatte. Er sah aus wie neu installiert. Es konnten nur sehr kleine Anhäufungen von Graphitstaub in einigen Ecken festgestellt werden.

Nach der INES-Skala ereignete sich nur ein Vorfall der Stufe „1“, alle anderen Ereignisse hatten während 23 Betriebsjahren einen INES-Wert von „Null“ [6, 7].

- Aufgrund der hervorragenden Funktion aller De- und Remontageeinrichtungen für die Komponenten konnten Reparaturen während des Betriebs des Reaktors durchgeführt werden. Kein Mensch wurde durch Strahlung verletzt.
- Der AVR musste 1988 aus politischen Gründen abgeschaltet werden. Er war ein ausgezeichnete Testreaktor für eine Vielzahl verschiedener Brennelemente mit unterschiedlichen Zusam-

mensetzungen von Uran, Thorium und Plutonium. All diese internationalen Experimente mussten gestoppt werden, eine sehr schlechte Entscheidung für die zukünftige Entwicklung von HTR-Kraftwerken weltweit.

Damit kann bestätigt werden, dass der Betrieb des AVR-Reaktors eine einzigartige Erfolgsgeschichte war.

Der AVR-Modulreaktor

Ein AVR-Design, modifiziert mit einem integrierten Helium/He-sec-Wärmetauscher in einem einzigen Stahlbehälter, ist das am weitesten entwickelte und funktionstüchtige, vollständig getestete Design.

Modularkonzept eines kleinen Modell-HTR (SMHTR) bis 100 MWth/40 MWe.

Design des THTR-300el- Demonstrations-KKW

Die Konstruktion des THTR-300 Kraftwerks wurde 1965 begonnen, Abbildung 7. Aus dem AVR konnten keine Erfahrungen in das neue Design eingebracht werden (Bild 8).

Die Hauptunterschiede zwischen dem THTR-300 und dem AVR sind:

- Spannbeton-Druckbehälter (PCPV) anstelle von zwei Stahlbehältern (Bild 9). Die Dimension war 25 Meter im Durchmesser und 28 Meter hoch. Der PCPV wurde vor allem aus Sicherheitsgründen gewählt. Ein Modell im Maßstab 1:20 wurde mit Wasserdruck getestet. Bei einem Druck zwischen 90-120 bar traten sehr kleine Risse auf. Ein Haupttriss trat bei 190 bar auf. Nach einem Druckabfall auf 40 bar war der Behälter

wieder nahezu gasdicht. Dieser Test war die Grundlage für die Berechnung des THTR-300 PCPV [28].

- ein geschlossener innerer Kreislauf aus Heliumkühlgas zur Vermeidung von Spaltprodukten und Graphitstaub. Dies war der wichtigste Konstruktionsfaktor, um die Freisetzung von kontaminiertem Primärheliumgas oder kontaminierten Graphitstaubpartikeln zu vermeiden.
- Helium-Gasfluss von oben nach unten.
- TRISO-Kugeln als Brennelemente.

Alle anderen Komponenten wie Gebläse, Brennelementzufuhr- und Handhabungs-Komponenten, Graphitstrukturen usw. wurden sehr ähnlich wie die Komponenten des AVR konzipiert und verbessert und zeigten keine Probleme.

Neue nukleare Berechnungen der Reaktorphysik zeigten, dass der Durchmesser des Cores

mit 5,6 m zu groß war. Damit konnten die Abschaltstäbe im umgebenden Graphitreflektor die Kugeln nicht auf die beim Abschalten des Reaktors notwendigen niedrigen Temperaturen kühlen. Bis zu diesem Zeitpunkt lagen noch keine Erfahrungen mit dem Verhalten der Graphitauskleidung bei längerem Betrieb vor. Deshalb wurde beschlossen, die Abschaltstäbe direkt in das Kugelbett einzubringen,

mit dem Risiko, dass die Brennelemente zerquetscht werden. Ein alternatives Design mit einem Kugelbett-Ringcore (PBRC) (Bild 10)[4] konnte nicht gewählt werden, da keine Erfahrung mit dem Verhalten der Graphitstruktur im AVR vorhanden war. Man konnte das Einbringen von Stäben in das Kugelbett unter Betriebsbedingungen nicht prüfen. Diese Entscheidung wurde später, während der Inbetriebnahme des Kraftwerks THTR-300, als schrecklicher Fehler erkannt. Es bestand zwar kein nukleares Risiko, aber 0,6 % der Kugeln brachen. Das waren viel mehr als erwartet nach den Ergebnissen des AVR mit 0,0092 %.

Alle betrieblichen Schwierigkeiten mit dem THTR-300 beruhten auf diesem einzigartigen Problem.

Tabelle 1[14] zeigt die Unterschiede zwischen den berechneten Auslegungsparemtern und den tatsächlichen Betriebsparametern. Kleinere Unterschiede können nicht

Anlagenparameter	Einheiten	Berechnete Werte	Messgrößen
Reaktorwärmeleistung	MW	761.65	763.5
Umlaufgeschwindigkeit	U/min	5.369	5.361
Heliumdurchfluss	kg/s	297	293.9
SG Eingang He Temperatur	°C	750	750.4
SG Ausgang He Temperatur	°C	247	245.9
Speisewassermenge	kg/s	254	253.9
Frischdampf Temperatur	°C	545	544.3
Frischdampfdruck	bar	186	184.9
Nachwärmefluss	kg/s	247,3	237.9
Nachwärmtemperatur	°C	535	532.3
Nachwärmedruck	bar	46.3	47.5
Generatorleistung	MWe	305.9	306
Elektrische Nettoleistung	MWe	295.5	295.6
Netto-Wärmeleistung	kcal/kWh	2.145	2.134

Tab. 1 THTR-300, Vergleich der wichtigsten Anlagenparameter.

berechnet werden und so wurde festgestellt, dass der THTR-300, ohne das Problem der zerquetschten Kugeln, mit gleich hohen Betriebszeiten wie der AVR betrieben worden wäre.

Heute kann festgestellt werden, dass die Ring-Core-Lösung all diese Schwierigkeiten vermieden hätte. Die Stabilität der Graphitstruktur des AVR, die nach dem Abschalten des AVR festgestellt wurde, bewies, dass diese Konstruktion die Grundlage für einen PBRC sein könnte. 1965 wurde sie patentiert [4].

Die positiven Ergebnisse des Betriebs des THTR-300 sind unter anderen [11, 12, 13]:

- HTR-Kraftwerke können wie konventionelle Kraftwerke betrieben und an das Stromnetz angeschlossen werden.
- Der Bruch von Kugeln erhöht nicht die Radioaktivität des primären Helium-Kühlgases.
- Der thermodynamische Wirkungsgrad ist so hoch wie in konventionellen Kraftwerken.
- Die nukleare und radiologische Sicherheit von Mensch und Umwelt ist ausgezeichnet.

- Keine Strahlenschäden traten auf, weder im AVR noch im THTR-300.
- Das kontaminierte Primärheliumgas und der Graphitstaub sind im PCPV sicher umschlossen.
- Der Spannbeton-Druckbehälter PCPV zeigte sich als hervorragende Sicherheitsbarriere gegen Strahlung, Flugzeugabstürze, Terroranschläge und Erdbeben bis in die höchsten Größenordnungen etc.

Die Kugelbrennelemente Konstruktions- und Betriebserfahrungen mit Kugelbrennelementen

Die wichtigsten Komponenten eines Kernkraftwerks sind die Brennelemente. Sie enthalten das spaltbare Material für die Energieerzeugung. Je robuster die Brennelemente, desto sicherer ist das Kernkraftwerk. Das Hauptmaterial eines Kugelbrennelements ist Graphit. Die äussere Schale hat einen Durchmesser von 60 mm,

während der Durchmesser der inneren, Brennstoff enthaltenden, Matrix 50 mm[14] beträgt.

Abbildung 11 zeigt den Unterschied zwischen der ersten Idee einer Kugel mit unbeschichtetem Brennstoff und dem aktuellen Typ. Der Innendurchmesser der beschichteten Brennstoffteilchen (Partikel) beträgt 0,5 mm. In die innere Graphitmatrix sind ca. 15.000 beschichtete Partikel (cp) kugelförmig eingebettet und enthalten den Brennstoff (Abbildung 12). Der Brennstoffkern ist in drei Schichten aus sehr hartem und druckfestem PyC-/SiC-/PyC eingekapselt und gasdicht (Bild 13). Dies sind die „TRISO“-Brennelemente. Mit Beschichtung hat jedes Teilchen einen Durchmesser von 0,9 mm.

Ohne Beschichtung wurde die Radioaktivität des primären Heliumgases im AVR zunächst auf 10^7 Curie berechnet. Deshalb wurde der AVR mit zwei Druckbehältern konzipiert. Alle Rohrleitungen und heliumbetriebenen Komponenten wurden mit sauberem Heliumgas umströmt, um das Eindringen von primär kontaminiertem Heliumgas in den Reaktorbehälter zu verhindern. Diese Brennelemente wurden zunächst nicht verwendet.

Die neu entwickelten TRISO-Elemente vermeiden Spalt- und Zerfallsprodukte, die die Quelle gefährlicher Radioaktivität sind. Drei Schichten bilden ein Containment für jedes cp und halten alle Spaltprodukte sicher eingeschlossen. Die Schichten bleiben bis 1.800 °C gasdicht und korrodieren auch unter hohem Druck nicht.

Wie bereits erwähnt, wurde der AVR zunächst mit einer Helium-Primärgasaktivität von 10^7 Curie entwickelt. Nach der Entwicklung der Kugeln mit beschichteten Partikeln wurde die primäre Heliumgasaktivität nur bei 360 Curie [3] gemessen, um einen Faktor von 0,000036 niedriger. Sie haben sich im Langzeitbetrieb des AVR als zuverlässige Brennelemente bewährt und haben sehr gute Eigenschaften gegenüber allen Brennelementen in anderen Kernkraftwerken.

Neue Kugeln können ohne Strahlenrisiko gelagert und behandelt werden (Abbildung 14). Abgestrahlte, abgebrannte Kugeln oder Graphitkugeln werden (Abbildung 15) hauptsächlich in speziell konstruierten Behältern oder Lagerräumen im Untergeschoss des Reaktorgebäudes gelagert. Es ist keine Kühlung erforderlich und sie können über einen längeren Zeitraum gelagert werden, ohne dass die Gefahr einer Kontamination oder Strahlung der Umgebung oder des Personals besteht [15,16,17].

Brüten von spaltbarem Uran-233 mit Thorium-232

In der Erdoberfläche befindet sich ausreichend Thorium zur Erzeugung von Strom und Wärme durch Kernkraftwerke für sehr lange Zeit. [20, 21, 22] Spaltbarer Brennstoff muss jedoch aus dem Thorium hergestellt werden. Dies ist möglich, indem man ^{232}Th zu ^{233}Th mit langsamen Neutronen erbrütet, was zunächst zu Protactinium (^{233}Pa) führt, das zu spaltbarem $^{233}\text{Uran}$ zerfällt. Dieses Verfahren eröffnet für ein THTR-Kraftwerk eine sehr gute Möglichkeit.

Die beschichteten Brennstoffkörnchen können Uran 235/238, Plutonium 238/242 oder Thorium 232[15, 17, 18] enthalten. Diese Brennstoffe können in der Kugelmatrix kombiniert und gemeinsam verbrannt werden. Nach dem Entladen des Core kann jede einzelne Kugel auf ihren Abbrandgrad gemessen werden. In HTR-Kugelbettreaktoren kann die Entsorgung von Pu umfassend kontrolliert und jede Kugel individuell behandelt werden. Eine sehr detaillierte und vollständige Kontrolle der Pu-Entsorgung ist gewährleistet und durch eine Überprüfung auf Einhaltung des Nicht-Verbreitungs-Vertrages möglich.

Stilllegung und Wiederaufbereitung von Brennelementen und beschichteten Partikeln

Das Papier der niederländischen Forschungsstelle der Europäischen Gemeinschaft, JRC, beschreibt die Ergebnisse eines Experiments: „Ein

Hochspannungs Verfahren am Prozessbeginn zur Abfallminimierung und Wiederaufarbeitung von beschichtetem Partikelbrennstoff für Hochtemperaturreaktoren.“ [10] Dieses Verfahren wird für die Abtrennung der beschichteten Körnchen aus der Brennstoffmatrix vorgeschlagen und ermöglicht die Wiederaufarbeitung des abgebrannten Brennstoffes durch Trennung der Beschichtungen von den Körnchen. Die Brennstoffkörnchen bleiben intakt wie es in Experimenten gem. Abbildung 16, 17 und 18 erfolgreich demonstriert wurde. Die Eigenschaften der von NUKEM hergestellten beschichteten Brennstoffkerne und der kompletten Kugeln sind in Tabelle 2 dargestellt.

Dieses von dem EU-JRC-Petten vorgeschlagene und untersuchte Verfahren sieht die vollständige Entfernung der Deckschichten vor, um den Brennstoff für die weitere Aufarbeitung und Herstellung neuer Brennstoffkörnchen verwendbar zu machen.

Kugelbett Ring-Core Design für sehr große TVHT-Reaktoren

Wichtige Erkenntnisse wurden aus dem Langzeitbetrieb des AVR und dem relativ kurzen drei Jahres-Betrieb des THTR-300 gewonnen.

Beschichtete Partikel

Partikelcharge HT 354-383
Kernzusammensetzung UO₂
Kerndurchmesser in Mikrometern 501
Anreicherung [U-235 Gew.-%] 16. 75
Schichtdicke in Mikrometern

- Puffer 92
 - Innere PyC 38
 - SiC 33
 - Äußere PyC 41
- Partikeldurchmesser 909

Kugel

Schwermetallbelastung [g/Kugel] 6 0
U-235 Inhalt [g/ Kugel] 1. 00
Anzahl der beschichteten Partikel pro Kugel 9.560
Volumenverpackung Bruch [%] 6,2
Defekte SiC-Schichten [U/U_{tot}] 7. 8 x 10⁻⁶
Matrixgraphit Sorte A3-3
Matrixdichte [kg/m³] 1.750
Temp. bei Endwärmebehandlung[°C] 1.900

Tab 2. Typische Eigenschaften der von NUKEM hergestellten beschichteten Partikel und Kugeln.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesen beiden Kraftwerken sind für Planung und Bau künftiger großer kommerzieller V/ HTR-Kraftwerke erforderlich. Die Erfahrungen mit den Graphitstrukturen sind hervorragend und darauf beruhende neue PBRC-Konstruktionen können keine Probleme verursachen. Der PCPV [4] des THTR-300 wurde ohne Vorkenntnisse entwickelt und war eine erste Lösung.

Zusammen mit der verbesserten Herstellung des Graphits durch Zulieferer und den umfangreichen Kenntnissen aus früheren Konstruktionen ist es möglich, aus Graphit Core und Reflektoren mit hoher Langzeitstabilität zu konstruieren (Bild 4). Die Inspektion des AVR-Core zeigte keine Verschiebung der Graphitblöcke nach mehr als 23 Jahren Betrieb. Graphit als geeigneter Werkstoff für HT-Reaktoren zeigte gute Fortschritte durch verbesserte Entwicklung.

Im Gegensatz zum THTR-300 sind die Absorberstäbe im auskleidenden Graphitmoderator installiert, um Schäden an den Graphitkugeln zu vermeiden. Dies war ein großes Problem mit dem THTR-300 (Abbildung 19).

Der Core sollte klein und nicht zu hoch sein. Dies ist wichtig für niedrigere Abklingtemperaturen bei einem Kühlmittelverlust (Abbildung 20). Die Abmessungen eines Ring Core können optimiert werden durch:

- Unterschied zwischen Innen- und Außendurchmesser,
- Volumen des Core,
- Höhe der Brennstoffzone,
- Leistungsdichte der Brennstoffzone,
- maximale Heliumgastemperatur,
- optimalen Fluss der Kugeln durch den Core.

Diese sechs Faktoren können hinsichtlich der maximalen Abklingtemperatur optimiert werden. Diese darf bei Kühlverlust (loca) und/oder Druckabfall (lopa) 1.600 °C nicht

überschreiten, denn diese deutet auf einen MC⁶-Unfall hindeutet.

Die möglichen Hauptmerkmale für dieses neue Konzept können sein:

- TRISO Kugeln als Brennelemente.
- Verwendung von U-235 zusammen mit Th-232 zum Erbrüten von U-233 und PU [20, 21].
- Ein vorgespannter Betondruckbehälter, der das Primärhelium vollständig und extrem gegen alle möglichen kritischen Ereignisse, Terroranschläge und Störungen innerhalb und außerhalb des Triebwerks schützt und absolut sicher gegen Cyber-Angriffe ist [26].
- Die Neukonstruktion eines Kugelbett-Cores in Ringform (Bild 10) [4] mit mehreren Abzugvorrichtungen für die Kugeln unterhalb des Core. Ein Vorteil dieser Konstruktion ist der verbesserte und gleichmäßigere bzw. symmetrischere Durchfluss von Kugeln durch den Core mit höherem möglichem Abbrand des Brennstoffes und verbesserter symmetrischer Kühlung des gesamten Kugelbettes [7].
- Abschalt- und Regelstäbe nur in Nischen des Graphitreflektors,
- He_{-prim}/He_{-sec} Wärmetauscher im primären Heliumkreislauf des PCPV zur Vermeidung von Wassereintritt [4].
- nur ein einziges Transportsystem zur Hochwärmeversorgung der verschiedenen Sekundäranlagen, denn dies reduziert die Kosten und vereinfacht die Auslegung des Druckbehälters.
- das reine Sekundärhelium befindet sich in den Rohren und hat einen etwas höheren Druck gegen den integrierten Primärhelium-kreislauf. Im Falle eines Lecks zwischen den beiden Heliumführungen wird das eindringende reine Sekundärhelium kontaminiert. Es wird dann durch die Heliumreinigungsanlage

dekontaminiert und in den Rein-helium-Kreis zurückgeführt.

- Diese Konstruktion ermöglicht es, den He/He-Wärmetauscher dicht in den Druckbehälter einzubauen. Mehrere verschiedene Austauschieranlagen wurden gebaut, ohne dass sie, wie in der Praxis des THTR-300 üblich, aus dem Behälter entnommen werden konnten.
- Mit dieser Konstruktion gibt es außerhalb des Reaktorbehälters keinerlei Kontamination. Alle möglichen industriellen Prozesse können ohne Gefahr radioaktiver Belastung in ganz normaler konventioneller Konstruktion angeschlossen werden.
- Diese Nuklearanlage macht es möglich, sämtliche nachfolgenden Produktionsanlagen in unmittelbarer Nähe des Reaktors zu betreiben.
- Das Heliumgas strömt von unten nach oben. Die Erfahrung aus dem AVR zeigt, dass diese Lösung gegenüber der umgekehrten Konstruktion beim THTR-300 wichtige Vorteile besitzt.

⁶ Melting Core - Kernschmelze

Eines der wichtigsten Merkmale dieser Konstruktion ist der kleine Core, der dem Core des AVR sehr ähnlich ist. Die Ergebnisse der MCA⁷-Tests mit Temperaturanstieg durch Nachzerfallswärme (Bild 20) können berücksichtigt werden. So ist es möglich, die maximale Primärhelium-Temperatur auf höchstmögliche Grade zu steigern, zum Beispiel bis auf 1.100 °C. Die Grenze wird dann nur durch die maximal zulässige Temperatur der Metallrohre des He/He Wärmetauschers im PCPV gegeben.

Auslegung wichtiger Komponenten für einen neuen 600 MWel/ 1.500 MWth Kugelhaufenreaktor und mögliche Risiken

Der Spannbeton-Druckbehälter. (PCPV)

Der Reaktorbehälter ist unter Sicherheitsaspekten die wichtigste Komponente jedes Kernkraftwerks. Die Berechnung für größere Cores für Kugelhaufenreaktoren ergab, dass der Core-Durchmesser für eine Stahl-Konstruktion zu groß ist. Der Behälter kann daher nicht aus metallischen Werkstoffen hergestellt werden. Es wurde entschieden, andere Baumaterialien für ein großes HTR-Kugelbett mit großem Volumen und hohem Druck zu suchen.

Zwei Lösungen wurden in Betracht gezogen,

- ein vorgespannter Gusseisenbehälter und
- ein vorgespannter Betondruckbehälter.

Der PCPV wurde wegen seiner herausragenden Sicherheitsvorteile gegenüber dem Gusseisen-

behälter gewählt. Mehrere Sicherheitsbedingungen konnten mit einem vorgespannten Gussbehälter nicht erreicht werden. Auch hätte die Konstruktion einige grundsätzliche Probleme mit sich gebracht.

Diese HTR-Konstruktion mit Beton war von Grund auf neu, ohne Vorkenntnisse. Der Betriebsdruck des Heliumgases wurde mit 40 bar berechnet. Es wurden Tests mit einem Modell im Maßstab 1:20 durchgeführt. Das Modell wurde mit warmem Wasser unter Druck gesetzt. Bei einem Druck von 90-120 bar begannen sich sehr kleine Risse zu bilden. Der Haupttriss trat bei 190 bar auf.

Nach Druckabsenkung auf 40 bar war der Behälter wieder nahezu gasdicht. Die Spannkabel zogen den Beton zusammen [4] so dass sich die Risse schlossen. Diese Ergebnisse waren sehr wichtig, da dieser Test bewies, dass bei einem Crash kein Sauerstoff in den Behälter eindringen kann. Während der gesamten Testphase wurden alle notwendigen Faktoren gemessen und als Basis für neue Programme zur Berechnung des PCPV für den THTR-300 verwendet.

Entwicklung, Konstruktion und Montage des Spannbeton-Druckbehälters THTR-300

Abbildung 21 zeigt den Querschnitt des Reaktors [26]. Im Inneren befinden sich der Core, Graphit- und Kohlesteinstrukturen, Hitzeschild, sechs Dampferzeuger, Gebläse, Abschaltstäbe, Messgeräte und Isolierung mit Auskleidung und zugehörigem Kühlsystem sowie die Durchführungen für die

Dampferzeuger. Die Löcher im Beton sind durch Stahlschichten mit Stahlplatten verstärkt (Bild 22). Insgesamt gibt es 135 Durchführungen. Die größte mit 2,25 m ist für den Ausbau der Dampferzeuger vorgesehen. Alle Durchführungen sind von Spannkabeln umgeben und brachten keine Designprobleme. Die Bauphase ist in den Abbildungen 23, 24 und 25 dargestellt.

Die Ergebnisse der Druckprüfung

Abbildung 26 zeigt die Genauigkeit zwischen den gemessenen und berechneten Faktoren. Die Druckprüfungen wurden mit Stickstoff und Helium durchgeführt, um eine genaue Messung zu gewährleisten.

Der Auslegungsdruck betrug 39,2 bar und der höchstmögliche Druck bei einem Unfall wurde mit 46,1 bar berechnet. Der Test erreichte den berechneten und höchstmöglichen Druck, (wie vom TÜV verlangt) ohne Probleme [14].

⁷ maximum credible accident – etwa entsprechend GAU- grösster anzunehmender Unfall

Dadurch ist sichergestellt, dass die Auslegungskennnisse und Berechnungsprogramme ausreichen, um größere PCPV bis zu einer höchstmöglichen Leistung von 4.000 MWth zu berechnen.

Sicherheitskriterien

Die wichtigsten Sicherheitskriterien [19] eines PCPV sind Sicherheit gegen:

- Flugzeugabstürze, Terroranschläge, politische Unruhen.
- Lufteintritt.
- Verlust von verunreinigtem Graphitstaub.
- alle Arten von Stürzen und Rissen.
- Erdbeben bis zum höchsten Grad.

und innerhalb des inneren He/He Wärmetauschers gegen Eindringen von:

- Wasser.
- Tritium.

Graphitreflektor und Keramikstruktur

Die umfangreichen Konstruktionserfahrungen mit beiden Reaktoren wird zu den besten technischen Lösungen führen. Die SGL Group ist ein sehr wichtiger Lieferant für Graphit- und Kohlesteine. Sie ist in der Lage, sehr zuverlässige Strukturen zu konstruieren, Bild 4.

Core- und Helium-Gasstrom

Die Erfahrung am AVR zeigt, dass die Strömung von unten nach oben einige Vorteile hat. Der Temperaturbereich des Helium beträgt 230 °C bis 280 °C. Die Eintrittstemperatur reicht von 750 °C bis 950 °C und kann maximal 1.100 °C erreichen. Massgebend sind hier die Beanspruchung der Metallwerkstoffe und die Festigkeit des Rohrwerkstoffes.

Die Gestaltung der Wand des Graphitreflektors ist sehr wichtig für einen guten und symmetrischen Kugelfluss durch den Core. Die besten und gründlichen Testergebnisse der für den AVR konzipierten Wand wurden vorher im Prüflabor der BBC/ Krupp erzielt.[1] Abbildung 27. Diese Konstruktion führt zu einer sehr symmetrischen Gasströmung durch das Kugelbett von unten nach oben und damit zu einer sehr guten symmetrischen Kühlung aller Kugeln quer über das ganze Bett. Die Berechnungsfaktoren für diese Konstruktion wurden im BBC/Krupp-Labor entwickelt und zeigten hervorragende Ergebnisse [6, 7].

Der Kugelfluss im AVR war viel besser als beim THTR-300. Ursache war der größere Durchmesser des THTR-Core. Zu große Durchmesser führen zu sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Kugel-Stroms - bis zu einem Faktor von 10 zwischen Wand und Bettmitte [7, 14]. Sehr hohe Abbrandresultate des Brennstoffes können bei guter symmetrischer Kugelströmung erzielt werden.

Helium-pr/He-sec-Wärmetauscher

- Die Berechnungen können auf den Ergebnissen der vom FZ-Jülich mit den Prüfgeräten durchgeführten Prüfungen aufbauen (Bild 28) [36].
- Die Ergebnisse der im GKM Mannheim durchgeführten Hochtemperatur-Dampfkeselversuche mit Dampftemperaturen von 600 °C können berücksichtigt werden.
- Das sekundäre Helium soll einen höheren Druck haben als der primäre Heliumkreislauf. Keine Radioaktivität kann den Sekundärteil des Kraftwerks verschmutzen.

- Die Fertigung erfolgt analog zur Konstruktion, die sich im THTR-300 mit den Dampferzeugern bewährt hat (Bild 29).

Die Heliumgebläse

Die Gebläse im AVR und im THTR-300 zeigten keinerlei Probleme. Eine Aufstockung auf höhere Kapazitäten ist problemlos möglich. Sie sollten auch dann ölgeschmiert sein (Abbildung 30).

Die Abschalt- und Regelstäbe

- Eine identische Konstruktion der THTR-300-Regelstäbe kann verwendet werden, es werden nur mehr Teile benötigt (Bild 31).

Der Brennelementkreislauf

- Die Erfahrung mit der AVR-Installation während 23 Jahren Betrieb ist hervorragend [5, 6, 8].

Eine Änderung oder Vergrößerung der Komponenten ist nicht erforderlich. Mehrere Beschicker werden parallel betrieben. Diese damals von BBC/Krupp entwickelten Komponenten können ohne Änderung der Konstruktion verwendet werden, Bild 5.

Die Helium-Reinigungsanlage

- Aufgabe der Helium-Reinigungsanlage ist es, das Heliumgas des Primärkreises von Verunreinigungen wie festem Graphitstaub und den radioaktiven chemischen Elementen Krypton, Xenon, Argon und Tritium zu reinigen. Eine detaillierte Beschreibung ist in ATW 5/1966[23] veröffentlicht.

Sicherheitssysteme und MCA-Tests

Der AVR ist das weltweit einzige Kernkraftwerk mit zweimaligem MCA-Test [4, 5, 19].

Der erste wurde im Frühjahr 1967 während der Inbetriebnahme durchgeführt. Wie erwähnt, gab es viele offene Fragen zum unbekanntem Verhalten wichtiger Komponenten, vor allem der Absorberstäbe. Mit dem TÜV war vereinbart, dass ein MCA-Test die kerntechnische Sicherheit und das gute Verhalten all dieser Komponenten nachweisen soll.

Bei höchster Heliumgastemperatur von 850 °C und voller Leistung von 46 MWth wurden die Gebläse durch Schnellstopp abgeschaltet. Das gesamte Kraftwerk war ohne Strom, auch die Notstrom-Dieselmotoren waren außer Betrieb und die Absorberstäbe waren blockiert. Nur die Kerntemperaturmessung war in Funktion. Nach dem Stopp bewegte sich die durch Nachzerfall erzeugte Temperatur langsam auf ca. 1.000 °C zu. 3] Dann sank die Temperatur in den nächsten Tagen auf normale Werte. Einige Tage später haben wir das komplette Kraftwerk problemlos wieder in Betrieb genommen.[4].

Nach diesem Test wurde vom TÜV die Vollgenehmigung für das fertiggestellte Kraftwerk erteilt.

Ein zweites Mal wurde der Test 1976 durchgeführt. [6] Diesmal konnten alle Instrumente berücksichtigt und alle Daten zur Messung des Temperaturverlaufs durch die Simulation eines Kühlmittelverlustes herangezogen werden, um ein Berechnungsprogramm für einen solchen zukünftigen Fall zu entwickeln (Abbildung 20).

Diese beiden weltweit ersten Experimente waren die Simulation eines Worst-Case-Szenarios, eines MCA, des bis dato einzigen Tests in Kernkraftwerken.

Wir wussten genau, dass es kein nukleares Risiko gab, da die Radioaktivität des primären Heliumgases sehr gering war. Die beschichteten Partikel haben ihre Funktion sehr gut erfüllt.

Ein ähnliches Experiment wurde 1986 in Tschernobyl durchgeführt. Dort war der Brennstoff nicht beschichtet und der Reaktor nicht inhärent sicher. Das Ergebnis ist bekannt.

Kühlmittelverlust war auch der Grund für den MCA in Fukushima, auch hier war der Brennstoff nicht beschichtet.

Dies zeigt die Vorteile zuverlässiger, beschichteter Kugelbrennelemente bei Unfällen gegenüber anderen Kernkraftwerkskonzepten – ein gewaltiger Unterschied.

Verglichen mit der ursprünglich berechneten radioaktiven Belastung für das AVR-Kraftwerk von 10^7 Curie betrug die gemessene Radioaktivität des AVR im Betrieb mit beschichteten Partikeln 360 Curie. Der daraus resultierende Berechnungsfaktor ergibt sich zu 0,000036.

Mit dem Chinesischen Experimental Reaktor HTR-10 MWth wurde 2007 der Kühlmittelverlust ein weiteres Mal mit TRISO-Kugelbrennelementen erfolgreich getestet. Der Film dazu findet sich auf Youtube unter <https://www.youtube.com/watch?v=4A1uoJ1Z5iAt>.

Darüber hinaus werden folgende zusätzliche Anlagen installiert, um den Reaktor für jedem Fall einer schweren Gefahr abzusichern [19]:

- Dieselmotorbetriebene Generatoren für elektrische Reserveleistung.
- Schnelle Entnahme der Kugeln aus dem Core in ein spezielles, sicheres Lager.
- Abschalt Stäbe im Graphitreflektor.
- Gasdichte Ausführung des Reaktorgebäudes als Containment.
- Wasserdichter Unterbau.

Zusammenfassung und Sicherheitsschlussfolgerungen:

- Innärent sicheres Design.
- Kernschmelze ist nicht möglich.
- Gasdichter integrierter Heliumkreislauf.
- Sicher gegen Wassereintritt.
- Sicher gegen Luftzutritt.
- Sicher gegen schwere Erdbeben.
- Das PCPV ist sicher gegen Terrorismus und andere schwere Angriffe und hat sich als hervorragender Einschluss erwiesen.
- Das PCPV in Hamm hat sich nach der Stilllegung seit über 25 Jahren als hervorragender Bunker für die Langzeitlagerung aller kontaminierten Komponenten bewährt.

- Keine Graphitbrand möglich.
- Dauerkühlung ist weder für neue Brennelemente und Kugeln im Core erforderlich, noch für Castor-Behälter und Lager.

„Das sicherste Kernkraftwerk ist das wirtschaftlichste Kraftwerk.“

Die sekundären elektrischen und/oder wärmeerzeugenden Teile eines HTR-Kraftwerks

Nukleare Sicherheitsvorschriften

Nukleare Sicherheitsvorschriften sind weder für das angeschlossene Kraftwerk [24, 25, 26, 27] noch für jedwede andere Industrieanlage erforderlich, z.B. Chemieanlagen mit hohem Wärmebedarf.

In 23 Jahren Betrieb gab es nicht die geringste radioaktive Verunreinigung im Turbinenteil des AVR. Nach der Stilllegung des THTR-300 wurde das komplette Sekundärteil verkauft und ist in einem konventionellen Kraftwerk mit Anschluss an eine normale Dampfkesselanlage noch in Betrieb.

Der Sekundärhelium-Dampferzeuger

Das sekundäre Helium aus dem He/He-Wärmetauscher führt zu einem neuen Design des Helium-Dampferzeugers. Dieser Generator erzeugt den Dampf für den Turbosatz zur Stromerzeugung. Die Dampfdaten sind konventionell mit einem Dampfdruck von 220 bar und 525 °C und einer Zwischenerwärmung auf 525 °C, falls erforderlich.

Die Temperatur des sekundären Heliums wird entsprechend dem he/he-Wärmetauscher im primären Heliumkreislauf berechnet. Diese Temperaturen sind abhängig von der Kubatur: je höher die Temperatur, desto kleiner der Wärmetauscher - eine wirtschaftliche Frage.

Das Dampfturbinen-Generator-Set und die Zusatzkomponenten

Konstruktionswechsel oder Modifikationen sind nicht erforderlich [29]. Die gleiche Konstruktion wie in konventionellen Kraftwerken kann entwickelt und eingebaut werden.

Das heißt, eine konventionelle Turbine mit Temperatureintritt von 525 °C, 220 bar Dampfdruck, ein- bis zweimaliger Zwischenerwärmung bis 525 °C, mit wassergekühltem Kondensator und Generator. Das aus dem Kondensator austretende Wasser wird durch mehrere Wärmetauscher gepumpt, die durch den aus der Turbine entnommenen Dampf gespeist werden. Dies ist so konventionell wie in herkömmlichen Kraft-

werken. Alle Komponenten und Installationen des Sekundärteils können wie in normalen konventionellen Kraftwerken ausgeführt werden. Es gibt keinen Unterschied im Design.

Die Meerwasserentsalzungsanlage Überblick

Die Meerwasserentsalzungsanlage kann mit erprobten Komponenten [30, 31, 32] installiert werden. Diese bestehen aus der Seewasser-Vorreinigungsanlage, Bild 32, und den folgenden verschiedenen Wärmetauschern zur Erwärmung des Wassers bis zur Verdampfung. Das destillierte Wasser ist frei von festen Partikeln und kann als Trinkwasser oder für viele andere Zwecke verwendet werden. Das Restsalz, die Sole und weitere Feststoffe können verkauft oder abgelagert werden.

Eine Solaranlage kann genutzt werden, um bei Sonnenschein die für die Turbine notwendige Wärme zu reduzieren. Die im Coreteil erzeugte Wärme kann nahezu vollständig mit höchster thermodynamischer Effizienz genutzt werden.

Turbinenkondensator

Der Kondensator der Turbine, Bild 33, ist die erste Stufe zur Erwärmung des Meerwassers. Seewasserbeständige Rohre sind im Kondensator erforderlich. Die Kühlwassermenge, der Temperaturanstieg und der Verflüssigerdruck müssen wirtschaftlich optimiert werden. Der Wirkungsgrad des thermodynamischen Prozesses muss berechnet werden. Normalerweise wird der Temperaturanstieg im Verflüssiger mit $5^{\circ}\text{--}10^{\circ}\text{C}$ berechnet. Auch die Kühlwassermenge kann variieren, bei einer 600 MWel-Anlage zwischen 20.000 - 40.000 m³ / Stunde. Ist die benötigte Kühlwassermenge für die Entsalzungsanlage zu hoch, kann das Wasser wieder ins Meer zurückgeleitet werden (Abbildung 33).

Solaranlage

Eine konventionelle Solaranlage, Bild 34, kann installiert werden. Die Sonnenenergie ist abhängig von der Sonneneinstrahlung, die hauptsächlich von der Tages- und

Jahreszeit und den Umweltbedingungen abhängt (Abbildung 35). Die Wärme aus der Solaranlage muss als zweite Heizstufe zum Wärmetauscher transportiert werden. Dieser Kreislauf ermöglicht es, den aus der Turbine abgezogenen Dampf zu reduzieren. Der sichere Dampf kann zur zusätzlichen Erzeugung von elektrischer Energie im Niederdruckteil der Turbine genutzt werden, indem der Dampf bis zum Verflüssigerdruck expandiert wird. Die Solaranlage kann Strom auch indirekt produzieren.

Entsalzungsanlage

Bekannte Meerwasserentsalzungsanlagen können als Destillationsverfahren und als MSF (Multi-Stage-Flash)-Anlage installiert werden (Bild 36). Das vorgewärmte Meerwasser wird mit dem aus der Turbine abgezogenen Dampf auf eine Temperatur von 90°C bis 135°C gebracht (1,0-1,5 bar). Anschließend strömt das Meerwasser mit wirtschaftlich optimierter Stufenzahl in die Verdampferkammern. Das Destillat kann dann als Trinkwasser verwendet werden. Mit nahezu gleicher Technik funktioniert das MED-Verfahren (Multi-Effekt-Destillation) (Abbildung 37). Soweit erforderlich, müssen Chemikalien zugesetzt werden, dies hängt von der Qualität des Meerwassers ab.

Eine wirtschaftliche Anlagenoptimierung soll durchgeführt werden, um das beste Verfahren auszuwählen.

Die Sole mit Chemikalien, Salz und anderen festen Bestandteilen des Meerwassers wird verdampft. Um die Feststoffpartikel zu trocknen, gibt es mehrere Möglichkeiten: durch die Sonne direkt, durch Sonnenwärme oder durch Niederdruckdampf aus der Turbine. Die festen Teile werden getrocknet und stabilisiert. Dann können sie verkauft oder gelagert werden.

Es sollte eine Analyse durchgeführt werden, die den Einfluss verschiedener Anlagenkonzepte, Be-

triebsparameter und Umgebungsbedingungen auf den Wirkungsgrad und die Kosten der Anlage sowie deren thermodynamischen Wirkungsgrad aufzeigt.

Vorteile der Erzeugung von Strom und Wasser

- Vorgereinigtes Meerwasser als Kühlung für den Turbokondensator ermöglicht es, diesen Prozess ohne oder mit kleineren Kühltürme zu betreiben. Die gesamte Restwärme aus dem thermodynamischen Prozess zur Stromerzeugung, die normalerweise in Kühltürmen abgeführt wird, nutzt man in der ersten Stufe zur Vorwärmung des Meerwassers.
- Der aus der Turbine entnommene Niederdruckdampf speist die Hochdruckleitung der Turbine zur Stromerzeugung und die Restwärme des Dampfes wird dann im Verdampfungsprozess für die Entsalzungsanlage genutzt.
- Der thermodynamische Wirkungsgrad der kombinierten Prozesse kann nahezu 100 % erreichen.
- Die kombinierte Beschickung der Verdampfer mit Dampf aus der Turbine und mit Wärme aus der Solaranlage ermöglicht es, die Verdampfer der Entsalzungsanlage bis zu 8.760 Stunden pro Jahr zu betreiben. Das bedeutet fast 100 % Betriebszeit für diese hohen Investitionskosten.
- Die Solaranlage ersetzt den entnommenen Dampf aus der Turbine. Ausserdem kann Strom indirekt erzeugt werden.

- Die abschließende Verdampfung und Trocknung der Sole kann mit Solarthermie, einem sehr wirtschaftlichen Verfahren, durchgeführt werden.
- Das produzierte Wasser kann gesammelt und gespeichert werden. Beide Verfahren können getrennt und alternativ je nach betrieblichen Anforderungen als Haupt- oder Nebenprodukt hergestellt werden.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Hauptkonstruktionsprinzipien großer VHTR-Kraftwerke: Zukünftige Konstruktionen von VHT-Reaktoren müssen, meist aus Sicherheitsgründen, folgende Konstruktionselemente aufweisen[38]:

- Kugeln mit TRISO beschichteten Partikeln.
- Inhärent sicheres Design, keine Kernschmelze möglich.
- Gasdicht geschlossener primärer Heliumkreislauf in einem Druckbehälter.
- Spannbeton-Druckbehälter.
- Helium_{primär}-/Helium_{secundär}-Wärmetauscher im Primärkreislauf.
- Kugelbett-Ringcore (PBRC).
- Kleine Coreabmessungen.
- Mehrere Abzüge für Kugeln.
- Sicherheit gegen alle möglichen gefährlichen Ereignisse, extern und intern.
- Sicher gegen alle Arten von Terroranschlägen, Cyber-Angriffen, Flugzeugabstürzen und ähnlichen Bedrohungen.
- Erdbeben hoher Stärke.
- Höchster Sicherheitsstandard.

Wirtschaftliche Vorteile:

- Sehr hohe primäre Heliumgastemperaturen.
- Keine Abschaltung bei Brennelementwechsel und Transport.
- Thermodynamischer Wirkungsgrad so hoch wie in fossilen Kraftwerken.
- Ein- bis zweimalige Zwischenheizung möglich.
- Sehr hoher Abbrand von Kernmaterial.
- Verwendung von ²³²Thorium in Kombination mit ²³⁵Uran zum Erbrüten von ²³³Uran.
- Nützliche Vernichtung von Plutonium, einschließlich Waffenplutonium.
- Zielerreichen des Nichtverbreitungsvertrags (NVV).

- Sichere Lagerung des gesamten strahlenden Materials.
- Sichere und einfache Lagerung von radioaktiven Stoffen.

(V)HTR zur Erzeugung von Strom und Hoch- und Niedertemperaturwärme für verschiedene industrielle Prozesse (23, 24, 33):

- Stromerzeugung mit Gasturbinen [37]
- Wasserstoffherzeugung [34, 35]
- Chemie-Prozesse
- Treibstoff- Hydrierung
- Industrielle Gase
- Stahlerzeugung
- Nukleare Vorwärmung
- Stadtheizung.
- und so weiter

Literatur und References

- 1st U. Cleve: The complete plant of the AVR experimental nuclear power plant in Jülich, commissioning and functional tests. atw: 5/1966.
- 2nd AVR experimental nuclear power plant with pebble bed reactor in Jülich. special atw 5/1966
- 3 Urban Cleve: The AVR pebble bed reactor and its further development. Electrical+electronics issue 3 /1969.
- 4th Urban Cleve, K. Kugeler, K. Knizia: The Technology of High Temperature-Reactors, Design, Commissioning and Operational Results of 15 MWe Experimental Reactor Jülich, Germany and thtr-300 MWe Demonstration Reactor Hamm and Their Impact on Future Designs. IACPP Congress Nice 2011,
- 5th U. Cleve: The Technology of High-Temperature Reactors, Colloquium RWTH Aachen, IEHK July 2011.
- 6th AVR - Experimental High-Temperature-Reactors: 21 Years of Successful Operation for an Future Technology. VDI publishing house ISBN 3-18-401015-5 1990.
- 7th U. Cleve: Questions and answers on the expert report on accidents with the AVR. FZ-Jülich, 2014.
- 8th U. Cleve: Fuel handling facility of high temperature pebble bed reactor. THTR meeting Brussels 1967.
- 9th U. Cleve: Onload fuelling of pebble bed high temperature reactor. HTR Symposium London 1968.
- 10th Feeder et al.: A High Voltage HeadEnd Process for Waste Minimization and Reprocessing of coated Particle Fuel for High Temperature Reactors. Proceedings of ICAPP San Diego USA June 2010.
- 11th U. Cleve: The Technology of High Temperature Reactors. atw 12/ /2009.
- 12th U. Cleve: Technology and Applications of High Temperature Nuclear Reactors. Merger Issue 1/2011.4
- 13th HKG: THTR project information 1962 - 1985.

14th HRB: The commissioning of the THTR-300, a performance report.

15th H. Bonnenberg: High Temperature Gas Cooled Reactor with spherical fuel elements. DGAP 2007.

16th N. Nabielek, K.Verfondern, M.J. Kania: HTR Fuel Testing in AVR and MTRs. HTR Conference, Prague 2010.

17 N. Nabielek, C.Tang, A.Müller: Recent Advances in HTR Fuel Manufacture. HTR Conference Prague 2010.

18th E. Mulder, D.Serfontaine, W. van der Merve: Thorium and Uranium fuel Cycle

20 U. Cleve: The Chancellor's Dialogue on the Future: Thorium as an Energy Source. Arguments and statements. Contributions on the Internet 2012.

21 U. Cleve: Breeding of fissile ²³³Uranium using ²³²thorium with Pebble Fuel Elements. EIR Conference: Report 49, May 2013.

22nd U Cleve, Thorium: fuel from the earth for thousands of years.

23 J. Schöning et.al The helium gas purification plant. atw 5/1966.

24 G Wrochna: Results from Nuclear Cogeneration Industrial Initiative. NC2I National Center for Nuclear Research (NCBJ) Poland. 2016,

25th Fütterer et.al.: The ARCHER Project, Advanced HTR for Cogeneration of heat and Electricity Proceedings of the HTR, China 2014.

26 U. Cleve: Nuclear high-temperature reactors for the production of liquid fuels, hydrogen and electrical energy. atw 6/2011.

27th U. Cleve: The Technology of High Temperature Reactors and Production of Nuclear Process Heat. NUTECH -2011, University of Cracow 2011.

28 Design, construction and erection of the THTR-300 prestressed concrete pressure vessel.

29 U. Cleve: Design and construction of large steam turbines. Technical Bulletins of HdT Issue 1, 1964.

30th U. Cleve: Steam-Heat-Environmental Process Combinations. Symposium Katovic 1976.

31st T. Brendel: Solar seawater desalination plants with multi-stage evaporation. Dissertation: Ruhr University Bochum 2003.

32nd J.Gebel, S.Yüce: An Engineering Guide to Desalination. VGB PowerTech. (2008).

33rd U.Cleve: Cost Valuation of Electricity and Heat for several industrial processes by co-generation in Power Stations. Dissertation: University of Heidelberg

1960.

34th K.R.Schultz, L.C.Brown, G.E.Broombreak,

C.J.Hamilton: Large Scale Production of Hydrogenby Nuclear Energy for Hydrogen Economy. GA Report A 74265,

35 S. Schulien: A way out of dependence on oil - harnessing hydrogen technology. University of Applied Sciences Wiesbaden.

36th Sun Guohui et al. Discussion of High-Temperature Performance of Alloy 625 for

HTR Steam Generators. Proceedings of HTR, Consecration, China 2014.

37th W. von Lensa: International Development Programs for the High Temperature Reactor. Bulletin FZ-Jülich.

38 U. Cleve: Design principles for nuclear and operational safety on HTR NPP.

Authors Dr.-Ing. Urban Cleve

Ex. CTO/HA Manager Technology
of BBC/Krupp Reaktorbau GmbH,
Mannheim
Hohenfriedbergerstr. 4
44141 Dortmund, Germany

Übersetzer:

Dipl.-Ing. Jochen Michels, Konrad-Adenauer-Ring 74, 41464 Neuss.

Fehler bitte an Jochen.michels-at-jomi1.com melden

Atw International Journal for Nuclear Power

I Editorial Advisory Board Frank Apel Erik Baumann Dr. Maarten Becker Dr. Erwin Fischer Eckehard Göring Dr. Ralf Güldner Carsten Haferkamp Dr. Petra-Britt Hoffmann Dr. Guido Knott Prof. Dr. Marco K. Koch Dr. Willibald Kohlpaintner Ulf Kutscher Andreas Loeb Dr. Thomas Mull Dr. Ingo Neuhaus Dr. Joachim Ohnemus

Prof. Dr. Winfried Petry

Dr. Walter Tromm

Dr. Tatiana Salnikova

Dr. Hans-Georg Willschütz

Dr. Andreas Schaffrath

Dr. Hannes Wimmer

Dr. Jens Schröder

Ernst Michael Züfle

Dr. Wolfgang Steinwarz

I Editorial

Prof. Dr. Bruno Thomauske

Christopher Weßelmann (Editor in Chief) Im Tal 121, 45529 Hattingen, Germany Phone: +49 2324 4397723 Fax: +49 2324 4397724 E-mail: editorial@nucmag.com