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: 78 (1987)

Heft: 7

Artikel: Moderne Regelungstechnik in der Chemie

Autor: Bonvin, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903847

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: 17.07.2025

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

Moderne Regelungstechnik in der Chemie

D. Bonvin

Dieser Beitrag weist auf die regelungstechnischen Eigenschaften von chemischen Produktionsanlagen hin und stellt einige moderne Regelmethoden vor, die sich für diese Anwendung gut eignen. Es werden die Totzeitkompensation, die Entkopplungsregelung sowie die Schätzung von unmessbaren Grössen anhand von Beispielen erläutert.

Cet article traite d'abord des propriétés dynamiques propres aux installations de production chimique et décrit quelques méthodes modernes de réglage. Le réglage avec compensation de temps mort, le réglage non-interactif par découplage, ainsi que l'estimation de grandeurs non-mesurables, sont introduits et analysés à travers des exemples.

Adresse des Autors
Dr. *D. Bonvin*, Technisch-Chemisches Laboratorium, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

1. Einführung

Die Regelungstechnik hat in den letzten 25 Jahren beachtliche Fortschritte gemacht, die auf ganz neuen Regelkonzepten und -methoden (Zustandsraumdarstellung, optimale Regelung und Zustandsschätzung, Maximum-Prinzip von Pontryagin usw.) beruhen. Ohne die Entwicklung des Digitalrechners wären aber diese Regelmethoden kaum zur Anwendung gekommen. Ein Überblick der modernen Regelungsmethoden sowie Beispiele ihrer praktischen Anwendung sind in [1; 2; 3] zu finden. Auch sind bereits viele Bücher geschrieben worden, welche diese modernen Regelmethoden sehr detailliert beschreiben [4; ...; 7].

Unter modernen Regelungsmethoden werden in diesem Aufsatz Methoden verstanden, welche die Möglichkeiten der klassischen Regelungstechnik (des PID-Reglers in seiner kontinuierlichen Form mit je einem Ein- und Ausgang) übertreffen. Die modernen Regelmethoden zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

1. Sie benützen oft explizit ein Modell der Regelstrecke.
2. Sie können Mehrgrössensysteme, die entweder als Zustandsraum oder als Übertragungsmatrix dargestellt sind, behandeln.
3. Sie werden als diskrete Systeme auf dem Digitalrechner implementiert.

Es ist nicht Ziel dieses Beitrages, einen vollständigen Überblick über die modernen Regelmethoden zu bieten; er soll vielmehr ihre Anwendungen in der chemischen Industrie illustrieren. Im folgenden werden zuerst gewisse Merkmale und Eigenschaften von chemischen Prozessen sowie die Regelziele und die Aufgabe der Modellbildung erläutert. Ferner wird die Anwendung von bestimmten Schätz- und Regelmethoden in der chemischen Industrie beschrieben.

2. Regelungstechnische Eigenschaften von chemischen Prozessen

Eine chemische Anlage besteht normalerweise aus mehreren Produktionseinheiten, die aus energetischen und wirtschaftlichen Gründen stark gekoppelt sein können (Wärmeintegration, Verzicht auf Zwischenbehälter usw.). Den Regelaspekten muss daher schon beim Entwurf der Anlage grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden. Das Regelsystem muss in der Lage sein, einen optimalen Betrieb zu gewährleisten, auch wenn Störungen das System beeinflussen oder neue Sollwerte (z. B. wegen neuer Produktspezifikationen) eingegeben werden.

Die Regelung einer Einzeleinheit führt selten zur Optimierung der Gesamtanlage. Das Zusammenspiel von vielen Elementen gibt einer Produktionsanlage den Charakter eines grossen dynamischen Systems. Dieses kann in Teilsysteme zerlegt werden, die unter der Aufsicht eines Koordinators einfacher zu regeln oder zu optimieren sind. Ferner können bei chemischen Prozessen gewisse toxikologische oder sicherheitstechnische Aspekte nicht vernachlässigt werden. Die potentielle Energie in unreagierten Edukten (Material, das noch nicht reagiert hat), kann sehr gross sein und erfordert strenge Begrenzungen für wichtige Zustandsvariabeln wie Temperatur, Druck oder Zusammensetzung. Da aber wichtige Zustandsgrössen oft nicht on-line messbar sind, wird die Reaktionsführung erschwert. Es kann versucht werden, mit Hilfe von Zustandsschätzmethoden diese Grössen on-line zu rekonstruieren.

Die Produktionseinheiten arbeiten entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich (batch). Bei der Regelung chemischer Prozesse ist zu beachten, dass sich diese durch problematische

Eigenschaften auszeichnen, wie etwa:
- starke Nichtlinearitäten in den thermodynamischen und kinetischen Beziehungen,
- reine Totzeiten (oft eine Folge von Material- oder Energietransport durch das System),
- unbekannte Regelstruktur (Auswahl der Mess- und Stellgrössen nicht offensichtlich),
- Struktur eines verteilten Systems, welches durch partielle Differentialgleichungen beschrieben wird,
- Vorhandensein von Instabilitäten, Oszillationen oder Grenzzyklen,
- Vorhandensein von positiven Nullstellen,
- grosse Modellunsicherheit oder -fehler.

Es gibt Prozesse, bei welchen fast alle oben erwähnten Eigenschaften auftreten. Im Vergleich zu elektrischen oder mechanischen Systemen sind anderseits die Zeitkonstanten in chemischen Systemen oft grösser (Sekunden/Minuten-Bereich im Labor, Minuten/Stunden-Bereich in der Produktion). Die Anforderungen an das Rechnersystem bezüglich Abtastzeit und Rechnergeschwindigkeit sind dementsprechend geringer.

3. Regelziele in der chemischen Industrie

Regelungskonzepte und -ziele sind in der Spezialitätenchemie anders als z. B. in der petrochemischen Industrie. Den Regelungszielen muss deshalb grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden. Stellt die Regelaufgabe die Stabilisierung eines instabilen Prozesses dar? Oder soll der Sollwert gewisser Variablen möglichst genau eingehalten werden? Muss die Anlage online optimiert werden? Oder ist das Hauptziel einfach die Prozessüberwachung mit entsprechender Protokollierung und Alarmmeldung? Ohne eine genaue Beantwortung dieser Fragen lässt sich kein vernünftiges Regelsystem entwickeln. Dazu kommt noch der übliche Kompromiss zwischen minimalen Entwicklungskosten und maximaler (optimaler) Regelung.

4. Dynamische Prozessmodelle

Ein Regler ist ein dynamischer Kompensator, der die Dynamik des geschlossenen Regelkreises gestaltet. Deshalb ist eine Analyse der Prozessdynamik (oft in der Form einer Modellierung) unerlässlich. Prozessmodelle können in drei Haupttypen klassifiziert werden: weisse, graue und schwarze Modelle.

Die detaillierten, *mechanistischen Modelle* (auch weisse Modelle genannt, weil sie eine vollständige Transparenz ihrer Struktur erlauben) beschreiben mathematisch die Hauptvorgänge im Prozess. Ihre Herleitung erfordert deshalb eine gute Kenntnis der physikalischen Prozessmerkmale. Die Parameter haben eine physikalische Bedeutung, und deren Anzahl ist relativ klein. Die Modellordnung und der Zeitaufwand für die Modellbildung können aber gross werden. Mechanistische Modelle haben den grossen Vorteil, dass sie normalerweise die physikalische Wirklichkeit über weite Bereiche richtig beschreiben und somit eine Extrapolation in andere Arbeitsbereiche erlauben.

Wenn es schwierig oder unerwünscht ist, den Prozess mechanistisch zu modellieren, aber möglich ist, an der Anlage Messungen vorzunehmen, so kann eine *Eingang/Ausgang-Prozessdarstellung* (schwarzes Modell) gewonnen werden. Die Modellstruktur wird vorgegeben; die Parameter werden dann anhand von Messdaten entweder off-line oder on-line identifiziert. Diese einfache Methode erfordert keine grosse Einsicht in den Prozess. Dies bedeutet demzufolge, dass das Modell nur im Bereich, in welchem es identifiziert wurde, Gültigkeit hat.

Die Tendenz, mehr A-priori-Information in die Modellstruktur einzubauen, führt zu den sogenannten *grauen Modellen*. Die Vorgabe einer «optimalen» Modellstruktur kann, vor allem bei komplexen Systemen, die Anzahl der zu identifizierenden Parameter stark reduzieren.

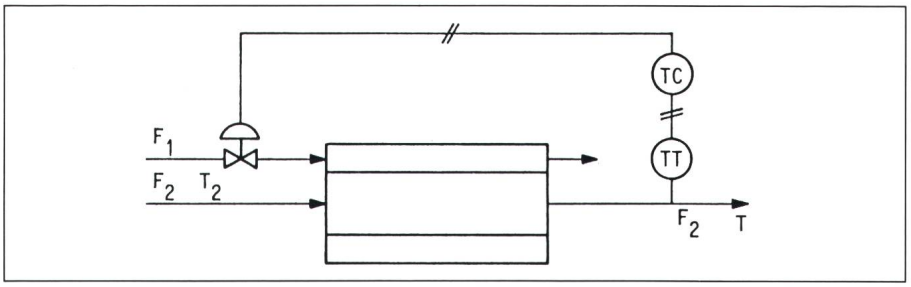
Die Wahl des für die Anwendung besten Modelles ist nicht immer offensichtlich. Zur Regelung eines noch nicht stehenden Prozesses muss zwangsmässig ein mechanistisches Modell entworfen werden. Wenn aber an der Anlage gemessen werden kann, genügt es oft, die Parameter eines vereinfachten mechanistischen oder eines schwarzen Modelles zu identifizieren.

5. Schätz- und Regelalgorithmen

Bis vor kurzem wurden die meisten Regelkreise in der chemischen Industrie mit analogen PID-Regelalgorithmen realisiert, welche kein explizites Prozessmodell benötigen, relativ robust sind und für schätzungsweise 80 bis 90% der Fälle genügen. Aus Kostengründen, aber auch zur Vereinfachung der Prozessüberwachung, wurden *diskrete* Approximationen von analogen PID-Elementen angeboten. Mit den Fortschritten der Digitaltechnik sind auch neue, modellgestützte diskrete Regelsysteme in der chemischen Produktion zur Anwendung gekommen. Diese Systeme bieten für komplexe oder schwer regelbare Prozesse viele Vorteile an: Behandlung von Totzeiten, von Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen, von Begrenzungen der Stell- oder Regelgrössen, von Nichtlinearitäten oder von zeitvarianten Mehrgrössensystemen. Backup-Probleme stellen immer noch den Hauptnachteil dar. Im folgenden werden zwei einfache modellgestützte Regelalgorithmen und ein Schätzungs- und Optimierungsproblem näher erläutert.

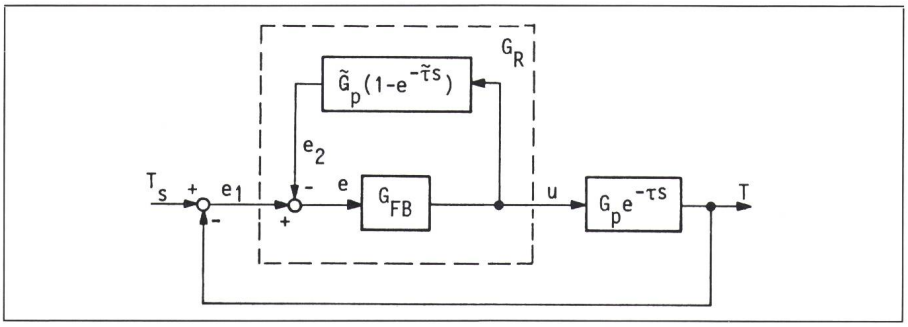
5.1 Beispiel 1: Totzeitkompensation

Die Austrittstemperatur T des Materialflusses F_2 wird über den Durchfluss F_1 des Heiz- bzw. Kühlmediums geregelt (Fig. 1). In dieser Gleichstromkon-



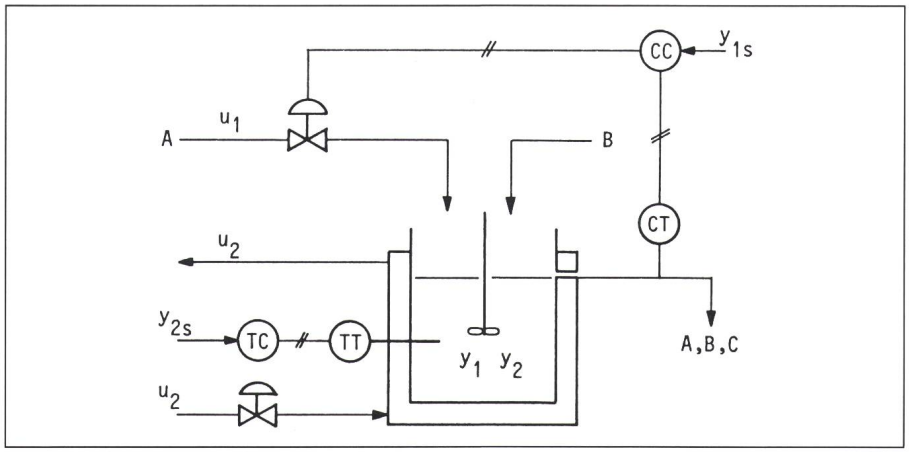
Figur 1 Regelung eines Gleichstromwärmetauschers

F_1 Durchfluss des Heiz-/Kühlmittelstromes
F_2 Durchfluss des Materialstromes
T_2 Eintrittstemperatur des Materialstromes
T Ausgangstemperatur des Materialstromes
TC Temperaturregler
TT Temperaturfühler



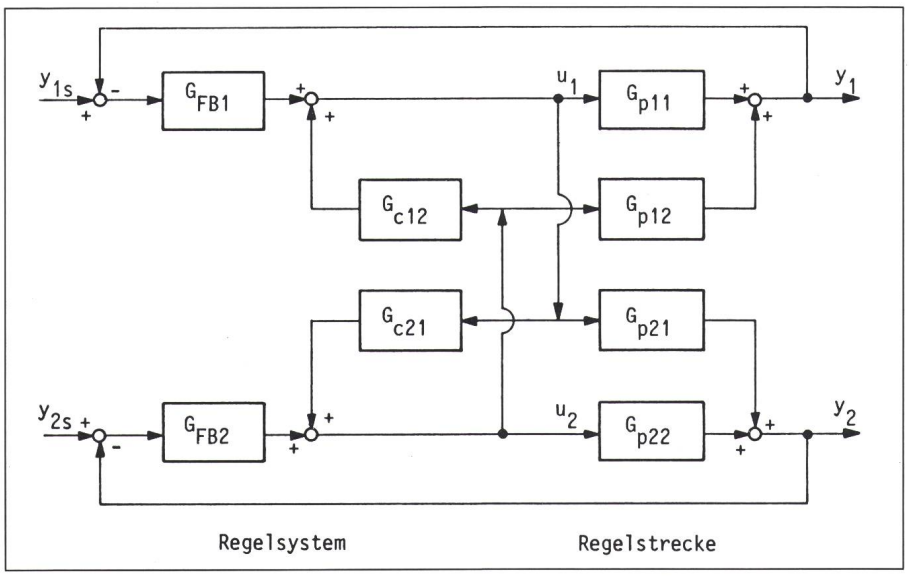
Figur 2 Signalflussdiagramm einer Totzeitkompensation für die Regelung des Gleichstromwärmetauschers

G_{FB} gewöhnlicher Feedback-Regler
G_R Regler mit Totzeitkompensation
$G_p e^{-\tau s}$ Regelstrecke mit Totzeit
$\tilde{G}_p e^{-\tilde{\tau} s}$ Modell der Regelstrecke



Figur 3 Konzentrations- und Temperaturregelung eines ideal durchmischten Rührkessels

y_1 Konzentration von Produkt C im Reaktor
y_2 Reaktortemperatur
u_1 Strom des Eduktes A
u_2 Heiz-/Kühlmitteldurchfluss
y_{1s} Konzentrationssollwert
y_{2s} Temperatursollwert
TT Temperaturfühler
TC Temperaturregler
CT Konzentrationsfühler
CC Konzentrationsregler



Figur 4 Signalflussdiagramm einer Entkopplungsregelung für den Rührkessel

G_{pij} Übertragungsfunktion der Regelstrecke zwischen dem Eingang j und dem Ausgang i
G_{cij} Übertragungsfunktion des Kreuzreglers zwischen dem Eingang j und dem Eingang i
G_{FBi} Übertragungsfunktion des Feedback-Reglers in der i-ten Regelschleife

figuration weist die Regelgrösse T eine beträchtliche Totzeit gegenüber Veränderungen des Durchflusses F_1 auf. Dadurch wird die Regelung stark erschwert. Ein konventioneller PID-Regler hat wegen der hohen Phasenverschiebung im Prozess grosse Mühe: Entweder sind hohe Schwingungen und sogar Instabilitäten zu erwarten, oder das geregelte System wirkt nach Reduktion der Reglerverstärkung sehr träg. Falls die Totzeit bekannt ist, kann die Regelabweichung korrigiert (vorhergesagt) werden, damit die Stellgrösse von der Totzeit nicht beeinflusst wird. Der Feedback-Regler G_{FB} kann anschliessend für den Prozess ohne Totzeit entworfen werden. Ein Prozessmodell, auch in der einfachen Form einer Sprungantwort, sowie ein Prozessrechner sind für die Implementierung der Totzeitkompensation notwendig. Die Figur 2 zeigt schematisch das Signalflussdiagramm einer solchen Kompensation: wenn das Modell richtig ist ($\tilde{G}_p = G_p$ und $\tilde{\tau} = \tau$), spürt die Regelabweichung e die Totzeit nicht.

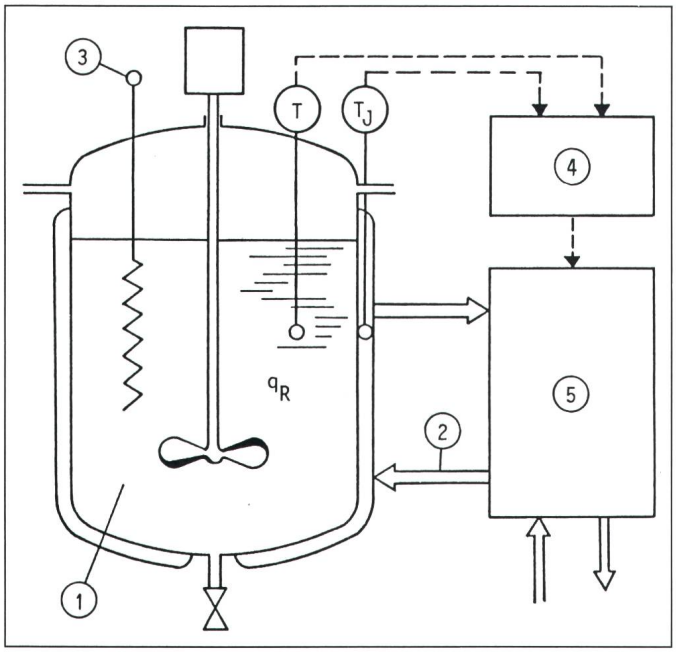
5.2 Beispiel 2: Entkopplungsregelung

In einem kontinuierlich betriebenen, ideal durchmischten Rührkessel reagiert Edukt A mit Edukt B zur Bildung von Produkt C. Die durch die chemische Reaktion erzeugte Wärmetönung wird mit einem durch den Reaktormantel fliessenden Heiz- bzw. Kühlmedium ausgetauscht. Die übliche Regelaufgabe, bei welcher die Reaktorkonzentration y_1 und die Reaktortemperatur y_2 durch Veränderung des Eduktstroms u_1 bzw. Kühlmitteldurchflusses u_2 geregelt wird, ist in Figur 3 dargestellt. Diese Konfiguration ist aber ungenügend, falls die zwei Regelkreise aufeinander grosse Wechselwirkungen ausüben. Wie in Figur 4 zu sehen ist, wirkt sich der Kühlmitteldurchfluss u_2 nicht nur auf die Temperatur y_2, sondern auch auf die Konzentration y_1 aus. Ähnliches gilt für den Eduktdurchfluss u_1. Die Effekte der Kreuzwechselwirkungen G_{p12} und G_{p21} können aber durch die zwei zusätzlichen Kreuzregler G_{c12} und G_{c21} auskompensiert werden. Die Bedingungen dafür lauten:

$$G_{p12} + G_{c12}\, G_{p11} = 0 \qquad (1)$$

$$G_{p21} + G_{c21}\, G_{p22} = 0 \qquad (2)$$

Die Figur 4 zeigt eine vollständige dynamische Entkopplung, das heisst,



Figur 5
Batchreaktor mit Heiz-/Kühlsystem
1 Reaktor
2 Heiz-/Kühlmedium
3 elektrische Kalibrationsheizung
4 Regelsystem
5 Heiz-/Kühlsystem

mit der genauen Kenntnis der Prozessdynamik und -wechselwirkungen sind die zwei Regelkreise effektiv entkoppelt. Für die Implementierung kann ein Prozessrechner eingesetzt werden; es ist aber auch möglich, die Kreuzregler durch analoge Lead/Lag-Elemente zu approximieren. Als Vereinfachung der dynamischen Entkopplung wären hier auch die sogenannte Ein-Weg-Entkopplung und die statische Entkopplung zu erwähnen.

5.3 Beispiel 3: Zustandsschätzung

Die isotherme Durchführung einer exothermen Reaktion in einem Batchreaktor kann grosse Anforderungen an das Regelsystem stellen. Die Temperatur im Reaktor wird durch Anpassung der Temperatur eines durch den Mantel zirkulierenden Heiz- bzw. Kühlmediums geregelt (Fig. 5). Das System besitzt keinen festen stationären Zustand (Betriebspunkt). Die momentanen Regeleigenschaften der Strecke (Verstärkung k, Zeitkonstante τ) hängen, wie man zeigen kann, stark von der Wärmeproduktionsrate q_r ab:

$$k = \frac{1}{1 - \alpha q_r} \tag{3}$$

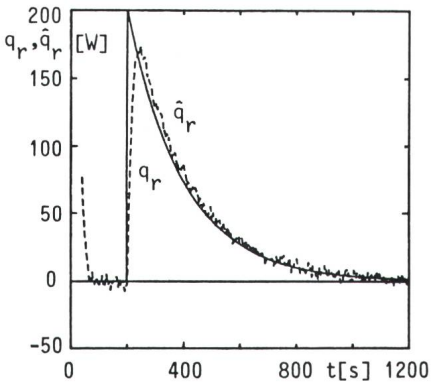
$$\tau = \frac{\beta}{1 - \alpha q_r} \tag{4}$$

wobei α und β Konstanten sind.

Das Reaktionssystem wird instabil, wenn die Wärmeproduktion gross wird ($\alpha q_r > 1$). Da q_r sich während der Reaktion stark verändert (Fig. 7), muss die Reglerverstärkung der Wärmeproduktion angepasst werden; nur so kann ein gutes Regelverhalten eingehalten werden. Dafür eignen sich adaptive Regler, entweder mit gesteuerter Adaption (parameter scheduling) oder mit kontinuierlicher Streckenidentifikation und Reglerparameteradaption (z. B. Self-tuning-Regler).

Die On-line-Schätzung der Wärmeproduktion erlaubt eine kontinuierliche Identifikation der Regelstrecke gemäss den Gleichungen 3 und 4, was für eine adaptive Regelung des Prozesses von grosser Bedeutung ist. Diese Schätzung von q_r trägt auch aus anderen Gründen viel zur sicheren Prozessführung bei. So kann z. B. der Einfluss der Wärmeproduktion im Reaktor, welche eine Art von Systemstörung darstellt, mit einer Störgrössenaufschaltung auskompensiert werden.

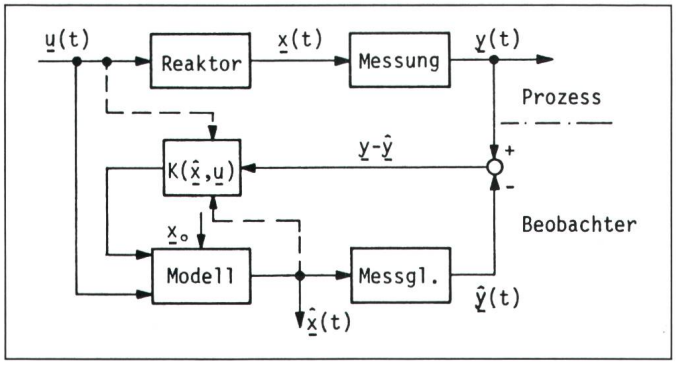
Die Schätzung von q_r, die ein genaues dynamisches Modell des Reaktors sowie gute Temperaturmessungen bedingt, kann mit einer Zustandsschätzung (Kalman-Filter, Luenberger-Beobachter) realisiert werden. Das Signalflussdiagramm eines Beobachters ist in Figur 6 gezeigt. Der Beobachter benützt ein Modell des Prozesses, die Information aus dem Messvektor $\boldsymbol{y}$ und eine Rückführmatrix $\boldsymbol{K}$, um dem Einfluss von falschen Anfangsbedingungen, von Modellfehlern und von Störungen entgegenzuwirken.



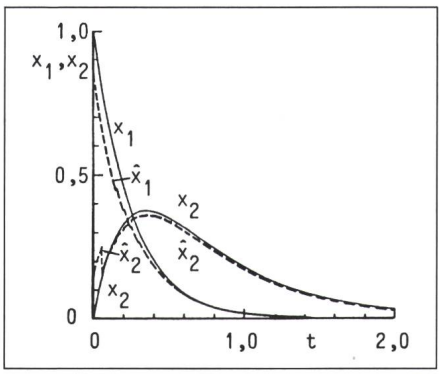
Figur 7 Schätzung der Wärmeproduktionsrate für eine Reaktion erster Ordnung
——— simulierte, wahre Wärmeproduktionsrate q_r
------- geschätzte Wärmeproduktionsrate $\hat{q}_r$

Für die Schätzung der Wärmeproduktionsrate wird ein approximatives Störmodell postuliert und q_r als erweiterter Zustand betrachtet. Die Figur 7 zeigt einen Vergleich zwischen q_r und $\hat{q}_r$, der wahren und der geschätzten Wärmeproduktionsrate für eine simulierte, beim Zeitpunkt 200 s beginnende Reaktion erster Ordnung in einem Bench-scale-Batchreaktor.

Interessanter für die Prozessführung und -optimierung wird es noch, wenn wichtige Zustandsgrössen wie Kon-



Figur 6
Signalflussdiagramm eines Reaktors mit nichtlinearem Beobachter
Die Matrix $\boldsymbol{K}(\hat{x}, u)$ verändert sich in Funktion von $\boldsymbol{u}(t)$ und $\hat{x}(t)$ (gestrichelte Linien).



Figur 8 Schätzung der Konzentrationen bei Folgenreaktionen (A–B–C) in einem kontinuierlichen Reaktor

x_1 Konzentration von A
x_2 Konzentration von B
$\hat{x}_1, \hat{x}_2$ geschätzte Werte

zentrationen, die oft nicht on-line messbar sind, anhand von Temperaturmessungen geschätzt werden können. Dafür sind gute kinetische Modelle nötig. Da aber die Reaktionskinetik von komplexen Reaktionssystemen oft nur ungenügend genau bekannt ist, kommen sogenannte graue Modelle zur Anwendung. Diese werden durch eine vereinfachte Struktur und wenige Parameter, die on-line zusammen mit den Zuständen identifiziert werden, charakterisiert. Dazu erweisen sich nichtlineare Filter, wie z. B. das erweiterte Kalman-Filter, als geeignete Werkzeuge. Die Figur 8 zeigt einen Vergleich zwischen den «wahren» und rekonstruierten Konzentrationen aus einem Reaktionssystem bestehend aus zwei Folgenreaktionen ($A \rightarrow B \rightarrow C$).

Dieses Beispiel deutet an, dass die Systemtheorie nicht nur neue, verbesserte Regelalgorithmen, sondern auch wertvolle Schätzmethoden für die chemische Entwicklung und Produktion anbietet.

6. Ausblick

Der zunehmende Einsatz von Prozessrechnern in der chemischen Produktion ermöglicht nicht nur eine bessere Protokollierung und Prozessüberwachung, sondern auch die Implementierung flexibler, modellgestützter Regelalgorithmen. Die Prozessmodelle, welche entweder aus Messdaten identifiziert oder aus physikalischen Gesetzen hergeleitet werden, erlauben u. a. die Entwicklung hochwertiger, strukturoptimaler Regelalgorithmen, die Vorhersage von Prozessvariablen, die Schätzung nicht direkt messbarer Grössen, die Filterung stark verrauschter Signale und die Implementierung adaptiver Regelalgorithmen.

Bei der Anwendung in der chemischen Industrie sind aber diesen neuen Möglichkeiten auch Grenzen gesetzt:
- Die Entwicklung von Mehrgrössenregelungen kann zeitaufwendig sein.
- Gewisse Regelmethoden sind relativ empfindlich auf Modellfehler.
- Die neuen, softwareorientierten Methoden sind für die Operatoren noch zu undurchsichtig.
- Den Back-up-Problemen wurde noch zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

Es wird aber die Zeit kommen, wo die Vorteile die Nachteile überwiegen. Eine Anfrage bei der chemischen Industrie Japans hat im Jahre 1981 das folgende Fazit geliefert: 63% der befragten Firmen haben ein grosses, 28% ein kleines und 9% kein Interesse an modernen Regelmethoden. Bei diesen Firmen waren insgesamt 70% kontinuierliche Prozesse und 30% Batch-Prozesse zu verzeichnen. Nur 20 bis 30% der Regelprobleme waren schwierig, und bei 83% dieser Fälle konnte eine Mehrgrössenregelung die Regelschwierigkeiten aufheben. Als das Hauptproblem wurde die Wechselwirkung zwischen Regelgrössen erwähnt.

Bei der Auswahl eines Regelalgorithmus müssen die technischen und wirtschaftlichen Endziele betrachtet werden. Die Kunst der Ingenieure besteht darin, nach verschiedenen Gesichtspunkten einen geeigneten Kompromiss zu finden.

Literatur

[1] *M. Mansour:* Einige Methoden der modernen Regelungstechnik. Bull. SEV/VSE 76(1985)11, S. 606...611.
[2] *T. Stutz:* Praktischer Nutzen neuer Regeltheorien. Bull. SEV/VSE 76(1985)11, S. 612...616.
[3] *G.K. Lausterer:* Moderne Regelungstechnik in der Praxis. Bull. SEV/VSE 76(1985)11, S. 617...623.
[4] *H. Unbehauen:* Regelungstechnik. 3 Bände. Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg-Verlag, 1982/1985.
[5] *O. Föllinger:* Lineare Abtastsysteme. 2. Auflage. München, Verlag R. Oldenbourg, 1982.
[6] *O. Föllinger:* Regelungstechnik. 5. Auflage. Heidelberg, Dr.-A.-Hüthig-Verlag, 1985.
[7] *R. Isermann:* Digitale Regelsysteme. Berlin u.a., Springer-Verlag, 1977.