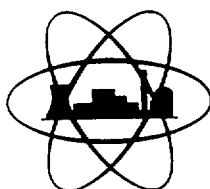


Ausgewählte Themen aus dem Betrieb des THTR 300

Von R. Bäumer



SONDERDRUCK AUS

VGB KRAFTWERKSTECHNIK

MITTEILUNGEN DER VGB TECHNISCHEN VEREINIGUNG DER GROSSKRAFTWERKS BETREIBER E.V.

69. Jahrgang • Heft 2 • Februar 1989 • Seite 158 bis 164

73-7

Ausgewählte Themen aus dem Betrieb des THTR 300

Von R. Bäumer*

Einleitung

Der Thorium-Hochtemperaturreaktor repräsentiert eine interessante und vielversprechende Technologie. Interessant, weil es sich bei dem Hochtemperaturreaktor THTR 300 um eine Technologie handelt, die in vielen Fällen von herkömmlichen Reaktoren abweicht. Vielversprechend deswegen, weil die Anwendungsmöglichkeiten dieses Reaktors für die Zukunft weltweit großes Interesse hervorrufen, auch wenn derzeit noch keine konkreten Baubeschlüsse auf dem internationalen Gebiet erkennbar sind. Über drei ausgewählte Themen aus dem Betrieb des THTR wird berichtet:

- Analyse der betriebsstatistischen Daten der Anlage,
- Erkenntnisse über das Kugelfließen im Reaktorkern und die Schädigungsrate der Kugelelemente sowie
- Reinigungsmöglichkeiten am Trockenkühlturm.

Analyse der betriebsstatistischen Daten

Am 1. Juni 1987 wurde die Anlage in die Verantwortung der Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH (HKG) übernommen.

* Direktor Dr.-Ing. R. Bäumer,
Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH, Hamm.

Das ist das Stichdatum, von dem die betriebsstatistischen Daten jeweils fortgeschrieben werden. Alle im folgenden vorgestellten Analysen sind damit ermittelt über den Betriebszeitraum vom 1. Juni 1987 bis 31. Juli 1988. Seit der Übernahme wurden mit dem THTR 1,5 Mill. MWh in das elektrische Verbundnetz eingespeist. Bezieht man die Zeit seit Beginn der Inbetriebnahme mit hinzu, so ist vom 16. November 1985, an dem die Turbine an das Netz geschaltet wurde, bis zum 31. Juli 1988 eine Stromerzeugung von 2,46 Mill. MWh aufgelaufen.

Gerechnet über diesen eben genannten Zeitraum (1. Juni 1987 bis 31. Juli 1988) wurde eine Zeitverfügbarkeit von 63,5% erreicht und eine Arbeitsverfügbarkeit von 48,2%. Gemessen daran, daß es sich bei dem THTR 300 um einen Prototyp handelt, ist das ein adäquates Ergebnis, da viele Anlagenkomponenten in diesem Reaktor erstmals großtechnisch erprobt werden.

Das Leistungsdiagramm wird in Bild 1 vorgestellt. Im Jahre 1987 fanden jeweils am Wochenende Leistungsreduktionen von 100 auf 40% statt. Diese Leistungsreduktionen wurden notwendig, um die erforderliche Kugelumwälzung im THTR durchzuführen. Aufgrund ungünstiger Strömungsführung am Kugelabzug konnten bei 100% Leistung keine Kugeln mehr umgewälzt werden. Die Kugelumwälzung ist wichtig zur Deckung des Reaktivitätsbedarfs des Reaktors. Über diesen Umstand wurde bereits auf vielen Fachvorträgen berichtet.

Dieser uns bei Übernahme bekannte Mangel beim Kugelabzug wurde in der Revision 1 erfolgreich beseitigt. Diese große Aufgabe hat einen Zeitraum von fast vier Monaten eingenommen.

Weitere Arbeiten sind auf dem Bild ausgewiesen. So wurde eine Generatorrevision durchgeführt, wiederkehrende Prüfungen vorgenommen und die Verkleidung der Außenfassade instand gesetzt. Nach der Revision 1 folgte von Februar bis März 1988 eine Leistungsperiode, in der die starken Lastabsenkungen am Wochenende nicht mehr notwendig waren, aber sehr wohl aufgrund von Wärmeverbrauchsmessungen in verschiedenen Lastbereichen gefahren wurde. Es zeigt sich in dieser Zeit auch, daß aufgrund der Schädigungsrate der Kugeln vereinzelt Probleme bei der Handhabung der Kugeln in den Förderstrecken entstanden. So wurde in der Revision 2 im April 1988 eine Kugelverklebung in der Beschickungsanlage beseitigt. Ebenfalls wurden die Behälter für die beschädigten Betriebselemente ausgetauscht, was nur bei abgeschalteter Anlage möglich ist.

In den Monaten Mai bis Juni 1988 war die Anlage kontinuierlich am Netz mit Lasteinschränkungen unterschiedlicher Stärke. Diese Lasteinschränkungen hängen damit zusammen, daß in bestimmten Anlagenräumen bei hohen Außentemperaturen die genehmigten Grenztemperaturen nur eingehalten werden konnten, wenn die Last und damit die ZÜ-Temperaturen zurückgenommen wurden. Die Kühlanlagen für diese Räume sind nicht ausreichend dimensioniert und bedürfen der Nachrüstung. Auch dieser Mangel war uns bei Übernahme

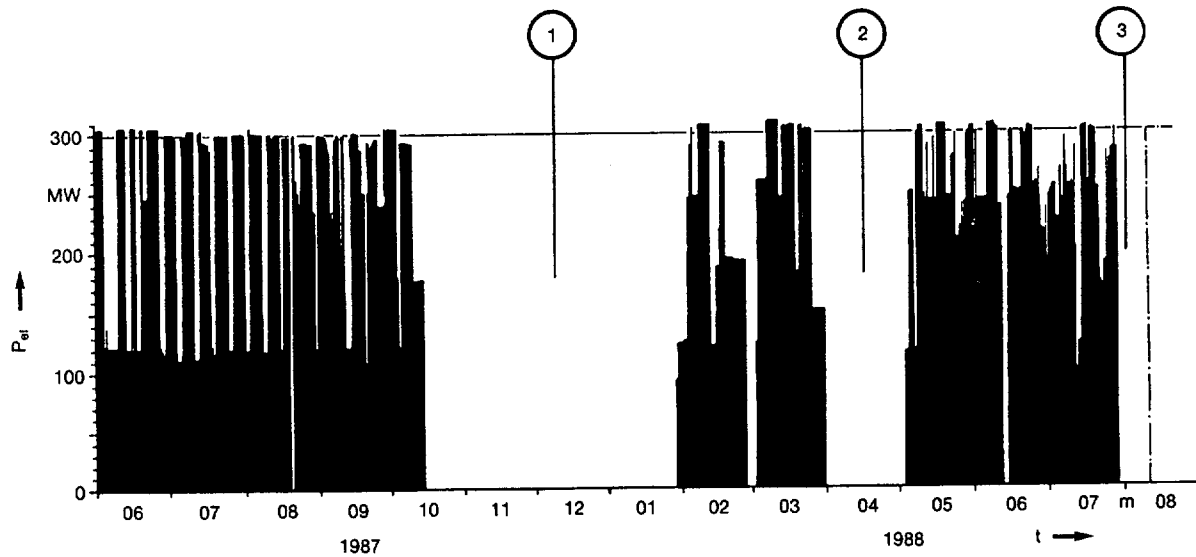
bekannt. Abhilfe soll in der nächsten Revision geschaffen werden, dann — wenn die Zusatzkühlanlage atomrechtlich genehmigt ist.

In der Revision 3, die auch noch im Juli 1988 durchgeführt wurde, erfolgte wiederum die Auswechslung eines Behälters für beschädigte Betriebselemente.

Aus diesen statistischen Daten läßt sich erkennen, daß die Anlage in dem betrachteten Zeitraum während 36,5% der gesamten Zeit zur Leistungserzeugung nicht zur Verfügung gestanden hat. Während weiterer 15,3% dieser Zeit war die Anlage zwar verfügbar, konnte aber nicht mit voller Leistung gefahren werden. Es soll nun analysiert werden, aufgrund welcher technischen Besonderheiten diese Nichtverfügbarkeitszahlen zustande gekommen sind. Hier gibt Bild 2 Auskunft.

In Bild 2 ist die Reaktorhalle mit dem großen Spannbetonbehälter dargestellt, ebenso der Kugelhaufen mit den 675 000 Kugeln, die über ein Kugelabzugsrohr abgezogen werden. Um den Spannbetonbehälter herum sind die Reaktorhallenbühnen angeordnet, und man erkennt weiterhin die im Spannbeton eingehängten Dampferzeuger mit den nach oben verlängerten Dampferzeugerringräumen. Links und rechts des Bildes sind die Ursachen für die Verfügbarkeitseinbußen ausgewiesen. Die Auswertung dieser Darstellung führt zu drei wesentlichen Schlußfolgerungen:

— Seit Übernahme der Anlage wurde die Nichtverfügbarkeit der Anlage maßgeblich bestimmt durch die Reparatur am Kugelabzug, Anteil 26,5%. Schwierigkeiten bei der Hand-



- ①
- Wiederkehrende Prüfungen
 - Generator-Hauptrevision und Kurzrevision an den Hilfsturbosätzen
 - Verbesserungen im Bereich des Kugelabzuges
 - Verbesserung der Außenfassade der Reaktorhalle
 - Verbesserungs- und Instandhaltungsmaßnahmen

- ②
- Wechsel der beiden Bruchkannen in der Beschickungsanlage
 - Beseitigen einer Kugelverklebung in Einzelscheibe/Wendelschrottscheider der Bestickungsanlage
 - Wiederkehrende Prüfungen

- ③
- Wechsel einer Bruchkanne in der Beschickungsanlage und Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen

Bild 1. Elektrische Leistung (1. Juni 1987 bis 31. Juli 1988).

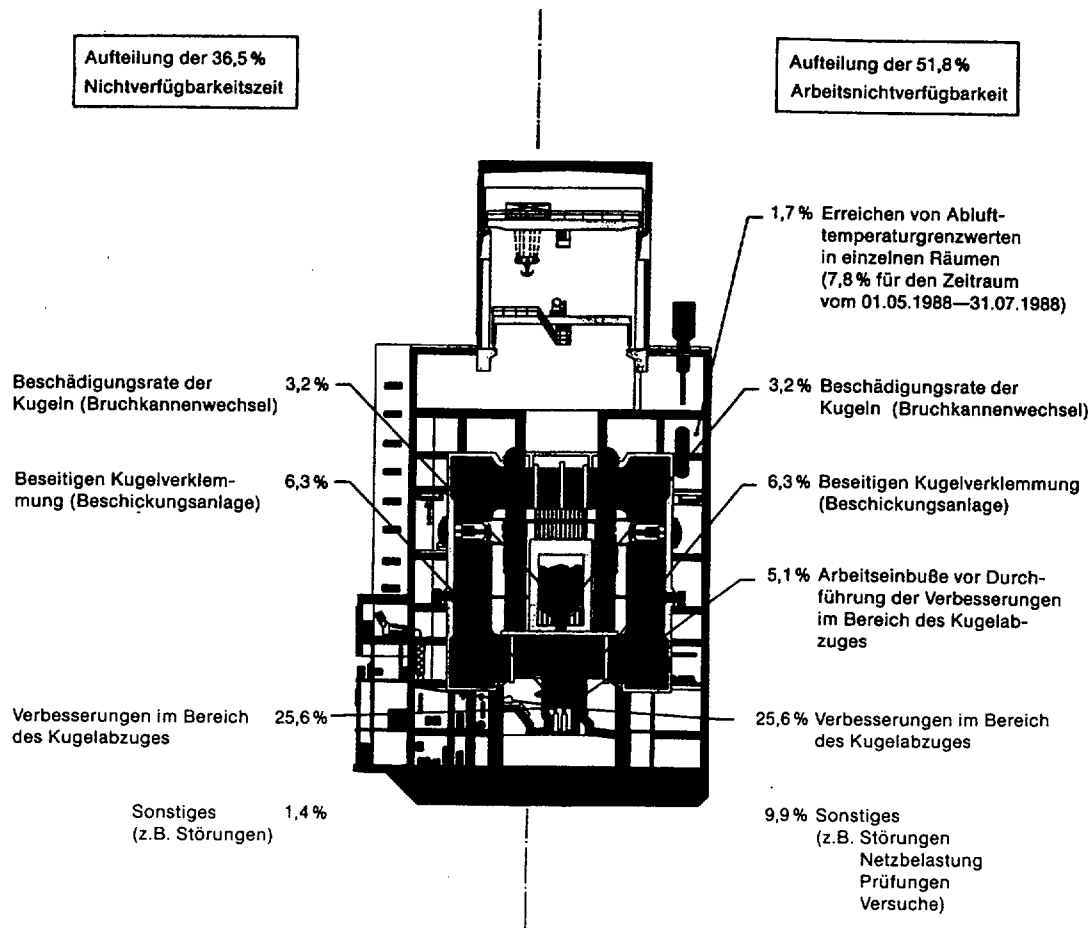


Bild 2. Zeit- und Arbeitsnichtverfügbarkeit in der Zeit vom 1. Juni 1987 bis zum 31. Juli 1988.

habung und Förderung der Kugeln — erzeugt durch die Schädigungsrate — brachten einen weiteren geringeren Anteil. Alle anderen prototypischen Kraftwerkskomponenten (Corestäbe, Gebläse, Dampferzeuger mit Abwärtsverdampfung) haben sich im Betrieb bewährt und arbeiten zuverlässig.

- Die Beschickungsanlage ist ein Bauteil, das instandhaltungsaufwendig und immer kleineren Störungen unterworfen ist. Der Entschluß des Herstellers, bei seinen Planungen für weitere Hochtemperaturreaktoren nur noch eine vereinfachte Beschickung — die Einmal-Durch- oder OTTO-Beschickung — anzuwenden, ist hier bereits eine Erkenntnis aus den Betriebserfahrungen AVR und THTR.

Die monatlich akkumulierte Gesamtpersonendosis zeigt Bild 3. Aufgetragen ist die Gesamtpersonendosis in ManmSv. Das ist die Personendosis, aufaddiert über alle Personen, die den Kontrollbereich betreten haben. Sehr deutlich ist zu erkennen, daß eine Spitze in der Gesamtpersonendosis in der Revision 1987 eingetreten ist. Das ist auch insofern verständlich, weil in diesen vier Monaten in der Nähe des Primärkreises der Kugelabzug saniert wurde. Es wurden hier sehr komplexe Schneidarbeiten im Bereich des Kugelabzuges in unmittelbarer Nähe des Primärkreises durchgeführt. Weiter ist auch zu erkennen, daß in dem Anlagenstillstand 1/88 und 2/88 ebenfalls eine leichte Erhöhung in der Gesamtpersonendosis vorhanden ist, die auf die hohe Zahl von wiederkehrenden Prüfungen zurückzuführen sind. Trotzdem sind die Werte nach wie vor sehr niedrig. Im Jahre 1986 betrug die Personendosis

44,1 ManmSv oder 4,4 manrem, 1987 stieg der Wert auf 102,2 manrem und 1988 fielen bisher 4,4 manrem an. Diese Zahlen bestätigen einmal mehr das gute Rückhaltevermögen der Kugelbrennelemente und auch die gute Abschirmung der Anlagenräume durch den Spannbetonbehälter.

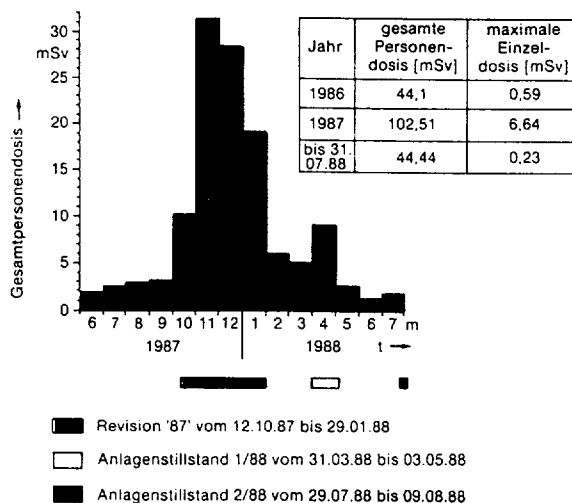
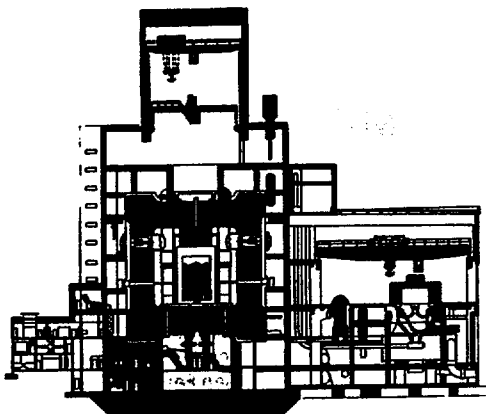


Bild 3. Monatlich akkumulierte Gesamtpersonendosis.



Räume der Gasreinigungsanlage mit einer max. Ortsdosisleistung von 0,3 mSv/h im Arbeitsbereich
Räume der Beschickungsanlage mit einer max. Ortsdosisleistung von <0,3 mSv/h im Arbeitsbereich

Bild 4. THTR-Anlagenräume mit dem wesentlichen Beitrag zur Personendosisbelastung.

In Bild 4 ist dargestellt, in welchen Räumen die wesentlichen Beiträge dieser Personendosisbelastung zustande gekommen sind.

Der THTR ist im Schnittbild dargestellt mit der Reaktorhalle und dem Maschinenhaus. Es sind nur zwei Raumbereiche, die einen Beitrag zur Personendosis liefern, und zwar die Räume der Beschickungsanlage unterhalb des Spannbetonbehälters, in denen die abgebrannten Brennelemente ausgeschleust werden, und die Räume der Gasreinigungsanlage, in denen das Primärgas Helium gereinigt wird. In den Gasreinigungsanlagen beträgt die maximale Ortsdosisleistung 0,3 mSv/h, in den Räumen der Beschickungsanlage ist sie kleiner als 0,3 mSv/h. Alle anderen Räume der Anlage sind praktisch strahlungsfrei.

Nach dem ersten Betriebsjahr kann auch die Anzahl der wiederkehrenden Prüfungen genauer überblickt werden.

In Tafel 1 sind diese Zahlen denen eines Konvoireaktors gegenübergestellt. Im Anlagenzustand „beliebig“ stehen 3500 wiederkehrende Prüfungen beim THTR; 1700 wiederkehrende Prüfungen beim Konvoireaktor gegenüber. Bei abgeschaltetem und unter Druck befindlichem Reaktor muß der THTR 430 Prüfungen machen und der Konvoireaktor 25. In der Gesamtheit muß der THTR 2,5mal soviel wiederkehrende Prüfungen machen wie der Konvoi-Druckwasserreaktor. Wenn auch die Aussagefähigkeit dieser Zahlen im einzelnen einer genaueren Bewertung unterzogen werden muß, ist hier doch klar zu erkennen, daß die vielen sicherheitstechnischen Aufrüstungen am THTR während der langen Bauzeit ihren Tribut gefordert haben. Aufgabe der nächsten Betriebsjahre wird es sein, die Vielzahl der wiederkehrenden Prüfungen zu reduzieren.

Tafel 1. Gesamtzahl der jährlich durchzuführenden wiederkehrenden Prüfungen.

Anlagenzustand	Anzahl der Prüfungen	
	THTR 300	Konvoi-DWR
beliebig	3590	1700
Reaktor abgeschaltet und unter Druck	430	25
Reaktor abgeschaltet und drucklos	50	160
Gesamt	4070	1885

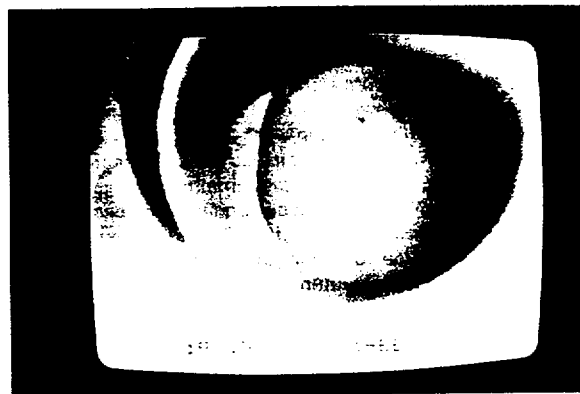


Bild 5. Verklebte Kugel und Bruchstück beim Durchlauf durch die Vereinzelnerschelbe.

Erkenntnisse über das Kugelfließen im Reaktorkern

Der Kugelhafenreaktor ist eine Anlage, die ihren Reaktivitätsbedarf durch ständige Zufuhr frischer Brennelemente und ständiges Umwälzen gebrauchter Brennelemente deckt. Der Vorteil dieser Beschickungsstrategie ist die geringe Überschubreaktivität des Reaktors, die sich bei den Sicherheitsanalysen sehr positiv auswirkt. Fällt die Beschickungsanlage allerdings für einen Zeitraum von 15 bis 20 Tagen aus, dann muß der Reaktor in der Leistung reduziert werden und in wenigen Tagen erlischt dann die Kettenreaktion ganz. Störungen in der Beschickungsanlage haben damit erheblichen Einfluß auf die Betriebsgestaltung des THTR. Sie sind in der Vergangenheit vielfach hervorgerufen worden durch beschädigte Kugelelemente. Die Schäden an den Kugeln sind in der Mehrzahl Oberflächenschäden, nur zum geringen Teil erscheinen direkte Durchbrüche. In Bild 5 ist eine abgeplatzte Kugelschale zu sehen, die zu einer Verklebung geführt hat.

Der Verlauf der Kugel-Schädigungsrate ist in Bild 6 dargestellt. Hier ist die Schädigungsrate in Prozent der jeweils abgezogenen Kugelelemente aufgetragen. 10% Schädigungsrate bedeuten, daß 10 von 100 abgezogenen Kugeln aufgrund von Schäden aussortiert worden sind. Von Januar bis Juli 1988 ist die Schädigungsrate sehr langsam, aber stetig zurückgegangen. Sie liegt derzeit bei ungefähr 0,6%.

Der Verlauf der Kurve weist immer wieder Maxima auf. Diese Maxima entstehen immer dann, wenn die Beschickung für eine längere Zeit ausgesetzt wurde, zum Beispiel bei Abschaltungen oder nach Revisionen.

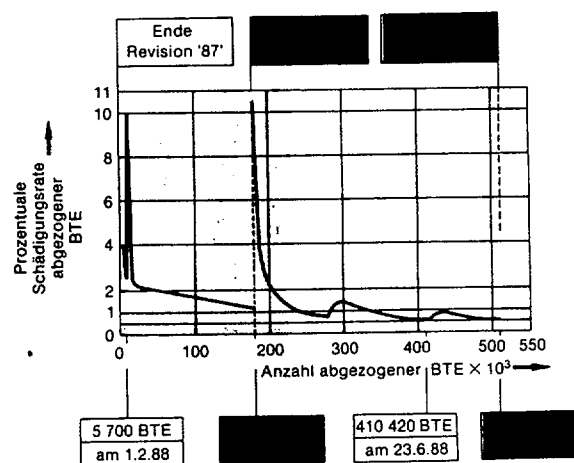


Bild 6. Entwicklung der Kugelbruchrate nach der Revision 1987.

Für diese Erscheinung gibt es derzeit noch keine technische Erklärung. Es kann sein, daß nach Abschalten des Reaktors während der Abkühlphase Zwängungen im Kugelabzugsrohr auftreten, die eine erhöhte Schädigungsrate erzeugen, aber diese Aussage ist bei weitem nicht gesichert. Hier müssen ergänzende Versuche letztlich Aufschluß geben. Bleibt die Schädigungsrate so wie sie derzeit ist, muß die Anlage außerhalb der Routinerevision jeweils noch einmal im Jahr abgeschaltet werden zum Austausch des Behälters für beschädigte Betriebselemente. Ein Einfluß auf die Primärkreisaktivität und damit auf die Sicherheit der Anlage ist durch die Schädigungsrate nicht gegeben. Die Deutung des Kugelbruchs hinsichtlich Ursache und Dauer ist nach derzeitigem Stand der Kenntnis wie folgt:

Als Ursache kommen nach wie vor nur häufige harte Abschaltungen während der Inbetriebnahmezeit in Frage. Diese Einschätzung wurde bestärkt durch die Tatsache, daß der AVR, der keine Kernstäbe in den Kugelhaufen einführt, das Problem der Kugelschädigung nicht kennt. Die Frage ist, warum sind diese vor mehr als 2 Jahren erzeugten Kugelbeschädigungen noch nicht aus dem Kern ausgewälzt? Untersuchungen des Kugelfließens geben hier Aufschluß.

Bild 7 zeigt das Reaktorcore schematisiert mit jeweils 5 Kanalzonen für die durch das Core fließenden Kugелеlemente. Diese 5 Kanalzonen dienen auch dem Rechenmodell als Basis. Jeder Kanal ist in Blöcke unterteilt und das Rechenmodell simuliert das Kugelfließen dadurch, daß jeweils nach 16 Tagen von einem Block in den anderen die Kugелеlemente umgeladen werden. Für den Planungszustand, der auf Modellversuchen mit Kugeln unter Luft beruhte, ergab das eine Kugel-

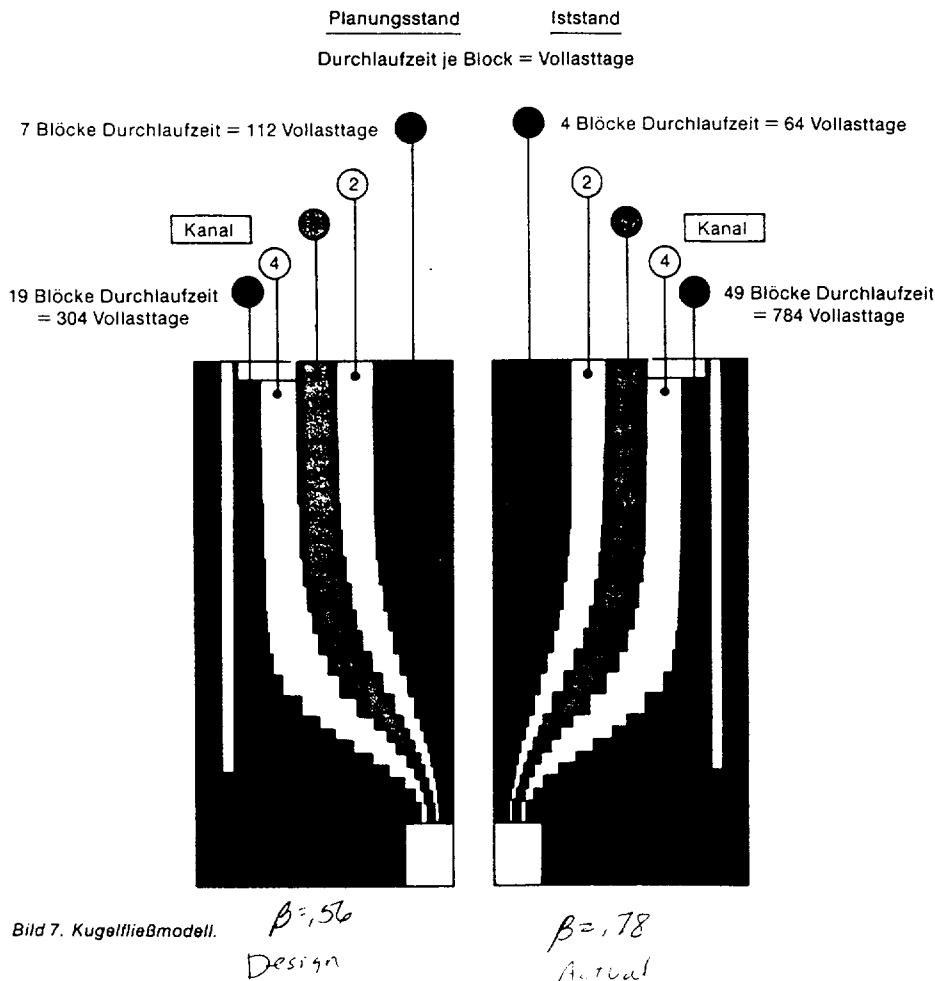
durchlaufzeit in der Mitte des Kugelhaufens von 112 Tagen, am Rande von 304 Tagen. In der Praxis stellt sich jedoch ein Fließverhalten mit einer Durchlaufzeit von 60 Tagen im Zentrum und 780 Tagen außen ein. Die Kanalzonen 2 bis 4 zeigen nur geringe Abweichungen gegenüber dem Planungsstand.

Dieses veränderte Fließverhalten ist mit Grund dafür, warum die in der Inbetriebnahmezeit erzeugten Kugelschäden immer noch nicht aus dem Kern ausgeschleust sind, sondern jetzt verspätet am Kugelabzug erscheinen.

Als einzige Ursache für das gegenüber der Planung doch gravierend andere Kugelfließverhalten, ist die Temperaturabhängigkeit des Reibwertes Graphit an Graphit in Helium anzunehmen. In Bild 8 erkennt man, daß eine starke Temperaturabhängigkeit des Reibwertes gegeben ist. Zwischen 200 und 1000 °C ist hier eine Änderung um den Faktor 2,5 zu erkennen. Es ist daher anzunehmen, daß der geringe Reibwert bei hohen Temperaturen die Kugeln im Zentrum schneller fließen läßt als der hohe Reibwert bei 250 °C im Außenbereich, siehe hierzu auch die Temperaturverteilung in Bild 9. Andere Ursachen sind derzeit nicht erkennbar. Ergänzend muß erwähnt werden, daß in den Versuchen zum Kugelfließen in den Jahren 1972 bis 1975 die Temperaturabhängigkeit des Reibwertes nicht nachgebildet wurde.

Heute rechnen wir damit, daß noch etwa 6 Monate beschädigte Elemente am Kugelabzug aus der Inbetriebnahme erscheinen und danach der Reaktorkern praktisch frei von beschädigten Elementen ist.

Es ist offensichtlich, daß sich auch die Beschickungsstrategie auf das geänderte Fließverhalten einstellen muß. Das starke



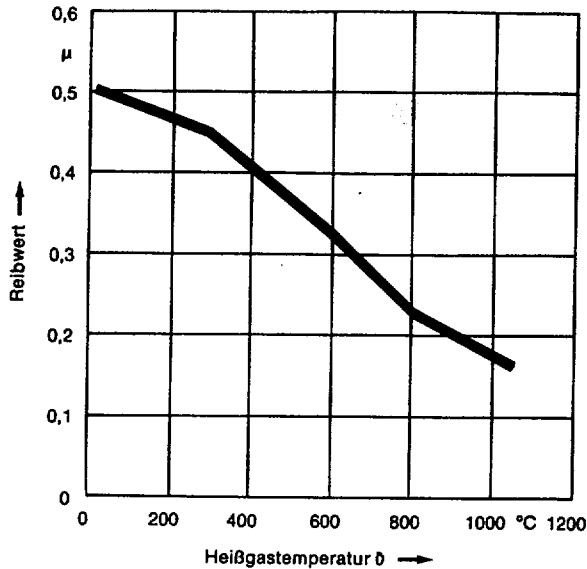


Bild 8. BTE-Reibwerte.

Durchschleusen frischer Brennelemente in der Kernmitte führt zu einem stark unausgeglichene Temperaturprofil der Heißgastemperatur, mit hoher Innen- und niedriger Außentemperatur. Durch das Verlegen der frischen Brennelemente auf die Randzone des Cores muß für einen Ausgleich gesorgt werden (siehe Bild 9). Aufgetragen ist die Heißgastemperatur im Bodenreflektor über dem Coreradius. Durch Umstellung der Beschickung konnte die Heißgastemperaturspitze innerhalb von drei Wochen von 940 auf 910 °C gesenkt werden.

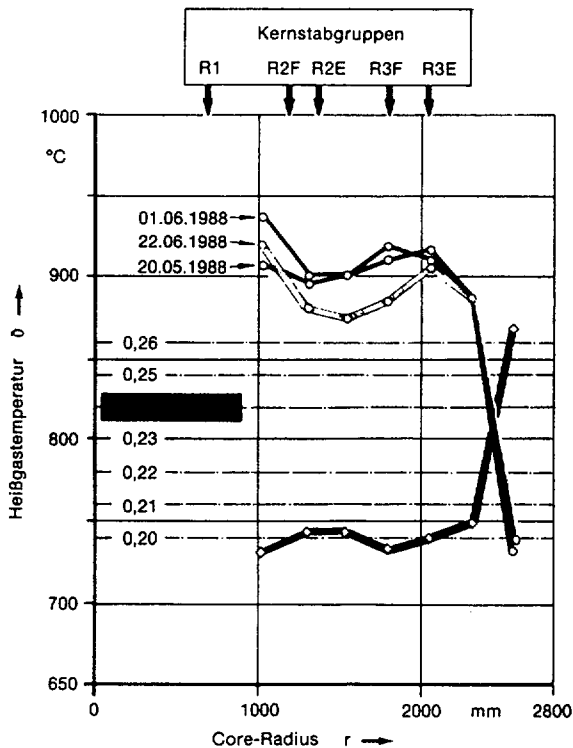


Bild 9. Heißgastemperaturverteilung im Bodenreflektor mit zugehörigem BTE-Reibwert.

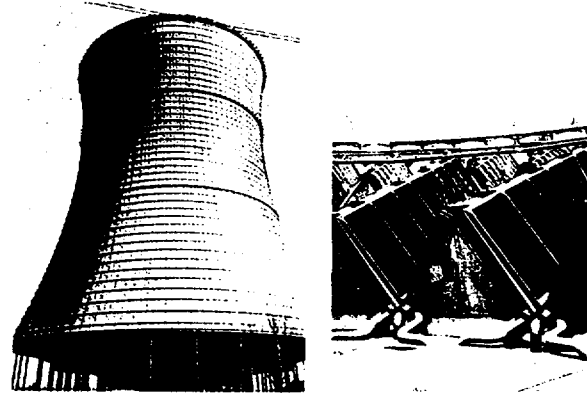


Bild 10. Trockenkühlturm — Einzelsicht der Kühldeltas.

Bis zum Erreichen des Gleichgewichtcores in etwa ein bis zwei Jahren wird dieses geänderte Kugelfließen einer weiteren sorgfältigen Beobachtung bedürfen.

Reinigungsmöglichkeiten am Trockenkühlturm

Bild 10 zeigt links die Aluminiumverkleidung des Trockenkühlturms, die an einem Stahnetzgitter befestigt ist. Rechts sind die im Inneren des Turmes aufgestellten Kühlelemente mit dem Kühlwasservor- und -rücklauf auf den fein gerippten Rohren für den Luftdurchtritt zu erkennen. Eine Reinigungsanlage für den Turm war im Liefervertrag von 1973 nicht enthalten. Während der Inbetriebnahmezeit wurde festgestellt, daß diese fein gerippten Rohre durch Pollenflug und Staubaufwirbelung sich sehr schnell zusetzten und die Kaltwassertemperatur des Hauptkühlwassers durch diesen Effekt um bis zu mehr als 3 °C anstieg. Durch das höhere Temperaturniveau des Hauptkühlwassers wurde eine Vakuumverschlechterung im Kondensator erzeugt, die eine elektrische Minderleistung von etwa 3 MW zur Folge hatte.

Es wurden verschiedene Reinigungsmethoden ausprobiert, die in Bild 11 dargestellt sind. Die erste Reinigung war eine Handreinigung mit Wasserdruckstrahlgeräten mit einem Spitzendruck von 80 bar. Die vier hintereinanderliegenden Rippenrohre wurden zweimal von oben gereinigt und einmal von unten. Mit dieser Grundreinigung, die sieben Wochen dauerte, wurde für die Abnahmemessung ein nahezu sauberer Turm erzielt. Die im unteren Teil des Bildes dargestellten Temperaturabweichungen sind Abweichungen der Kaltwassertemperatur von der Auslegungstemperatur von 26,5 bei 12 °C Lufttemperatur. Die vorher vorhandene Erhöhung der Kaltwassertemperatur um 3 °C ging durch die Grundreinigung auf die Auslegungstemperatur zurück, was in Bild 11 mit dem Wert Null dargestellt ist. In den nächsten drei Wochen wurde nicht gereinigt und der Turm verschmutzte in dieser Zeit sehr schnell, so daß wieder eine Kaltwassertemperaturabweichung von 3 °C zum Auslegungswert vorhanden war. Wir entschlossen uns daher, eine automatische Reinigungsanlage einzusetzen, die von Kühlelement zu Kühlelement umgesetzt werden kann und mit mehreren Düsen das Element besprüht. Gegenüber der Handreinigung wird mit höherem Wasserdurchsatz gearbeitet. Ein dreiwöchiger Reinigungszyklus für jedes Element läßt die mittlere Temperaturerhöhung der Kaltwassertemperatur des Hauptkühlwassers auf 1 °C gegenüber dem gänzlich sauberen Turm absinken. Andere Reinigungsverfahren wurden untersucht, aber verworfen.

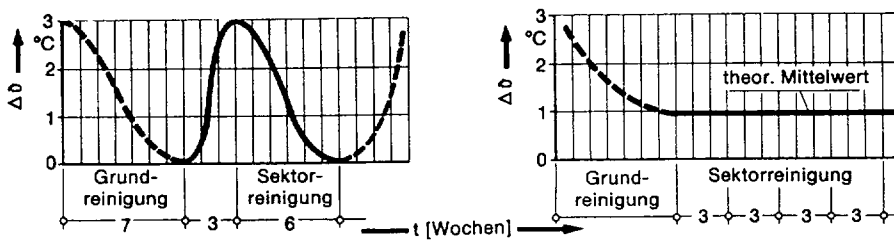
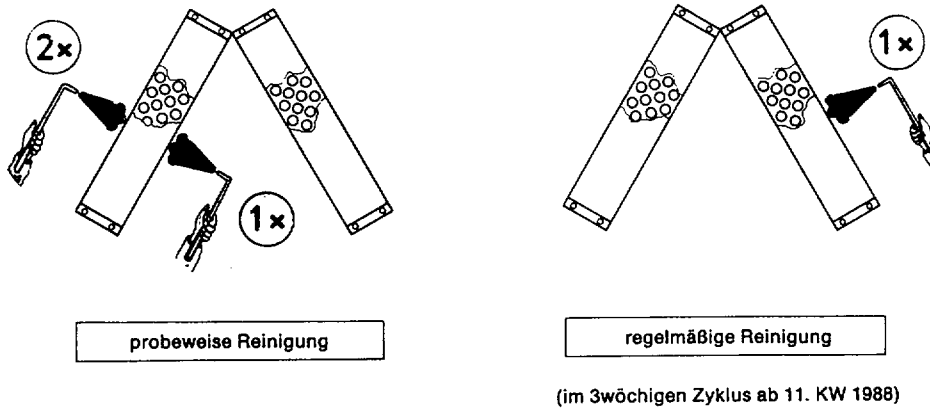


Bild 11. Prinzip der Kühlungsaufrechterreinigung.

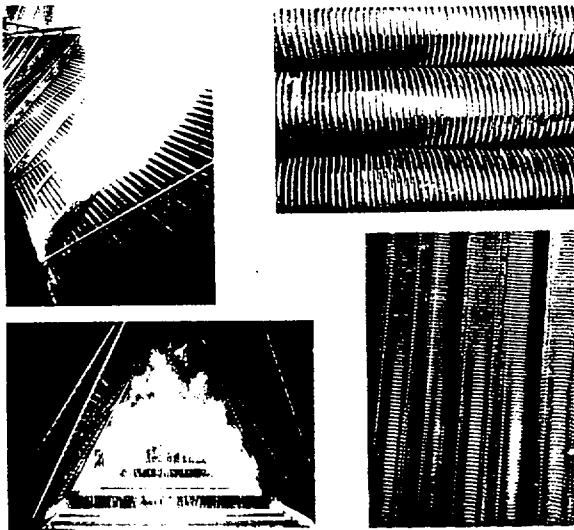


Bild 12. Reinigung der Kühler des Trockenkühlturms mit einem Hochdruckreiniger.

In Bild 12 ist links oben die maschinelle Reinigung mit dem Düsenstock zu erkennen, links unten der Wasserdurchtritt durch die einzelnen Elemente und rechts die gesäuberten Rohre. Der Zwischenraum der Kühlrippen beträgt 2 mm. Der Düsenstock bewegt sich nicht nur in axialer Richtung, sondern auch quer zur Elementachse.

Zusammenfassung

Die Wertung aller bisher beim THTR erlangten Betriebserfahrungen fällt eindeutig positiv aus. Die wesentlichsten Auslegungsdaten haben sich bestätigt. Mit den bisherigen Erkenntnissen aus dem THTR-Betrieb ist ein weiterer optimierter Hochtemperaturreaktor plan- und baubar.

Für den THTR beginnen gleichwohl schwierige Jahre, die nichts mit der Technik der Anlage zu tun haben, aber in denen es gilt, die Brennelementversorgung sicherzustellen und auf eine weitere Betriebsgenehmigung nach 1100 Volllasttagen hinzuwirken. Wenn alle, die den THTR zum Erfolg geführt haben, ihm auch weiterhin ihre Unterstützung angedeihen lassen, können wir auch diese Probleme lösen.