Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 11

Artikel: Moderne Regelungstechnik in der Praxis

Autor: Lausterer, G. K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904624

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Moderne Regelungstechnik in der Praxis

G.K. Lausterer

Die Hoffnung der Regelungstechniker auf eine breite Anwendung moderner Zustandsraumverfahren ist bisher nicht in Erfüllung gegangen. Dies liegt zum einen daran, dass in vielen Fällen der ökonomische Anreiz, den bewährten PID-Regler zu ersetzen, nicht gegeben ist, zum anderen wird jedoch auch der vermeintlich hohe Projektierungsaufwand gescheut.
In diesem Aufsatz wird gezeigt, dass mit den heutigen Prozessleitsystemen die technologischen Voraussetzungen zur Anwendung moderner Zustandsraummethoden gegeben sind. Nach einer theoretischen Einführung wird anhand eines praktischen Beispiels gezeigt, wie ein Zustandsregler ohne allzu grossen Rechenaufwand berechnet werden kann.

Une large application des méthodes modernes d'espace d'état qu'espèrent les techniciens en régulation ne se manifeste pas encore. Cela tient au fait que, dans de nombreux cas, le remplacement des éprouvés régulateurs PID ne se justifie pas économiquement et que l'on craint en outre le cout élevé des projets d'application. Avec les systèmes actuels de conduite de processus les dispositions technologiques sont disponibles pour l'application de méthodes modernes d'espace d'état. Après une introduction d'ordre théorique, un exemple montre comment un régulateur d'état peut être calculé sans grande complication.

Adresse des Autors
Gerhard K. Lausterer, PhD, Systemtechnische Entwicklung, Siemens AG, D-7500 Karlsruhe 21.

1. Erwartung und Realität

Die Regelungstechnik ist eine vergleichsweise junge Wissenschaft; und doch hat sie bereits eine Fülle theoretischer Methoden entwickelt, deren praktische Anwendung allerdings oft an der Unzulänglichkeit der vorhandenen Hardware gescheitert ist. Viele Regelungstechniker haben nun gehofft, dass mit der weiten Verbreitung der Mikroprozessoren auch der Siegeszug der modernen Methoden der Regelungstechnik (sprich Zustandsraummethoden) verbunden sein werde. Diese Hoffnung wurde bislang ziemlich enttäuscht. In der produzierenden Industrie, in der chemischen Verfahrenstechnik oder in der Energieerzeugung kann von einem Durchbruch der modernen Verfahren nicht gesprochen werden.

Woran liegt es, daß immer noch der größte Teil aller Regelkreise mit PI- oder PID-Reglern, gegebenenfalls mit Hilfs- oder Störgrössenaufschaltungen, realisiert wird, obwohl die technologischen Voraussetzungen für höhere Regelalgorithmen bei den modernen Prozessleitsystemen durchaus gegeben sind? Ein Grund ist sicher der, dass die Betreiber der zu automatisierenden Anlagen mit der Einführung der neuen Technik (Mikroprozessor, serielle Informationsverarbeitung) nicht zugleich ihre bewährten Konzepte ändern wollten. Nachdem aber die Zuversicht in die digitalen Prozessleitsysteme gefestigt ist, dürfte der Zeitpunkt gekommen sein, da auch fortgeschrittene Konzepte realisiert werden können. Voraussetzung ist jedoch, dass dazu ein ökonomischer Anreiz gegeben ist, z.B. durch

- geringere dynamische Belastung der Anlage und der Stellglieder und damit höhere Verfügbarkeit,
- genauere Einhaltung der Spezifikationen und damit bessere Produktqualität,
- bessere Ausnutzung der Thermodynamik (z.B. höhere Frischdampftemperatur vor Turbine) und damit höheren Wirkungsgrad,
- verbesserten Umweltschutz, z.B. Verringerung schädlicher Nebenprodukte oder Abwärme.

2. Anforderungen an Prozessleitsysteme

Verfahrenstechnische, chemische oder energieerzeugende Prozesse sind heute meist hochkomplexe Systeme mit hohem Automatisierungsgrad, charakterisiert durch eine hierarchische Organisation, eine Vielzahl von Komponenten mit teilweise starken dynamischen Kopplungen. Entwurf und Betrieb dieser Anlagen erfolgen unter den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit. Die Anforderungen an die Prozessleitsysteme lauten deshalb:

- hohe Verfügbarkeit,
- sichere Erkennung und Beseitigung von Systemfehlern (Redundanz),
- sichere Erkennung und Lokalisierung von Anlagefehlern,
- hohe Genauigkeit, Driftfreiheit,
- flexible Einsatzmöglichkeit,
- Änderungsfreundlichkeit, gute Dokumentation (Selbstdokumentation),
- einfache Projektierung, kurze Montage und Inbetriebnahme,
- Kostenvorteile gegenüber konventioneller festprogrammierter Technik.

3. Anforderungen an die regelungstechnischen Methoden

An die Methoden werden heute folgende Anforderungen gestellt:

- leichte Nachvollziehbarkeit (kein theoretischer Wasserkopf),

- geringer Projektierungsaufwand,
- nachgewiesene Vorteile (Kostenersparnis),
- Flexibilität, leichte Anpassung bzw. Änderung,
- Gewährleistung der Anlagensicherheit, d.h. unbedingte Stabilität.

In den meisten Fällen setzt die Anwendung moderner theoretischer Verfahren die Verfügbarkeit genügend genauer mathematischer *Prozessmodelle* voraus. Solche Modelle werden einerseits durch theoretische Modellbildung (physikalische Erhaltungssätze), anderseits durch Messungen am Prozess, durch die sogenannte *Identifikation*, gewonnen. Für viele technologische Prozesse stehen heute geeignete mathematische Prozessmodelle zur Verfügung. Anhand einer grossen Zahl konkreter Beispiele aus dem Bereich der Kraftwerkstechnik wird in [1] der gezielte Einsatz mathematischer Modelle zur Optimierung der Kraftwerksregelung aufgezeigt.

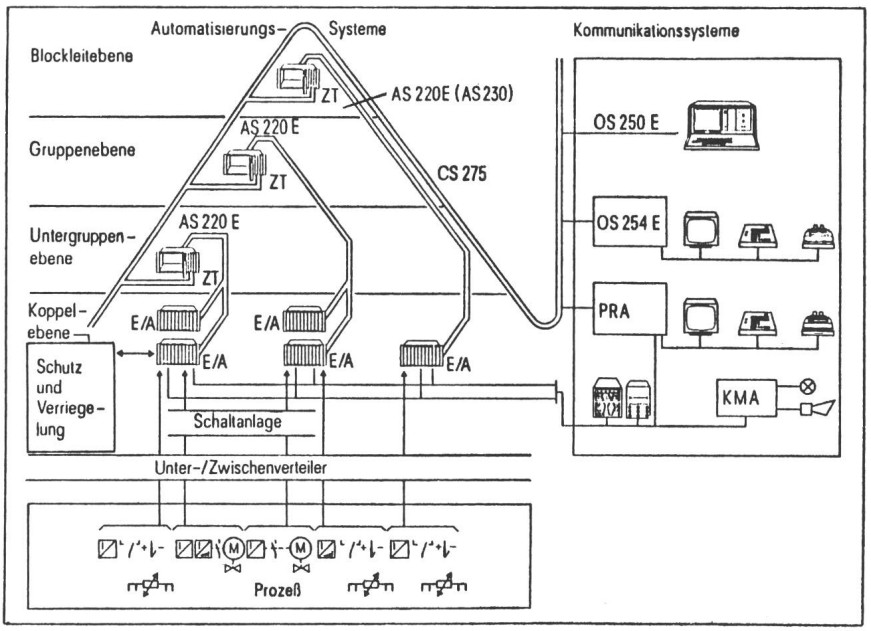

Fig. 1 Hierarchische Leittechnikstruktur des Teleperm-ME-Systems
PRA Prozessrechneranlage
KMA Konventionelle Meldeanlage

4. Moderne Prozessleitsysteme

Moderne Prozessautomatisierungs- oder Prozessleitsysteme werden charakterisiert durch die drei wesentlichen Komponenten:
- mikroprozessorgestützte Automatisierungsgeräte, d.h. selbständige Hardwarefunktionseinheiten mit paralleler Informationsverarbeitung (verteilte Intelligenz),
- Datenbusse zur seriellen Informationsübertragung,
- Bildschirmgeräte zur Bedienung und Beobachtung des Prozesses.

Die im vorigen Abschnitt genannten Anforderungen werden durch die modernen Prozessautomatisierungssysteme, die in unterschiedlichen Formen von vielen Herstellern angeboten werden, durchwegs erfüllt. Am Beispiel von Teleperm M soll etwas näher auf die typischen Eigenschaften und Vorzüge eines modernen Prozessleitsystems eingegangen werden. Ein Systemüberblick wird in [2] gegeben. Die Implementierung verbesserter Regelkonzepte für Dampferzeuger mit Teleperm M wird in [3] beschrieben.

Die Figur 1 zeigt die wesentlichen Komponenten und die hierarchische Leittechnikstruktur des Teleperm-Systems am Beispiel eines Kraftwerkblockes. Die Funktionen der Blockleit-, Gruppen- und Untergruppenebene erfüllen die Automatisierungssysteme AS 220 E, während die direkte Prozessankopplung über Ein-/Ausgabe-Baugruppen erfolgt. Die Bedienung und Beobachtung sowie die zentrale Strukturierung und Parametrierung erfolgt über die Systeme OS 250 E bzw. OS 254 E. Alle Systeme werden über das möglicherweise redundant ausgeführte Bussystem CS 275 verbunden. Schutz und Verriegelungsfunktionen sind weiterhin in konventioneller Technik realisiert.

Das Automatisierungssystem AS 220 E kann sowohl busgekoppelt (in grossen Anlagen) als auch autark eingesetzt werden. Die Handhabung und Anwendung von Funktionsbausteinen des Systems wird in [4] erläutert. Die Funktionsbausteine (z.B. Summierer, Multiplizierer, PID-Regler usw.) werden einfach definiert, eingebaut, parametriert und verschaltet. So können selbst komplizierte Schaltungen in sehr kurzer Zeit realisiert werden. Änderungen können on-line ausgeführt werden. Dies ist insbesondere beim Austesten neuer Reglerstrukturen von unschätzbarem Vorteil. Die Figur 2 zeigt einen Erweiterungsrahmen mit einigen Teleperm-Ein-/Ausgabe-Baugruppen.

Die Ein-/Ausgabe-Baugruppen dienen der Signalaufbereitung, -verteilung sowie der Messwertvorverarbeitung (z.B. Radizieren). Aber auch weitergehende Funktionen, wie Einzelsteuerung und Einzelregelung mit busunabhängiger Bedienung und Beobachtung, lassen sich realisieren. Die strukturierbare Rechenbaugruppe bietet mit 8 Analogeingängen, 6 Analogausgängen und freier Strukturierung ein Höchstmass an Flexibilität.

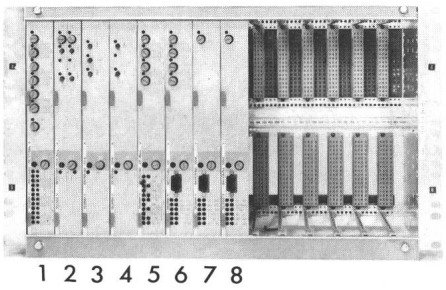

Fig. 2 Ausschnitt eines mit E/A-Baugruppen bestückten Baugruppenträgers
1 Binärsignaleingabebaugruppe zum Versorgen, Erfassen und Überwachen von Binärgebern (Halbleiter oder Kontakte) sowie zum Verteilen der Gebersignale
2 Steuerungsbaugruppe zum Steuern und Überwachen von zwei Motoren oder Magnetventilen
3 Steuerungsbaugruppe zum Steuern und Überwachen eines Stellantriebs
4 Steuerungsbaugruppe zum Steuern und Überwachen eines Motors oder Magnetventils
5 Analogsignaleingabebaugruppe zum Versorgen, Erfassen und Überwachen von vier Messumformern sowie zum Verteilen der Messignale
6 Anwenderspezifisch strukturierbare Rechenbaugruppe zur Messauswertung (Durchflusskorrekturrechnung, Grenzwertermittlung)
7 Anwenderspezifisch strukturierbare Regelungsbaugruppe mit kontinuierlichem Stellausgang
8 Anwenderspezifisch strukturierbare Regelungsbaugruppe mit schaltenden Befehlsausgängen (auch für Antriebe mit zwei Drehzahlen oder Zwei-Motoren-Antriebe geeignet)

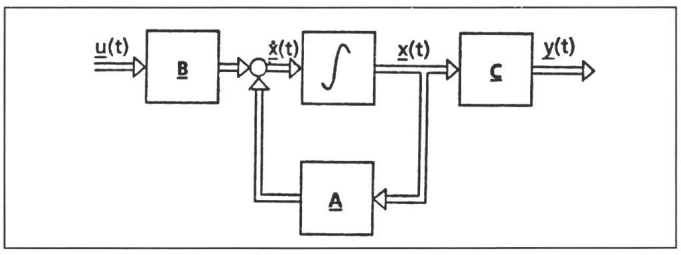

Fig. 3
Blockschaltbild eines Systems in Zustandsraumdarstellung

Da bei Störungen des Zentralteils AS 220 E diese intelligenten Funktionsbaugruppen voll funktionsfähig bleiben, wird eine sehr hohe Verfügbarkeit erreicht. Die Berechnung von Zuverlässigkeitskenngrössen eines Automatisierungssystems wird in [5] aufgezeigt.

5. Theoretische Grundlagen

5.1 Zustandsraumdarstellung

Ehe auf das Beispiel eingegangen wird, ist es hilfreich, den theoretischen Hintergrund zu beleuchten. Zunächst wird dazu die Zustandsraumdarstellung als mathematische Grundlage des Verfahrens erläutert [6]. Mathematisch gesehen bedeutet die Einführung von Zustandsvariablen die Umwandlung einer Differentialgleichung n-ter Ordnung in ein System von n Differentialgleichungen erster Ordnung. Dieses lässt sich sehr elegant in Form einer Matrixdifferentialgleichung darstellen. Die standardisierte Darstellung eines linearen, zeitinvarianten Systems lautet (Fig. 3):

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) \tag{1}$$

Hierbei ist

$\boldsymbol{x}(t)$ der Zustandsvektor (Dimension $= n \times 1$),
$\boldsymbol{u}(t)$ der Steuervektor (Dimension $= p \times 1$),
$\boldsymbol{A}$ die Systemmatrix (Dimension $= n \times n$)
$\boldsymbol{B}$ die Steuermatrix (Dimension $= n \times p$)

des Systems.

Oft werden nicht alle Zustandsgrössen x_i, $i = 1, \ldots n$ direkt beobachtet (gemessen). Dann definiert man

$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) \tag{2}$$

wobei

$\boldsymbol{y}(t)$ der Ausgangsvektor (Dimension $= q \times 1$),
$\boldsymbol{C}$ die Ausgangsmatrix (Dimension $= q \times n$)

ist.

Die konstanten Matrizen $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$ enthalten die Parameter des physikalischen Systems. Sie können direkt identifiziert oder z.B. aus der Übertragungsfunktion berechnet werden.

5.2 Zustandsregler

Ist der Zustandsvektor $\boldsymbol{x}(t)$ bekannt, so kann in sehr einfacher Form ein Zustandsregler entworfen werden, indem man für die Rückkopplung ansetzt:

$$\boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t) \tag{3}$$

$\boldsymbol{K}$ ist die $p \times n$-Rückführmatrix, die im allgemeinen Fall zeitabhängig ist. Setzt man (3) in (1) ein, so erhält man

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t) = (\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\boldsymbol{x}(t) \tag{4}$$

oder

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}(t) \text{ mit } \boldsymbol{F} = \boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K} \tag{5}$$

Das homogene System (5) ist asymptotisch stabil, falls die Matrix $\boldsymbol{F}$ nur negative Eigenwerte besitzt.

Es gibt nun sehr viele Möglichkeiten, die Rückführmatrix $\boldsymbol{K}$ zu entwerfen, eine davon ist die Vorgabe bestimmter Eigenwerte[1]). Bei der sogenannten Strukturoptimierung geht man von der Minimierung eines quadratischen Gütekriteriums aus

$$I = (1/2) \int_0^T (\boldsymbol{x}^T\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{u}^T\boldsymbol{R}\boldsymbol{u})\,dt \tag{6}$$

wobei $\boldsymbol{Q}$ die $n \times n$- und $\boldsymbol{R}$ die $p \times p$-Bewertungsmatrize des Systemzustands bzw. der Stellgrösse ist[2]). Die Lösung des Optimierungsproblems kann z.B. unter Anwendung der klassischen Variationsrechnung und Formulierung der Hamiltonfunktion H erfolgen.

$$H = (1/2)\,(\boldsymbol{x}^T\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{u}^T\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}) + \boldsymbol{\psi}^T(\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}) \tag{7}$$

Damit lässt sich das Gütekriterium (6) neu formulieren als

$$I = \int_0^T (H[\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, \boldsymbol{\psi}] - \boldsymbol{\psi}^T\dot{\boldsymbol{x}})\,dt \tag{8}$$

Die Bestimmung von $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\psi}, t)$ aus $\left(\frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{u}}\right) = 0$ liefert

$$\boldsymbol{R}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\psi} = \boldsymbol{0} \tag{9}$$

oder

$$\boldsymbol{u} = -\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\psi} \tag{10}$$

Die kanonischen Gleichungen lauten

$$\left(\frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\psi}}\right) = \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \tag{11}$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{x}}\right) = -\dot{\boldsymbol{\psi}} = -\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x} - \boldsymbol{A}^T\boldsymbol{\psi} \tag{12}$$

In der Symmetrie dieser Gleichungen zeigt sich die Nähe zur klassischen Hamiltonischen Mechanik. In dieser Analogie entsprechen die Zustandsgrössen $\boldsymbol{x}$ den generalisierten Ortskoordinaten, der Vektor $\boldsymbol{\psi}$ den sogenannten kanonisch konjugierten Impulsen. Im Lagrangeformalismus bezeichnet $\boldsymbol{\psi}$ dagegen die Lagrangeschen Multiplikatoren. Der Vektor $\boldsymbol{\psi}$ kann aber auch als Empfindlichkeitsmass gedeutet werden, d.h. er gibt an, wie empfindlich das Gütefunktional (6) auf eine Verletzung der Nebenbedingungen (1) reagiert. Eine reale physikalische Bedeutung kann $\boldsymbol{\psi}$ jedoch nicht zugesprochen werden.

[1]) Die nachfolgende Ableitung ist zum prinzipiellen Verständnis des praktisch realisierten Zustandsreglers nicht erforderlich. Sie zeigt jedoch zum einen die mathematische Eleganz der Zustandsraumformulierung, zum anderen die Verwandtschaft zur klassischen Mechanik.

[2]) Eine ausführliche Herleitung des optimalen Zustandsreglers sowie eine Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Bewertungsmatrizen $\boldsymbol{Q}$ und $\boldsymbol{R}$ sowie der Lage der Pole und Nullstellen des optimalen Systems findet man z.B. bei Schwarz [7].

Mit (10) erhält man aus (11)

$$\dot{x} = Ax - BR^{-1}B^T\psi \tag{13}$$

Die Gleichungen (12) und (13) stellen also ein gekoppeltes System von Matrizendifferentialgleichungen dar. Die direkte Lösung dieses Differentialgleichungssystems ist trotz seiner Linearität schwierig, da für das adjungierte System (12) nur Endbedingungen zum Zeitpunkt $t = T$ angegeben werden können, während für das System (13) üblicherweise Anfangsbedingungen bei $t = 0$ vorliegen. Mathematisch betrachtet handelt es sich hier also um ein sogenanntes Zweipunkt-Randwertproblem. Diese Schwierigkeiten werden nun durch folgenden Kunstgriff umgangen: Mit dem linearen Ansatz

$$\psi = P(t)x \tag{14}$$

erhält man

$$\dot{\psi} = \dot{P}x + P\dot{x} \tag{15}$$

Eingesetzt in (12) ergibt sich

$$\dot{P}x + P\dot{x} = -Qx - A^TPx \tag{16}$$

Aus (13) erhält man durch Multiplikation von links mit P

$$P\dot{x} = PAx - PBR^{-1}B^TPx \tag{17}$$

Zieht man nun (17) von (16) ab, so findet man

$$\dot{P}x = -PAx - A^TPx - Qx + PBR^{-1}B^TPx \tag{18}$$

Da Gleichung (18) für beliebiges $x(t)$ gilt, muss auch gelten

$$\dot{P} = -PA - A^TP - Q + PBR^{-1}B^TP \tag{19}$$

wobei nun nur noch $P(T)$ (T = Endzeitpunkt der Integration) spezifiziert werden muss. (19) ist die sogenannte Matrix-Riccati-Gleichung, deren Lösung mit (10) und (14) das optimale Regelgesetz

$$u = -R^{-1}B^TPx = -K(t)\,x(t) \tag{20}$$

liefert. Oft beschränkt man sich auf die stationäre Lösung von (19), so dass die Rückführmatrix K konstant wird. Es existieren verschiedene digitale Rechenprogramme zur Lösung der Matrix-Riccati-Gleichung.

Damit ist die Lösung des Reglersyntheseproblems zwar formalisiert, das Ingenieurproblem der Wahl geeigneter Bewertungsmatrizen Q und R in (6) bleibt jedoch bestehen. Hier setzt die Simulation als wesentliche Stütze des Regelungstechnikers ein.

5.3 Beobachter

Das Konzept des Zustandsreglers basiert auf der vollständigen Rückführung des Zustandsvektors. Oft ist dieser jedoch nur unvollständig bekannt, und die fehlenden Zustandsgrössen müssen zumindest asymptotisch aus den bekannten Grössen rekonstruiert werden. Dazu bedient man sich eines sogenannten Beobachters oder Zustandsschätzers. Dieser bildet die Struktur des Systems nach und wird mit den Eingangsgrössen des Systems (Steuervektor) beaufschlagt. Ohne Störgrössen, bei identischen Strukturen und gleichen Anfangsbedingungen von System und Beobachter müssten die Zustandsgrössen und damit auch die Ausgangsgrössen beider Systeme für alle Zeiten identisch sein. Dies ist natürlich unrealistisch. Daher führt man auch die Ausgangsgrössen des Systems dem Beobachter zu, der daraus und aus den geschätzten Ausgangsgrössen den Schätzfehler bildet. Dieser wird mit hoher Verstärkung zurückgeführt, d.h. der Beobachter gleicht sich selbst ab. Vereinfacht gesagt ist der Beobachter ein Servosystem, das dem eigentlichen System nachfolgt. Man macht für ihn üblicherweise den Ansatz:

$$\dot{z}(t) = Dz(t) + Ey(t) + Gu(t) \tag{21}$$

wobei

z der $n \times 1$-Zustandsvektor des Beobachters, D die $n \times n$-Systemmatrix des Beobachters, E die $n \times q$- und G die $n \times p$-Steuermatrizen des Beobachters darstellt. Der Beobachter wurde von Luenberger [8] eingeführt.

Die zunächst freien Matrizen D, E und G werden nun so bestimmt, dass die Zustandsgrössen $z_i(t)$ des Beobachters Linearkombinationen der Zustandsgrössen $x_i(t)$ des Systems darstellen. Dann gilt

$$z(t) = Tx(t) \tag{22}$$

wobei T eine nichtsinguläre $n \times n$-Transformationsmatrix ist.

Wegen (22) muss nun gelten

$$\dot{z} = DTx + ECx + Gu = T\dot{x} = TAx + TBu \tag{23}$$

oder

$$TA - DT = EC \tag{24}$$

$$G = TB \tag{25}$$

Aus den Zustandsgrössen $z_i(t)$ des Beobachters kann nun mit

$$x = T^{-1}z$$

der unbekannte Zustand des Systems ermittelt werden. Da für die vier unbekannten Matrizen D, E, G und T nur zwei Gleichungen zur Verfügung stehen, ist das System unterbestimmt, d.h. der Regelungstechniker hat noch Freiheitsgrade, mit denen ein gewünschtes Beobachterverhalten festgelegt werden kann. Am einfachsten setzt man $T = I$ (I = Einheitsmatrix).

Dann gilt

$$D = A - EC \tag{26}$$

$$G = B \tag{27}$$

Um D festzulegen, muss nur noch E passend gewählt werden (z.B. zur Vorgabe bestimmter Eigenwerte). Setzt man nun (26) und (27) in (21) ein und verwendet

$$\hat{y} = Cz \tag{28}$$

so erhält man mit

$$\dot{z} = Az + Bu + E(y - \hat{y}) \tag{29}$$

eine Darstellung, bei der man klar die Fehlerrückführung erkennt.

Der Beobachter kann auch ähnlich wie der Regler mit Hilfe eines Gütekriteriums definiert werden, was ebenfalls auf eine Matrix-Riccati-Gleichung führt.

6. Praktisches Beispiel

Praktische Erfahrungen in der Anwendung von Zustandsreglern mit Beobachtern an realen Strecken wurden bereits 1974 gewonnen [9]. Das folgende Beispiel zeigt die Anwendung eines Zustandsreglers mit Beobachter in einem Grosskraftwerk mit Benson-Kessel [1; 3]. Aufgabe dieser Regelung ist, den überhitzten Dampf am Eingang zur Turbine durch Einspritzen von Wasser möglichst auf einer konstanten Temperatur zu halten (Endtemperaturregelung). Das Verfahren kann anhand der Figuren 4a bis

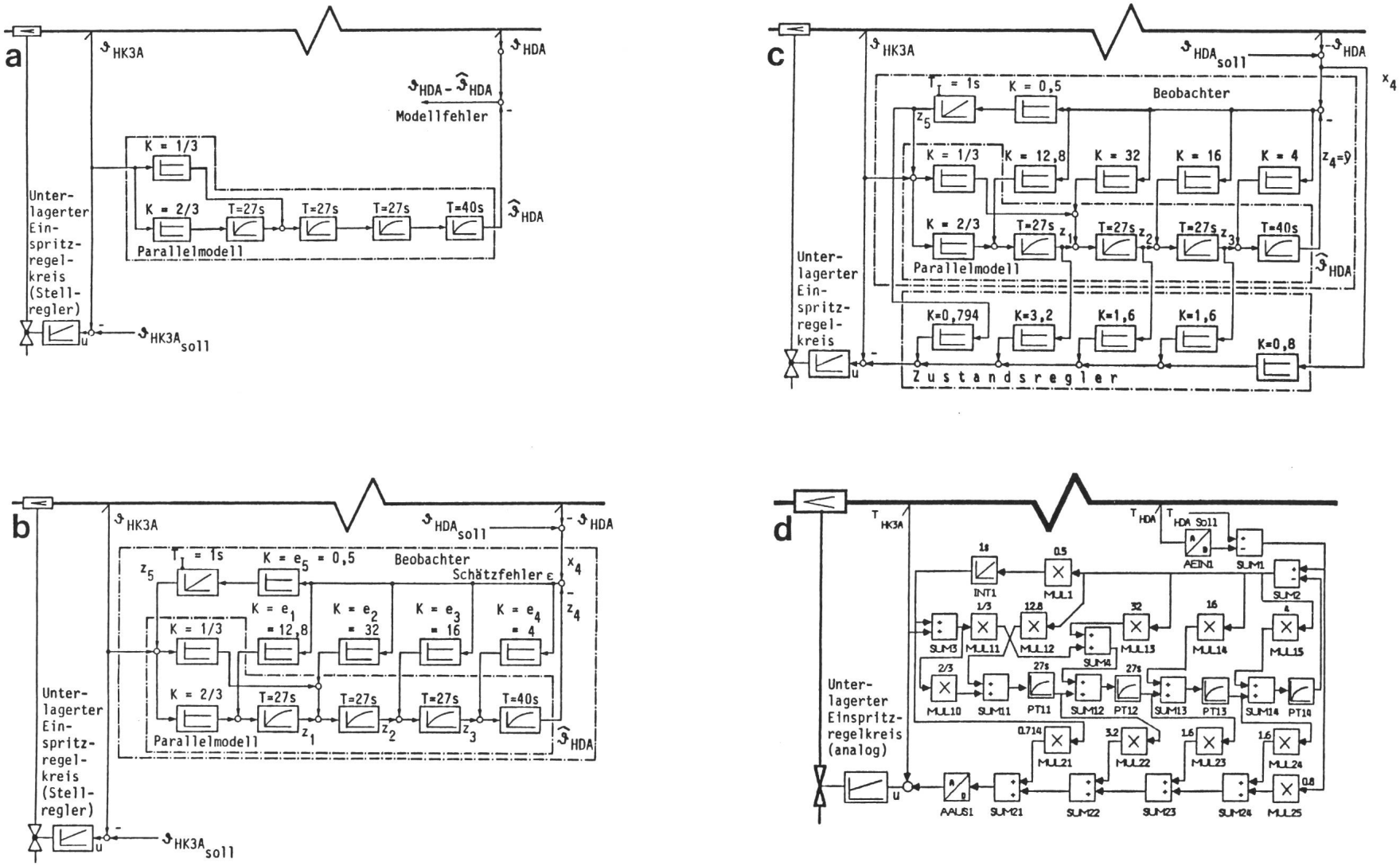

Fig. 4 Beispiel: Endtemperaturregelung einer Turbine

a Überhitzerstrecke mit Parallelmodell
ϑ_{HK3A} Hinterkühlertemperatur des Überhitzerstranges A
ϑ_{HDA} Hochdruckaustrittstemperatur des Überhitzerstranges A

b Überhitzerstrecke mit Beobachter
c Überhitzerstrecke mit Beobachter und Zustandsregler
d Praktische Realisierung des Zustandsreglers mit Beobachter

4d leicht nachvollzogen werden. Die Figur 4a zeigt das System (die Überhitzerstrecke) mit dem Parallelmodell, das aus der Sprungantwort des Systems identifiziert wurde. Durch Rückführung des Modellfehlers wird das Parallelmodell zum Beobachter. Da es sich um ein Eingrössensystem mit nur einer Eingangs- und Ausgangsgrösse handelt, werden aus den Matrizen $\boldsymbol{B}$ und $\boldsymbol{C}$ Vektoren (Kleinbuchstaben), u und y sind skalare Grössen. Ansonsten gelten die Formeln aus Abschnitt 5.3. Die ausführliche Zustandsdarstellung des Systemmodells 4. Ordnung (Eingrössensystem) lautet:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \qquad (30a)$$

$$y = [0001]\,[x_1\ x_2\ x_3\ x_4]^T = x_4 \qquad (30b)$$

oder in Kurzform

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{b}u \qquad (31a)$$

$$y = \boldsymbol{c}^T\boldsymbol{x} = x_4 \qquad (31b)$$

Ein genaues Abbild des (mathematischen) Systemmodells ist das Parallelmodell (Fig. 4a), aus dem man durch Rückführung des Schätzfehlers ε den Beobachter (Fig. 4b) gewinnt. Zur Kompensation bleibender Störungen kann dieser mit einem zusätzlichen Integrationsglied versehen werden, wodurch allerdings die Ordnung um $1(z_5)$ erhöht wird. Die Beobachtergleichungen lauten damit (erweiterte Grösse mit *):

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \end{bmatrix} \varepsilon \qquad (32a)$$

$$\hat{y} = [0\ 0\ 0\ 1\ 0]\ [z_1\, z_2\, z_3\, z_4\, z_5]^T \qquad (32b)$$

$$\dot{\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{A}^*\boldsymbol{z} + \boldsymbol{b}^*u + \boldsymbol{e}\,\varepsilon \qquad (33a)$$

$$\hat{y} = \boldsymbol{c}^{*T}\boldsymbol{z} = z_4 \qquad (33b)$$

Hier bedeutet

$$\varepsilon = y - \hat{y} = \boldsymbol{c}^T\boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}^{*T}\boldsymbol{z}$$

$$= x_4 - z_4 = \vartheta_{\mathrm{HDA}} - \hat{\vartheta}_{\mathrm{HDA}} \qquad (34)$$

den Schätzfehler. ϑ_{HDA} bezeichnet die Hochdruckaustrittstemperatur des Überhitzerstranges A des Dampferzeugers, das Zeichen ^ kennzeichnet die Schätzung.

Daher gilt

$$\dot{\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{A}^*\boldsymbol{z} + \boldsymbol{b}^*u + \boldsymbol{e}(\boldsymbol{c}^T\boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}^{*T}\boldsymbol{z})$$

$$= \boldsymbol{A}^*\boldsymbol{z} + \boldsymbol{b}^*u + \boldsymbol{e}(x_4 - z_4) \qquad (35)$$

oder

$$\dot{\boldsymbol{z}} = [\boldsymbol{A}^* - \boldsymbol{e}\,\boldsymbol{c}^{*T}]\,\boldsymbol{z} + \boldsymbol{b}^*u + \boldsymbol{e}x_4 \qquad (36)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & -e_1 & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & -e_2 & a_{25} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & -e_3 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & (a_{44}-e_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e_5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \end{bmatrix} x_4 \qquad (37)$$

$a_{11} = -(1/27)\ \mathrm{s}^{-1}$	$b_1 = -(2/3)\ a_{11}$
$a_{22} = a_{11}$	$b_2 = -(1/3)\ a_{22}$
$a_{33} = a_{11}$	$e_1 = 12{,}8$
$a_{44} = -(1/40)\ \mathrm{s}^{-1}$	$e_2 = 32$
$a_{21} = -a_{11}$	$e_3 = 16$
$a_{32} = -a_{11}$	$e_4 = 4$
$a_{43} = -a_{44}$	$e_5 = 0{,}5$

Bei stabiler Rückführung $\boldsymbol{e}$, d.h. falls die Matrix $[\boldsymbol{A} - \boldsymbol{e}\boldsymbol{c}^T]$ stabile Eigenwerte hat, klingt der Schätzfehler ε nach Verschwinden der Störungen und unter Voraussetzung von Messfehlerfreiheit asymptotisch ab. Bei hoher Verstärkung $\boldsymbol{e}$ kann der tatsächliche Schätzfehler sehr gering gehalten werden, so dass man annehmen kann, dass auch sämtliche Zustandsgrössen des Beobachters recht genau mit den Zustandsgrössen des Systems übereinstimmen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass das Systemmodell (30a), auf dem der Beobachterentwurf aufbaut, mit dem tatsächlichen physikalischen System genügend genau übereinstimmt. Dies kann z.B. durch Versuche nachgewiesen werden (experimentelle Validierung des Modells).

Der Vektor $\boldsymbol{e}$ wird nun z.B. so gewählt, dass die Eigenwerte von $\boldsymbol{D} = \boldsymbol{A} - \boldsymbol{e}\boldsymbol{c}^T$ etwas weiter links der imaginären Achse liegen als die von $\boldsymbol{A}$, damit das Beobachtersystem dynamisch schneller als das Ausgangssystem ist. Die Figur 4b zeigt den vollständigen Beobachter.

Nun werden die Zustandsgrössen nach der Gleichung $u = -\boldsymbol{k}^T\boldsymbol{x}$ bzw. $u = -\boldsymbol{k}^T\boldsymbol{z}'$ auf den Systemeingang zurückgeführt (Fig. 4c), wobei der Strich ′ besagt, dass die nicht direkt gemessene Ausgangsgrösse z_4 durch x_4 ersetzt wurde. Der Integrator in der Rückführung dient der Kompensation unbekannter Störungen des Systems. Er ersetzt damit den Integralanteil des Reglers.

Die praktische Realisierung des Zustandsreglers mit Beobachter erfolgt nach Bild 4d. Jedes Element stellt einen Funktionsbaustein dar. Der direkte Vergleich eines Zustandsreglers mit einer konventionellen PID/PI-Kaskade erfolgte an einem Kraftwerk mit zwei parallelen, denselben Störungen unterliegenden Überhitzersträngen. Die Figur 5 zeigt deutlich die Überlegenheit des Zustandsreglers.

Die praktische Arbeit auf der Anlage erstreckte sich auf folgende Phasen:

1. Aufnehmen der Sprungantwort der Strecke,
2. Ermittlung der Struktur und der Parameter des Modells,
3. Voreinstellung des Beobachters am simulierten Modell,
4. Voreinstellung des Zustandsreglers mit simuliertem Modell und Beobachter,
5. Feinabstimmung von Modell, Beobachter und Zustandsregler auf der Anlage. Diese Phase konnte innerhalb von nur zwei Tagen abgeschlossen werden.

Die durchgeführten Versuche haben folgende Resultate erbracht:

- Trotz vorheriger sorgfältiger Optimierung des konventionellen Reglers verringerte der Zustandsregler die maximale Regelabweichung um den Faktor zwei bis drei.
- Aus der Sprungantwort liess sich leicht ein hinreichend genaues Modell der Überhitzerstrecke ermitteln.

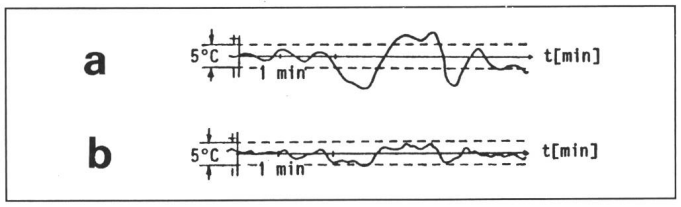

Fig. 5 Frischdampf-Temperaturregelung an parallelen Endüberhitzersträngen

a Strang A: PID/PI-Kaskade
b Strang B: Zustandsregelung mit Beobachter

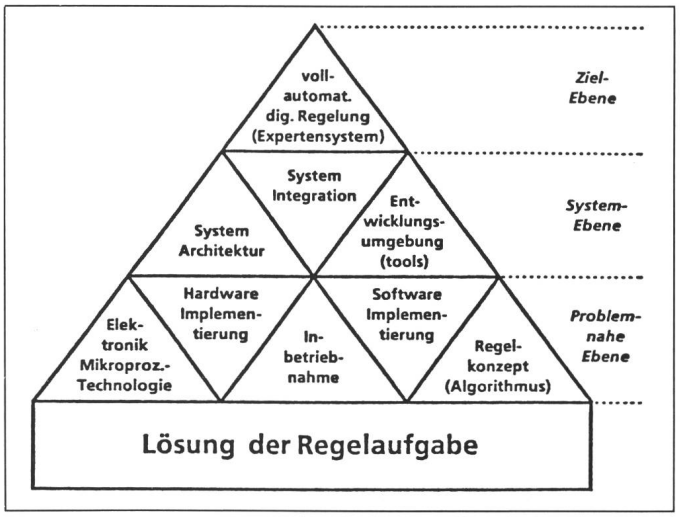

Fig. 6
Die Pyramide des Regelungstechnikers

- Durch wenige Einstellversuche konnten ohne grossen mathematischen Aufwand vernünftige Beobachterparameter gewonnen werden [1].
- Der Zustandsregler kann leicht von Hand nachgetrimmt werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Flexibilität moderner Prozessleitsysteme erleichtert erheblich die Implementierung moderner Regelkonzepte, ja sie macht sie in vielen Fällen überhaupt erst praktikabel. Die Änderung der Reglerstruktur erforderte früher den Austausch von Baugruppen in den Regelschränken, heute sind dazu nur wenige Tasteneingaben erforderlich. Dabei kann das Risiko bei On-line-Strukturierung und -Parametrierung durch Vorschalten von Begrenzern minimal gehalten werden. Nach erfolgreichem Test werden diese dann einfach wieder gelöscht.

Die neuen Verfahren der Regelungstechnik werden sich in Zukunft dank ihrer prinzipiellen Überlegenheit mehr und mehr durchsetzen, allerdings nur dort, wo auch ein ökonomischer Anreiz gegeben ist. Der Regelungstechniker wird daher in Zukunft sich verstärkt auf die praktische Umsetzung der theoretischen Erkenntnisse konzentrieren müssen. Das Bündel der Aufgaben, die er dazu zu bewältigen hat, lässt sich in der «Pyramide des Regelungstechnikers» (Fig. 6) darstellen. Die klassische Disziplin der Regelungstechnik konzentriert sich heute vor allem auf die rechte untere Ecke der Pyramide, doch die umliegenden Dreiecke gewinnen mehr und mehr an Bedeutung. Insbesondere die Entwicklung der Technologie (z.B. intelligente Sensoren) wird einen entscheidenden Einfluss auf die praktische Lösung der Regelaufgabe nehmen [10]. Bis zur effektiven vollautomatischen Regelung unter Einsatz eines Expertensystems ist allerdings noch ein weiter Weg zurückzulegen.

Literatur

[1] *G. Lausterer:* Optimierung der Kraftwerksregelung durch gezielten Einsatz mathematischer Modelle. Regelungstechnische Praxis 25(1983)11, S. 451...458, und Nr. 12, S. 514...519.

[2] *E. Schneider:* Teleperm M heute – ein aktueller Überblick. Regelungstechnische Praxis 25(1983)8, S. 329...335.

[3] *G. Lausterer* und *G. Kallina:* Implementierung verbesserter Regelkonzepte für Dampferzeuger mit einem dezentralen Prozessleitsystem. Jahrbuch der Dampferzeugung 5(1985)2, S. 796...813.

[4] *B. Ochner, C. Schlemmer* und *W. Thiel:* Handhabung und Anwendung von Funktionsbausteinen beim Automatisierungssystem AS 220 E. Siemens Energietechnik 6(1984)1, S. 37...40.

[5] *M. Koolman* und *W. Kratz:* Berechnung von Zuverlässigkeitskenngrössen eines Automatisierungssystems. Regelungstechnische Praxis 26(1984)6, S. 252...257.

[6] *O. Föllinger* und *D. Franke:* Einführung in die Zustandsbeschreibung dynamischer Systeme. München/Wien, Oldenbourg-Verlag, 1982.

[7] *H. Schwarz:* Optimale Regelung linearer Systeme. Mannheim/Wien/Zürich, Bibliographisches Institut, 1976.

[8] *D.G. Luenberger:* Observing the state of a linear system. IEEE Trans. Military Electronics 8(1964)2, S. 74...80.

[9] *H. Unbehauen* u.a.: Anwendung von DDC-Algorithmen zur Regelung eines Wärmeaustauschers. Regelungstechnik 22(1974)8, S. 226...235.

[10] *W. Böhme:* Entwicklungstrends der Automatisierungstechnik. Regelungstechnische Praxis 25(1983)10, S. 400...407.