

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

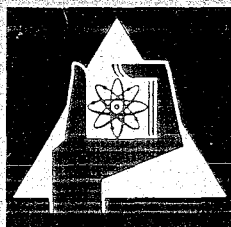
Oktober 1969

KFK 1159

Institut für Reaktorbauelemente

Zum Problem der Notkühlung eines Kernreaktors mit Gasturbine

W. Hübschmann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Zum Problem der Notkühlung eines Kernreaktors mit Gasturbine

Von Wolfgang Hübschmann, Karlsruhe *)

DK 621.039.5: 621.039.534

Wird für einen gasgekühlten Hochtemperaturreaktor eine hohe Notkühsicherheit verlangt, so bieten sich folgende konstruktive Maßnahmen an: die teilintegrierte Bauweise, eine besondere Konstruktion und Anordnung der HD-Verdichter, sowie dampfturbogetriebene Hilfsgebläse. Es wird untersucht, welcher Grad von Sicherheit gegen Verdichterausfall, Rohrbruch und zur Abfuhr der Nachwärme unter Unfallbedingungen durch diese Maßnahmen erreicht werden kann. Vor- und Nachteile dieser Maßnahmen werden zunächst anhand des schnellen gasgekühlten Hochtemperaturreaktors diskutiert, da für diesen eine besonders hohe Notkühsicherheit notwendig ist. Anschließend wird die Bedeutung für thermische Reaktoren erläutert.

1. Allgemeines

Die Probleme der Notkühlung eines gasgekühlten Hochtemperatur-Reaktors mit Gasturboanlage sind bei einem schnellen Reaktor mit metallischer Brennstoffumhüllung besonders ausgeprägt. Daher soll dieser Beitrag sich dem schnellen Reaktor im besonderen zuwenden und die Frage zu klären versuchen, mit welchen Mitteln eine ausreichende Notkühsicherheit dieses Reaktors erreicht werden kann, damit anschließend daraus die Konsequenzen für die weit weniger kritischen thermischen Reaktoren gezogen werden können. Ist es sinnvoll, diese Frage bereits jetzt zu stellen? Dazu soll die Bedeutung der Notkühlung für schnelle Reaktoren mit Gasturboanlage kurz erläutert werden. Die Notkühlung dieser Reaktoren ist nicht nur eine Frage der Sicherheit, sondern ebenso eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Dies wird durch zwei Gedankengänge deutlich:

1. Die Gasaustrittstemperatur aus dem Reaktor soll im Interesse eines guten thermodynamischen Wirkungsgrades möglichst hoch gewählt werden können. Dadurch wird jedoch der zulässige Temperaturanstieg bei einer Betriebsstörung eingeschränkt. Dies gilt besonders für den Direktkreislauf, da bei Brennelementschäden die Gefahr einer Turbinenkontamination und damit größerer Stillstandszeiten besteht; dies gilt ferner insbesondere für einen schnellen Reaktor, da dessen Wärmekapazität wesentlich kleiner als die eines thermischen Hochtemperaturreaktors ist. Soll für diesen Reaktortyp sowohl der Vorteil des hohen thermischen Wirkungsgrades einer Gasturboanlage nutzbar sein als auch der Vorteil der großen Verfügbarkeit gasgekühlter Kernkraftwerke erhalten bleiben, so ist dies nur bei genügend großer Notkühsicherheit möglich.

2. Wegen der Degression der Anlagekosten mit steigender Kraftwerksgröße besteht ein starker Trend zu immer größeren Kernkraftwerkseinheiten, und der Preisvorteil eines Großkraftwerkes bewährter Bauart wird vor einem kleinen Prototypkraftwerk fortschrittlicher Bauart immer größer. Damit wächst auch die Schwierigkeit, neue Kernreakortypen auf den Markt zu bringen. Ein Vorteil des gasgekühlten schnellen Brutreaktors besteht darin, daß sich der gesamte äußere Kreislauf und der Druckbehälter im Prinzip nicht von dem eines thermischen Reaktors unterscheiden, so daß beim Übergang auf schnelle Reaktoren theoretisch nur der Reaktorkern gewechselt zu werden braucht. Dieser Vorteil kann nur dann voll genutzt werden, wenn die Notkühsicherheit des thermischen Vorgängers bereits so groß ist, daß sie auch für einen schnellen Reaktorkern ausreicht, wenn also die „technologische Schrittweite“ so klein wie möglich gemacht wird.

Zweckmäßig erschien es daher, zu untersuchen, welche Möglichkeiten der Notkühlung für einen schnellen Reaktor mit Gasturboanlage bestehen und welche dieser möglichen Maßnahmen auch in thermischen Gasturboanlagen bereits mit Vorteil verwirklicht werden können.

2. Aufgaben der Notkühlung

Die vielfältigen Situationen, in denen eine Notkühlung erforderlich wird, können unter folgenden drei Begriffsformen zusammengefaßt werden.

*) Dr.-Ing. W. Hübschmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Kernforschungszentrums Karlsruhe.

Vortrag, gehalten am 15. April 1969 auf der Reaktortagung des Deutschen Atomforums e. V. in Frankfurt (Main).

1. **Verdichterausfall**; dazu zählen der Ausfall einer oder mehrerer Verdichter oder einer ganzen Welle.

2. **Rohrbruch**; dazu werden Brüche vor allem an den kritischen Stellen des Kreislaufes betrachtet.

3. **Nachwärmeabfuhr**; diese umfaßt Nachwärmepiegel zwischen 10 % und weniger als 1 % der Nennleistung, unter normalen und erschwerten Umständen, wie beschädigter Reaktorkern oder ausgefallene Pumpen und Gebläse.

Aus dem breiten Spektrum möglicher Notkühlrichtungen sollen hier nur die „system-spezifischen“ herausgegriffen werden. Als system-spezifisch kann man solche Einrichtungen bezeichnen, die allein aus einer Modifikation des Hauptkühlkreislaufes und seiner Komponenten entstehen bzw. solche Zusatzaggregate, die bereits für einen sicheren Lastbetrieb erforderlich sind. Vom Standpunkt sowohl der Betriebssicherheit als auch der Wirtschaftlichkeit sind solche Einrichtungen denen vorzuziehen, die nur für den Notfall betriebsbereit gehalten werden müssen.

Im folgenden werden diskutiert (Tafel 1):

- die teilintegrierte Bauweise,
- die Separierung und Aufteilung der HD-Verdichter,
- die Anordnung der HD-Aggregate in der Druckbehälterwand,
- dampfturbogetriebene Hilfsgebläse.

3. Teilintegrierte Bauweise

Die integrale Bauweise, d. h. die Zusammenfassung möglichst vieler Kreislaufkomponenten zusammen mit dem Reaktorkern in einem gemeinsamen Druckgefäß, wie bei anderen Reaktortypen bereits mit Erfolg angewendet und ist auch für Gasturboanlagen schon mehrfach vorgeschlagen worden [1; 2], und zwar ausschließlich in Verbindung mit einem Spannbeton-Druckbehälter, der für die integrale Bauweise geradezu prädestiniert ist [3]. Durch die Zusammenfassung der Kreislaufkomponenten und den Wegfall langer Rohrleitungen ergeben sich als Hauptvorteile:

- niedrigere Anlagekosten,
- niedrigerer Druckverlust,
- höhere Notkühsicherheit infolge der höheren Sicherheit gegen Rohrbrüche und plötzlichen Verlust des Kühlmittels.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht im Falle der Gasturboanlage darin, daß kaltes Kreislaufgas von 60 bis 80 °C

Tafel 1. Systemspezifische Maßnahmen zur Erhöhung der Notkühsicherheit

| konstruktive Maßnahme | wirksam bei |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Trennung von HD- und ND-Welle | Ausfall eines HD-Verdichters |
| Aufteilung der HD-Verdichter | |
| Integration des HD-Teils | Rohrbruch |
| konzentrische MD- und ND-Rohre | |
| HD-Aggregate als Gasstrombegrenzer | |
| Bypass mit Dampferzeuger | Ausfall der ND-Welle |
| dampfturbogetriebene Hilfsgebläse | Ausfall mehrerer HD-Verdichter |
| | Nachwärmeabfuhr |

innerhalb des Spannbeton-Druckbehälters für dessen notwendige Innenkühlung zur Verfügung steht. Da Druckbehälter und Kern den gleichen Grad an Notkühsicherheit aufweisen müssen, erscheint es zunächst sinnvoll, auf die kostspielige separate Kühlung des Druckbehälters, wie sie bei einer 2-Kreis-Anlage notwendig ist, zu verzichten, dafür aber bei der integrierten 1-Kreis-Anlage das gemeinsame Kühl- und Notkühsystem mit um so größerer Sicherheit auszustatten. Diese höhere Sicherheit kommt beiden, dem Druckbehälter und dem Kern, zugute, bei gleichzeitig vereinfachter Anlage. Im folgenden wird eine Kopplung der Kern- und Druckbehälterkühlung vorgesehen, damit die dabei auftretende Problematik herausgearbeitet werden kann.

Nachteilig ist bei integrierter Bauweise die erschwerte Zugänglichkeit der integrierten Komponenten zur Inspektion, Wartung und Reparatur. Dies darf nicht zu einer verringerten Betriebssicherheit oder Verfügbarkeit der gesamten Anlage führen. Daher kann die meist vorgeschlagene vollintegrierte Bauweise, bei der alle Turbomaschinen und Wärmetauscher integriert sind und die zweifellos ein erstrebenswertes Endziel darstellt, sicher nur schrittweise erreicht werden.

Um die „technologische Schrittweite“ zu verkleinern, muß man als Zwischenlösung zunächst eine teilintegrierte Bauweise wählen. Gezeigt soll werden, wieweit dabei bereits die Vorteile der Integration bezüglich der Sicherheit verwirklicht werden können. Bild 1 zeigt das Prinzip einer teilintegrierten Bauweise. Die Turbomaschinen sind auf die HD- und ND-Welle aufgeteilt. Nur der HD-Teil ist zusammen mit dem Rekuperator 5 in den Druckbehälter integriert. Der ND-Teil mit dem Generator und den Kühlern verbleibt frei zugänglich außerhalb des Druckbehälters und kann bis zu größten Leistungen einwellig, d. h. mit dem besten erreichbaren Wirkungsgrad, ausgeführt werden, wie K. Bamnert gezeigt hat [4].

Der integrierte HD-Teil jedoch kann auf mehrere parallele Wellen aufgeteilt werden, deren Anzahl unabhängig von der Anzahl der ND-Wellen so groß gewählt werden kann, daß die Anlage genügend unempfindlich gegen den Ausfall eines der Verdichter und gleichzeitig unabhängig vom sofortigen Einsatz von Hilfsgebläsen wird. Auf besondere Probleme des HD-Aggregates wird weiter unten eingegangen.

Der Druckbehälter ist dem eines fortschrittlichen gasgekühlten Reaktors (AGR) sehr ähnlich: Die Dampferzeuger werden durch die Rekuperatoren, die elektrisch getriebenen Gebläse durch gas-turbo-getriebene Verdichter ersetzt. Der wesentliche Unterschied besteht lediglich darin, daß der Druckbehälter jetzt mit dem kalten Gas aus dem HD-Verdichter gekühlt wird. Die enge technologische Verwandtschaft dürfte den Übergang von einer 2-Kreis- auf eine 1-Kreis-Anlage erleichtern.

Durch die Integration des gesamten HD-Teils entfällt die Bruchgefahr in diesem durch Druck und Temperatur am stärksten belasteten Teil des Kreislaufes; denn ein plötzlicher Bruch des Spannbeton-Druckbehälters braucht praktisch nicht betrachtet zu werden.

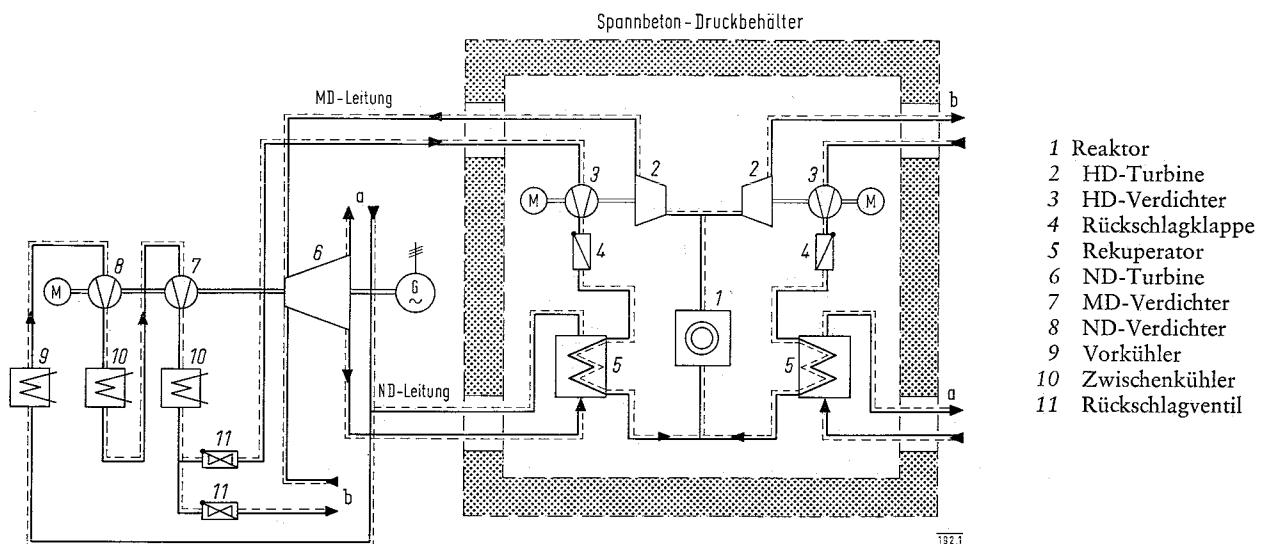
Im MD- und ND-Bereich kann die Bruchgefahr durch die konsequente Anwendung des bekannten Prinzips konzentrischer Rohrleitungen wesentlich verringert werden, wie in Bild 1 für die MD- und ND-Leitung gezeigt. Sie kann jedoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Bei einem Bruch der MD-Rohrleitung, des am schwersten zu beherrschenden Bruches, z. B. fällt der Gasdruck im Druckbehälter schnell auf den Ausgleichsdruck im Sicherheitsbehälter, das sind etwa 2 bis 3 at, ab [1]. Dieser Druckverfall muß durch Begrenzung der möglichen Leckquerschnitte so weit verlangsamt werden, daß genügend Zeit für eine kontrollierte Reduzierung der Reaktorleistung und die Einleitung von Notkühlmaßnahmen bleibt. Dabei stellt die hohe Schallgeschwindigkeit des Heliums ein schwieriges Problem dar. Will man z. B. wie in Siedewasserreaktoren die Druckverfallsgeschwindigkeit durch den Einbau von Venturidüsen in alle Rohrleitungen wirksam begrenzen, so muß man bei Helium sehr enge Venturidüsen und damit beträchtliche ständige Druckverluste in Kauf nehmen. Die teilintegrierte Bauweise bietet hierzu eine Alternativlösung, die den störenden Druckverlust der Venturidüse vermeidet. Die Venturidüsen werden durch die engen Strömungskanäle der Turbine und des Kompressors ersetzt. Eine solche Anordnung wurde zuerst beim dampfgekühlten Brutreaktor vorgeschlagen [5]. Im Unterschied zu diesem kann allerdings der bei einem Rohrbruch austretende Heliumstrom wegen der hohen Schallgeschwindigkeit auf ein Mehrfaches des Nennwertes ansteigen. Dabei werden Überdrehzahlen auftreten, die zu einem Bruch der Schaufeln oder des Läufers führen können.

Um eine gefährliche Kettenreaktion zu vermeiden, muß man solche Aggregate in die Druckbehälterwand einbauen, und zwar so, daß diese gleichzeitig Fundament und Splitterschutz darstellt. Man versuchte, ein HD-Aggregat zu konzipieren, das diesen Anforderungen gerecht wird, sich aber nicht allzu weit von bereits bekannten Konstruktionen [1; 6; 7] entfernt.

4. Integriertes HD-Aggregat

Bild 2 zeigt ein solches integriertes HD-Aggregat, das durch folgende Hauptmerkmale gekennzeichnet ist:

- Die HD-Verdichterleistung wird auf 4 bis 8 parallele Aggregate aufgeteilt. Diese Aufteilung hat sich als eine ausreichende Reservehaltung herausgestellt. Dadurch ergeben sich hoch-

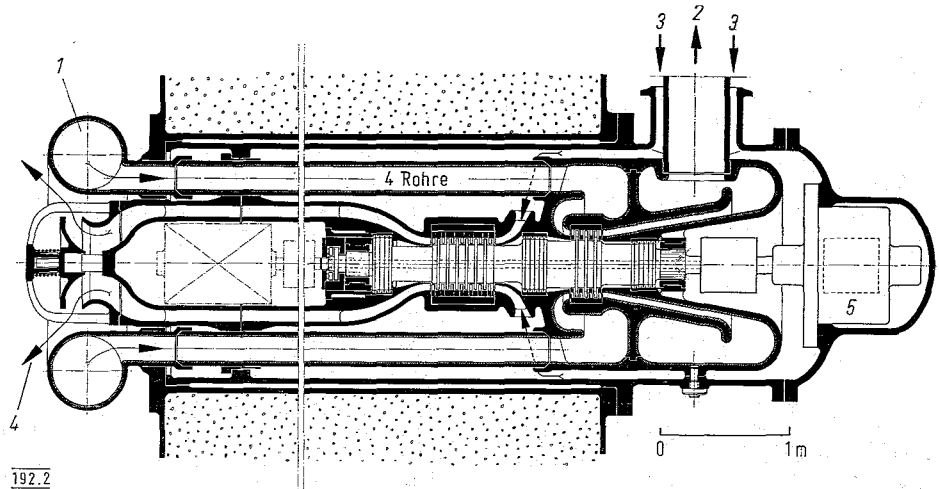


- 1 Reaktor
- 2 HD-Turbine
- 3 HD-Verdichter
- 4 Rückschlagklappe
- 5 Rekuperator
- 6 ND-Turbine
- 7 MD-Verdichter
- 8 ND-Verdichter
- 9 Vorkühler
- 10 Zwischenkühler
- 11 Rückschlagventil

Bild 1. Schaltbild einer Gasturbinenanlage mit integrierten Hochdruckaggregaten

Bild 2.
Integrierter Hochdruck-Turboverdichter

- 1 vom Reaktor
- 2 zur ND-Turbine
- 3 vom MD-Verdichter
- 4 zum Rekuperator
- 5 Motor



tourige, kompakte Aggregate mit kleinem Laufraddurchmesser, die leicht ein- und ausgebaut werden können.

- Die Lager sind vorzugsweise gasgeschmiert. Dadurch entfallen gesonderte Schmiermittelanschlüsse und Dichtungen, und die Möglichkeit des Eindringens von Schmieröl ins Kühlmittel ist — zumindest innerhalb des Druckbehälters — beseitigt.
- Die Aggregate werden innerhalb der Druckbehälterwand in die konzentrischen MD-Leitungen so eingebaut, daß die Leckquerschnitte bei den möglichen Rohr- oder Flanschbrüchen so klein wie möglich werden. Besondere Montageöffnungen werden eingespart, was den Erfordernissen der Betonbauweise sowie der Sicherheit entgegenkommt. Nachteilig sind allerdings die sich kreuzenden Gasströme an der Eintrittsseite sowie der verhältnismäßig große Axial Schub, da sich der Schub der Turbine und der des Verdichters addieren.
- An der Austrittsseite des HD-Verdichters wird eine Rückschlagklappe vorgesehen. Diese ist notwendig für einen stabilen Parallelbetrieb der Verdichter und wirkt bei einem Rohrbruch als Sperre in der Kaltgasleitung. Diese Sperre soll ermöglichen, wie noch gezeigt wird, auch nach einem Rohrbruch den Kern gezielt zu kühlen. Außerdem kann ein elektrischer Zusatzantrieb angeordnet werden, welcher zum Anfahren der Anlage, zum Stabilisieren des Gleichlaufes der HD-Aggregate untereinander sowie als Reserveantrieb zur Notkühlung dient. Die Anordnung des Motors auf der linken, inneren Seite hat Vorteile bezüglich der Sicherheit, beschränkt jedoch die Leistung, da der verfügbare Durchmesser verhältnismäßig klein ist.

Die gezeigte Ausführungsform ist sicher nicht die einzig mögliche; wenn es jedoch gelingt, ein Aggregat zu entwickeln, das den erwähnten Anforderungen entspricht, so können auch bei nur teilintegrierter Bauweise die wesentlichen sicherheitstechnischen Vorteile der Integration genutzt werden, ohne die Nachteile der vollen Integration, wie erschwerte Zugänglichkeit und eventuell verminderte Verfügbarkeit, in Kauf nehmen zu müssen.

5. MD-Bypass und Hilfsgebläse

Die durch die Integration erzielte Sicherheit bezieht sich auf die unmittelbaren Auswirkungen von Störungen während des Betriebes. Als nächstes muß die Nachwärmeabfuhr sichergestellt werden, und zwar nicht nur unter normalen Bedingungen, d. h. bei intaktem Kreislauf, sondern auch unter erschwerten Bedingungen, wie Rohrbruch oder Versagen der ND-Welle. Bisherige Vorschläge zur Nachwärmeabfuhr bieten Nachteile bei teilintegrierter Bauweise:

1. Durchdrehen der Wellen mit Hilfe der Anwurfmotoren. Diese Methode ist unbefriedigend, da sie eine große elektrische Leistung erfordert, die durch ständig einsatzbereite Hilfsgeneratoren erbracht werden muß. Sie versagt außerdem bei der hier gewählten Schaltung, wenn die ND-Welle beschädigt ist (z. B. durch Schaufelbruch oder Lagerschaden).

2. Elektrisch getriebene Hilfsgebläse und Notkühler in einem Bypass.

Diese Methode entspricht der bekannten Notkühlung der 2-Kreis-Anlagen [7], bei der das Gas auf hohem Temperaturniveau umgewälzt wird. Sie ist daher dann ungenügend, wenn das Druckgefäß mit kaltem Kreislaufgas gekühlt werden soll.

Bei beiden Lösungen bleibt die Nachwärme ungenutzt, und eine hohe Notstromleistung muß ständig verfügbar sein. Wegen des schnellen Sinkens der Nachwärme, die schon nach einer halben Stunde auf unter 2 % der vorherigen Leistungsstufe gesunken ist, wäre es sehr wünschenswert, gerade die erste Zeit nach dem Abschalten, den Reaktor aus eigener Kraft kühlen zu können.

Für die teilintegrierte Bauweise wird deshalb ein Notkühl-doppelkreislauf vorgesehen (Bild 3). Ein MD-Bypass 1 verbindet die heiße und kalte Seite der konzentrischen MD-Leitungen über einen Bypass-Kühler 2, ein Hilfsgebläse 3 und ein Rückschlagventil 5, das normalerweise durch den Differenzdruck der MD-Leitung geschlossen ist. Im Bypass-Kühler 2 wird der Dampf zum Betrieb eines Turbogenerators 8 erzeugt. Dieser liefert den Strom zum Betrieb der Hilfsgebläse.

Der MD-Bypass 1 ist der eigentliche Sicherheitskreislauf. Er erlaubt es, daß die HD-Aggregate auch dann weiterlaufen, wenn die ND-Welle ausfällt, da sich die Rückschlagventile 5 dann selbsttätig öffnen. Er macht die Notkühlung vielfältig und redundant:

vielfältig dadurch, daß HD-Aggregate und Hilfsgebläse in Reihe geschaltet und von unterschiedlichen Energiequellen gespeist werden, redundant dadurch, daß mehrere Kreisläufe parallel arbeiten.

Die Hilfsgebläse sind ständig betriebsbereit; denn der Dampf-erzeuger 2 wird durch einen kleinen Bypass-Strom unter Druck sowie die Turbine 8 durch einen Dampfstrom warm gehalten, so daß sowohl ein häufiger Funktionstest als auch ein sofortiges Anspringen bei einer Betriebsstörung gewährleistet sind.

Damit die Gastemperatur im MD-Verdichter und am Eintritt in den Rekuperator 9 nicht sprungartig steigt, wird das Gas in diesem Bypass auf unter 100 °C abgekühlt. Der Gasstrom in diesem Bypass kann daher nur klein sein. Der Massenstrom entspricht prozentual etwa dem Nachwärmepegel. Der Volumenstrom fällt auf etwa 10 % des Nennwertes. Dies hat zwei Konsequenzen:

1. Ein HD-Bypass 10 ist zusätzlich notwendig; denn der kleine Gasstrom des MD-Bypasses 1 würde nicht ausreichen, den Reaktorkern in allen Teilen genügend zu kühlen. Außerdem würde es zu Wärmespannungen führen, wenn der kalte Rückstrom aus diesem Bypass unmittelbar den Reaktorkern und seinen Tragrost treffen würde; denn im Bypassbetrieb fehlt die aufheizende Wirkung des Rekuperators. Diese muß ersetzt werden durch den überlagerten HD-Bypass 10 (Bild 3), mit dem Hilfsgebläse 4 und der Rückschlagklappe 12. Das Gebläse 4 wälzt ein Mehrfaches der Menge im MD-Bypass — bis

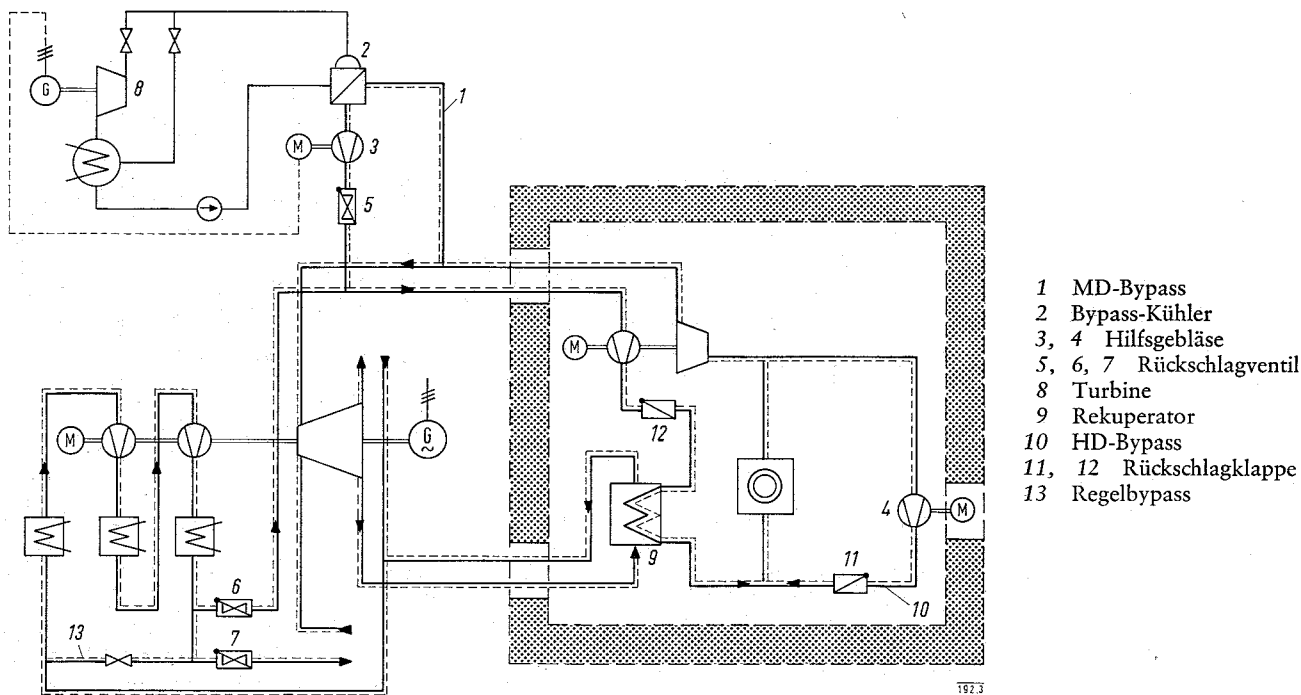


Bild 3. Schaltbild mit Bypass und Hilfsgebläsen

- 1 MD-Bypass
- 2 Bypass-Kühler
- 3, 4 Hilfsgebläse
- 5, 6, 7 Rückschlagventil
- 8 Turbine
- 9 Rekuperator
- 10 HD-Bypass
- 11, 12 Rückschlagklappe
- 13 Regelbypass

zu etwa 10 % der Vollastmenge — um, so daß der Kern gut gekühlt ist und die Aufheizspanne gering bleibt.

2. Für die Behälterkühlung steht auch im Notkühlbetrieb kaltes Kreislaufgas, allerdings nur in kleiner Menge, zur Verfügung. Hier tritt das eigentliche Problem der Kopplung von Kern- und Druckbehälterkühlung in Erscheinung. Sie erscheint im Prinzip möglich; jedoch muß durch die Führung des Gases innerhalb des Druckbehälters dafür gesorgt werden, daß auch bei kleinem Gasstrom der Druckbehälter ausreichend kalt gehalten wird.

Praktisch die gesamte Nachwärme und die im Druckbehälter gespeicherte Wärme kann verlustlos zur Dampferzeugung genutzt werden. Da ein Dampfkreislauf — im Gegensatz zum Gaskreislauf — auch bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen noch einen annehmbaren Wirkungsgrad aufweist, erlaubt diese Schaltung, die Nachwärme verhältnismäßig lange mit eigener Kraft abzuführen.

Eine Grenze ist dadurch gezogen, daß die Reaktoraustrittstemperatur nach etwa einer Stunde so weit abfällt, daß der Dampfkreislauf nicht mehr betrieben werden kann. Diese Zeit reicht jedoch bequem, ein Notstromaggregat in Betrieb zu nehmen, das lediglich zur Abfuhr von etwa 1,5 % Nachwärme ausgelegt zu sein braucht.

Die Schaltung (Bild 3) ermöglicht, auch bei Rohrbrüchen den Kern gezielt zu kühlen:

Bei dem gefährlichsten Rohrbruch — das ist der Bruch der konzentrischen MD-Leitung — muß lediglich das Rückschlagventil 6 oder 7 des schadhaften Rohrstranges geschlossen werden. Die Rückschlagklappe schließt selbsttätig, so daß nur noch das heiße Innenrohr der gebrochenen MD-Leitung nach außen offen ist. Der Kern kann daher sowohl durch die HD-Aggregate als auch die Hilfsgebläse der übrigen MD-Leitungen direkt gekühlt werden, da das kalte Gas den Kern passieren muß, bevor es den Leckquerschnitt erreicht. Vorausgesetzt, daß der Reaktor schnell abgeschaltet wird, kann eine gefährliche Überhitzung des Kerns damit vermieden werden. Brüche an anderen Stellen des Kreislaufes sind leichter zu beherrschen.

6. Anwendbarkeit auf thermische Reaktoren

Zum Schluß soll erörtert werden, wieweit die skizzierten Vorschläge auch für thermische Reaktoren angewendet werden können. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß die

Kontinuität der Kernkühlung eine wesentlich kleinere Bedeutung hat, sowohl wegen der großen Wärmekapazität als auch wegen der Unempfindlichkeit des thermischen Kerns.

Die Argumente für die Trennung von HD- und ND-Welle und für die Aufteilung und Integrierung der HD-Aggregate verlieren damit an Bedeutung, insoweit diese Maßnahmen den Kern gegen eine Überhitzung bei Ausfall eines HD-Verdichters oder bei Rohrbruch schützen sollen. Die teilintegrierte Bauweise, d. h. die Integration nur des HD-Teiles und Rekuperators mit den konzentrischen Rohrleitungen, behält jedoch als Alternative zur vollintegrierten Bauweise ihre Vorzüge, insbesondere die der besseren Zugänglichkeit der Komponenten bei gleich guter Bruch-sicherheit des Kreislaufes.

Ebenso dürfte der MD-Bypass mit Dampferzeuger und dampfturbogetriebenen Hilfsgebläsen interessant bleiben wegen der guten Betriebssicherheit, wegen der Reduzierung der Anforderungen an die Notstromversorgung und weil er die Kopplung von Kern- und Druckbehälterkühlung ermöglicht. Wird von der Möglichkeit der Kopplung Gebrauch gemacht, dann allerdings werden auch die Argumente für die Trennung und Aufteilung der HD-Aggregate wieder stark, da diese Maßnahmen die Vielfalt und Redundanz der Behälterkühlung gewährleisten.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß bei thermischen Reaktoren die Argumente zwar nicht so zwingend wie bei schnellen Reaktoren sind, daß die Maßnahmen aber auch dort mit Vorteil angewendet werden können, um Erfahrungen für den Betrieb eines schnellen Reaktors zu gewinnen.

7. Schrifttum

- [1] Bammert, K.; Böhm, E.: High temperature gas-cooled reactors with gas turbine. *Atomkernenergie* 13 (1968) S. 371–376.
- [2] Thorn, J. D.; Coast, G.; Prince, K.: Nuclear gas turbine concepts. IAEA symposium Jülich, Oct. 68, SM 111/40.
- [3] Lindackers, K.-H.; Stöbel, W.; Tscherner, M.: Major safety aspects for the construction of HTGR's or AGR's in more densely populated areas. IAEA symposium Jülich, Oct. 68, SM 111/9.
- [4] Bammert, K.; Twardziok, W.: Kernkraftwerke mit Heliumturbinen für große Leistungen. *Atomkernenergie* 12 (1967) S. 305–326.
- [5] Erbacher, F.; Frisch, W.; Hübschmann, W.; Ritz, L.; Woite, G.: The safety of steam-cooled fast reactors as influenced by the design and arrangement of their components. Internat. Conf. on the Safety of Fast Reactors, Aix-en-Provence, Sept. 1967.
- [6] Spillmann, W.: Einige Probleme der Helium-Turbomaschinen für Atom-anlagen. *Escher Wyss Mitt.* 33 (1960) S. 111–114.
- [7] Keller, C.: Über Grundlagen und Aufbau des ersten Kernkraftwerks mit Gasturbine im Direktkreislauf (Geesthacht). *Brennstoff-Wärme-Kraft* 20 (1968) S. 257–259.