

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	5
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	9
GRUNDGEDANKEN	11
1 ANLASS UND AUFGABE	19
1.1 Die Energiewende im Jahr 2012	21
1.2 Die Energiewende im Jahr 2024	22
1.3 Vorurteile.....	23
1.4 Spurensicherung	25
1.4.1 Prof. Dr. Rudolf Schulten	27
1.4.2 Alte und neue Wege der Kerntechnik	29
1.4.3 Einige Begriffe	38
1.5 Typen und Generationen der Reaktoren.	41
1.5.1 Einordnung laufender Reaktortypen	42
1.5.2 Andere Reaktor-Typen	44
2 PHYSIK UND BRENNELEMENTE	46
2.1 Besonderheiten der Kugelbett-Technik	46
2.1.1 Gezähmte Ketten-Reaktion	46
2.1.2 Bereitstellen von Wärme	47
2.1.3 Industrielle und dezentrale Wärme	52
2.1.4 Hochtemperaturwärme – nicht primär Strom	54
2.2 Reaktor und Brennelemente	55
2.2.1 Brenn-Elemente (Kugeln und Körner)	58
2.2.2 Anordnung im Reaktor	60
2.2.3 Brennstoff-Körner (coated particles)	62
2.2.4 Prof. Dr. Bonnenberg im Energie-Dialog 2007	65
2.2.5 Dr. Cleve über den Kugelbett-Ofen - KBO	67
2.3 Wirtschaftliche und betriebliche Vorteile.....	88
2.4 Pro und Contra aus Sicht des MIT.....	90

Energiewende – nun aber richtig!

3	TECHNIK – KONSTRUKTION - BAU	98
3.1	Modul-Reaktoren.....	98
3.2	Criticisms of the reactor design	99
3.3	Daten zum Jülicher Versuchsreaktor	101
3.4	HT – Wärmetauscher, FZ Jülich.....	101
3.5	Hochtemperatur- Wärmeübertrager.....	103
3.6	Atom-Müll-Lagerung am Beispiel Ahaus	109
3.7	Nutzung stattendlagerung.....	112
4	SICHERHEIT	113
4.1	Nuklear-physikalisch inhärent sicher	114
4.1.1	Inhärente Sicherheit	114
4.1.2	Unterschiede zwischen LWR und HTR	116
4.2	Baulich-betriebliche Sicherheit	120
4.2.1	Bauform und -Ausführung	120
4.2.2	Lagerung der Abfälle	129
4.3	Versorgungs-Sicherheit	129
4.3.1	Uran und Thorium	129
4.3.2	Uranvorräte und Preis	130
4.3.3	Thoriumvorräte und Preis	130
4.3.4	Rohstoffe gewinnen - mit Hochtemperatur	132
4.4	Proliferation – ungewollte Verbreitung	133
4.5	Risiko-Versicherung	134
4.6	Beiträge von Experten	135
4.6.1	Werner von Lensa, HTR-Projekte	135
4.6.2	Prof. A. Hurtado, Sichere Kernkraftwerke	136
4.6.3	P.-W. Phlippen, Sicherheitseigenschaften	138
4.7	Umwelt-Bezüge	139
4.7.1	Ulli Kulke, Atomkraft in grün	139
4.7.2	Stellungnahme von Greenpeace	139
4.7.3	BDI Manifest für Wachstum und Beschäftigung	140

Inhaltsverzeichnis

5	POLITIK UND GESELLSCHAFT	141
5.1	Deutsche Regierungen zur Kernenergie	141
5.2	Umfeld und Anfänge.....	143
5.3	Nordrhein-Westfalen als Energie-Gebiet.....	147
5.4	Stadtwerke für dezentrale Produktion.....	149
5.5	Wettbewerb der Konzepte und Konzerne	152
5.6	Geschichtliche Entwicklung, Chronologie	154
5.6.1	ab 1945 bis 1967	155
5.6.2	von 1968 bis 1979	161
5.6.3	von 1980 bis 2000	177
5.6.4	von 2000 bis 2020	188
6	KUGELBETT-TECHNIK IM AUSLAND	219
6.1	Einzelne Länder	219
6.1.1	China	219
6.1.2	Süd-Afrika	225
6.1.3	USA	226
6.2	Niederlande.....	229
7	ANHANG	230
7.1	Wirtschaftlichkeit.....	230
7.1.1	Investitions-Kosten	230
7.1.2	Kraftwerksliste	231
7.1.3	Brennstoff	233
7.1.4	Kosten und Wirtschaftlichkeit	233
7.1.5	Sicherheits-Einrichtungen	236
7.1.6	Laufender Betrieb	237
7.1.7	Gesamte Kosten	238
7.1.8	Sinkende Kosten für das Stromnetz	238
7.1.9	Störfall-Kosten für die Kilowattstunde	239
7.2	Anwendungen der HTR-Technologie.....	241
7.2.1	Treibstoff-Hydrierung	241
7.2.2	Wasserstoff aus Wasser	242

Energiewende – nun aber richtig!

7.3	„Angst vor China“	243
7.4	Einheiten, Dimensionen, Umrechnung	260
7.4.1	Umrechnungsfaktoren, SI-Vorsätze	261
7.4.2	Heizwerte von Biomasse und fossilen Brennstoffen	262
7.4.3	Stoff- und Energie-Umsatz (Prof. Hopp)	263
7.4.4	Welt-Energiebedarf pro Tag (Prof. Hopp):	265
7.4.5	Einheiten zur Radioaktivität	266
7.4.6	Einheiten zu Energie und Leistung	266
7.5	Bewertung aktueller Reaktor-Typen	269
8	LITERATUR UND QUELLEN	281

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Farrington Daniels, 1889 –1972, Chemiker, USA	26
Abb. 2 Prof. Dr. R. Schulten (1923 bis 1996)	27
Abb. 3 Titelzeile der Zeitschrift FUSION	29
Abb. 4 Der AVR (Bild aus der Zeitschrift FUSION, siehe Abb. 3)	34
Abb. 5 Generationen Kernreaktoren zur Energieerzeugung	41
Abb. 6 Eckdaten wichtiger Reaktoren	44
Abb. 7 Konzept eines modularen HTR-Prozesswärmereaktors	48
Abb. 8 Entwicklung der maximalen Brennstofftemperatur	49
Abb. 9 Freisetzung von Spaltprodukten aus TRISO-BE	51
Abb. 10 Rückhaltung von Radioaktivität im schweren Störfall	52
Abb. 11 AVR -Längsschnitt vertikal	55
Abb. 12 Spannbetonbehälter des THTR in Hamm	56
Abb. 13 Konstruktive Grundbegriffe	57
Abb. 14 TRISO Brennelemente (von Lensa, siehe auch 4.6.1)	64
Abb. 15 Grundüberlegungen zum Kugelbett-Ofen (KBO)	70
Abb. 16 Brennelemente und Coated Particles	72
Abb. 17 Kühlmittelverlust (LCA) im AVR	74
Abb. 18 Einbauten aus Grafit und Kohlenstoff	75
Abb. 19 Kraftwerk THTR in Hamm-Uentrop	76
Abb. 20 Core design des THTR 300	77
Abb. 21 Betriebserfahrungen mit dem THTR 300	78
Abb. 22 mögliche Weiterentwicklungen	81
Abb. 23 Zwischen- undendlagerung	83
Abb. 24 Zusammenfassung	89
Abb. 25 Das MIT zum 100 MW Modulreaktor	90
Abb. 26 Umwandlung von Kohle in Benzin	102
Abb. 27 Prinzip von He/He – Zwischen-Wärmeübertragern	104
Abb. 28 Heliumbeheizter Steam-Reformer (Prinzipschema)	105
Abb. 29 Zwischenkreislauf-Wärmetauscher nach Kugeler et alii	106
Abb. 30 Steam-Reformer für die H2-Produktion	108
Abb. 31 CASTOR-Behälter für abgebrannte LWR BE	110

Energiewende – nun aber richtig!

folgt kontinuierlich im Betrieb, wodurch auch Überschuss-Reaktivität zur Abbrand-Kompensation im Core vermieden wird. Dies ist ein sehr wichtiger Gesichtspunkt im Hinblick auf die Vermeidung extremer nuklearer Transienten bei Reaktivitätsstörfällen.

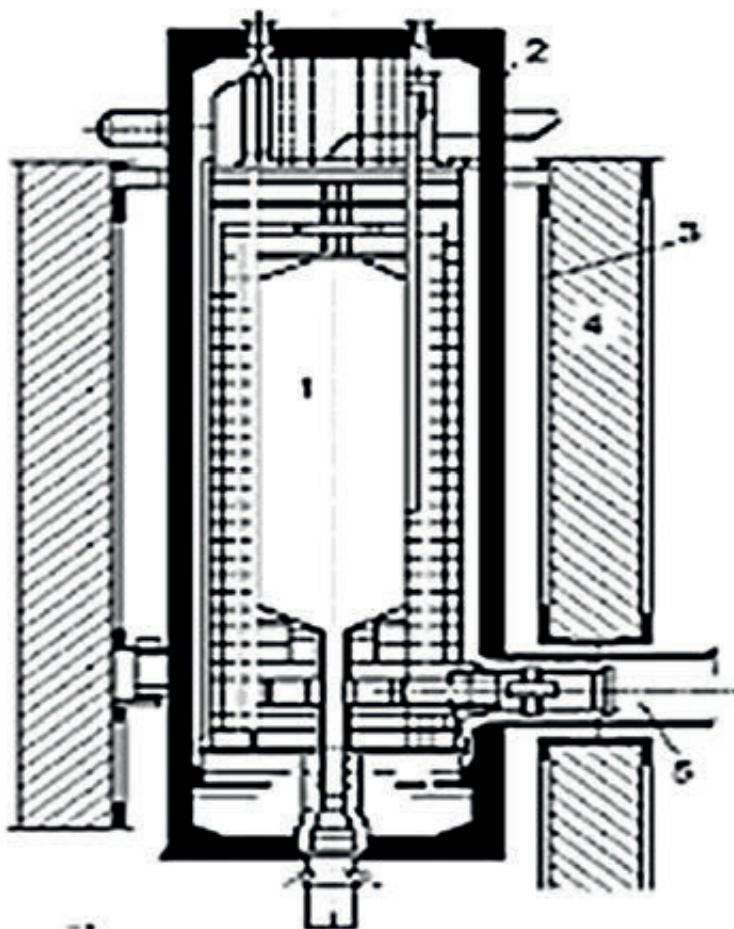


Abb. 7 Konzept eines modularen HTR-Prozesswärmereaktors

a) Schnitt durch den Reaktor:	b) Wichtige Daten des Reaktors:
1. Core, 2. Reaktordruckbehälter, 3. äußerer Flächenkühler, 4. Betonzelle, 5. Koaxialleitung	Thermische Leistung: 200 MW Leistungsdichte: 3 MW/m ³ Heliumdruck: 40 bar Brennstoff: Coated particles Anreicherung: 8% Abbrand: 80.000 MWd/t (1.920.000 MWh/t)

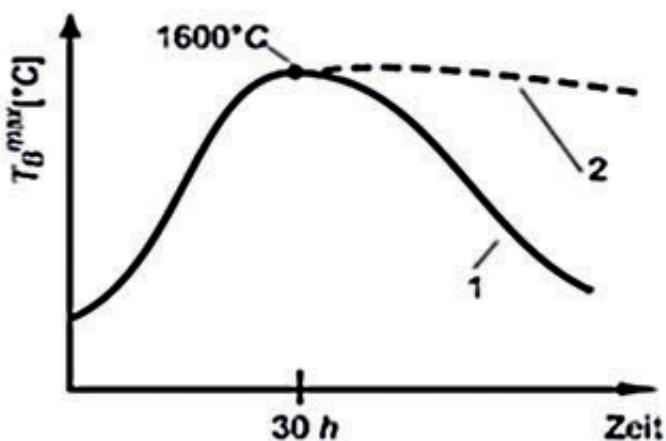


Abb. 8 Entwicklung der maximalen Brennstofftemperatur

Die max. Störfalltemperatur erreicht 1600°C. Die Regelung und Abschaltung des Reaktors erfolgt durch Abschaltelemente, die im Reflektor (der inneren Auskleidung) untergebracht sind. Das Core mitsamt Einbauten befindet sich in einem Reaktordruckbehälter. Dieser ist basissicher gestaltet aus Schmiedestahl oder aus Stahlgussstrukturen, die von außen vorgespannt werden. In Abb. 12 ist eine vorgespannte

2.1.4 Hochtemperaturwärme – nicht primär Strom

Bei Reaktoren denken wir sofort an Strom-Erzeugung. Strom kennt jeder, braucht jeder und ist die „edelste“ Energieform. In unserem hochindustrialisierten Land ist Prozesswärme für viele Produktionszweige ebenfalls eine existenziell notwendige Energieform. Großchemie, Metall-Industrie, Grundstoff-Industrien und weitere können ohne sie nicht existieren. Statt Wärme unter hohen Verlusten mit Strom oder Verbrennung zu erzeugen, bündelt das hier dargestellte Verfahren viele Vorteile.

Die folgenden Absätze basieren auch auf Wikipedia-Inhalten. Dort ergibt sich ein oft wechselndes Bild, weil sich gegnerische Schreiber „Editions-Gefechte“ liefern.

Ein Hochtemperaturreaktor (HTR) oder Höchsttemperaturreaktor (VHTR, Very High Temperature Reactor) ist ein Kernreaktor-Typ ähnlich der vierten Generation. Der Brennstoff wird in Form von ca. 6 cm großen Pebbles (= Kiesel) oder Briketts (Prismatic Blocks) verwendet. Jede der rund 700.000 Kugeln des Hammer THTR-300 enthält 20.000 bis 40.000 Körner sog. „coated particles“ (CP). Die Kombination aus Kugeln und Körnern macht diese Technik so einzigartig.

Der Kugelbett-Reaktor wurde in der Bundesrepublik Deutschland in den 1960er bis 1980er Jahren entwickelt und zeichnet sich durch einen geringen Uranverbrauch, geringe Abwärme und die hohe Brennstoffausnutzung aus. Der Name gründet auf seiner Nutztemperatur bis 950°C. Dieser Reaktortyp benutzt Heliumgas als Kühlmittel und Grafit als Moderator. Aufgrund seiner Bauart gilt der Kugelhaufenreaktor als sicherer und effizienter als herkömmliche Reaktortypen. Der AVR, am Kernforschungszentrum in Jülich errichtet, diente als Versuchsreaktor. Der produktive Demotyp wurde in Hamm-Uentrop (früher Schmehausen) als Thorium-Hochtemperaturreaktor THTR-300 gebaut und betrieben.

2.2 Reaktor und Brennelemente

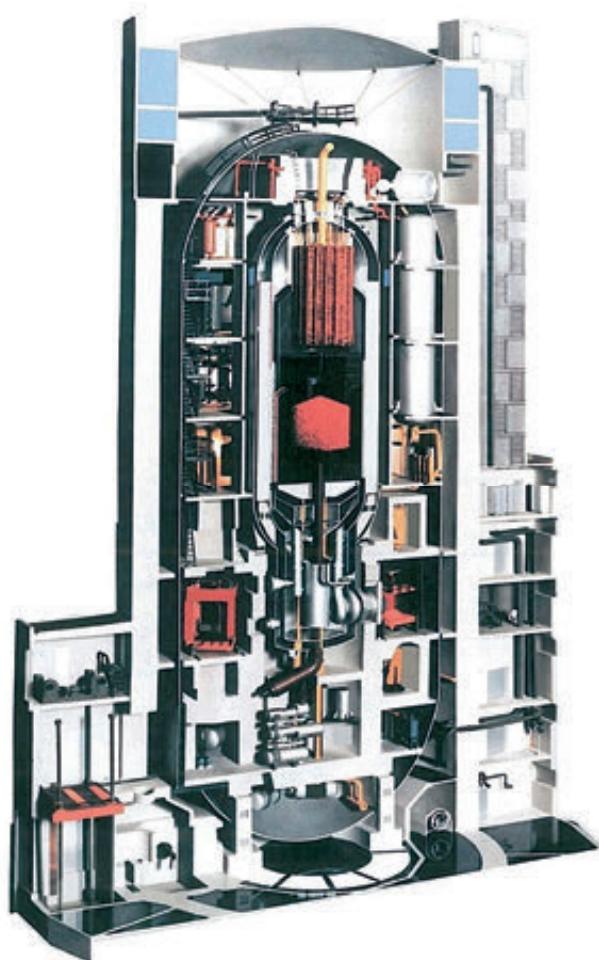


Abb. 11 AVR -Längsschnitt vertikal

Energiewende – nun aber richtig!

Der auch unter den Namen Hochtemperatur-Reaktor, Gas/Grafit-Reaktor, Kugelhaufen-Reaktor, Pebble Bed Reactor, PBMR, Pebble Bed Modular Reactor bekannte Reaktortyp wird hier oft Kugelbett-Ofen genannt. Das geschieht einmal, weil er kein Meiler ist (wie die LWR), zum anderen, weil seine hohe Wärme für viele Anwendungen besonders geeignet ist. Er ist ein Ofen, der kontinuierlich Brennstoff aufnimmt und „Asche“ abgibt. Die Meiler dagegen müssen von Zeit zu Zeit abgeschaltet und neu beladen werden¹⁴.

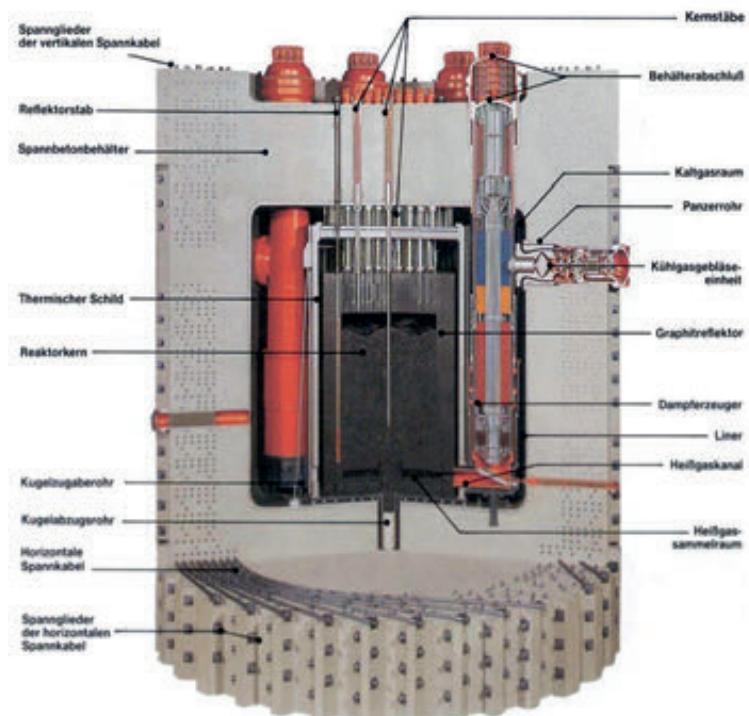


Abb. 12 Spannbetonbehälter des THTR in Hamm

¹⁴ Man darf (vor allem die deutschen) Wikipedia-Texte zum HTTR, wie auch zu anderen Reaktoren nicht immer als wahrheitsgetreu ansehen. Sie sind vielfach subtil im Sinne der Atomgegnerschaft verfärbt.

Einige Begriffe zur Konstruktion seien hier erklärt, von außen nach innen gesehen. Je nach Bauart variieren die Anzahl und die Reihung dieser „Schalen“ in gewissem Umfang.

Gebäudehülle	Äußerste Umhüllung des Reaktorgebäudes aus einigen Meter dickem Beton, Außenluftkontakt
Containment	Rückhaltung für radioaktive Stoffe, kann im Ernstfall gesamte strahlende Stoffe aus dem RDB aufnehmen, 4 cm Stahl
Zwischenraum	Einbauten, Leitungen
Biologischer Schild	Stahlbeton bis 2 Meter dick
Thermischer Schild	Schwächung der Direktstrahlung aus dem Core, Milderung des Temperaturgradienten
Reaktor-Druckbehälter RDB, Reaktorkessel	aus Stahl, Spannbeton, Stahlguss, Sphäroguss, gasdicht, berstsicher, nach Riß selbstschließend
Liner	Behälterauskleidung; enthält ein Wasserkühlungssystem für den Beton
Zwischenraum	Platz für Hilfssysteme
Grafitreflektor	Innenauskleidung, direkt am Core
Core, Reaktorkern	Kugelhaufen, Kugelbett, Schüttung der Brennelemente
In den Abbildungen 11 und 12 sind sie teils erkennbar.	

Abb. 13 Konstruktive Grundbegriffe

Energiewende – nun aber richtig!

in der oberen Schicht abgehoben hätten. Bei der Brennelement-Abzugsvorrichtung wurde eine geänderte Konstruktion eingebaut. Nachdem die Erstkonstruktion bereits fertig war, erkannte die Reaktorphysik, dass der Durchmesser des zylindrischen Reaktorkerns so groß war, dass es nicht mehr möglich war, die Abschalt- und Regelstäbe nur im äußeren Grafitreflektor mechanisch dort praktisch beanspruchungslos zu führen.

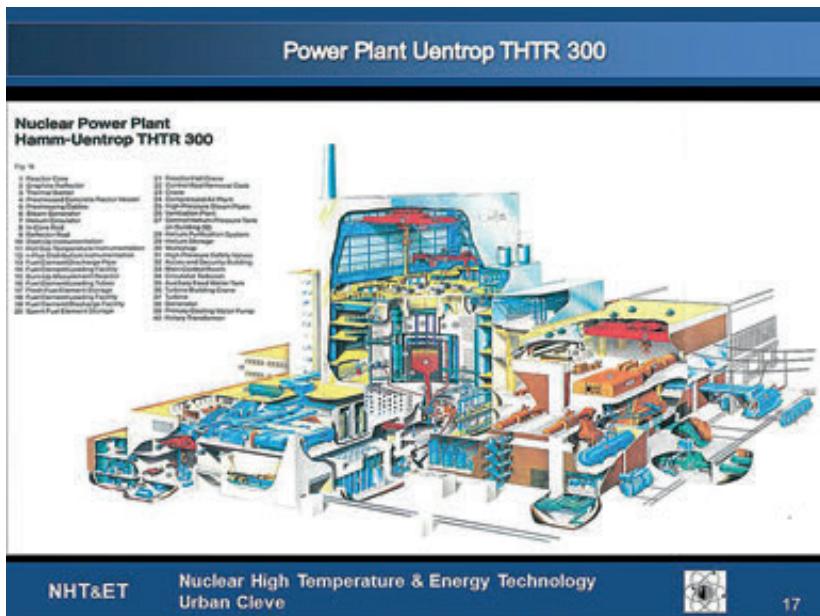


Abb. 19 Kraftwerk THTR in Hamm-Uentrop

Der Reaktor konnte also wegen der entstehenden Nachwärme nicht mehr vollständig abgefahren werden. Es bestand eine sehr kritische Lage. In einer großen Besprechung mit allen verantwortlichen Vorständen von BBC-Baden und Mannheim, sowie Krupp und der KFA wurde diese extrem schwierige Situation besprochen. Es wurde auch der Abbruch der ganzen HTR-Entwicklung in Erwägung gezogen. Nachdem sicher war, dass ein Schaden für das Betriebspersonal und

vor allem die Umgebung ausgeschlossen werden konnte, wurden zwei alternative Konstruktionen vorgeschlagen. Zum einen ein Einfahren der Abschaltstäbe in das Kugelbett, mit dem Risiko der Zerstörung von Brennelementen und der Stäbe selbst, zum anderen eine neuartige Core-Geometrie mit mehreren Kugelabzugsvorrichtungen (Abb. 20).

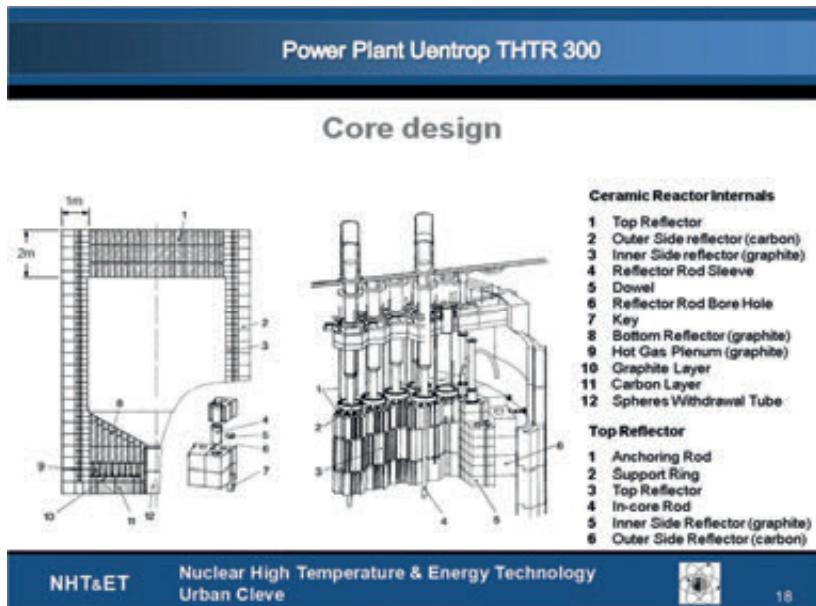


Abb. 20 Core design des THTR 300

Letzteres war nur möglich, wenn sicher war, dass die Core-Grafit-einbauten stabil stehen würden. Diese Erfahrung aus dem AVR lag noch nicht vor, daher wurde diese Konstruktion nicht gewählt. Das Gesamtrisiko schien mit dem Einfahren der Stäbe geringer zu sein. Eine höhere Bruchrate der BE sollte bewusst in Kauf genommen werden. Die gesamte Anlage war ja auch als Demonstrations- und Versuchsanlage gedacht, Fehlschläge mussten also mit in Betracht gezogen werden.

Energiewende – nun aber richtig!

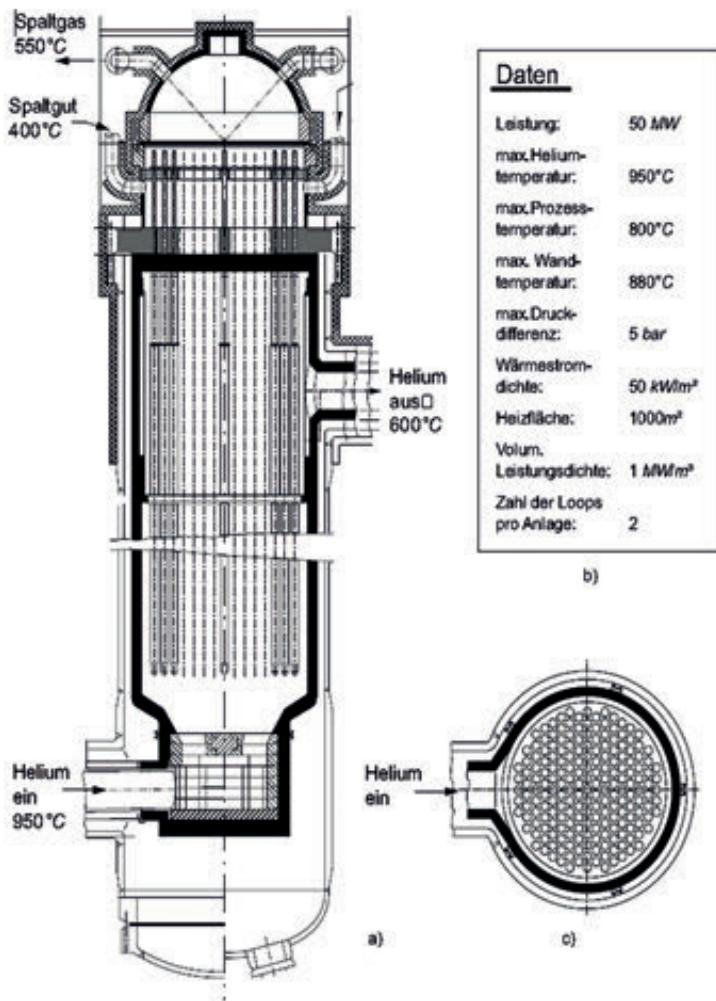


Abb. 10.4: Steam – Reformer zur Wasserstofferzeugung
 a) Konzept des Apparates (Vertikalschnitt)
 b) wichtige Daten der Komponente
 c) Schaltung (Horizontalschnitt)

Abb. 30 Steam-Reformer für die H₂-Produktion