

ÜBER DIE THERMODYNAMISCHEN GRUNDLAGEN DER REAKTORKÜHLUNG

Von

G. BÜKI

Lehrstuhl für Wärmekraftwerke, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 27. September 1961)

Vorgelegt von Prof. DR. A. LÉVAI

I. Einleitung

Die grundlegende Bedingung zur Erzielung eines guten Wirkungsgrades in Wärmekraftwerken beliebiger Art besteht darin, daß die verwertbare Wärme dem Arbeitsmittel mit der höchstmöglichen durchschnittlichen Temperatur zugeführt wird, wobei man stets von den einschränkenden Faktoren der Anfangstemperatur auszugehen hat. Als solche gelten in den klassischen Wärmekraftwerken das Material des Kesselüberhitzers bzw. der Hauptdampfleitung und der Turbine. In Kernkraftwerken hingegen *kann als begrenzende Temperatur die zulässige Höchsttemperatur im Reaktor-Spaltstoff bzw. in dessen Umhüllung betrachtet werden*, je nach dem, welche der beiden im gegebenen Fall die Temperatur des Kühlmittels tatsächlich einschränkt. Die vorliegende Arbeit setzt sich den Nachweis zum Ziel, daß dieser Ausgangspunkt bei Kernkraftwerken besonders wichtig ist und daß darüber hinaus zur Ausgestaltung des Wärmekreisprozesses von Kernkraftwerken überhaupt nur *jene thermodynamische Betrachtungsweise richtig sein kann, die als Ausgangsbedingung die im Spaltstoff bzw. die in dessen Umhüllung zulässige Temperatur ansieht*. Eine solche Betrachtungsweise muß bei der Bestimmung der optimalen thermodynamischen Kenngrößen die mit der Reaktorkühlung verknüpften wärmetechnischen und reaktorphysikalischen Änderungen der Primärseite ebenso in Rechnung ziehen wie die Wirkungsgradänderung an der Sekundärseite bzw. deren wirtschaftliche Folgen. Es folgt daraus ein Vorschlag zur Änderung der Anfangstemperatur in Abhängigkeit von der Kraftwerksbelastung.

2. Temperaturdiagramme des Reaktors und des Arbeitsmittels

In einem Kühlkanal des Reaktors kann der Temperaturverlauf des Kühlmittels [$t_K(z)$], der Umhüllung [$t_H(z)$] und des Spaltstoffes [$t_B(z)$] dem Kanal (z) entlang berechnet werden, wenn die Änderung der Wärmequelle [$q(z)$] —ebenfalls dem Kanal entlang— bekannt ist [1]. Den Temperaturverlauf des Kühlmittels beschreibt mithin der Zusammenhang

$$t_K(z) = t_{K1} + \frac{\int_0^z q(z) \cdot dz}{G \cdot c_p} \quad (1.1)$$

Hier bedeutet t_{K1} in [°C] die Temperatur des in den Kanal eintretenden Kühlmittels (die Austrittstemperatur desselben wird mit t_{K2} bezeichnet), G in [kg/h] die durch den Kanal strömende Kühlstoffmenge, c_p in [kcal/kg, °C] die als konstant vorausgesetzte spezifische Wärme des Kühlmittels, $Q(z)$ in [kcal/h, cm] die auf die Längeneinheit (z in cm) des Spaltstoffstabes bezogene Wärmequelle. Diese und die nachfolgenden Gleichungen gelten unter der Voraus-

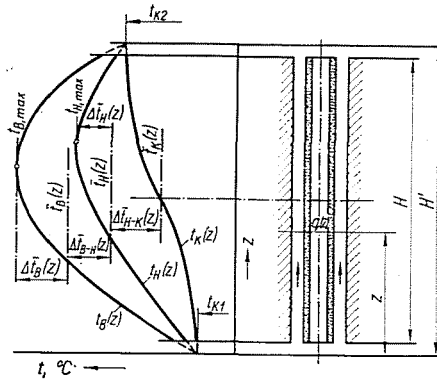


Abb. 1. Temperaturverlauf von Kühlmittel, Spaltstoff und Umhüllung im Kühlkanal

setzung, daß die Wärme aus Spaltstoff und Umhüllung auf den Kühlmittel senkrecht zum Spaltstoffkanal übergeht; die Wärmeströmung dem Kanal entlang wird hierbei vernachlässigt. Der Temperaturverlauf in der Umhüllung wird durch die Gleichung

$$t_H(z) = t_K(z) + \frac{Q(z)}{k_{H-K} \cdot f} \quad (1.2)$$

beschrieben, in der k_{H-K} die Wärmedurchgangszahl zwischen Umhüllung und Kühlmittel in [kcal/h, cm², °C], hingegen f die auf die Einheitslänge des Spaltstoffstabes bezogene wärmeabgebende Fläche bezeichnet, die somit die Dimension [cm] hat. Ähnlich kann z. B. der Verlauf der Mittelpunktstemperatur vom zylindrischen Spaltstoffstab zu

$$t_B(z) = t_K(z) + \frac{Q(z)}{k_{B-K} \cdot f} \quad (1.3)$$

geschrieben werden. Dabei ist k_{B-K} die fiktive Wärmedurchgangszahl zwischen

der Mittellinie des Spaltstoffstabes und dem Kühlstoff. Diese Zahl ist insofern fiktiv, daß sie einerseits die innere Wärmequelle im Spaltstoff mit berücksichtigt, andererseits aber auf die Wärmeübergabefläche zwischen Umhüllung und Betriebsstoff bezogen ist.

In Abb. 1 sind die angeführten Zusammenhänge graphisch dargestellt, und zwar unter Berücksichtigung der extrapolierten Länge des Spaltstoff-

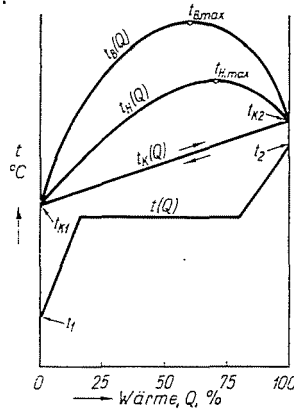


Abb. 2. Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der übertragenen Wärmemenge

stabes, da dies im weiteren die graphische und analytische Umformung der Kurven in anderen Diagrammen wesentlich erleichtert. An der extrapolierten Länge ist nämlich der Neutronenfluß und somit die Wärmeentwicklung gleich Null, weshalb auch kein Temperaturunterschied zwischen Kühlmittel, Umhüllung und Spaltstoff besteht.

Zur Untersuchung der Anfangstemperatur des anschließenden Arbeitsprozesses wird man obige Temperaturänderungen zweckmäßig als Funktion des prozentualen Anteils der durch das Kühlmittel aufgenommenen bzw. angegebenen Wärmemenge ($Q, \%$) darstellen (Abb. 2). In diesem Diagramm ändert sich die Kühlmitteltemperatur $[t_K]$ — gleichfalls eine konstante spezifische Wärme angenommen — linear mit Q

$$t_K(Q) = t_{K1} + \frac{Q}{G \cdot c_p} \tag{1.4}$$

Die Temperaturkurven des Betriebsstoffes $[t_B(Q)]$ und der Umhüllung $[t_H(Q)]$ können graphisch bzw. analytisch gleichfalls leicht umgeformt werden. Für den Temperaturverlauf der Umhüllung gilt der Zusammenhang

$$t_H(Q) = t_K(Q) + \frac{q(Q)}{h_{H-K} \cdot f} \tag{1.5}$$

und für den Temperaturverlauf des Spaltstoffes der Zusammenhang

$$t_B(Q) = t_K(Q) + \frac{q(Q)}{k_{B-K} \cdot f}. \quad (1.6)$$

Die in letzten beiden Gleichungen vorkommende Funktion $q(Q)$ kann aus den bekannten Funktionen $q(z)$ und $Q(z) = \int_0^z q(z) \cdot dz$ bestimmt werden.

Die Temperaturlinie des Kühlmittels zeigt in der einen Richtung die Erwärmung im Reaktor, in der anderen Richtung die Abkühlung im Wärmeaustauscher. An die Abkühlungskurve kann sich sinngemäß die Erwärmungs-

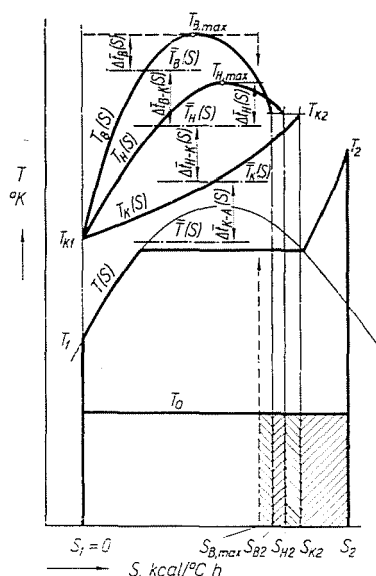


Abb. 3. Reaktortemperaturen und Wärmekreisprozeß von Kernkraftwerken im T — S -Diagramm

kurve des Arbeitsmittels im sekundären System anschließen, wenn die Temperatur desselben ebenfalls als Funktion der aufgenommenen Wärmemenge dargestellt wird [$t(Q)$]. In diesem Falle werden eigentlich die Zustandsänderungen des Arbeitsmittels im t — i Diagramm derart dargestellt, daß man statt des spezifischen Wärmeinhaltes die prozentuale Wärmemenge benützt. (Als Arbeitsmittel wird in der Folge als Beispiel überhitzter Dampf mit einer einzigen Druckstufe vorausgesetzt.)

In diesem Schaubild lassen sich zwar die Beziehungen zwischen den Primär- und Sekundärtemperaturen vorteilhaft darstellen, doch bietet es nur geringe Möglichkeiten den wirkungsgradverschlechternden Einfluß der Tem-

peraturunterschiede zu untersuchen; zu diesem Zweck eignen sich die T - s , oder $1/T$ - i -Diagramme weit besser. Von diesen beiden wird hier das T - S Diagramm gewählt, da in diesem außer den Verlusten auch der Wirkungsgrad des Wärmekreisprozesses gut dargestellt werden kann (Abb. 3).

In diesem Diagramm wird jedoch der Begriff der Entropie (S) in einem allgemeineren Sinne benützt, als dies in der wärmetechnischen Praxis für gewöhnlich üblich ist. Die hier benutzte Entropie ist keine spezifische und keine Zustandsgröße, wird also nicht auf die Gewichtseinheit eines Stoffes bezogen, sondern auf die in der Zeiteinheit (h) zugeführte bzw. abgeführte totale Wärmemenge (Q) nach der bekannten Beziehung $Q = \int T \cdot dS$. Die Dimension der Entropie ist daher hier kcal/°C, h. Da die verschiedenen Medien (Kühlmittel, Umhüllung, Spaltstoff) immer dieselbe Wärme aufnehmen, müssen bei ihnen im T - S -Diagramm die Flächen unter der Temperaturlinie gleich sein, so daß dem abweichenden Temperaturverlauf entsprechend den einzelnen Medien verschiedene Entropie-Endwerte (S_2) zugehören. Der Anfangswert der Entropie (am Anfang der extrapolierten Länge) ist überall gleich ($S_1 = 0$). Diese Deutung der Entropie ermöglicht die graphische Transformierung der Temperaturkurven aus Abb. 2 in das T - S -Schaubild der Abb. 3. Für die Temperaturänderung des Kühlmittels gilt der Zusammenhang

$$T_K(S) = T_{K1} + \frac{\int_{T_{K1}}^{T_K(S)} T_K(S) \cdot dS}{G \cdot c_p}, \quad (1.7)$$

für die Temperaturänderung der Umhüllung

$$T_H(S) = T_{K1} + \frac{\int_{T_{K1}}^{T_H(S)} T_H(S) \cdot dS}{G \cdot c_p} + \frac{q \left[\int_{T_{K1}}^{T_H(S)} T_H(S) \cdot dS \right]}{k_{H-K} \cdot f} \quad (1.8)$$

und für die Temperaturänderung des Betriebsstoffes

$$T_B(S) = T_{K1} + \frac{\int_{T_{K1}}^{T_B(S)} T_B(S) \cdot dS}{G \cdot c_p} + \frac{q \left[\int_{T_{K1}}^{T_B(S)} T_B(S) \cdot dS \right]}{k_{B-K} \cdot f}. \quad (1.9)$$

Wie bereits bei den Gleichungen (1.5) und (1.6) angeführt, bedeuten die Funktionen q [$T \cdot dS$] die Änderungen der Wärmequelle entlang der aufgenommenen Wärme.

Für die späteren Untersuchungen ist in der Abb. 3 auch jener Fall dargestellt, bei welchem die Temperatur während der Wärmeabfuhr im Spaltstoffstab konstant und gleich der höchsten Temperatur ist ($T_{B, \max}$). Die zulässige Entropiezunahme ist hierbei die geringste ($S_{B, \max}$, gestrichelte Linien).

Zu vorstehenden Ausführungen sei noch folgendes bemerkt:

Die Gleichungen der Temperaturänderungen (1.1) bis (1.9) können nur dann entwickelt werden, wenn die Verteilung der Wärmequelle, d. h. des Neutronenflusses dem Kanal entlang bekannt ist. Als Beispiel sind im Anhang die Lösungen der Integralgleichungen für den reflektorlosen, unregelmäßigten Reaktor — also für den Fall des sinusförmig verteilten Flusses — angegeben. Wie aus diesen Beispielen ersichtlich, erhält man für die Temperaturänderungen — selbst für die einfachsten — wenig handliche Beziehungen, es ist also praktischer, den Temperaturverlauf graphisch darzustellen.

Ferner sei noch hervorgehoben, daß an den Schaubildern 1 und 3 außer dem Temperaturverlauf auch die Durchschnittstemperaturen und die durchschnittlichen Temperaturunterschiede dargestellt sind, doch muß betont werden, daß *die durchschnittlichen Temperaturen und Temperaturunterschiede in den verschiedenen Schaubildern nicht gleich sind.* (So z. B. ist die Durchschnittstemperatur des Kühlmittels im Falle sinusförmiger Flußverteilung im $t-z$ und $t-Q$ -Schaubild $\bar{t}_K(z) = \bar{t}_K(Q) = \frac{t_{K1} + t_{K2}}{2}$, d. h. das arithmetische Mittel der Ein- resp. Austrittstemperaturen, während dieselbe Durchschnittstemperatur im $T-S$ -Schaubild $\bar{T}_K(S) = (T_{K2} - T_{K1}) / \ln \frac{T_{K2}}{T_{K1}}$ beträgt, d. h. dem logarithmischen Mittelwert entspricht. Bei wärmetechnischen und thermodynamischen Untersuchungen des Reaktors muß also stets mit den entsprechenden Temperaturen bzw. Diagrammen gerechnet werden, wobei besonders auf nachstehende zwei Fälle zu achten ist:

1. Bei wärmetechnischen Untersuchungen des Reaktors selbst bildet z. B. die Berechnung der gewinnbaren Wärmeleistung eine wichtige Aufgabe. Die vom Spaltstoff an das Kühlmittel abgebbare Wärmemenge kann aus der Beziehung

$$Q = \int_0^F k_{B-K} \cdot \Delta t_{B-K}(z) \cdot dF \quad (1.10)$$

berechnet werden, in der beispielsweise für das zylindrische Spaltstoffelement die Beziehung $dF = d \cdot \pi \cdot dz$ gilt (d ist der Durchmesser des Spaltstoffstabes). Der in (1.10) vorkommende Temperaturunterschied (Δt_{B-K}) ist eine Funktion der Länge des Kanals. *Offensichtlich müssen die für die Wärmeleistung maßgebenden durchschnittlichen Temperaturen und Temperaturunterschiede stets im $t-z$ bzw. $t-Q$ Diagramm bestimmt werden.*

2. Bei der thermodynamischen Untersuchung des Kernkraftwerkes wünscht man dagegen aus der Änderung der Reaktortemperaturen auf den thermischen Wirkungsgrad des anschließenden Arbeitsprozesses zu folgern. *Naturgemäß muß man in diesem Falle die den thermischen Wirkungsgrad be-*

* S. Punkt 3. Gleichungen (3.2)–(3.4)

stimmenden durchschnittlichen Temperaturen und Temperaturunterschiede stets im $T-S$ Diagramm rechnen.

Da zwischen den Temperaturen des Reaktors und jenen des Arbeitsprozesses den obigen Ausführungen gemäß enge Beziehungen bestehen, können die optimalen thermodynamischen Verhältnisse des Kernkraftwerkes nur gemeinsam für die primär- und sekundärseitigen Kenngrößen bestimmt werden. Die Optimierung kann sich z. B. auf die Wahl des entsprechenden Kühlmittels, auf die Temperaturkurven von Kühlmittel, Umhüllung oder Spaltstoff, auf die günstigen Ein- bzw. Austrittstemperaturen des Kühlmittels, die maximale Leistung des Reaktors, die kleinsten Energiekosten des Kernkraftwerkes, auf die Wahl der Betriebsführung, u. ä. m. bzw. auf deren Kombinationen erstrecken. Aus der Fülle der Aufgaben seien im weiteren nur einige herausgegriffen und für sich allein betrachtet, u. zw. die Wahl der Kühlungsart, günstige Austrittstemperatur, thermodynamisch richtige Betriebsweise bei veränderlicher Belastung.

3. Reaktorkühlung und idealer Arbeitsprozeß

Das Problem der Reaktorkühlung soll hier unter der Voraussetzung untersucht werden, daß dem gegebenen Reaktor — unabhängig von der Ein- und Austrittstemperatur des Kühlmittels — stets ein idealer Arbeitsprozeß nachgeschaltet werden kann. In diesem Falle kann die Abkühlungskurve des

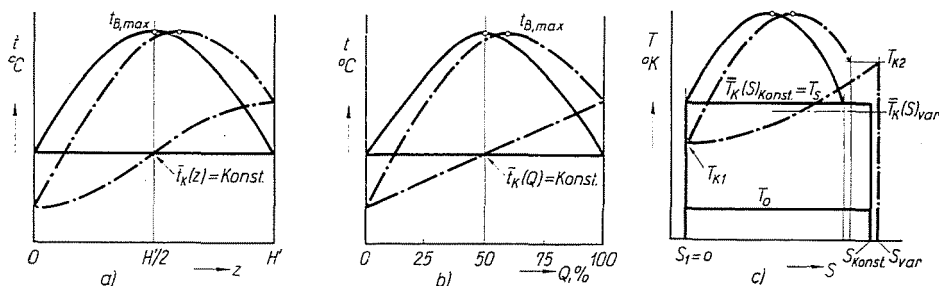


Abb. 4. Idealer Kreisprozeß bei Kühlung bei konstanter und veränderlicher Temperatur
 ————— Kühlung bei konstanter Temperatur
 - - - - - Kühlung bei veränderlicher Temperatur

Kühlmittels gleichzeitig als die Erwärmungskurve des Arbeitsmittels angesehen werden. Ein solcher Fall kann in Wirklichkeit nur etwa bei direkt an die Turbine angeschlossenen Siedereaktoren und bei unmittelbaren Gasturbinenprozessen vorkommen; in den anderen Fällen gehen die Erwärmungskurven des Arbeitsmittels und die Abkühlungskurve des Kühlmittels auseinander. Die Abweichung ist zwar nicht ohne Wirkung auf die Bestimmung der optima-

len thermodynamischen Kenngrößen der Reaktorkühlung, doch kann sie für die prinzipielle Untersuchung oft vernachlässigt werden.

Ist an den Reaktor ein idealer Arbeitsprozeß angeschlossen, kann man sich die Frage stellen, wie der thermische Wirkungsgrad des idealen Arbeitsprozesses durch die Art der Reaktorkühlung (Verdampfungskühlung bzw. Flüssigkeits- oder Gaskühlung) beeinflusst wird, oder anders gesagt, *ist es richtiger, mit Rücksicht auf den thermischen Wirkungsgrad, die Wärme aus dem Reaktor dem Kanal entlang bei konstanter oder bei veränderlicher Temperatur zu entziehen.*

Zur Beantwortung dieser Frage muß man — bei gegebenem Reaktor — voraussetzen, daß aus dem Reaktor eine konstante Wärmeleistung gewonnen werden soll. Dies läßt sich unter den in Abb. 4a dargestellten Temperaturverhältnissen annähernd dadurch sichern, daß man in der Mitte des Kühlkanals in beiden Fällen die gleiche Kühlmitteltemperatur ($z = H'/2$) einhält. In dieser Abbildung sind die Verhältnisse für den Siedereaktor mit ausgezogenen, diejenigen für den flüssigkeits- oder gasgekühlten Reaktor mit strichpunktierten Linien aufgetragen. Würde nämlich bei symmetrischer Flußverteilung die höchstzulässige Spaltstofftemperatur bei den beiden Kühlungsarten in der Mitte des Kanals auftreten, dann wäre die entziehbare Wärmeleistung in beiden Fällen in der Tat die gleiche. Eine geringe Abweichung verursacht der Umstand, daß die höchste Spaltstofftemperatur im Falle veränderlicher Kühlmitteltemperatur nicht in der Mitte des Kanals auftritt, daß also die Temperaturdifferenzen zwischen Spaltstoff und Kühlmittel in der Mitte des Kanals nicht gleich sind. Die Abweichung kann aber vorerst vernachlässigt werden.

In diesem Falle ergibt sich, daß die durchschnittliche Temperatur des Kühlmittels in Abhängigkeit von der übertragenen Wärmemenge bei beiden Kühlungsarten gleich ist (Abb. 4b). Die für den thermischen Wirkungsgrad maßgebenden Durchschnittstemperaturen — die aus dem T — S Diagramm zu bestimmen sind — stimmen jedoch in den beiden Fällen nicht überein (Abb. 4c). Die in Funktion der Entropieänderung gemittelte Temperatur bei Erwärmung zwischen den Temperaturen T_{K1} und T_{K2} kann durch die Beziehung

$$\bar{T}_K(S)_{\text{var}} = \frac{\int_{T_{K1}}^{T_{K2}} T_K(S) \cdot dS}{\int_{T_{K1}}^{T_{K2}} dS} \quad (3.1)$$

definiert werden. Aus dieser ergibt sich — mit den Beziehungen $dS = dQ/T$ bzw. $dQ = c_p \cdot dT$ (mit $c_p = \text{konst}$) — für die Durchschnittstemperatur

$$\bar{T}_K(S)_{\text{var}} = \frac{T_{K2} - T_{K1}}{\ln \frac{T_{K2}}{T_{K1}}} \quad (3.2)$$

Bei der Verdampfungskühlung ist die in Abhängigkeit von der Entropie gemittelte Mitteltemperatur offenbar mit der Siedetemperatur identisch, man hat also

$$\bar{T}_K(S)_{\text{konst}} = T_S = \frac{T_{K1} + T_{K2}}{2}. \quad (3.3)$$

Offenbar ist ferner

$$\bar{T}_K(S)_{\text{konst}} > \bar{T}_K(S)_{\text{var}}, \quad (3.4)$$

da das arithmetische Mittel größer ist als das logarithmische. Demnach kann bei konstanter Kühlmitteltemperatur im anschließenden Arbeitsprozeß ein besserer Wirkungsgrad erreicht werden als bei veränderlicher Kühlmitteltemperatur. Der Unterschied ist nicht sehr beträchtlich, vom Gesichtspunkt des Wirkungsgrades des idealen Arbeitsprozesses aus ist also die Art der Reaktorkühlung belanglos. (Die Art der Kühlung vermag jedoch den Wirkungsgrad des wirklichen Arbeitsprozesses wesentlich zu beeinflussen.)

4. Optimale Austrittstemperatur des Kühlmittels

Untersucht man die Austrittstemperatur des Kühlmittels für einen Reaktor mit gegebener Oberfläche bei gegebener Erwärmung des Kühlmittels ($\Delta t_K = \text{konst}$), so erhält man für die Änderung des thermischen Wirkungsgrades in Funktion der Austrittstemperatur — unter Vernachlässigung der im Punkt 3 aufgezeigten Differenz zwischen arithmetischem und logarithmischem Mittel — die Beziehung

$$\eta_0(t_{K2}) = 1 - \frac{T_0}{T_{K2} - \frac{\Delta t_K}{2}}. \quad (4.1)$$

Man trachtet selbstredend, die Austrittstemperatur zu erhöhen. Mit der Temperaturerhöhung nimmt aber die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen Spaltstoff und Kühlmittel und damit auch die über eine gegebene Oberfläche übertragbare Wärmemenge ab. Die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades und die gemeinsam mit der Verringerung des Temperaturunterschiedes abnehmende Wärmeleistung ergibt für die Austrittstemperatur einen Optimalwert [2, 3].

Für Kraftwerke mit Kohlenfeuerung pflegt man in diesem Sinne keine Optimalisierung zu machen, da die Rauchgastemperatur in den befeuerten Kesseln so hoch zu liegen kommt, daß selbst bei der praktisch höchstmöglichen Erhöhung der Dampfüberhitzung keine wesentliche Änderung des Temperaturunterschieds zwischen Rohrwand und Rauchgas und praktisch auch keine

Änderung in der übertragenen Wärmemenge eintritt (Abb. 5). Dagegen muß man beim Atomreaktor damit rechnen, daß mit der Erhöhung der Austrittstemperatur — bei einer gegebenen Höchsttemperatur des Spaltstoffes — dem Reaktor nur eine wesentlich geringere Wärmemenge entzogen werden kann. Die gewonnene Wärmeleistung (N_W) ist mit der wärmeabgebenden Ober-

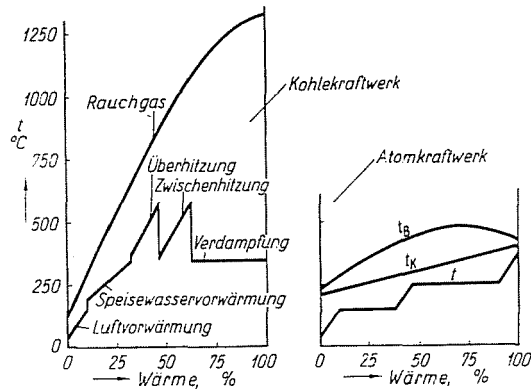


Abb. 5. Temperaturunterschiede zwischen Wärmequelle und Kühlmittel in kohlengefeuerten Wärmekraftwerken und in Kernkraftwerken

fläche ($F = \text{konst}$), mit der Wärmedurchgangszahl ($k_{B-K} = \text{konst}$) und mit dem durchschnittlichen Temperaturunterschied zwischen Spaltstoff und Kühlmittel ($\Delta \bar{t}_{B-K}$) verhältnismäßig, d. h. es gilt

$$N_W(t_{K2}) = \frac{1}{860} \cdot k_{B-K} \cdot F \cdot \Delta \bar{t}_{B-K}(t_{K2}) \quad (4.2)$$

Die Änderung des in (4.2) vorkommenden Temperaturunterschiedes läßt sich an Abb. 6 für Verdampfungskühlung (Abb. a) und für Flüssigkeits- bzw. Gaskühlung (Abb. b) untersuchen. Die stetigen Kurven zeigen die Änderung der Temperaturen bei einer angenommenen Austrittstemperatur ($t_{K2,0}$), während die strichpunktierten Linien die Temperaturkurven für veränderte t_{K2} -Werte darstellen, wobei in beiden Fällen die höchste Spaltstofftemperatur ($t_{B, \text{max}}$) unverändert bleibt. Den Unterschied in den durchschnittlichen Temperaturen kann man als verhältnismäßig mit der Änderung der in Kanalmitte auftretenden maximalen Temperaturunterschiede ansehen. Für die Verdampfungskühlung gilt dann

$$\Delta \bar{t}_{B-K}(t_{K2}) = \Delta \bar{t}_{B-K,0} \cdot \frac{t_{B, \text{max}} - t_{K2}}{t_{B, \text{max}} - t_{K2,0}} \quad (4.3)$$

Bei Flüssigkeits- bzw. Gaskühlung wird die genaue Berechnung des Tempe-

raturunterschieds dadurch erschwert, daß sich durch die Änderung der Austrittstemperatur auch die Stelle der Höchsttemperatur des Spaltstoffes verschiebt, womit sich die Spaltstofftemperatur in der Kanalmitte gleichfalls ändert. Man darf jedoch die Annäherung machen, daß die Spaltstofftempe-

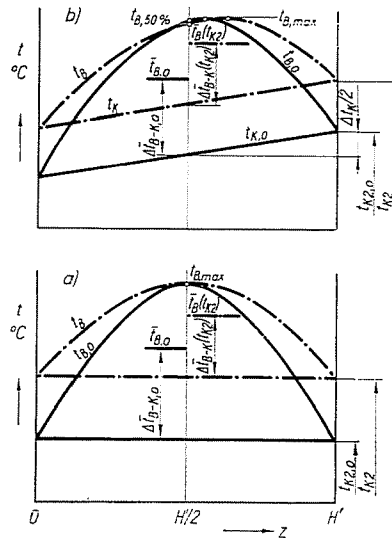


Abb. 6. Wirkung der Kühlmittel-Austrittstemperatur auf die Spaltstofftemperatur bei Kühlung bei konstanter (a) und veränderlicher (b) Temperatur

ratur in der Kanalmitte der Höchsttemperatur gleich ist ($t_{B,50\%,0} \cong t_{B,max}$). Mit dieser Vernachlässigung schreibt sich die geänderte Temperaturdifferenz zu

$$\Delta \bar{i}_{B-K}(t_{K2}) \cong \Delta \bar{i}_{B-K,0} \cdot \frac{t_{B,max} - (t_{K2} - \Delta t_K/2)}{t_{B,max} - (t_{K2,0} - \Delta t_K/2)}, \quad (4.4)$$

die bei $\Delta t_K = 0$ in die für die Verdampfungskühlung gewonnene Formel (4.3) übergeht.

Unter Anwendung der Gleichungen (4.2) und (4.4) nimmt die Wärmeleistung bei Flüssigkeitskühlung als Funktion der Austrittstemperatur (t_{K2}) die Form

$$N_W(t_{K2}) = \frac{1}{860} \cdot k_{B-K} \cdot F \cdot \Delta \bar{i}_{B-K,0} \cdot \frac{t_{B,max} - (t_{K2} - \Delta t_K/2)}{t_{B,max} - (t_{K2,0} - \Delta t_K/2)} \quad (4.5)$$

an. Ähnlich kann auch die erreichbare elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Austrittstemperatur ausgedrückt werden:

$$N(t_{K2}) = N_W(t_{K2}) \cdot \eta_{An} \cdot \eta_0(t_{K2}), \quad (4.6)$$

wobei die Funktion $N_W(t_{K2})$ durch die Beziehung (4.5), die Funktion $\eta_0(t_{K2})$ hingegen durch die Beziehung (4.1) gegeben ist. (η_{An} ist der Wirkungsgrad der energieumformenden Anlagen unter Berücksichtigung des Eigenbedarfes.)

Die optimale Anfangstemperatur kann für verschiedene Bedingungen bestimmt werden, je nach dem, ob sich die Optimalisierung die erreichbare Maximalleistung oder die minimalen Energieeinheitskosten zum Ziel setzt, und je nach dem, ob in Abhängigkeit von der Belastung eine konstante oder eine veränderliche Kühlmitteltemperatur angestrebt wird. Im Folgenden werden drei diesbezügliche Beispiele erläutert.

4.1 Optimale Austrittstemperatur zwecks Erreichung der Höchstleistung

In vielen Fällen, z. B. bei Reaktoren zum Antrieb von Schiffen und sonstigen Fahrzeugen muß im Interesse der Wirtschaftlichkeit danach gestrebt werden, das Gewicht der Leistungseinheit möglichst niedrig zu halten, d. h. die Optimalisierung zielt auf die Erzielung der höchstmöglichen Leistung des gegebenen Reaktors ab. Die Spaltstoffkosten sind hier von sekundärer Bedeutung.

Für einen gegebenen Reaktor ergibt sich die höchste gewinnbare elektrische Leistung aus der Bedingung

$$\frac{dN(t_{K2})}{dt_{K2}} = 0.$$

Nach Durchführung der Operationen wird die der Höchstleistung zugehörige Austrittstemperatur

$$(T_{K2})_{N \max} = \frac{\Delta t_K}{2} + \sqrt{T_{B, \max} \cdot T_0} \quad (4.7)$$

und die dem idealen Arbeitsprozeß zugehörige mittlere Anfangstemperatur

$$(\bar{T}_K)_{N \max} = \sqrt{T_{B, \max} \cdot T_0}. \quad (4.8)$$

Für den realen Fall, daß zwischen Kühlstoff und Arbeitsprozeß ein Temperaturunterschied besteht, dessen Durchschnittswert in Abhängigkeit von der veränderlichen Austrittstemperatur als konstant angesehen werden kann ($\Delta \bar{t}_{K-A} = \text{konst}$), erhält man für die Austrittstemperatur des Kühlmittels die Beziehung

$$(T_{K2})_{N \max} = \Delta \bar{t}_{K-A} + \frac{\Delta t_K}{2} + \sqrt{(T_{B, \max} - \Delta \bar{t}_{K-A}) \cdot T_0} \quad (4.7a)$$

und für die zugehörige mittlere Arbeitsmitteltemperatur den Zusammenhang

$$(\bar{T})_{N \max} = \sqrt{(T_{B, \max} - \Delta \bar{t}_{K-A}) \cdot T_0}. \quad (4.8a)$$

4.2 Wirtschaftliche Austrittstemperatur bei belastungsunabhängiger Anfangstemperatur

In diesem Fall wird der Optimalwert der Kühlstoff-Austrittstemperatur durch die Minimum-Bedingung

$$\frac{dk(t_{K2})}{dt_{K2}} = 0$$

für die Energieeinheitskosten (k Ft/kWh) bestimmt. Ohne hier in die Ableitung der bekannten Kostenformel einzugehen [4, 5], kann die optimale Temperatur ($t_{K2} = t_{K2, \text{opt}}$) in der implizierten Form

$$A \cdot \frac{T_{K2} - \frac{\Delta t_K}{2}}{t_{B, \text{max}} - \left(t_{K2} - \frac{\Delta t_K}{2} \right)} = \frac{860 \cdot p_q \left[t_{B, \text{max}} - \left(t_{K2} - \frac{\Delta t_K}{2} \right) \right] + A}{t_{K2} - \frac{\Delta t_K}{2} - t_0} \cdot T_0 \quad (4.9)$$

ausgedrückt werden. Hierbei ist

$$A = \frac{K_r}{\tau_{Ni}} \cdot \frac{t_{B, \text{max}} - \left(t_{K2,0} - \frac{\Delta t_K}{2} \right)}{k_{B-K} \cdot F \cdot \Delta \dot{i}_{B-K,0}},$$

K_r — die Abschreibung der leistungsabhängigen Anlagekosten in [Ft/Jahr]

p_q — der Wärmepreis der Energie in [Ft/kcal]

τ_{Ni} — die jährliche Benutzungsdauer [h/Jahr].

Die der Höchstleistung zugehörige $[(t_{K2})_{N \text{max}}]$ und die optimale ($t_{K2, \text{opt}}$) Austrittstemperatur sind der Abb. 7 zu entnehmen, in der die Änderung des Wirkungsgrades (η_0), der erreichbaren Wärme- (N_w) und der elektrischen Leistung (N) in Abhängigkeit von der Austrittstemperatur prozentuell aufgetragen sind. In Abb. 7 sind jene Abschnitte, in denen für $\Delta t_K = \text{konst}$ die Änderung der Austrittstemperatur des Kühlmittels die Überschreitung der unteren (t_0) und oberen ($t_{B, \text{max}}$) Temperaturgrenzen bewirken würde, gestrichelt gezeichnet. Offenbar muß — bei belastungsabhängigen Parametern — die dem optimalen Ausbau zugehörige Austrittstemperatur höher liegen als die der Höchstleistung zugehörige Austrittstemperatur.

4.3 Mit der Belastung veränderliche Austrittstemperatur

Aus Abb. 7 läßt sich folgern, daß die Ausgestaltung eines Wärmekreisprozesses mit lastabhängig veränderlichen Anfangsparametern bei Kernkraftwerken thermodynamisch begründet sein kann [6]. Dieser Vorschlag soll im Folgenden erläutert werden:

Die Anfangsparameter werden letzten Endes durch die im Spaltstoff (bzw. in der Umhüllung) zulässige Temperatur begrenzt, während die gewinn-

bare elektrische Leistung durch den Temperaturunterschied zwischen Spaltstoff und Arbeitsmittel sowie durch den thermischen Wirkungsgrad bestimmt wird, d. h. jeder Belastung ist bei guter thermodynamischer Ausnutzung des Reaktors ($t_{B, \max} = \text{konst}$) eine bestimmte Anfangstemperatur zugeordnet (s. Abb. 7).

Anhand dieser Abbildung läßt sich ein Diagramm auftragen, in dem die Wärmeleistung (N_w), die mittlere Kühlmitteltemperatur (\bar{t}) und der Wirkungs-

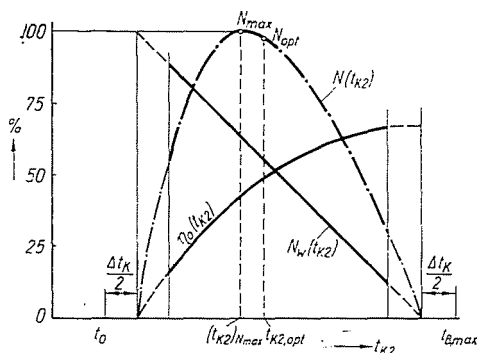


Abb. 7. Bestimmung der maximalen und optimalen Leistung in Funktion der Austrittstemperatur des Kühlmittels

grad (η_0) in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung (N) dargestellt wird (Abb. 8). Aus der mechanischen Transformierung des Diagramms würden sich zu jeder Leistung je zwei Werte für die Wärmeleistung, für die Temperatur und für den Wirkungsgrad ergeben, unter denen jedoch nur derjenige einen Sinn hat, bei dem sich mit abnehmender Belastung wachsende Wirkungsgrad- bzw. Temperaturwerte ergeben. Um den begrenzenden Faktor der Temperaturerhöhung (z. B. die Temperatur des Spaltstoffes oder der Umhüllung) voll ausnutzen zu können, sollte der Kernreaktor so gefahren werden, daß bei Teillasten höhere Arbeits- resp. Kühlmitteltemperaturen erzielt werden.

Dieselbe Erscheinung kann man im Prinzip auch bei Kraftwerken mit Kohlenfeuerung beobachten. Bei diesen wird die in der Rohrwand zulässige Höchsttemperatur als Temperaturbegrenzungsfaktor angesehen. Es ist somit auch dort die Möglichkeit gegeben, die Dampftemperatur bei Teillasten zu erhöhen, soweit dies die Werkstoffeigenschaften zulassen. Da aber der Unterschied zwischen Rohrwand- und Dampftemperatur dort im Vergleich zur Brennkammertemperatur niedrig liegt, lassen sich bei Teillasten auch viel geringere Temperatur- und Wirkungsgraderhöhungen erzielen, d. h. die Arbeit mit veränderlichen Dampfparametern ist bei Wärmekraftwerken wenig begründet. Demgegenüber können in Kernkraftwerken, bei denen zwischen der Höchsttemperatur von Spaltstoff und Kühlmittel ein wesentlicher Temperatur-

unterschied herrscht, die veränderlichen Parameter wesentlich zur Verbesserung der thermodynamischen Verhältnisse beitragen.

Die Anwendung veränderlicher Parameter vermag jedoch auch entgegengesetzte Wirkungen auszulösen, die sich in erster Linie aus der wesentlich komplizierteren Art der Regelung ergeben. Außerdem muß beachtet werden, daß sich die Kosten für Einrichtungen, die mit veränderlichen Parametern betrieben werden, erhöhen, während ihre Sicherheit abnimmt. Wie aber Bei-

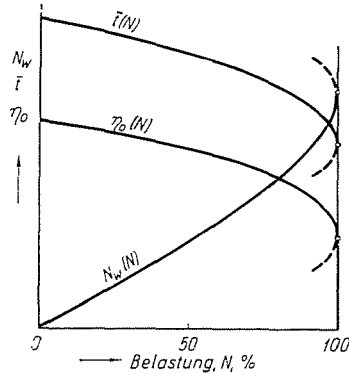


Abb. 8. Verlauf der Kenngrößen des Wärmekreisprozesses in Funktion der Belastung für $t_{B, \max} = \text{konst}$

spiele aus dem Dampfkraftwerkbau beweisen, bestehen bereits gute Ausführungen für Turbinen, Kessel, usw. mit veränderlichen — gleitenden — Parametern.

Beim Aufbau von Atomkraftwerken können auch Lösungen in Frage kommen, die statt der stetig veränderlichen Parameter eine stufenweise Änderung ermöglichen (wie z. B. die Überlastregelung der Turbine in Wärmekraftwerken). Eine solche Lösung kann die spezifischen Gestehungskosten des Primärteils senken, da diese auf die Höchstleistung bezogen werden, und überdies wirkt sie sich auch auf die Brennstoffkosten günstig aus, weil das Kernkraftwerk unter Teilbelastungen mit einem besseren Wirkungsgrad arbeitet als bei Höchstlast. Der vorgeschlagene Grundsatz kann für gasgekühlte Reaktoren — an die in der Regel Dampfkreisprozesse mit zwei oder mehreren Druckstufen angeschlossen sind —, bis zu einem gewissen Grad auch dann nutzbar gemacht werden, wenn die Ausgestaltung des Kraftwerkteiles nicht den beschriebenen Gesichtspunkten entspricht. Bei Teilbelastungen kann nämlich durch Erhöhung der Gastemperatur ein immer höherer Teil der Dampfmenge im Hochdrucksystem erzeugt werden, ja bei einer bestimmten Belastung läßt sich sogar erreichen, daß nahezu die totale Dampfmenge unter Hochdruck erzeugt wird, was thermodynamisch natürlich günstig ist.

Anhang

Verteilung des Neutronenflusses im stärkstbelasteten Betriebselement-Kanal

$$\Phi(z) = \Phi_{\max} \cdot \sin \frac{\pi \cdot z}{H'}$$

I. Temperaturänderungen des Kühlmittels

Im t - z -Diagramm:

$$t_K(z) = t_{K1} + \frac{\Delta t_K}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot z}{H'} \right)$$

Im t - Q -Diagramm:

$$t_K(Q) = t_{K1} + \frac{Q}{G \cdot c_p}$$

Im T - S -Diagramm:

$$T_K(S) = T_{K1} \cdot e^{\frac{S}{G \cdot c_p}}$$

II. Temperaturänderungen des Spaltstoffes

Im t - z -Diagramm:

$$t_B(z) = t_{K1} + \frac{\Delta t_K}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot z}{H'} \right) + \Delta t_{B-K, \max} \cdot \sin \frac{\pi \cdot z}{H'}$$

Im t - Q -Diagramm:

$$t_B(Q) = t_{K1} + \frac{Q}{G \cdot c_p} + \frac{2 \cdot \Delta t_{B-K, \max} \cdot Q}{Q_0} \sqrt{\frac{Q_0}{Q} - 1},$$

wobei

$$Q_0 = G \cdot c_p \cdot \Delta t_K.$$

Im T - S -Diagramm:

$$[C \cdot S]_0^S = \left[D \cdot \ln T_B \mp \arcsin \frac{-2 \cdot T_B + b}{\sqrt{b^2 + 4 \cdot c}} \pm \frac{1}{\sqrt{-c}} \arcsin \frac{b \cdot T_B + 2 \cdot c}{T_B \cdot \sqrt{b^2 + 4 \cdot c}} \right]_{T_{K1}}^{T_B},$$

wobei

$$B = \frac{\Delta t_K}{2 \cdot \Delta t_{B-K,\max}},$$

$$C = \frac{\Delta t_K^2 + 4 \cdot \Delta t_{B-K,\max}^2}{2 \cdot Q_0 \cdot \Delta t_{B-K,\max}},$$

$$b = \Delta t_K + 2 \cdot T_{K1},$$

$$c = \Delta t_{B-K,\max}^2 - \Delta t_K \cdot T_{K1} - T_{K1}^2.$$

Zusammenfassung

Aus den Temperaturdiagrammen des Reaktors (Kühlmittel, Umhüllung, Spaltstoff) und des Arbeitsmittels lassen sich sinngemäß die für die Leistungsberechnung und für die energetische Betrachtung maßgebenden mittleren Temperaturen bestimmen, die voneinander abweichen. Die miteinander verknüpften kernphysikalischen bzw. thermodynamischen Vorgänge im Reaktor und im Arbeitsprozeß erschweren die optimale Lösung, die verschiedene Zielsetzungen haben kann. Als Beispiele werden im Aufsatz die Wahl der Kühlungsart und die Bestimmung der günstigen Kühlmittelaustrittstemperatur behandelt mit dem Resultat, daß für den Betrieb des Reaktors ein neuer Weg vorgeschlagen wird, der bei abnehmender Belastung eine Erhöhung der Kühlmitteltemperatur vorsieht. Dadurch wird der Spaltstoff auch bei Teillasten gut ausgenutzt, und es verbessert sich der Wirkungsgrad des Kreisprozesses. Allerdings verteuert dies auch die Einrichtungen des Sekundärkreises: es ergibt sich also in Abhängigkeit von der Belastung ein Grenzwert, unter dem die Erhöhung der Anfangsparameter nicht mehr wirtschaftlich ist.

Literatur

1. RETROW, P. A.: Kernenergieanlagen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1959
2. КАЛАФАТИ, Д. Д.: Анализ оптимальных условий осуществления термодинамических циклов атомных электростанций, Физика и теплотехника реакторов, Атомиздат, 1958
3. RIEZLER, W., WALCHER, W.: Kerntechnik, B. G. Teubner Verl., 1958
4. LÉVAI, A.: Wärmekraftwerke, VEB Verlag Technik, Berlin, 1959
5. LÉVAI, A., BÜKI, G.: Mutual Influences of Nuclear Power Stations and Co-operating Power Plant Systems, World Power Conference, Madrid, 1960, V/7.
6. BÜKI, G.: Atomerőművek termodinamikája (Thermodynamik der Kernkraftwerke), Kerntechnischer Lehrgang der ungarischen Landes-Atomenergie-Kommission, 1961

G. BÜKI, Budapest XI. Stoczek u. 4. Ungarn.