

DIGITALE ADAPTIVE REGELUNG

- Eine Einführung mit Beispielen -

R. Schumann

Technische Hochschule Darmstadt
Institut für Regelungstechnik

Juli 1980

Kurzfassung

Es wird gezeigt, wie sich digitale parameteradaptive Regler durch geeignete Kombination von rekursiven Parameterschätzverfahren mit Reglersyntheseverfahren realisieren lassen. Das grundsätzliche Verhalten parameteradaptiver Regelkreise wird an zwei Beispielen erläutert. Versuchsergebnisse für die parameteradaptive Regelung eines Lufterhitzers bilden den Abschluß.

1. Einführung

Die rasch fortschreitende Entwicklung in der Halbleiter- und Computertechnologie hat dazu geführt, daß dem Regelungstechniker immer mehr Prozessrechner in Form von preiswerten Mini- oder Mikrorechnern zur Verfügung stehen. Dies führte zur Entwicklung einer digitalen Regelungstechnik, deren charakteristische Eigenschaften unter anderem sind:

- . Die Abtastung der Prozesssignale zu diskreten Zeitpunkten, die durch eine feste Abtastzeit T_0 voneinander getrennt sind,
- . die Möglichkeit der Speicherung auch vergangener Prozesssignalwerte im Prozessrechner,
- . die Verwendung von zeitdiskreten Prozessmodellen, z.B. in Form von Differenzengleichungen.

Der Einsatz von Prozessrechnern ermöglicht nun neben dem Ersatz analoger Regelungen auch die Bewältigung völlig neuer Aufgaben wie z.B.:

- . Die Prozessidentifikation: Aus den gemessenen Prozesssignalen wird ein zeitdiskretes Prozessmodell bestimmt,
- . die rechnergestützte Reglersynthese: Auf der Grundlage eines z.B. durch Prozessidentifikation ermittelten Prozessmodells werden verschiedene Regler entworfen und durch Simulation des geschlossenen Regelkreises miteinander verglichen,
- . die selbsteinstellende bzw. adaptive Regelung: Die in den gemessenen Prozesssignalen enthaltene Information wird dazu benutzt, mit Hilfe eines Adaptionsalgorithmus einen Regler jeweils zwischen zwei Abtastzeitpunkten neu an den Prozess anzupassen.

Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit Entwurf und grundsätzlichem Verhalten eines Typs von digitalen adaptiven Regelungen, der parameteradaptiven Regelung. Dazu wird zunächst der Aufbau des parameteradaptiven Regelkreises erläutert und die Funktion seiner wesentlichen Bestandteile beschrieben. Anhand eines analog simulierten Testprozesses wird dann das grundsätzliche Verhalten eines parameteradaptiven Regelkreises gezeigt. Versuchsergebnisse für die parameteradaptive Regelung eines Lufterhitzers bilden den Abschluß.

2. Digitale parameteradaptive Regelung

2.1 Der parameteradaptive Regelkreis

Bild 1 zeigt das Blockschaltbild eines parameteradaptiven Regelkreises. Der Grundregelkreis wird gebildet durch den Prozeß, dessen Ausgangsgröße y die Regelgröße

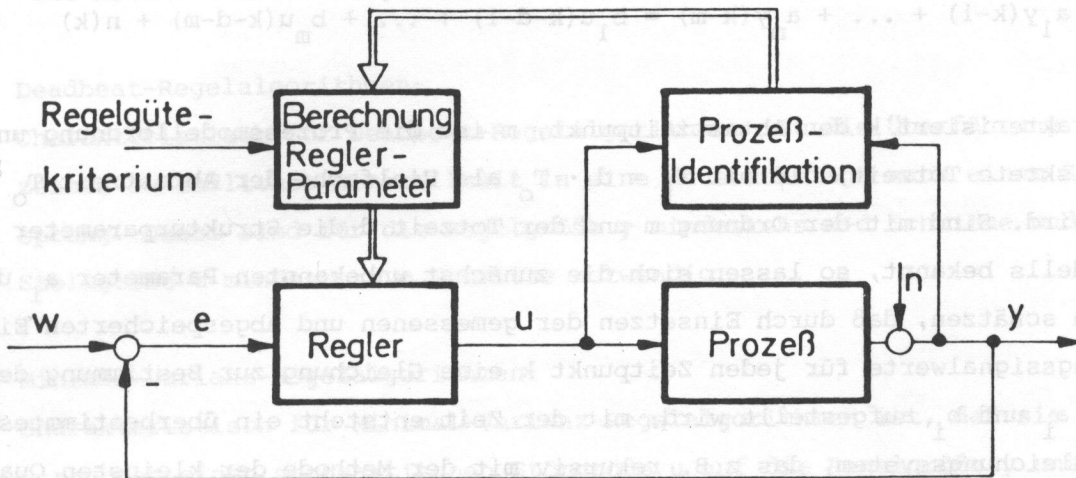


Bild 1: Parameteradaptiver Regelkreis.

darstellt und durch ein stochastisches Störsignal u gestört sein soll, und dem im Prozessrechner als Regelalgorithmus realisierten digitalen Regler, der aus der Regelabweichung $e = w - y$ das Stellsignal u am Prozesseingang erzeugt. Diesem Grundregelkreis ist ein zweiter Adaptionskreis überlagert, der aus Funktionsblöcken für die Prozessidentifikation und die Reglersynthese besteht. Zur Prozessidentifikation wird ein rekursives Parameterschätzverfahren verwendet, das nach jeder Messung die Parameter eines Prozessmodells neu bestimmt - daher die Bezeichnung 'parameteradaptiv'. Aus diesen Prozessmodellparametern werden die Parameter des Regelalgorithmus nach dem Gewißheitsprinzip berechnet, d.h. ohne Berücksichtigung eventueller Schätzfehler und unter der Annahme, daß die geschätzten Prozessmodellparameter gleich den (unbekannten) Parametern des Prozesses sind. Da alle Funktionen des parameteradaptiven Reglers einschließlich Parameterschätzung, Reglersynthese und Berechnung des Stellsignals jeweils zwischen zwei Abtastzeitpunkten und damit innerhalb eines Abtastintervalls der Länge T_0 durchgeführt werden sollen, können für die einzelnen Funktionsblöcke im allgemeinen nur Verfahren mit kleinem Rechenaufwand in Anwendung kommen.

2.2 Prozessmodell und Prozessidentifikation

Als einfaches zeitdiskretes Prozessmodell kann für viele Eingrößenprozesse, zumindest im jeweiligen Arbeitspunkt, eine lineare Differenzengleichung m -ter Ordnung verwendet werden, in der in Anlehnung an Bild 1 y die Ausgangsgröße, u die Eingangsgröße des Prozesses und n ein nichtmeßbares Störsignal bezeichnet

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_m y(k-m) = b_1 u(k-d-1) + \dots + b_m u(k-d-m) + n(k)$$

Dabei charakterisiert k den Abtastzeitpunkt, m ist die Prozessmodellordnung und d die zeitdiskrete Totzeit, die mit $T_t = d \cdot T_0$ als Vielfache der Abtastzeit T_0 dargestellt wird. Sind mit der Ordnung m und der Totzeit d die Strukturparameter des Prozessmodells bekannt, so lassen sich die zunächst unbekannten Parameter a_1 und b_1 dadurch schätzen, daß durch Einsetzen der gemessenen und abgespeicherten Ein- und Ausgangssignalwerte für jeden Zeitpunkt k eine Gleichung zur Bestimmung der Parameter a_1 und b_1 aufgestellt wird; mit der Zeit entsteht ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem, das z.B. rekursiv mit der Methode der kleinsten Quadrate gelöst werden kann. Dadurch wird der Einfluß der Störgröße weitgehend eliminiert und man erhält in jedem Abtastschritt ein verbessertes Prozessmodell. Für Prozesse mit zeitveränderlichem dynamischem Verhalten läßt sich durch Vorgabe eines Gedächtnisparameters λ auch ein 'nachlassendes Gedächtnis' des Schätzverfahrens erreichen - aktuelle Signalwerte werden höher bewertet als vergangene -, wodurch das geschätzte Prozessmodell in gewissem Umfang dem sich ändernden tatsächlichen Prozessverhalten angepaßt werden kann. Das rekursive Parameterschätzverfahren führt zu einem relativ kleinem Rechenaufwand; so lassen sich z.B. auf dem Prozessrechner HP 21 MX-E die 6 Parameter einer Differenzengleichung 3. Ordnung mit der rekursiven Methode der kleinsten Quadrate in weniger als 30 msec pro Abtastintervall schätzen. Weitere Einzelheiten zur Prozessidentifikation können z.B. aus [1] entnommen werden.

2.3 Digitale Regelalgorithmen

Der Regler wird auf dem Prozessrechner als Regelalgorithmus realisiert, der ebenfalls in Form einer linearen Differenzengleichung gegeben sein kann

$$u(k) = -p_1 u(k-1) + \dots - p_\mu u(k-\mu) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + \dots + q_v e(k-v)$$

Hierbei ist $e = w - y$ die Abweichung der Regelgröße y vom Sollwert w , vergleiche auch Bild 1. Im parameteradaptiven Regelkreis sollen nun die Parameter p_i und q_i aus den geschätzten Prozessmodellparametern in jedem Abtastintervall neu bestimmt werden, wozu nur ein kleiner Rechenaufwand notwendig sein soll. Geeignet sind daher vor allem Regelalgorithmen, deren Parameter direkt aus dem Prozessmodell bestimmt werden können. Hierzu gehören die nachstehend beschriebenen Deadbeat- und Minimal-Varianz-Regelalgorithmen [2].

• Deadbeat-Regelalgorithmen:

Charakteristisch für Deadbeat-Regelalgorithmen ist die Überführung des Prozesses in endlicher Einstellzeit in eine neue Ruhelage nach einem Sollwertsprung. Dabei sind für die Regelgröße y mindestens $m+d$ Schritte und für die Stellgröße u mindestens m Schritte notwendig.

• Minimal-Varianz-Regelalgorithmen:

Charakteristisch für Minimal-Varianz-Regelalgorithmen ist, daß sie die Auswirkungen einer stochastischen Störgröße u auf die Regelgröße y unter Berücksichtigung des Stellaufwandes möglichst gering halten sollen.

Sowohl bei den Deadbeat - als auch bei den Minimal Varianz Regelalgorithmen läßt sich der Stellaufwand durch Vorgabe eines Reglerparameters r in festen Grenzen beeinflussen. Zur Berechnung der Parameter beider Regelalgorithmen aus den Prozessmodellparametern benötigt der Prozessrechner HP 21 MX-E jeweils weniger als 10 msec. Zusammen mit dem im Abschnitt 2.2 beschriebenen Parameterschätzverfahren lassen sich somit parameteradaptive Regelalgorithmen realisieren, deren laufender Rechenaufwand pro Abtastschritt unter 50 msec liegt.

2.4 Start der parameteradaptiven Regelung

Vor dem Start der parameteradaptiven Regelung müssen bestimmte Parameter festgelegt werden. Dazu gehören:

- die Abtastzeit T_0
- die Modellordnung m
- die Modelltotzeit d
- der Gedächtnisparameter λ für die Parameterschätzung
- der Reglerparameter r

Diese Startvorgaben, insbesondere die Vorgabe von T_0 , m und d , sind ein Hindernis für den praktischen Einsatz von parameteradaptiven Regelalgorithmen. Gerade aber in letzter Zeit sind neue Verfahren zur selbsttätigen Bestimmung von Ordnung m und Totzeit d entwickelt worden, die eine Vorgabe dieser Parameter nicht mehr unbedingt erfordern [3]; in der Entwicklung sind weiterhin auch Verfahren zur automatischen Bestimmung einer geeigneten Abtastzeit T_0 . Damit verbleiben zur Vorgabe im wesentlichen nur noch der Gedächtnisparameter λ und der Reglerparameter r ; diese Parameter aber gewähren dem Anwender den notwendigen Spielraum, um Einfluß auf das Regelverhalten in Betrachtung des jeweiligen Prozesses zu nehmen.

3. Parameteradaptive Regelung eines analog simulierten Prozesses

Um das prinzipielle Verhalten des parameteradaptiven Regelkreises zu veranschaulichen, werden nun Versuchsergebnisse an einem analog simulierten Tiefpassprozess 2. Ordnung gezeigt. In Bild 2 ist das Verhalten des mit einem parameteradaptivem Deadbeatregler

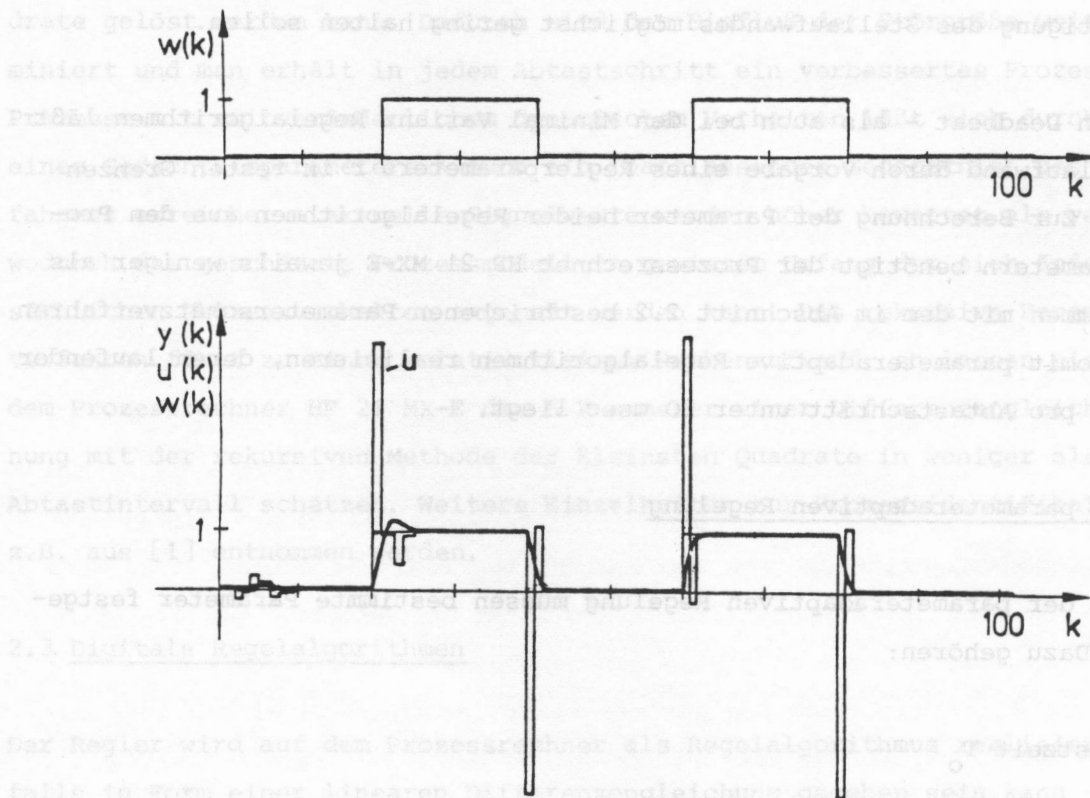


Bild 2: Regelung eines Tiefpassprozesses 2. Ordnung mit parameteradaptivem Deadbeatregler bei Sollwertsprüngen.

geschlossenen Regelkreises dargestellt, auf den als einzige äußere Anregung Sollwertsprünge einwirken. Nach Schließen des Regelkreises bei $k = 0$ werden, hervorgerufen durch das Messrauschen, einige kleine Stellbewegungen erzeugt, die zu einem groben Prozessmodell führen, so daß der Regelkreis zunächst stabilisiert wird. Beim ersten Sollwertsprung bei $k = 20$ ergibt sich zwar noch nicht exaktes Deadbeatverhalten, das für diesen Prozess durch zwei Stellgrößensprünge (Ordnung 2!) charakterisiert ist, aber die bei diesem Sollwertsprung gewonnene Information reicht schon aus, um für alle folgende Sollwertsprünge exaktes Deadbeatverhalten zu gewährleisten. Bild 3 zeigt das Verhalten des mit einem parameteradaptiven Minimal-Varianz-

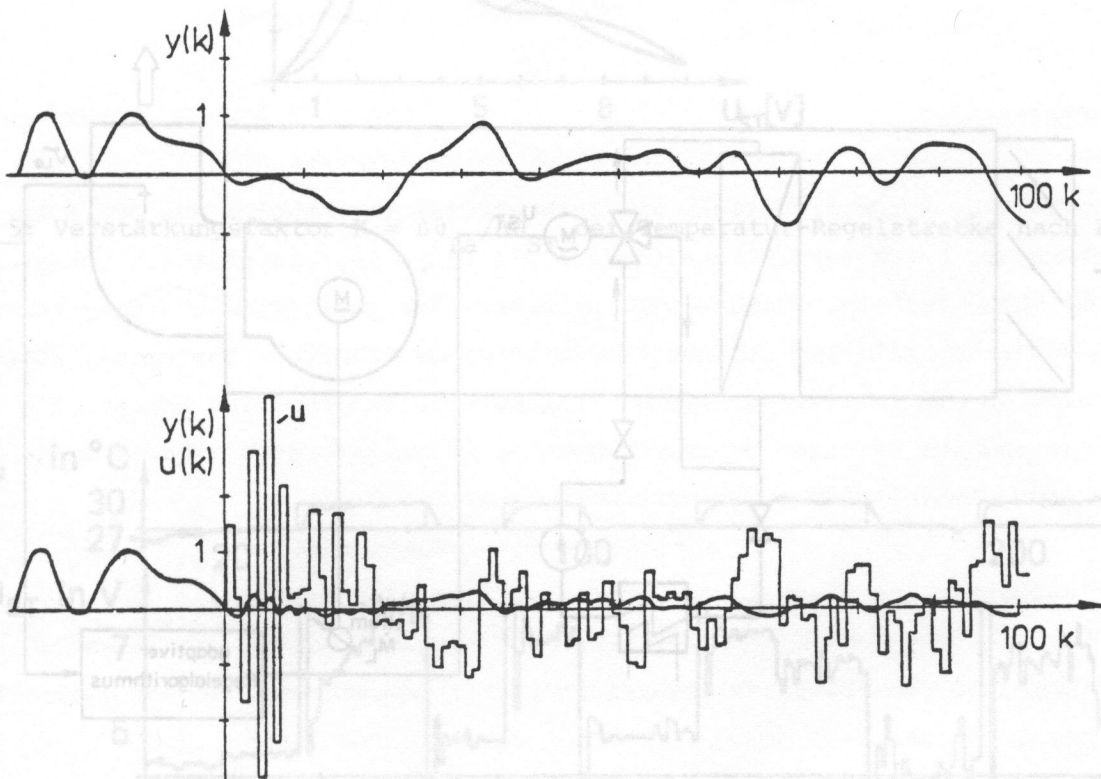


Bild 3: Regelung eines Tiefpassprozesses 2.Ordnung mit parameteradaptivem Minimal-Varianz-Regler bei stochastischer Störung.

Regler geschlossenen Regelkreises, auf den als einzige Anregung ein stochastisches Störsignal n wirkt, das im offenen Regelkreis zu dem im oberen Teil von Bild 3 dargestellten Regelgrößenverlauf führt. Nach Schließen des Regelkreises bei $k = 0$ zeigen sich zunächst relativ große Stellbewegungen; nach ca. 10 Schritten reicht die gewonnene Information schon aus, um den Einfluß der Störgröße auf die Regelgröße deutlich zu vermindern, und im weiteren zeigt der parameteradaptive Minimal-Varianz-Regler ein dem theoretisch exakt angepaßten Minimal-Varianz-Regler entsprechendes Verhalten. Aus beiden Bildern wird deutlich, daß sich der parameteradaptive Regler

schnell auf das Verhalten des linearen Prozesses einstellt und schon nach kurzer Zeit ein dem theoretisch exakt angepaßten Regler vergleichbares Regelergebnis liefert.

4. Parameteradaptive Regelung eines Lufterhitzers

Am Beispiel der Regelung einer Lufterhitzeranlage, wie sie als Bestandteil einer Klimaanlage häufig verwendet wird, soll nun gezeigt werden, wie sich ein parameteradaptiver Regler auch an ein sich änderndes dynamisches Verhalten des Prozesses anpaßt. Bild 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Lufterhitzers. In diesem wird Frisch-

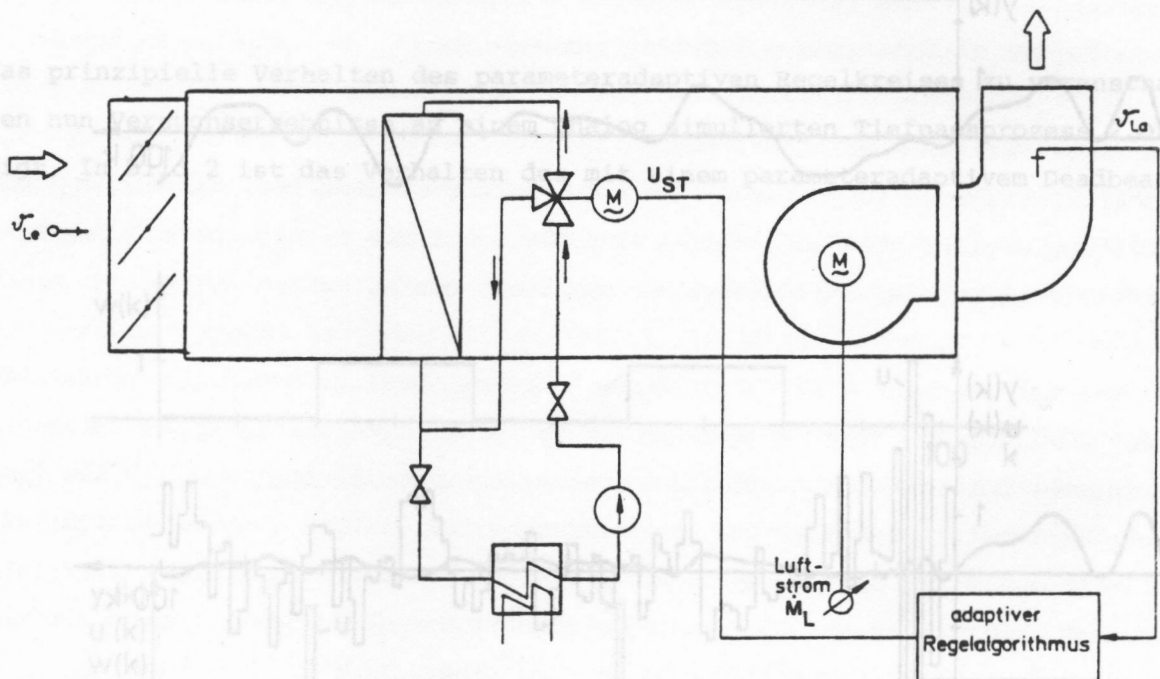


Bild 4: Schematische Darstellung des Lufterhitzers.

luft der Temperatur ϑ_{Le} durch einen wasserbeheizten Wärmeaustauscher erhitzt, wobei die Wärmezufuhr durch die Verstellung eines Splitventils über die Stellspannung U_{ST} beeinflusst werden kann. Am Lüfterausgang wird die Luftaustrittstemperatur ϑ_{La} gemessen, die die Regelgröße darstellt. Regelungstechnische Probleme ergeben sich dabei aus der starken Abhängigkeit des Verstärkungsfaktors $K = \Delta\vartheta_{La} / \Delta U_{ST}$ von der Stellgröße U_{ST} und vor allem von dem einstellbaren Luftstrom $\dot{M}_L$, wie in Bild 5 dargestellt. Bild 6 zeigt Versuchsergebnisse für die Regelung des Lufterhitzers mit einem parameteradaptiven Deadbeatregler, wobei ein Prozessmodell 3. Ordnung mit Totzeit $d = 0$ verwendet und das dynamische und statische Verhalten des Prozesses durch Verstellung des Luftstroms $\dot{M}_L$ variiert wird. Nach Schließen des Regelkreises stabili-

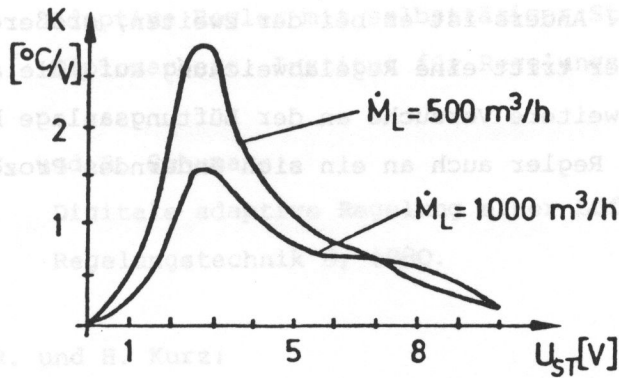


Bild 5: Verstärkungsfaktor $K = \Delta \vartheta_{La} / \Delta U_{ST}$ der Temperatur-Regelstrecke nach Bild 4.

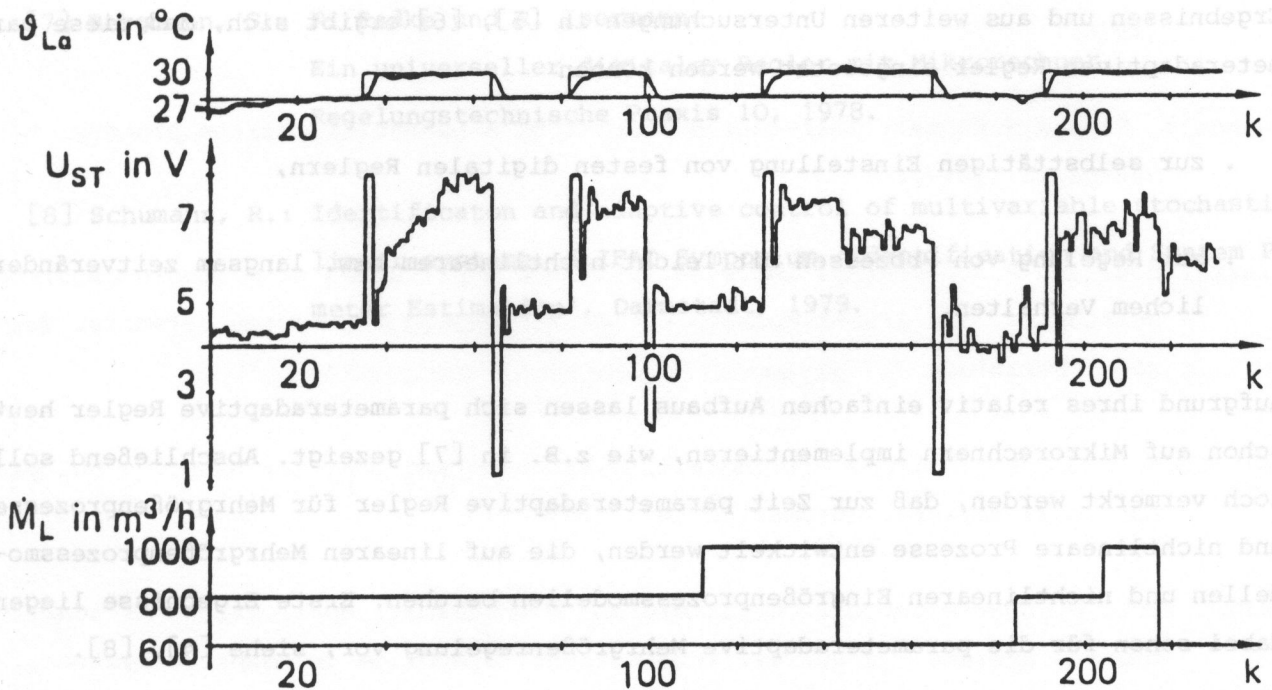


Bild 6: Regelung des Lufterhitzers mit parameteradaptivem Deadbeatregler bei Änderung des Luftstroms $\dot{M}_L$ (Modellstruktur: $m=3$, $d=0$).

siert sich auch hier wieder der Regelkreis durch kleine anfängliche Stellbewegungen. Das lange Nachstellen beim ersten Sollwertsprung bei $k = 35$ zeigt allerdings, daß dadurch nur ein grobes Prozessmodell bestimmt und insbesondere der Verstärkungsfaktor noch nicht richtig geschätzt worden ist. Bei den nächsten Sollwertsprüngen wird aber schon annähernd Deadbeatverhalten erzielt. Die erste Verstellung des Luftstroms $\dot{M}_L$ bei $k = 110$ führt zu kleinen Stellbewegungen, hat aber keinen sichtbaren Einfluß auf die Regelgröße. Anders ist es bei der zweiten, größeren Änderung des Luftstroms bei $k = 145$, hier tritt eine Regelabweichung auf, die aber schnell ausgeregelt wird. Dieser und weitere Versuche an der Lüftungsanlage haben bestätigt, daß sich parameteradaptive Regler auch an ein sich änderndes Prozessverhalten anpassen können [4].

5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde dargelegt, wie parameteradaptive Regler aus der Kombination eines rekursiven Parameterschätzverfahrens mit einem Reglersyntheseverfahren gebildet werden können. In verschiedenen Beispielen wurde gezeigt, wie sich parameteradaptive Regler schnell auf ein unbekanntes Prozessverhalten einstellen, aber auch, wie sie sich an ein zeitveränderliches Prozessverhalten anpassen können. Aus diesen Ergebnissen und aus weiteren Untersuchungen in [5], [6] ergibt sich, daß diese parameteradaptiven Regler eingesetzt werden können

- zur selbsttätigen Einstellung von festen digitalen Reglern,
- zur Regelung von Prozessen mit leicht nichtlinearem bzw. langsam zeitveränderlichem Verhalten.

Aufgrund ihres relativ einfachen Aufbaus lassen sich parameteradaptive Regler heute schon auf Mikrorechnern implementieren, wie z.B. in [7] gezeigt. Abschließend soll noch vermerkt werden, daß zur Zeit parameteradaptive Regler für Mehrgrößenprozesse und nichtlineare Prozesse entwickelt werden, die auf linearen Mehrgrößenprozessmodellen und nichtlinearen Eingrößenprozessmodellen beruhen. Erste Ergebnisse liegen dabei schon für die parameteradaptive Mehrgrößenregelung vor, siehe [4], [8].

6. Literatur

- [1] Isermann, R.: Prozessidentifikation. Springer, Berlin, 1974.
- [2] Isermann, R.: Digitale Regelsysteme. Springer, Berlin, 1977.
- [3] Sohn, K.H.: Adaptive Regler mit selbsttätiger Struktursuche.
Diplomarbeit, Institut für Regelungstechnik, TH Darmstadt, 1980.
- [4] Bergmann, S. und R. Schumann:
Digitale adaptive Regelung einer Lüftungsanlage.
Regelungstechnik 8, 1980.
- [5] Isermann, R. und H. Kurz:
Parameteradaptive Regelalgorithmen mit rekursiven Parameterschätz-
verfahren. Regelungstechnik 11, 1979.
- [6] Kurz, H.: Erprobung und Vergleich von parameteradaptiven Regelalgorithmen
bei verschiedenen Prozessen. Regelungstechnik 1, 1980.
- [7] Bergmann, S.; F. Radke und R. Isermann:
Ein universeller digitaler Regler mit Mikrorechner.
Regelungstechnische Praxis 10, 1978.
- [8] Schumann, R.: Identification and adaptive control of multivariable stochastic
linear systems. 5. IFAC Symposium 'Identification and System Para-
meter Estimation', Darmstadt, 1979.

Weitere empfehlenswerte Literatur

A) Allgemein:

Åström, K.J., U.Borisson, L.Ljung and B.Wittenmark: Theory and applications of self-tuning regulators. Automatica 13 (1977).

Isermann, R.: Parameter-adaptive control algorithms - a tutorial. 6th IFAC/IFIP-Conference on Digital Computer Applications, Düsseldorf (1980).

Saridis, G.N.: Self-organizing control of stochastic systems. Marcel Dekker, New York and Basel (1977).

B) Anwendungsbezogen:

Bergmann, S. and K.H.Lachmann: Digital parameteradaptive control of a pH-neutralization process. JACC 1980, San Francisco.

Borisson, U. and R.Syding: Self-tuning control of an ore crusher. IFAC-Automatica 12 (1976).

Buchholt, F. and M.Kümmel: Self-tuning control of a pH-neutralisation process. Automatica 15 (1979).

Clarke, D.W. and P.J.Gawthrop: Implementation and application of microprocessor-based selftuners. 5th IFAC-Symposium on Identification and System Parameter Estimation, Darmstadt (1979).

Källström, C.G., K.J.Åström, N.E.Thorell, J.Eriksson and L.Stein: Adaptive autopilots for large tankers. Automatica 15 (1979).

Parks, P.C., W.Schaufelberger, Chr.Schmid and H.Unbehauen: Applications of adaptive control systems - a survey. International Symposium on Adaptive Systems, Bochum (1980).