

am Eintritt bzw. am Austritt des Kalorimeters. Der Wasserstrom und die Wassertemperaturzunahme wurden unmittelbar gemessen. Die Wärmeströme  $\dot{Q}_{k1}$  und  $\dot{Q}_{11}$  ergaben sich aus besonderen Messungen. Die Temperaturdifferenzen waren zwischen verschiedenen Punkten des Gaskörpers kleiner als 50 K und zwischen verschiedenen Punkten der Wandoberfläche kleiner als 25 K.

Die Gleichungen für die beiden untersuchten Verfahren wurden auf ein Dreielementensystem angewendet (zwei isotherme Flächen und ein isothermer Gaskörper). Aus (Bild 4) gehen die Differenzen  $\Delta$  hervor, die zwischen den theoretisch berechneten Werten und den Meßergebnissen bestehen. Die mittlere quadratische Abweichung beträgt für das Modell der mittleren Strahlungsparameter 28,6% und für das Modell der schwarzen Bänder 19,3%. Für die mittlere arithmetische Abweichung ergab sich bei den untersuchten Modellen entsprechend -20,34% und -6,76%. Die Meßergebnisse bestätigen also eine größere Genauigkeit des Verfahrens der Strahlungsparameter gegenüber dem Verfahren der mittleren Strahlungsparameter.

lungsbänder gegenüber dem Verfahren der mittleren Strahlungsparameter.

### Schrifttum

- [1] *Hottel, H. C., und Sarofim, A. F.*: Radiative transfer. New York, Toronto und London: McGraw Hill Book Company 1967.
- [2] *Leckner, B.*: Spectral and Total emissivity of water vapor and carbon dioxide, Combustion and Flame 19 (1972) S. 33/48.
- [3] *Eckert, E. R. G.*: Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch. Berlin, Heidelberg und New York: Springer-Verlag 1966.
- [4] *Szargut, J.*: Wärmeübertragung durch Strahlung in einem Kammerofen (Orig. poln.). Archiwum Hutnictwa 16 (1971) Nr. 2, S. 143/53.
- [5] *Wandrasz, J.*: Mathematisches Bändermodell der Energieübertragung durch Strahlung in einem Kammerofen (Orig. poln.), Zeszyty Naukowe Pol. Sl., Energetyka, z. 58, Gliwice 1976, S. 1/121.
- [6] *Edwards, D. K., und Balakrishnan, A.*: Thermal radiation by combustion gases. Internat. J. Heat Mass Transfer 16 (1973) Nr. 1, S. 25/40.

BWK 307

# Ein Rechenprogramm zur nichtlinearen Simulation der Dynamik von Benson-Dampferzeugern

F. Mayinger, H.-H. Reineke, R. Schramm, alle Hannover und P. Steinmetz, Oberhausen

*Der Aufsatz stellt ein Dynamikprogramm vor, welches das Verhalten eines Dampferzeugers bei Laständerungen und Störfällen simuliert. Anhand ausgewählter Komponenten (z.B. Verdampfer) werden die theoretischen Grundlagen (Grundgleichungen) für die Simulation vorgestellt, das numerische Lösungsverfahren erläutert und Ergebnisse der ersten Testrechnungen anhand von Diagrammen gezeigt.*

halten, gilt es, einen Kompromiß zwischen der geforderten Genauigkeit einerseits und dem notwendigen Aufwand andererseits zu finden.

### Theoretische Grundlagen

#### Allgemeine Beschreibung

Die physikalischen Vorgänge in einem Dampferzeuger werden durch gekoppelte, nichtlineare partielle Differentialgleichungen beschrieben, die bei der digitalen Simulation numerisch zu lösen sind. Eine der wichtigsten Vereinfachungen des

### Aufgabenstellung

Durch den zunehmenden Einsatz moderner Kraftwerksblöcke zur Deckung des Mittel- und Spitzenlastbedarfs steigen die Anforderungen an das dynamische Verhalten und die Regelbarkeit der Anlagen. Um diesen Anforderungen gerecht werden zu können, müssen schon im Projektstadium möglichst genaue Aussagen über das Verhalten auch des Dampferzeugers bei raschen Laständerungen möglich sein, damit bei der Planung und Auslegung entsprechende Maßnahmen getroffen werden können. Aus diesem Grund arbeitet die Deutsche Babcock AG, Oberhausen, zusammen mit dem Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Hannover seit einiger Zeit an der Erstellung eines Rechenprogramms, mit dem zunächst die Dynamik und später auch das Regelverhalten eines Kraftwerksblocks bei relativ großen Laständerungen auf dem Digitalrechner simuliert werden soll. Vorerst ist das Programm für Benson-Dampferzeuger aufgestellt; die Erweiterung auf andere Kesseltypen ist in späteren Erweiterungsschritten vorgesehen.

Die Hauptanforderung an das Rechenprogramm ist die Analyse großer Laständerungen. Aus diesem Grund scheidet die Simulation mit Hilfe eines linearen Modells aus, wie es z.B. von L. Borsi u.a. [1], basierend auf den Arbeiten von P. Profos [2], entwickelt wurde. Um den durch die Simulation des nicht linearen Verhaltens der Komponenten des Kraftwerksblocks stark ansteigenden Rechenaufwand in erträglichen Grenzen zu

### Formelzeichen

|                            |                                                                     |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $A$                        | Querschnittsfläche                                                  |
| $c_p$                      | spezifische Wärmekapazität                                          |
| $[c \cdot A]_{\text{eff}}$ | Effektivwert des Produkts aus Strahlungszahl und bestrahlter Fläche |
| $h$                        | spezifische Enthalpie                                               |
| $\dot{M}$                  | Mengenstrom                                                         |
| $p$                        | Druck                                                               |
| $\dot{q}$                  | Wärmestromdichte                                                    |
| $\dot{Q}$                  | Wärmestrom                                                          |
| $s$                        | Entropie                                                            |
| $t$                        | Zeit                                                                |
| $T$                        | Temperatur C                                                        |
| $T^\circ$                  | Temperatur K                                                        |
| $U_b$                      | benetzter Umfang                                                    |
| $w$                        | Geschwindigkeit                                                     |
| $x$                        | Längenkoordinate                                                    |
| $\epsilon$                 | vol. Dampfgehalt                                                    |
| $\lambda$                  | Wärmeleitfähigkeit                                                  |
| $\eta$                     | kinematische Zähigkeit                                              |
| $\rho$                     | Dichte                                                              |
| $\sigma$                   | Schlupffaktor                                                       |
| $'$                        | Sättigungszustand, Flüssigkeit                                      |
| $''$                       | Sättigungszustand, Dampf                                            |

Tabelle 1: Simulierte Komponenten und Prinzip der mathematischen Modelle

| Komponente              | Prinzip der mathematischen Modelle                                                                                                                |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. Wasserseite</b>   |                                                                                                                                                   |
| Economiser              | Erhaltungssätze: part. DGL                                                                                                                        |
| Überhitzer              | Wärmeübergangsbez., 1-phas. Druckabfall                                                                                                           |
| Verdampfer              | Erhaltungssätze: part. DGL (3 Grundgleichungen)<br>WÜ-Beziehungen, 2-phas. Druckabfall, Schlupf-bez.                                              |
| HD-Vorwärmer            | Erhaltungssätze: gew. DGL; WÜ-Eingabe                                                                                                             |
| Speisewasserpumpe       | Kennlinie $\Delta p = a_1 + b_1 \dot{M} + c_1 \dot{M}^2$                                                                                          |
| Entgaser                | Kennlinie $p = a_2 + b_2 \dot{M} + c_2 \dot{M}^2$                                                                                                 |
| Drossel                 | Kennlinie 1-phasig u. 2-phasig<br>2-phasig: Vergleichsdichte nach <i>M. Heckle</i> [8]                                                            |
| Turbine                 | Dampfkegelgesetz                                                                                                                                  |
| Dampfabscheider         | Kennlinie mit Wasserstand                                                                                                                         |
| Einspritzung            | Enthalpie- und Massenbilanz, algebr. Gleichung                                                                                                    |
| <b>2. Rauchgasseite</b> |                                                                                                                                                   |
| Feuerraum               | Erhaltungssätze für Masse, Impuls: gew. DGL.<br>Energie: algebr. Gleichung. Verbrennungsrechnung, Verteilungsfunktion für Wärmeabgabe an die Wand |
| Rauchgasabschnitt       | Erhaltungssätze: gew. DGL<br>Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion<br>Reibungsdruckabfall, Abstrahlung an benachbarte Abschnitte           |
| <b>3. Rohrwand</b>      |                                                                                                                                                   |
| geringe Wanddicke       | Wärmebilanz: gew. DGL                                                                                                                             |
| große Wanddicke         | Wärmebilanz: part. DGL                                                                                                                            |
| <b>4. Feuerung</b>      |                                                                                                                                                   |
| Kohle, Mühle + Siebter  | Massenerhaltung: gew. DGL                                                                                                                         |
| Staubleitung            | Massen- und Impulserhaltung: part. DGL                                                                                                            |
| Öl                      | Massenerhaltung: gew. DGL                                                                                                                         |
| <b>5. Luftseite</b>     |                                                                                                                                                   |
| Frischlüfter            | Kennlinie $\Delta p = a_3 + b_3 \dot{M} + c_3 \dot{M}^2$                                                                                          |
| Luftleitung             | Erhaltungssätze: gew. DGL                                                                                                                         |

dargestellten Dampferzeugermodells besteht darin, sowohl auf der Wasser- als auch auf der Rauchgasseite alle Vorgänge als räumlich eindimensional zu betrachten. Dadurch können z.B. im Feuerraum unsymmetrische Belastungen der Wandung lediglich durch Mehrfach-Vergleichsrechnungen erfaßt werden. Effekte, die z.B. aus der einseitigen Beheizung der Rohre in einer Membranwand resultieren, lassen sich allenfalls global, d.h. über den Rohrumfang verteilt wiedergeben. Diese Vereinfachung schließt nicht von vorneherein aus, daß sich nicht z.B. auf der Wasserseite mehrere jeweils eindimensionale Strömungspfade, sogenannte Parallelkanäle, betrachten lassen können. Auf eine solche Verzweigung des Strömungspfad wurde aber zur Einsparung von Rechenzeit vorerst verzichtet.

Eine Übersicht über die wichtigsten Komponenten, die bei der Simulation des Kraftwerkblocks bislang berücksichtigt wurden, gibt *Tabelle 1*.

Man kann in dieser Tabelle im Prinzip drei Arten von Komponenten unterscheiden. Eine Reihe von Komponenten wie z.B. die Speisewasserpumpe und die Drosseln lassen sich durch Kennlinien, d.h. im allgemeinen nichtlineare algebraische Gleichungen, beschreiben. Man vernachlässigt also deren kinematisch bedingtes Zeitverhalten, berücksichtigt aber Ventilstellzeiten.

Bei einer zweiten Gruppe wird das Verhalten durch Differentialgleichungen beschrieben, die aus den Erhaltungssätzen folgen. Die Vorgänge lassen sich aber modellmäßig soweit vereinfachen, daß alle Parameter in einem Punkt konzentriert sind. Darum reichen gewöhnliche Differentialgleichungen für die Be-

schreibung dieser Komponenten aus. Schließlich gibt es noch eine dritte Gruppe, nämlich die Heizflächen selbst, die durch partielle Differentialgleichungen beschrieben werden sollten wegen der starken Änderung, die die thermo- und hydrodynamischen Zustände in diesen Komponenten erfahren.

Grundgleichungen für den Verdampfer

Eine ausführliche Darlegung der modellmäßigen Beschreibung aller bislang berücksichtigten Komponenten würde zuviel Raum in Anspruch nehmen. Das Grundprinzip des Simulationsmodells soll darum nur an Beispielen wie dem Verdampfer (Zweiphasenströmung) erläutert werden. Aus den Erhaltungssätzen folgen die Grundgleichungen:

Energieerhaltung:

$$\frac{\delta}{\delta t} [(1-\epsilon) \rho' h' + \epsilon \rho'' h''] + \frac{\delta}{\delta x} [(1-\epsilon) \rho' h' w' + \epsilon \rho'' h'' w''] = \frac{U_h}{A} \dot{q}$$

Massenerhaltung:

$$\frac{\delta}{\delta t} [(1-\epsilon) \rho' + \epsilon \rho''] + \frac{\delta}{\delta x} [(1-\epsilon) \rho' w' + \epsilon \rho'' w''] = 0 \tag{2}$$

Impulserhaltung:

$$\frac{\delta p}{\delta x} = - \frac{\delta p}{\delta x} \Big|_{\text{Reib}} - \frac{\delta}{\delta x} [(1-\epsilon) \rho' w'^2 + \epsilon \rho'' w''^2] - \frac{\delta}{\delta t} [(1-\epsilon) \rho' w' + \epsilon \rho'' w''] + g [(1-\epsilon) \rho' + \epsilon \rho''] \tag{3}$$

Der Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeiten der flüssigen und der dampfförmigen Phase wird durch den Schlupf faktor  $\sigma$  nach den Ansätzen von *S.G. Bunkoff* [3] und *A.B. Jones* [4] beschrieben. Zur Bestimmung des Reibungsdruckabfalls bei zweiphasiger Strömung dient die Beziehung von *R.G. Martinelli* und *D.B. Nelson* [5]. Für die Berechnung des Wärmeübergangs zwischen Rohrwand und Zweiphasengemisch werden je nach Dampfgehalt und Strömungszustand die Gleichungen von *S. Levy* [6] oder von *V.E. Schrock* und *L.M. Grossmann* [7] herangezogen.

Die Bestimmung der Sättigungszustandswerte fällt in den allgemeinen Bereich der Stoffwertberechnung. Die *Tabelle 2* enthält eine Zusammenstellung sämtlicher im Rechenprogramm enthaltenen Stoffwertfunktionen und einen Hinweis auf das Grundprinzip, auf dem die Funktionen basieren.

Grundlagen der Rauchgasberechnung

Auch für die Rauchgasseite kann das mathematische Modell nur in einigen Punkten beispielhaft erläutert werden. Die Be-

Tabelle 2: Stoffwertfunktionen

| Aufbau                                  | Funktionen                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Interpolation in gespeicherten Tabellen | $T = f(p, h); h = f(p, T); p = f(p, T)$<br>$c_p = f(p, T); s = f(p, h); h = f(p, s)$                                                                                                                                                                                                        |
| spline-functions                        | $h' = f(p); h'' = f(p); \rho' = f(p)$<br>$\rho'' = f(p); s' = f(p); s'' = f(p)$                                                                                                                                                                                                             |
| analytische Funktionen                  | Wasser<br>$\lambda = f(p, T); \eta = f(p, T)$<br>Rauchgas<br>$\lambda = f(T, x_{CO_2}, x_{H_2O}, x_{O_2}, x_{SO_2})$<br>$\eta = f(T, x_{CO_2}, x_{H_2O}, x_{O_2}, x_{SO_2})$<br>$c_p = f(T, x_{CO_2}, x_{H_2O}, x_{O_2}, x_{SO_2})$<br>$\rho = f(T, x_{CO_2}, x_{H_2O}, x_{O_2}, x_{SO_2})$ |
| Stahl (Wand)                            | $\lambda = f(T, \text{Materialart})$                                                                                                                                                                                                                                                        |

rechnung der Vorgänge im Feuerraum erfolgt in den folgenden Teilschritten:

1. Statistische Verbrennungsrechnung zur Bestimmung der Rauchgaszusammensetzung und des Rauchgasmengenstroms.
2. Berechnung der insgesamt in den Feuerraum eingebrachten Wärmemenge unter Berücksichtigung der Verbrennungslufttemperatur und der Schlackenmenge.
3. Ermittlung der Feuerraumaustrittstemperatur nach

$$\dot{Q}_{zu} = \underbrace{[c \cdot A]_{\text{eff}} \cdot \left[ \left( \frac{T'_{FE}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T'_W}{100} \right)^4 \right]}_{\dot{Q}_{\text{abgegeben}}} + \underbrace{\dot{M}_{RG} \cdot c_p \cdot T_{FE}}_{\dot{Q}_{RG \text{ aus fühlbar}}} \quad (5).$$

Der Wert  $[c \cdot A]_{\text{eff}}$  ergibt sich aus stationären Betriebsdaten.

4. Verteilung des gesamten im Feuerraum abgestrahlten Wärmestroms  $\dot{Q}_{\text{abgegeben}}$  auf die Feuerraumwände mit Hilfe einer Verteilungsfunktion  $P_{(h)}$ .

Die Verteilungsfunktion soll dem Umstand Rechnung tragen, daß die Wärmebelastung der Feuerraumwand, abhängig von der Lage des Flammenraums und der Feuerungsart, über der Feuerraumhöhe stark unterschiedlich ist. Die Verteilungsfunktion kann während des Rechenlaufs verändert werden, um z.B. den Ausfall oder Wechsel einer Brennebene zu simulieren.

In den an den Feuerraum anschließenden Rauchgasabschnitten des Berührungszuges erfolgt die Berechnung des Wärmeübergangs zwischen Rauchgas und Rohrwand unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Strahlung und Konvektion. In einem Rauchgasabschnitt können parallel Membranwände und querdurchströmte Bündel vorhanden sein, wobei sowohl glatte als auch berippte Rohre vorgesehen sind. In jedem Rauchgasabschnitt ergeben Bilanzen für Masse, Energie und Impuls den Verlauf von Massenstrom, Temperatur und Druck des Rauchgases. Außerdem wird die Zusammensetzung des Rauchgases durch getrennte Massenbilanzen für jede der im Rauchgas vorkommenden Komponenten bestimmt, um lastabhängig die Strahlung und die Stoffwerte zu berechnen.

Zusätzlich zum Wärmetransport an die Wände des jeweiligen Rauchgasabschnitts wird auch die Wärmeabstrahlung an Wand und Gas in stromaufwärts liegenden Rauchgasabschnitten berücksichtigt. Die Berechnung der abgestrahlten Wärmemenge erfolgt nach dem Strahlungsgesetz mit einem aus stationären Betriebsdaten ermittelten Wert für  $[c \cdot A]_{\text{eff}}$ . Als Rückstrahltemperatur wird die mittlere Wandtemperatur bzw. die Rauchgastemperatur des nächsten in Richtung des Rauchgasstroms gelegenen Abschnitts herangezogen.

## Numerisches Lösungsverfahren

Die numerische Lösung beruht auf einem impliziten Differenzenansatz, der im Prinzip für beliebige Zeitschrittweiten numerisch stabil ist. Ausgehend vom Zeitpunkt  $n$ , an dem sämtliche Variablen bekannt sind, erfolgt die Berechnung der Zustände zum Zeitpunkt  $n+1$  in einer Reihe von Teilschritten. Alle Größen, die bei der Durchführung eines Teilschritts für den Zeitpunkt  $n+1$  noch nicht bekannt sind, werden vom Zeitpunkt  $n$  übernommen. Der Zeitschritt  $\Delta t$  muß demzufolge klein genug sein, damit diese Vorgehensweise mit hinreichender Genauigkeit zulässig ist.

Im ersten Teilschritt beim Vorrücken von einem Zeitpunkt zum nächsten werden in Richtung des strömenden Rauchgases die Abschnitte des Rauchgaszuges durchgerechnet. Danach erfolgt wieder in Richtung des strömenden Fluids die Berechnung

der Zustandsänderung auf der Wasserseite. Im letzten Teilschritt wird schließlich die Wandtemperatur für den nächsten Zeitschritt vorintegriert.

Da der Rechenablauf immer in Strömungsrichtung fortschreitet, lassen sich ohne Iteration über einen Zeitschritt nur Änderungen am Kesseleintritt rechnen. In der jetzigen Konzeption ist das Rechenprogramm außerdem nicht in der Lage, Rückwärtsströmung in Teilabschnitten zu untersuchen. Daraus ergibt sich eine nicht als vollständig anzusehende Liste von simulierbaren Störfällen:

### Ohne Iteration:

1. Speisepumpenausfall
2. HD-Vorwärmerausfall oder Abschaltung
3. Ausfall des Luftvorwärmers
4. Heizwertänderung
5. Not-Aus

### Mit Iteration:

6. Rohrbruch (keine Rückströmung)
7. Ansprechen Sicherheitsventile (keine Rückwärtsströmung)
8. Laständerung Turbine

Das Rechenprogramm besteht aus drei Teilen. Ein Vorprogramm liest die Kesselstruktur und die geometrischen Daten ein und erstellt die Koppelung zwischen den aufgerufenen Modulen. Den zweiten Teil bildet das eigentliche Dynamikprogramm. Dieser Programmteil kann lastabhängige Parameter sowie alle Größen, die entweder im praktischen Betrieb durch Regel- und Steueranlagen oder für rein theoretische Untersuchungen geändert werden, einlesen und auswerten. Der dritte Teil des Programmsystems enthält Ausgabe- und Plott Routinen, die eine anschauliche Darstellung der Ergebnisse gestatten.

## Ergebnisse

Für die ersten Testrechnungen mit dem Dynamikprogramm wurde eine vereinfachte Kesselschaltung gewählt, die schematisch in Bild 1 dargestellt ist. Die Berechnungen für diese Schaltung dienen in erster Linie dazu, die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit des Rechenprogramms zu erproben.

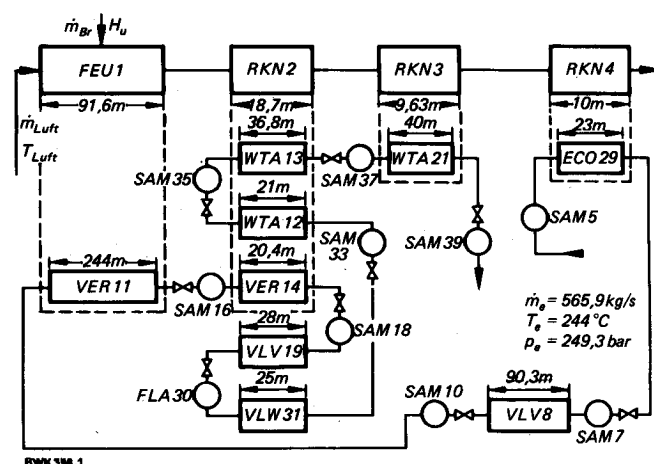


Bild 1: Prinzip der untersuchten Kesselschaltung

|                |                                  |
|----------------|----------------------------------|
| FEU 1          | Feuerraum                        |
| RKN 2-3        | Rauchgasknoten                   |
| ECO 29         | Speisewasservorwärmer            |
| VER 11         | Verdampferschraube               |
| VER 14         | Verdampfer, senkrechte Berohrung |
| WTA            | Überhitzer                       |
| VLV            | Verbindungsleitung, 2-phasig     |
| VLW            | Verbindungsleitung, 1-phasig     |
| SAM            | Sammler                          |
| H <sub>u</sub> | 25 MW/kg                         |

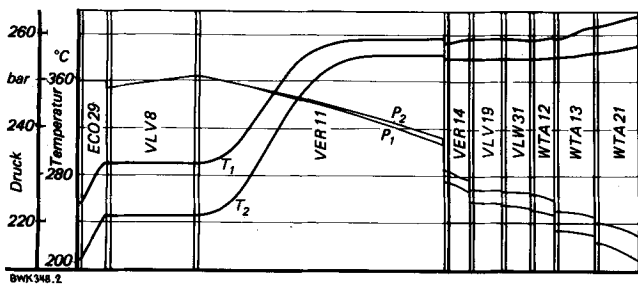


Bild 2: Verlauf von Druck und Temperatur im Dampferzeuger  
Index 1: stationärer Ausgangszustand  
Index 2: stationärer Zustand nach Störfall 2

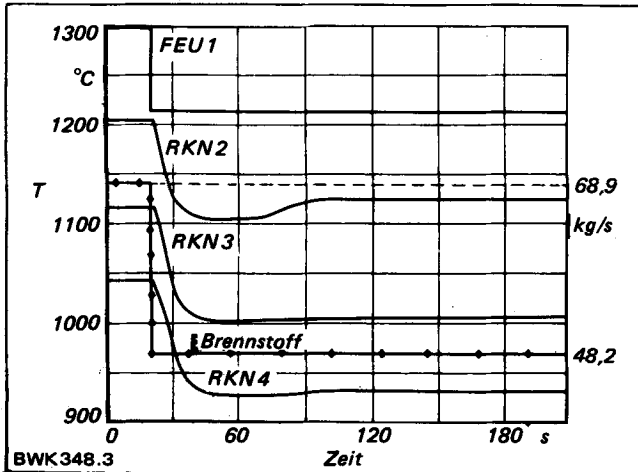


Bild 3: Zeitliche Änderung der Rauchgastemperaturen am Austritt der bezeichneten Abschnitte, Störfall 1

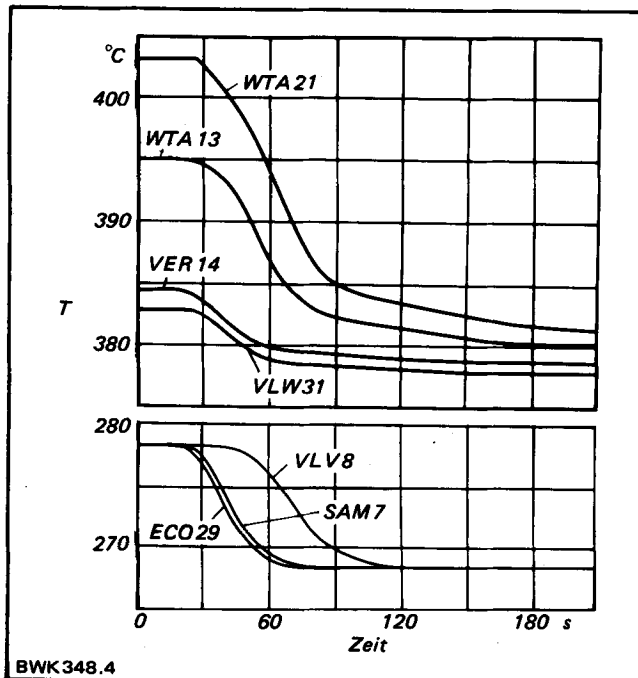


Bild 4: Zeitliche Änderung der Wassertemperaturen, Störfall 1

Als Beispiele sollen zwei untersuchte Störfälle dargelegt werden: erstens eine sprunghafte Reduzierung der Brennstoffzufuhr um 30% bei gleichbleibendem Luftverhältnis und konstanten Eintrittsdaten für die Wasserseite, und zweitens eine sprunghafte Verringerung der Eintrittsenthalpie des Speisewassers um 15% bei konstantem Mengenstrom und gleichbleibenden Verhältnissen auf der Rauchgasseite. Ausgangspunkt für die Berechnung dieser Störfälle ist ein stationärer Kesselzu-

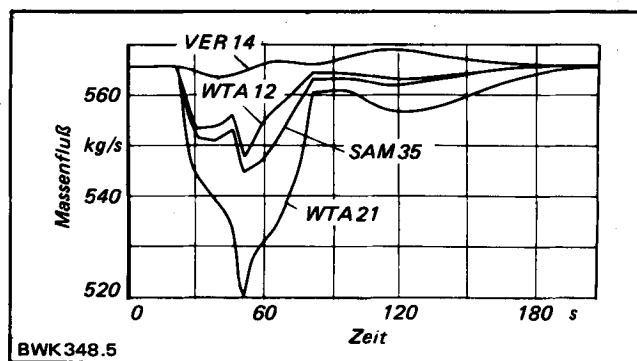


Bild 5: Zeitliche Änderung der Mengenströme, Störfall 1

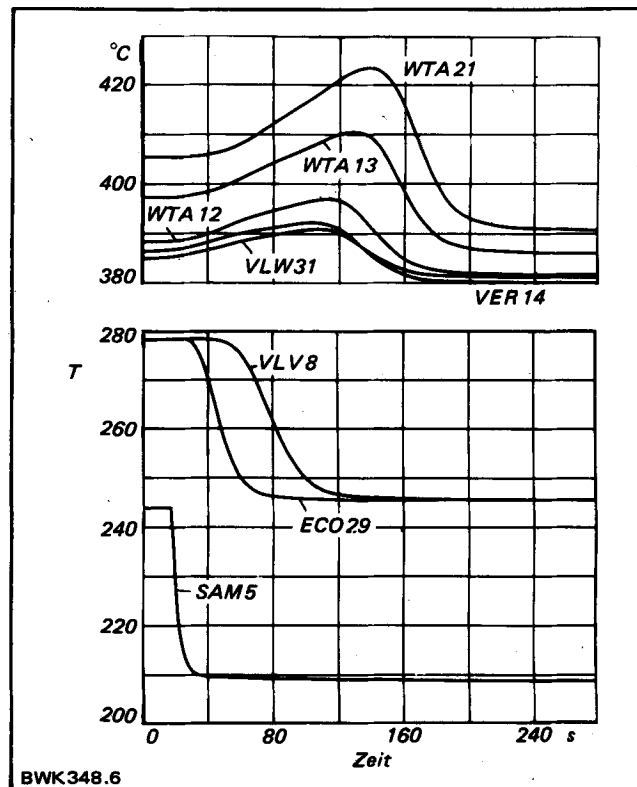


Bild 6: Zeitliche Änderung der Wassertemperaturen, Störfall 2

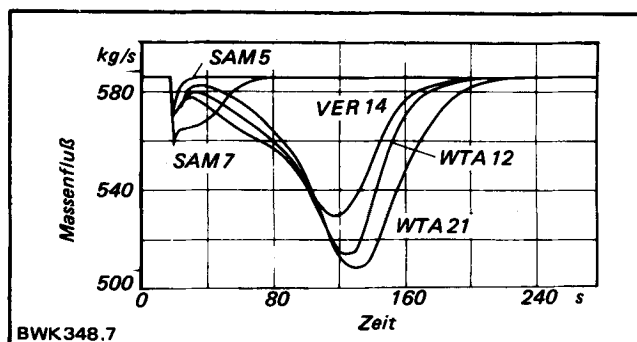


Bild 7: Zeitliche Änderung der Mengenströme, Störfall 2

stand, der in einem Vorlauf ebenfalls mit dem Dynamikprogramm berechnet wurde. Bild 2 zeigt die Verläufe von Druck und Temperatur über die abgewinkelte Kessellänge für diesen Zustand.

Die zeitliche Änderung einer Reihe von Zustandsgrößen im Kessel, wie sie für den ersten Fall berechnet wurde, zeigen die Bilder 3, 4 und 5. Die Rauchgastemperatur folgt dem Abfall der Brennstoffzufuhr mit sehr geringer Verzögerung, die bei

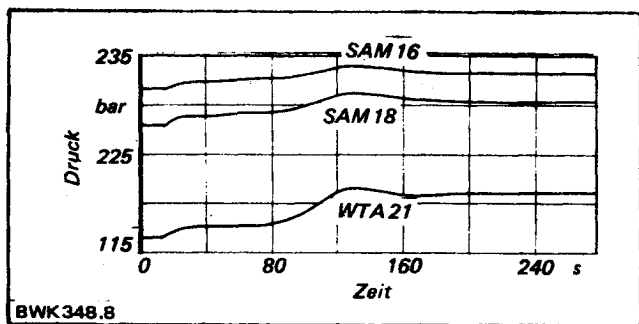


Bild 8: Zeitliche Änderung der Drücke, Störfall 2

den im Rauchgasstrom abwärts gelegenen Abschnitten nur geringfügig ansteigt.

Eine sehr schnelle Reaktion auf die Störung zeigt sich auch auf der Wasserseite bei den Austrittstemperaturen an allen Heizflächen. Mit einer nur geringen Verzögerung, die durch die Wärmespeicherung der Wände verursacht wird, setzt nach der Reduzierung der Brennstoffzufuhr ein spürbarer Temperaturabfall ein. Bei den unbeheizten Verbindungsleitungen dagegen setzt die Änderung der Austrittstemperatur erst nach einer gewissen Totzeit ein, da diese Elemente nicht unmittelbar durch die Rauchgasseite beeinflusst werden. Am deutlichsten ist dies bei der Leitung VLV 8 zu erkennen. Durch den Abfall der Temperatur steigt die Dichte auf der Wasserseite an und es wird Masse eingespeichert. Dadurch sinkt der Gesamtstrom kurzzeitig ab. Aus Bild 5 wird deutlich, wie sich dieser Effekt bis zum Ende der Kesselschaltung aufaddiert.

Die für den zweiten Störfall berechneten Ergebnisse sind in den Bildern 6, 7, und 8 dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, wie die Austrittstemperaturen bei den vordersten Komponenten im Wasserstrang erst nach einer gewissen Verzugszeit auf die am Eintritt aufgeprägte Störung reagieren. Durch die Temperaturabsenkung und der daraus resultierenden Erhöhung der Dichte wird auch in diesem Fall Masse eingespeichert und der Gesamtstrom zeitweilig abgesenkt, wie es Bild 7 zeigt. Da die den Heizflächen zugeführten Wärmeströme nahezu konstant sind, müssen demzufolge die Austrittstemperaturen an den Heizflächen kurzzeitig ansteigen, wie es auch aus Bild 6 deutlich wird.

Erst wenn die am Eintritt aufgeprägte Temperaturstörung bis zum Ende des jeweiligen Wärmeaustauschers durchgelaufen ist, setzt ein Temperaturabfall ein.

Durch den Anstieg der Dichte verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit und demzufolge nehmen die Reibungsverluste

ab. Dadurch steigt besonders im hinteren Teil des Wasserstrangs der Druck an. Der zeitliche Verlauf des Druckanstiegs ist für drei Punkte im Kessel in Bild 8 dargestellt; für den stationären Zustand, der sich nach dem Abklingen der dynamischen Änderungen einstellt, ist der Druckverlauf über den Kessel in Bild 2 aufgetragen.

## Zusammenfassung und Ausblick auf weitere Arbeiten

In seiner ersten Ausbaustufe ist das Dynamikprogramm in der Lage, das Verhalten eines Dampferzeugers bei Laständerungen und Störfällen zu simulieren. Neben den Elementen des eigentlichen Dampferzeugers werden dabei auch die übrigen Komponenten der Gesamtanlage insoweit berücksichtigt, wie sie Rückwirkungen auf das Verhalten des Dampferzeugers haben. Im zweiten Schritt ist die Simulation der Regel- und Steuereinrichtungen und deren Verknüpfung mit der Kesselanlage vorgesehen.

Neben der eigentlichen numerischen Simulation der verschiedenen Kesselkomponenten ist bei einem solchen Programm die Ein- und Ausgabe der Daten eine Frage ersten Ranges. Bei einem langfristig geplanten Projekt dieser Art kommt einer allgemeinen „Benutzerfreundlichkeit“ größte Bedeutung zu. Diesem Punkt wurde schon in der ersten Ausbaustufe große Aufmerksamkeit gewidmet, und auch im zweiten Schritt sind in dieser Richtung, besonders in Bezug auf die Aufbereitung und Ausgabe der Ergebnisse, verstärkte Anstrengungen vorgesehen.

## Schrifttum

- [1] Borsi, L.; Hofmeister, W.; Falgenhauer, G.; Reichel, H.: Untersuchung über Dynamik und Regelverhalten von Benson-Dampferzeugern; VGB Kraftwerkstechnik 58 (1978) Nr. 4, S. 240/246.
- [2] Profos, P.: Die Regelung von Dampfanlagen; Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1962.
- [3] Bankoff, S.G.: A Variable Density Single-Fluid Model for Two-Phase Flow with Particular Reference to Steam-Water Flow; Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer 82 (1960) S. 265/272.
- [4] Jones, A.B.: Hydrodynamic Stability of a Boiling Channel; USACC Report KAPL 11-9 (1961).
- [5] Martinelli, R.C.; Nelson, P.B.: Prediction of Pressure Drops during Forced Circulation Boiling of Water; Trans. ASME 70 (1948) S. 695/702.
- [6] Levy, S.: Generalized Correlation of Boiling Heat Transfer; Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer 81 (1959) S. 37/42.
- [7] Schrock, V.E.; Grossmann, L.M.: Forced Convection Boiling Studies Forced Convection Vaporization Project; USACC Report TID-14632 (1959).
- [8] Heckle, M.: Bestimmung der Zweiphasenströmung Gas/Flüssigkeit durch Drosselorgane; Chemie-Ing.-Technik 42 (1970) Nr. 5, S. 304/310.

BWK 348

## Lehrgänge des VDI-Bildungswerkes

### Supraleitungstechnik

In Zusammenarbeit mit der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) veranstaltet das VDI-BILDUNGSWERK vom 10. bis zum 12. Oktober 1978 in Karlsruhe den Lehrgang „Supraleitungstechnik“. Lehrgangsträger sind: VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Regelungstechnik, Fachauschuß Tiefe Temperaturen — Arbeitskreis Kryotechnik der DPG, Deutsche Arbeitsgemeinschaft Vakuum (DAGV).

Die Vorträge vermitteln u.a. einen Überblick über abgeschlossene Großforschungsprojekte sowie über die laufenden Arbeiten und das Innovationspotential der Supraleitungstechnik.

Außerdem wird den Anwendungsmöglichkeiten der Supraleitung in der Datenverarbeitung erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet.

Der Lehrgang wendet sich an Physiker, die anwendungsorientiert arbeiten sowie an Ingenieure. Der Teilnehmer sollte graduiert sein, ein Diplom oder eine entsprechende Vorbildung besitzen.

### Durchfluß- und Mengenmessung in geschlossenen Rohrleitungen

Neu in sein Programm hat das VDI-BILDUNGSWERK den Lehrgang „Durchfluß- und Mengenmessung in

geschlossenen Rohrleitungen“ aufgenommen. Lehrgangsträger sind die VDI/VDE Gesellschaft Meß- und Regelungstechnik und die VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. Die Veranstaltung findet am 16. und 17. Oktober 1978 in Düsseldorf statt.

Der Lehrgang gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren der Durchfluß- und Mengenmessung in geschlossenen Rohrleitungen. Dabei sollen die vermittelten Kenntnisse vor allem Hilfen für die Auswahl des Meßverfahrens geben. Weiter soll gezeigt werden, wie Anwendungsfehler erkannt und beseitigt werden können.

Auskunft, Anmeldung und Programme für beide Lehrgänge: VDI-Bildungswerk, Graf-Recke-Straße 84, 4000 Düsseldorf, Tel. 0211/6214214. BWK 6836