

# Dynamisches Verhalten von Gegenstromwärmeübertragern nuklearer Gasturbinenanlagen bei sprunghafter Änderung der Eintrittstemperaturen

Von R. Dietrich

Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Mannheim

## Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren angegeben, das die Berechnung des Frequenzganges und der Übergangsfunktion der Gasaustrittstemperaturen von Gegenstromwärmeübertragern nuklearer Gasturbinenanlagen gestattet.

Die partiellen Differentialgleichungen, die den Zusammenhang zwischen den Temperaturen des wärmeabgebenden Gases, der Rohrwand und des wärmeaufnehmenden Gases beschreiben, werden angegeben. Ausgehend von diesen Gleichungen werden die Beziehungen zur Berechnung des Frequenzganges und der Übergangsfunktion der Gasaustrittstemperaturen bei sprunghafter Änderung der Gaseintrittstemperaturen mit Hilfe der Laplace-Transformation ermittelt.

Als Beispiel für die Anwendung des entwickelten Verfahrens werden der Frequenzgang und die Übergangsfunktion der Gasaustrittstemperaturen des Gegenstromwärmeübertragers einer nuklearen 600 MWe-Gasturbinenanlage bei sprunghafter Änderung der Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases berechnet.

## Abstract

**Dynamic behaviour of counter-flow heat exchangers of nuclear power plants with gas turbine at step change of inlet temperatures**

A method is given which permits the calculation of the frequency response and the step response of the gas outlet temperatures of counter-flow heat exchangers of nuclear power plants with gas turbine.

The partial differential equations describing the relation between the temperatures of the hot gas, the tube wall, and the cold gas are specified. Based on these equations the relations for calculating the frequency response and the step response of the gas outlet temperatures at a step change of the inlet temperatures are determined by means of Laplace Transform.

As an example for the application of the developed method, the frequency response and the step response of the gas outlet temperatures of the counter-flow heat exchanger of a 600 MWe nuclear power plant with gas turbine are calculated for a step change of the inlet temperature of the hot gas.

## EURATOM / INIS DESCRIPTORS

COUNTER CURRENT	FREQUENCY RESPONSE
HEAT EXCHANGERS	STEP RESPONSE
NUCLEAR POWER PLANTS	TEMPERATURE
GASES	DIFFERENTIAL EQUATIONS
TURBINES	

## Verwendete Bezeichnungen

a	grd	Temperatursprung
$c_p$	kJ/kg grd	Spez. Wärmekapazität der strömenden Gase
$c_R$	kJ/kg grd	Spez. Wärmekapazität des Rohrmaterials
d	m	Rohrdurchmesser
f	m <sup>2</sup>	Freier Strömungsquerschnitt
$f_R$	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche des Rohrmaterials für alle Rohre
L	m	Länge der Wärmeübertragerrohre
t	s	Zeit
$u = d \pi z$	m	Rohrumfang aller Wärmeübertragerrohre
w	m/s	Strömungsgeschwindigkeit der Gase
x	m	Ortskoordinate der Wärmeübertragerrohre $0 \leq x \leq L$
z	-	Rohranzahl

$\alpha$	kJ/m <sup>2</sup> s grd	Wärmeübergangszahl
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\delta$	grd	Temperatur

## Indizes

1	Wärmeabgebendes Gas
2	Wärmeaufnehmendes Gas
R	Rohrwandungen

## 1. Einleitung

Bei der Projektierung einer geschlossenen Gasturbinenanlage mit Kernreaktor (Fig. 1) sind Aussagen über das dynamische Verhalten der Anlage im Regellastbetrieb und bei Störfällen notwendig. Die mathematische Behandlung derartiger Vorgänge setzt jedoch eine Kenntnis über den Frequenzgang bzw. die Übergangsfunktion der Ausgangsgrößen der einzelnen Anlagekomponenten des Kreislaufes voraus. Nachfolgend wird ein Rechenverfahren entwickelt, das eine Berechnung des Frequenzganges und der Übergangsfunktion der Gasaustrittstemperaturen von Gegenstromwärmeübertragern bei sprunghafter Änderung der Gaseintrittstemperaturen gestattet.

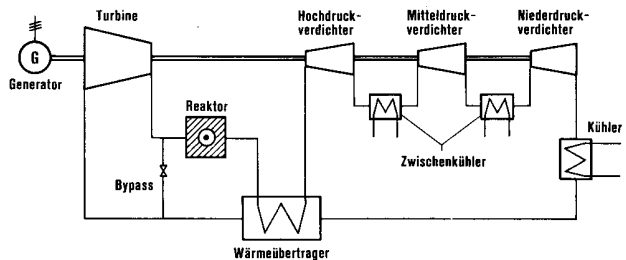


Fig. 1: Kreislaufschema eines nuklearen 600 MWe-Gasturbinenkraftwerks  
Fig. 1: Circuit diagram of a 600 MWe nuclear power plant with gas turbine

Als Beispiel für die Anwendung dieses Verfahrens werden der Frequenzgang und die Übergangsfunktion der Gasaustrittstemperaturen für einen Gegenstromwärmeübertrager einer 600 MWe-Gasturbinenanlage bei sprunghafter Änderung der Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases um +50 °C berechnet. Eine derartige Änderung der Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases ist z. B. infolge eines Regeleingriffes an einem Bypass-Ventil, das sich zwischen Reaktoraustritt und Turbinenaustritt befindet (Fig. 1), möglich.

## 2. Voraussetzungen

Um die dynamischen Vorgänge in einem Gegenstromwärmeübertrager mathematisch erfassen zu können, müssen die Voraussetzungen, durch die das Problem gekennzeichnet wird, näher erläutert werden. Für das zu behandelnde Problem können sie folgendermaßen formuliert werden:

1. Das wärmeabgebende und -aufnehmende Gas ströme außerhalb bzw. innerhalb eines wärmespeichernden Rohrbündels konstanten Querschnitts.

- Die Temperaturen der strömenden Gase seien in Ebenen senkrecht zur Rohrachse konstant.
- Die Rohrwände seien relativ dünn, so daß die Wandtemperatur in Ebenen senkrecht zur Rohrachse als konstant angesehen werden kann.
- In Richtung der Rohrachse fänden weder in den strömenden Gasen noch in den Rohrwandungen Wärmeflüsse statt. Hiervon seien die Wärmetransporte durch die Strömung jedoch ausgenommen.
- Die Dichte, die spez. Wärmekapazität, die Wärmeübergangszahlen und die Massendurchsätze seien in dem betrachteten Temperaturbereich konstant.

### 3. Aufstellen der Grundgleichungen

Der Zusammenhang zwischen den Temperaturen des wärmeabgebenden Gases, der Rohrwand und des wärmeaufnehmenden Gases wird durch partielle Differentialgleichungen beschrieben. Die Gleichungen ergeben sich aus der Wärmebilanz für einen Rohrabschnitt  $dx$  des Gegenstromwärmeübertragers. In Fig. 2 ist ein Rohrabschnitt schematisch dargestellt.

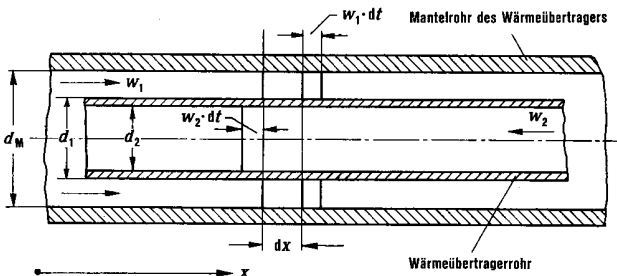


Fig. 2: Rohrabschnitt eines Gegenstromwärmeübertragers  
Fig. 2: Tube section of a counter-flow heat exchanger

#### 3.1. Wärmebilanz für das wärmeabgebende Gas

Für die totale Änderung des Wärmeinhalts des wärmeabgebenden Gases läßt sich schreiben

$$dQ_1 = -f_1 \varrho_1 c_{p1} \left( \frac{\partial \delta_1}{\partial t} + w_1 \frac{\partial \delta_1}{\partial x} \right) dx dt \quad (1)$$

Sie ist gleich der vom wärmeabgebenden Gas an die Rohrwand übertragenen Wärme

$$dQ_{R1} = \alpha_1 u_1 (\delta_1 - \delta_R) dx dt \quad (2)$$

Durch Gleichsetzen von (1) und (2) ergibt sich

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial t} + w_1 \frac{\partial \delta_1}{\partial x} = - \frac{\alpha_1 u_1}{f_1 \varrho_1 c_{p1}} (\delta_1 - \delta_R) \quad (3)$$

#### 3.2. Wärmebilanz für die Rohrwand

Während des Zeitintervalls  $dt$  erfolgt eine Änderung des Wärmeinhalts der Rohrwand um

$$dQ_R = f_R \varrho_R c_R dx \frac{\partial \delta_R}{\partial t} dt \quad (4)$$

Diese Änderung des Wärmeinhalts wird durch die Änderung der übertragenen Wärme zu beiden Seiten der Rohrwand hervorgerufen. Analog zu (2) gilt für die übertragene Wärme von der Rohrwand an das wärmeaufnehmende Gas

$$dQ_{R2} = \alpha_2 u_2 (\delta_R - \delta_2) dx dt \quad (5)$$

Die Differenz zwischen der übertragenen Wärme nach (2) und (5) dient zur Änderung des Wärmeinhalts der Rohrwandungen.

Aus (2), (4) und (5) ergibt sich für die Änderung der Rohrwandtemperatur

$$\frac{\partial \delta_R}{\partial t} = \frac{\alpha_1 u_1}{f_R \varrho_R c_R} (\delta_1 - \delta_R) - \frac{\alpha_2 u_2}{f_R \varrho_R c_R} (\delta_R - \delta_2) \quad (6)$$

#### 3.3. Wärmebilanz für das wärmeaufnehmende Gas

Für die totale Änderung des Wärmeinhalts des wärmeaufnehmenden Gases läßt sich schreiben

$$dQ_2 = f_2 \varrho_2 c_{p2} \left( \frac{\partial \delta_2}{\partial t} - w_2 \frac{\partial \delta_2}{\partial x} \right) dx dt \quad (7)$$

Sie ist gleich der von der Rohrwand an das wärmeaufnehmende Gas übertragenen Wärme (5). Durch Gleichsetzen von (7) und (5) ergibt sich

$$\frac{\partial \delta_2}{\partial t} - w_2 \frac{\partial \delta_2}{\partial x} = \frac{\alpha_2 u_2}{f_2 \varrho_2 c_{p2}} (\delta_R - \delta_2) \quad (8)$$

Die Gleichungen (3), (6) und (8) stellen die Ausgangsgleichungen für das dynamische Verhalten eines Gegenstromwärmeübertragers dar.

#### 3.4. Aufteilung der Temperaturen in einen stationären und instationären Teil

Für die nachfolgenden Betrachtungen empfiehlt es sich, die Temperaturen in einen stationären und instationären Teil aufzugliedern. Diese Aufteilung ist aufgrund des linearen Charakters des Problems möglich. Es seien

$$\left. \begin{aligned} \delta_1(x, t) &= \delta_{10}(x) + \Theta_1(x, t) \\ \delta_R(x, t) &= \delta_{R0}(x) + \Theta_R(x, t) \\ \delta_2(x, t) &= \delta_{20}(x) + \Theta_2(x, t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

In den nachfolgenden Abschnitten soll nur der instationäre Teil betrachtet werden, da die Gleichungen zur Berechnung der stationären Temperaturen allgemein bekannt sind [1].

### 4. Lösung des Gleichungssystems für den instationären Zustand

Wird bei der mathematischen Behandlung des Übergangsverhaltens von den Abweichungen vom stationären Zustand ausgegangen, so ergeben sich durch Substitutionen von (9) in (3), (6) und (8) sowie unter Berücksichtigung der Beziehungen für den stationären Zustand folgende Gleichungen:

Für das wärmeabgebende Gas

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial t} + w_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial x} = K_1 (\Theta_R - \Theta_1) \quad (10)$$

Für das Rohrbündel

$$\frac{\partial \Theta_R}{\partial t} = K_{R1} (\Theta_1 - \Theta_R) - K_{R2} (\Theta_R - \Theta_2) \quad (11)$$

Für das wärmeaufnehmende Gas

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial t} - w_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial x} = K_2 (\Theta_R - \Theta_2) \quad (12)$$

Die Koeffizienten  $K_1$ ,  $K_{R1}$ ,  $K_2$  und  $K_{R2}$  geben die reziproken Werte der Zeitkonstanten des Systems an und haben die Dimension  $\text{Zeit}^{-1}$ .

$$K_1 = \frac{\alpha_1 u_1}{f_1 \varrho_1 c_{p1}}, \quad K_{R1} = \frac{\alpha_1 u_1}{f_R \varrho_R c_R} \quad (13/14)$$

$$K_2 = \frac{\alpha_2 u_2}{f_2 \varrho_2 c_{p2}}, \quad K_{R2} = \frac{\alpha_2 u_2}{f_R \varrho_R c_R} \quad (15/16)$$

Betrachtet man das System für eine sprunghafte Änderung der Eintrittstemperaturen, so liegen folgende Anfangs- und Randbedingungen vor:

Anfangsbedingungen

$$\left. \begin{aligned} \Theta_1(x, 0) &= 0 \\ \Theta_R(x, 0) &= 0 \\ \Theta_2(x, 0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Randbedingungen

$$\left. \begin{aligned} \Theta_1(0, t) &= a_1 \\ \Theta_2(L, t) &= a_2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$a_1$  und  $a_2$  bedeuten hierbei die Sprünge der Eintrittstemperaturen zur Zeit  $t = 0$ .

Bei der Lösung des Gleichungssystems läßt sich die Laplace-Transformation (LT) vorteilhaft anwenden. Es empfiehlt sich, die Zeitkoordinate  $t$  durch die komplexe Variable  $s$  zu ersetzen. Die Zuordnung der Funktionen im ersten Bildraum sei folgende [2]:

$$\left. \begin{aligned} L\{\Theta_1(x, t)\} &= \varphi_1(x, s) \\ L\{\Theta_R(x, t)\} &= \varphi_R(x, s) \\ L\{\Theta_2(x, t)\} &= \varphi_2(x, s) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Unter Berücksichtigung des Differentiationsatzes für die Originalfunktion [2]

$$L\left\{\frac{\partial \Theta}{\partial t}\right\} = s \varphi(x, s) - \Theta(x, 0) \quad (20)$$

und durch Eliminieren von  $\varphi_R(x, s)$  und  $\varphi_2(x, s)$  bzw.  $\varphi_R(x, s)$  und  $\varphi_1(x, s)$  ergeben sich für  $\varphi_1(x, s)$  bzw.  $\varphi_2(x, s)$  folgende gewöhnliche Differentialgleichungen

$$\frac{d^2}{dx^2} \varphi_1(x, s) + \nu_1 \frac{d}{dx} \varphi_1(x, s) + \nu_2 \varphi_1(x, s) = 0 \quad (21)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \varphi_2(x, s) + \nu_1 \frac{d}{dx} \varphi_2(x, s) + \nu_2 \varphi_2(x, s) = 0 \quad (22)$$

Hierbei bedeuten

$$\nu_1 = c_1 - c_2 \quad (23)$$

$$\nu_2 = b_1 b_2 - c_1 c_2 \quad (24)$$

$$c_1 = \frac{s}{w_1} + \frac{K_1}{w_1} \left(1 - \frac{K_{R_1}}{s + K_{R_1} + K_{R_2}}\right) \quad (25)$$

$$c_2 = \frac{s}{w_2} + \frac{K_2}{w_2} \left(1 - \frac{K_{R_2}}{s + K_{R_1} + K_{R_2}}\right) \quad (26)$$

$$b_1 = \frac{K_1}{w_1} \cdot \frac{K_{R_2}}{s + K_{R_1} + K_{R_2}} \quad (27)$$

$$b_2 = \frac{K_2}{w_2} \cdot \frac{K_{R_1}}{s + K_{R_1} + K_{R_2}} \quad (28)$$

Mit den Randbedingungen (18), die ebenfalls einer LT unterworfen werden müssen

$$L\{\Theta_1(0, t)\} = \varphi_1(0, s) = \frac{a_1}{s} \quad (29)$$

und

$$L\{\Theta_2(L, t)\} = \varphi_2(L, s) = \frac{a_2}{s} \quad (30)$$

ergeben sich für die Übergangsfunktionen im ersten Bildraum folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x, s) &= \\ &= \frac{1}{s} \cdot \frac{a_2(e^{\lambda_1 x} - e^{\lambda_2 x}) - a_1 \left( \frac{c_1 + \lambda_2}{b_1} e^{\lambda_2 L + \lambda_1 x} - \frac{c_1 + \lambda_1}{b_1} e^{\lambda_1 L + \lambda_2 x} \right)}{\frac{c_1 + \lambda_1}{b_1} e^{\lambda_1 L} - \frac{c_1 + \lambda_2}{b_1} e^{\lambda_2 L}} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(x, s) &= \\ &= \frac{1}{s} \cdot \frac{a_2 \left( \frac{c_2 - \lambda_2}{b_2} e^{\lambda_1 x} - \frac{c_2 - \lambda_1}{b_2} e^{\lambda_2 x} \right) - a_1 (e^{\lambda_2 L + \lambda_1 x} - e^{\lambda_1 L + \lambda_2 x})}{\frac{c_2 - \lambda_2}{b_2} e^{\lambda_1 L} - \frac{c_2 - \lambda_1}{b_2} e^{\lambda_2 L}} \end{aligned} \quad (32)$$

Die Koeffizienten  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  ergeben sich zu

$$\lambda_{1,2} = -\frac{\nu_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\nu_1}{2}\right)^2 - \nu_2} \quad (33)$$

Die Gleichungen (31) und (32) stellen die Lösung des Gleichungssystems (10), (11) und (12) im ersten Bildraum oder die Laplace-Transformierten der Übergangsfunktionen von  $\Theta_1$  und  $\Theta_2$  dar.

#### 4.1. Bestimmung des Frequenzganges für die Gasaustrittstemperaturen

Der Frequenzgang ergibt sich aus der Laplace-Transformierten der Übergangsfunktion durch Multiplikation mit der komplexen Variablen  $s$  und durch Setzen von  $s = i\omega$  [2; 4].

Für den Frequenzgang der Austrittstemperaturen ergibt sich somit

$$\begin{aligned} G_1(L, \omega) &= [s \varphi_1(L, s)]_{s=i\omega} = \\ &= \left[ \frac{a_2 (e^{\lambda_1 L} - e^{\lambda_2 L}) - a_1 \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{b_1} e^{(\lambda_1 + \lambda_2)L}}{\frac{c_1 + \lambda_1}{b_1} e^{\lambda_1 L} - \frac{c_1 + \lambda_2}{b_1} e^{\lambda_2 L}} \right]_{s=i\omega} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} G_2(0, \omega) &= [s \varphi_2(0, s)]_{s=i\omega} = \\ &= \left[ \frac{a_2 \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{b_2} - a_1 (e^{\lambda_2 L} - e^{\lambda_1 L})}{\frac{c_2 - \lambda_2}{b_2} e^{\lambda_1 L} - \frac{c_2 - \lambda_1}{b_2} e^{\lambda_2 L}} \right]_{s=i\omega} \end{aligned} \quad (35)$$

Werden die Gleichungen (34) und (35) so umgeformt, daß die Frequenzgänge als Funktion der Real- und Imaginärteile, d. h. in der Form

$$G_1(L, \omega) = \text{Re}_1(L, \omega) + i \text{Im}_1(L, \omega) \quad (36)$$

und

$$G_2(0, \omega) = \text{Re}_2(0, \omega) + i \text{Im}_2(0, \omega) \quad (37)$$

vorliegen, so kann mit Hilfe des Real- und Imaginärteils die Ortskurve dargestellt und aus einer der beiden Größen die Übergangsfunktion im Originalraum (vgl. Abschnitt 4.2) ermittelt werden.

#### 4.2. Ermittlung der Übergangsfunktion aus dem Frequenzgang

Nach [2] und [3] besteht zwischen dem Frequenzgang und der Übergangsfunktion eine mathematische Beziehung. Bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsgröße lauten die

Gleichungen zur Ermittlung der Übergangsfunktion aus dem Frequenzgang

$$\Theta(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Re(x, \omega)}{\omega} \sin(\omega t) d\omega \quad (38)$$

oder

$$\Theta(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Im(x, \omega)}{\omega} \cos(\omega t) d\omega \quad (39)$$

Bei der Anwendung dieser Gleichungen sind zwei Kriterien zu beachten [3]:

1. Für  $\omega = 0$  muß die Funktion  $Re(x, \omega)$  Null sein oder einen endlichen Wert haben.
2. Für  $\omega = 0$  muß die Funktion  $Im(x, \omega)$  Null sein.

Bei der numerischen Auswertung empfiehlt es sich, die Funktion zu wählen, die am schnellsten gegen Null konvergiert.

#### 4.3. Numerische Auswertung

Durch den Einsatz einer Digital-Rechenanlage lassen sich die Gleichungen zur Berechnung des Frequenzganges und der Übergangsfunktion numerisch auswerten. Bei der Berechnung der Übergangsfunktion ist zu beachten, daß die Funktionen

$$f_1(x, \omega, t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Re(x, \omega)}{\omega} \sin(\omega t)$$

und

$$f_2(x, \omega, t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Im(x, \omega)}{\omega} \cos(\omega t)$$

mit zunehmendem  $\omega$  gegen Null konvergieren (Fig. 3). Die Integration, die zur Bestimmung der Übergangsfunktion bis zu  $\omega = \infty$  ausgeführt werden müßte, kann dadurch vorzeitig bei einem endlichen  $\omega$ -Wert abgebrochen werden, ohne daß ein wesentlicher Fehler entsteht. Die obere Grenze des Integrals von  $\omega = \infty$  kann also durch  $\omega = \Omega$  ersetzt werden. Bei der numerischen Integration ist ferner zu berücksichtigen, daß die Funktionen die Form einer gedämpften Schwingung haben. Die Schrittweite  $h$  der äquidistanten Stützstellen ist daher so zu wählen, daß der Kurven-

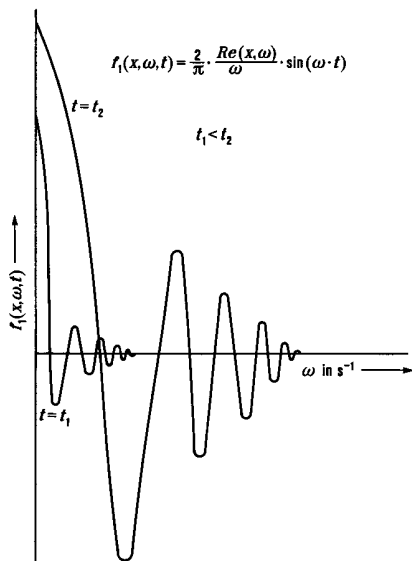


Fig. 3: Darstellung des Integranden zur Berechnung der Übergangsfunktion aus dem Frequenzgang

Fig. 3: Plotting of integrand for calculating the step response from the frequency response

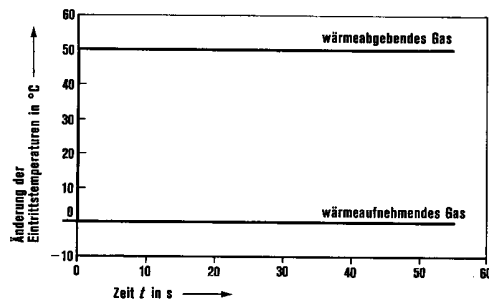


Fig. 4: Änderung der Eintrittstemperaturen

Fig. 4: Change of inlet temperatures

verlauf zwischen dem Anfangs- und Endpunkt eines Integrations-schrittes (bei Anwendung der Simpson-Regel eines Doppelstreifens) mit ausreichender Genauigkeit durch eine Parabel wiedergegeben werden kann [4]. Die Bestimmung der Schrittweite setzt aber eine Kenntnis des Kurvenverlaufs, der sich für jedes  $t$  ändert, voraus. Diese Schwierigkeit läßt sich jedoch umgehen, wenn die numerische Integration für verschiedene Schrittweiten ( $h, h/2, h/4 \dots$ ) durchgeführt wird, wobei die Schrittweite solange verkleinert wird, bis die Abweichung zwischen den beiden zuletzt erzielten Ergebnissen im Rahmen der zulässigen Abweichung liegt. Auf diese Weise kann die Übergangsfunktion mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden.

#### 5. Anwendung des abgeleiteten Verfahrens

Zur Anwendung des entwickelten Verfahrens wurden die Übergangsfunktion und der Frequenzgang der Gasaustrittstemperaturen eines Gegenstromwärmeübertragers einer nuklearen 600 MWe-Gasturbinenanlage für eine sprunghafte Änderung der Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases um  $+50^\circ\text{C}$  ermittelt. Eine derartige Änderung der Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases ist z. B. infolge eines Regeleingriffes an einem Bypass-Ventil, das sich zwischen Reaktorausstritt und Turbinenausstritt befindet (Fig. 1), möglich. Der Berechnung lagen folgende Daten zugrunde:

$$K_1 = 39,28 \text{ s}^{-1}$$

Der reziproke Wert der Zeitkonstanten für die Änderung der Temperatur des wärmeabgebenden Gases aufgrund des Wärmeübergangs zwischen dem wärmeabgebenden Gas und der Rohrwand

$$K_{R1} = 0,3129 \text{ s}^{-1}$$

Der reziproke Wert der Zeitkonstanten für die Änderung der Rohrwandtemperatur aufgrund des Wärmeübergangs zwischen dem wärmeabgebenden Gas und der Rohrwand

$$w_1 = 32,0 \text{ m s}^{-1}$$

Strömungsgeschwindigkeit des wärmeabgebenden Gases

$$a_1 = 50^\circ\text{C}$$

Änderung der Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases (Fig. 4)

$$K_2 = 38,26 \text{ s}^{-1}$$

Der reziproke Wert der Zeitkonstanten für die Änderung der Temperatur des wärmeaufnehmenden Gases aufgrund des Wärmeübergangs zwischen der Rohrwand und dem wärmeaufnehmenden Gas

$$K_{R2} = 0,5047 \text{ s}^{-1}$$

Der reziproke Wert der Zeitkonstanten für die Änderung der Rohrwandtemperatur aufgrund des Wärmeübergangs zwischen der Rohrwand und dem wärmeaufnehmenden Gas

$$w_2 = 18,3 \text{ m s}^{-1}$$

Strömungsgeschwindigkeit des wärmeaufnehmenden Gases

$$a_2 = 0^\circ\text{C}$$

Änderung der Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases (Fig. 4)

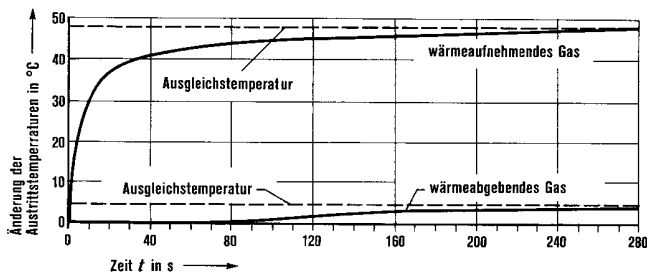


Fig. 5: Änderung der Austrittstemperaturen  
Fig. 5: Change of outlet temperatures

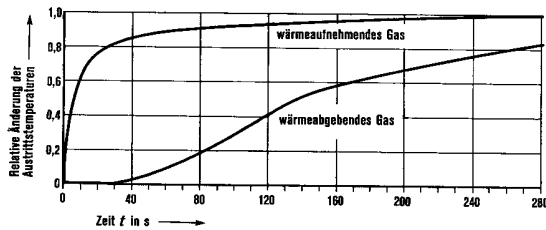


Fig. 6: Relative Änderung der Austrittstemperaturen  
Fig. 6: Relative change of outlet temperatures

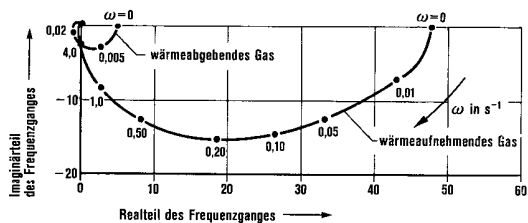


Fig. 7: Frequenzgang der Austrittstemperaturen  
Fig. 7: Frequency response of outlet temperatures

Die Ergebnisse der Rechnung sind in den Fig. 5 bis 7 dargestellt.

Fig. 5 zeigt die absolute und Fig. 6 die relative Änderung der Austrittstemperaturen des wärmeaufnehmenden und -abgebenden Gases. Im einzelnen ist folgendes zu erkennen:

1. Die maximale Änderung der Austrittstemperatur des wärmeaufnehmenden Gases ist größer (etwa 47,5°C) als die des wärmeabgebenden Gases (etwa 5°C), d. h. die Eintrittstemperatur des Reaktors steigt stärker an als die des Kühlers.

2. Die Austrittstemperatur des wärmeaufnehmenden Gases steigt während der ersten 30 s steil an und erreicht nach dieser Zeit eine Änderung um 39°C, das sind 82% der maximalen Änderung. Bei der Austrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases erfolgt eine Änderung erst nach etwa 30 s. Nach dieser Zeit steigt die Austrittstemperatur langsam an und erreicht erst nach 274 s einen Anstieg um etwa 4°C, das sind 82% der maximalen Änderung. Die Eintrittstemperatur des Reaktors ändert sich somit schneller als die des Kühlers.

3. Nach 280 s erreicht die Austrittstemperatur des wärmeaufnehmenden Gases etwa 98% und die des wärmeabgebenden Gases etwa 83% ihrer maximalen Änderung (Fig. 6).

In Fig. 7 ist der Frequenzgang für die Austrittstemperaturen des wärmeabgebenden und -aufnehmenden Gases dargestellt. Zu diesen Ortskurven ist folgendes zu sagen:

1. Bei einer Frequenz von  $\omega = 0 \text{ s}^{-1}$  sind die Zahlenwerte für die Realteile, die für diesen  $\omega$ -Wert gleich den Amplitudenverhältnissen sind, genauso groß wie die für die maximale Änderung ( $t = \infty$ ) der Austrittstemperaturen. Für das wärmeabgebende Gas ist der Realteil 4,8 und für das wärmeaufnehmende 47,7.
2. Bei zunehmender Frequenz nähern sich die Ortskurven dem Koordinatennullpunkt, und zwar für das wärmeabgebende Gas schneller als für das wärmeaufnehmende.

### 6. Schlußbetrachtung

In dem vorliegenden Bericht wird ein Verfahren angegeben, mit dem es möglich ist, das dynamische Verhalten eines Gegenstromwärmeübertragers für sprunghafte Änderungen der Eintrittstemperaturen zu ermitteln. Ein Vorteil des Verfahrens besteht darin, die Übergangsfunktion für jeden beliebigen Zeitpunkt nach Änderung der Eintrittstemperaturen in einem direkten Rechengang bestimmen zu können, ohne die dazwischenliegenden Verhältnisse berücksichtigen zu müssen. (Eingegangen am 6. 8. 1970)

### Literatur

- [1] Schack, A.: Der industrielle Wärmeübergang. Düsseldorf: Verlag Stahlisen mbH 1962
- [2] Doetsch, G.: Anleitung zum praktischen Gebrauch der Laplace-Transformation 3. Auflage. München: Oldenbourg-Verlag 1967
- [3] Schneider, A.: Die näherungsweise Bestimmung der Übergangsfunktion von Regelvorgängen aus dem Frequenzgang. Regelungstechnik 9, S. 277 bis 282 (1961)
- [4] Zurmühl, R.: Praktische Mathematik 5. Auflage. Berlin: Springer-Verlag 1965

### Ein Sammelband = ein Nachschlagewerk

Einbanddecken für die Zeitschrift ATOMKERNENERGIE (grünes Ganzleinen mit Goldprägung) für den 15. Band und 16. Band 1970 sind ab sofort lieferbar. Auch für zurückliegende Jahrgänge (1956–1969) steht ein begrenzter Vorrat an Einbanddecken zur Verfügung. Preis pro Einbanddecke 6,- DM.

### A bound volume = a reference work

Covers for volume 15 as well as for volume 16 of our journal ATOMKERNENERGIE (green cloth-binding with gold blocking) are available now. A limited supply of covers for back volumes (1956–1969) is available as well. The price for one cover is DM 6.-.



VERLAG KARL THIEMIG KG · 8 MÜNCHEN 90 · POSTFACH 900740