

REGLER MIT NICHTLINEAREN ELEMENTEN

K. FUCHS

Siemens & Halske AG, Karlsruhe-West, Deutschland

Von nichtlinearen Problemen zu sprechen, ist auf vielen Gebieten der angewandten Wissenschaften schon fast zur Mode geworden. Es ist daher verständlich, daß die Zahl der Veröffentlichungen, die das Gebiet der nichtlinearen Regelungen betreffen, ähnlich angestiegen ist, wie wir es bei anderen aktuellen Gebieten beobachten. So notwendig gerade deshalb zusammenfassende Übersichtsberichte geworden sind, so schwierig ist gleichzeitig auch die Abgrenzung ihrer Themenkreise. In diesem Bericht sollen daher Teilprobleme herausgegriffen werden, die eine gewisse Vorstellung von Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der Regelungstheorie geben können. Daß dabei auf Beweise verzichtet werden muß, dürfte verständlich sein, jedoch soll versucht werden, Problemstellungen zu beleuchten und Ergebnisse mitzuteilen.

Vergegenwärtigen wir uns zunächst, welche Probleme bei der Untersuchung von Regelkreisen interessieren. Es sind dies vor allem Fragen nach der Reaktionsgeschwindigkeit eines Reglers, nach dem Verlauf von Übergängen aus einem Zustand in einen anderen, nach der Stabilität und schließlich nach den günstigsten Verhältnissen, die an einem Regler oder einem Regelkreis erreicht werden können.

Soweit die Systeme linear sind, lassen sich nach dem Stand der linearen Theorie die Vorgänge vollkommen übersehen. Es gelingt, theoretisch für jede vorgegebene lineare Strecke einen linearen Regler anzugeben, mit dem es möglich ist, Regelabweichungen überhaupt zu vermeiden. Diese theoretische Möglichkeit läßt sich praktisch nie verwirklichen. Der Wunsch scheitert fast immer daran, daß der Regler ebenso viele Einstellparameter aufweisen muß, wie die Strecke Freiheiten hat. Praktisch lassen sich mit Erfolg nur PID-Regler, d. h. Regler mit drei Parametern, erstellen. Schon der Versuch, einen vierten Parameter in der Form einer weiteren Ableitung einzuführen, liefert selten eine deutliche Verbesserung der Regelgüte. Heute sind die Möglichkeiten, welche die lineare Theorie bietet, ausgeschöpft. Der Regler mit PID-Verhalten ist die Spitzenleistung der linearen Theorie. Mit dem Erzielten ist aber der Regelungstechniker keineswegs zufrieden.

Wenn man einmal den Versuch macht, eine verhältnismäßig langsame Strecke hoher Ordnung von Hand zu regeln, dann wird man bei einiger *Übung* feststellen, daß man den besten Regler bezüglich der Regelergebnisse — manchmal um eine Größenordnung — übertreffen kann. Solche

Beobachtungen sind schmerzlich, lassen sich aber nicht leugnen. Es lohnt daher, solche von Hand gewonnenen Ergebnisse näher zu betrachten. Man wird sofort zwei Hauptmerkmale feststellen: Der Mensch arbeitet grundsätzlich (1) diskontinuierlich und (2) nichtlinear.

Stehen dem Menschen jedoch keine Informationen über den Charakter der Strecke zur Verfügung, dann wird das Regelergebnis nicht besser sein als das von einem linearen PID-Regler erreichte. Erst nach einiger *Übung* lernt er das Übergangsverhalten der Strecke kennen und speichert dieses Wissen. Mit diesen zusätzlichen Informationen ausgestattet kann er jedem linearen PID-Regler überlegen sein. Man stellt dabei fest, daß ein optimaler Regelverlauf, d. h. ein möglichst schnelles Einschwingen der Regelgröße nach einer Störung, nur erreicht werden kann, wenn die zur Verfügung stehende Energie zur Verstellung des Stellgliedes stets voll eingeschaltet wird. Seit etwa zehn Jahren hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, daß die Regeleigenschaften durch die Anwendung nichtlinearer Regler und Elemente verbessert werden können. Probleme dieser Art wurden von zahlreichen Autoren (z. B. Hopkins [4], Lewis [5], Schwartz [9], Matuschka [7], Herschel [3], Lerner [6], Silva [10, 11]) untersucht.

In dieser Arbeit wird über Untersuchungen einiger nichtlinearer Teilprobleme am Analogrechner berichtet: die Regler sind nichtlineare Regler. Ihr Regelverhalten wird mit linearen Reglern verglichen. Die Ordnungszahl der Strecke ist wesentlich höher als die der Regler. Es wird versucht, auf die folgende Fragestellung eine Antwort zu geben:

- (1) Läßt sich durch die Einfügung nichtlinearer Elemente das Führungsverhalten und Störverhalten verbessern?
- (2) Läßt sich bei nichtlinearen Reglern eine weitergehende entscheidende Verbesserung des Regelverhaltens überhaupt erreichen?

VERGLEICH EINES NICHTLINEAREN PI-REGLERS MIT EINEM LINEAREN IDEALEN PI-REGLER

Durch vergleichende Untersuchungen des Regelverhaltens eines nichtlinearen PI-Reglers mit einem linearen idealen PI-Regler am Analogrechner soll die Bedeutung nichtlinearer Elemente erst einmal herausgestellt werden. Die Regelstrecke ist eine Strecke 5. Ordnung, entstanden durch eine Hintereinanderschaltung von gleichen Verzögerungsgliedern 1. Ordnung.

In Bild 1 wird das Blockschaltbild des Regelkreises mit dem idealen linearen PI-Regler gezeigt. Derselbe Regelkreis mit einem nichtlinearen PI-Regler ist in Bild 2 dargestellt. Dieser nichtlineare PI-Regler enthält zwei nichtlineare Elemente, einen Dreipunktschalter, d. h. ein symmetrisches Relaisglied mit Totzone und Hysterese und einen Stellmotor mit konstanter Stellgeschwindigkeit. Der Ansprechwert des Dreipunktschalters ε_1 ent-

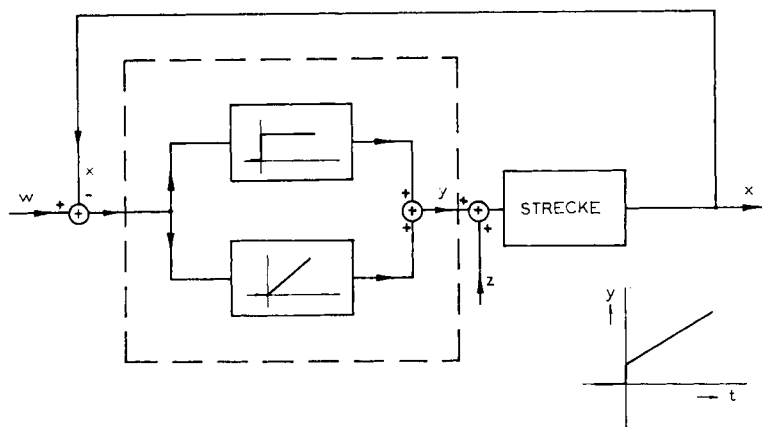


Bild 1.—Idealer linearer PI-Regler an Regelstrecke höherer Ordnung.

spricht 0,2% und der Abfallwert ε_0 0,1% des Meßbereichumfanges. Im Rückföhrpfad dieses Reglers liegt ein nachgebendes Zeitglied, dessen Amplitude K_r und dessen Zeitkonstante T_i eingestellt werden kann. Wird dieser Regler mit einer sprungförmigen Eingangsgröße (X_w) erregt, so wird der Stellmotor schrittweise betätigt. Die Art der Verstellung ist so, daß ein erster langer Schaltimpuls von einer konstanten Folge kürzerer Schaltimpulse und Schulpausen abgelöst wird. Das Übertragungsverhalten dieses Reglers ist dem eines linearen PI-Reglers ähnlich, da auch hier einem ersten großen Verstellschritt eine Verstellung mit konstanter mittlerer Stellgeschwindigkeit folgt. Sowohl der erste Schritt wie die folgende mittlere Stellgeschwindigkeit sind Funktionen der Größe des erregenden Sprungsignals.

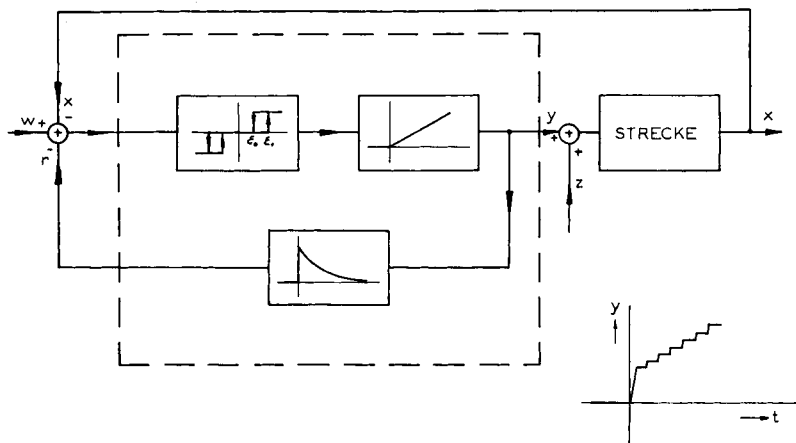


Bild 2.—Nichtlinearer PI-Regler an Regelstrecke höherer Ordnung.

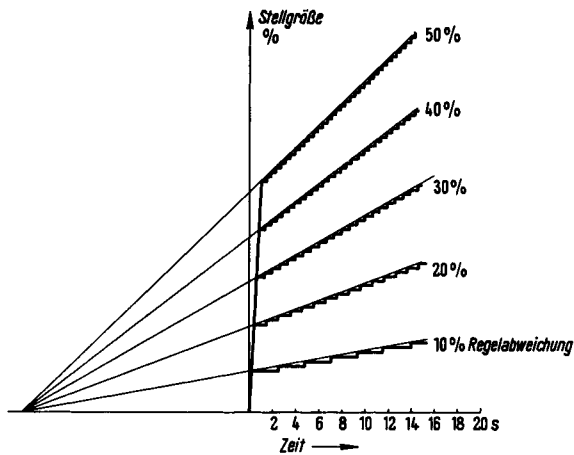


Bild 3.—Übertragungsverhalten des nichtlinearen PI-Reglers.
Stellzeit $T_y \ll$ Zeitkonstante T_i .

Es hat sich eingebürgert, Regler mit solchem Verhalten als nichtlineare PI-Regler zu bezeichnen und auch zu ihrer Kennzeichnung die Parameter Proportionalbereich (X_p) und Nachstellzeit (T_N) zu verwenden. Für die Definition dieser Parameter gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es ist jedoch naheliegend, für die Parameter X_p und T_N die im linearen Fall übliche Definition zu wählen. Die auf eine sprunghafte Erregung folgende Bewegung des Stellmotors wird in einem Weg-Zeit-Diagramm aufgezeichnet und die treppenförmige Bewegung des Stellmotors durch eine mittlere Weglinie ersetzt. Das von dieser Linie auf der Ordinatenachse abgeschnittene Stück wird als der mit X_w multiplizierte reziproke P-Bereich definiert. Entsprechend wird dann der Abszissenabschnitt als Nachstellzeit T_N festgelegt.

Wählt man bei dem vorgenannten nichtlinearen PI-Regler die Stellgeschwindigkeit des Stellmotors sehr groß (Stellzeit T_y sehr klein) im Verhältnis zur Zeitkonstante T_i des Zeitgliedes im Rückführpfad, dann stellt man fest, daß nach den gewählten Definitionen Proportionalbereich X_p und Nachstellzeit T_N unabhängig von der Regelabweichung sind, wie das im Bild 3 gezeigt wird. Der Regler ist dem eines linearen PI-Reglers mit Verzögerung sehr ähnlich, hier sind auch Proportionalbereich und Nachstellzeit konstant.

Ist dagegen die Stellgeschwindigkeit des Stellmotors sehr klein (Stellzeit T_y sehr groß) im Verhältnis zur Zeitkonstante T_i des Zeitgliedes im Rückführpfad, dann ergibt sich in erster Näherung der Proportionalbereich X_p unabhängig von X_w . Die Nachstellzeit ist dagegen stark nichtlinear abhängig von der Regelabweichung, und zwar nimmt dieselbe mit zunehmenden

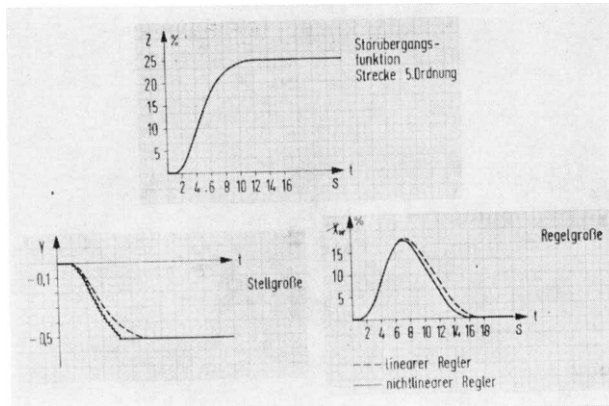


Bild 4.—Störverhalten des nichtlinearen und idealen linearen PI-Reglers an Strecke 5. Ordnung.

der Regelabweichung, um mehr als eine Größenordnung ab (1). Regler, bei denen sich Reglerparameter in diesem Sinne ändern, werden als progressive nichtlineare Regler bezeichnet (8).

Im folgenden soll nun das Regelverhalten eines nichtlinearen PI-Reglers mit kleiner Stellzeit T_y im Verhältnis zur Zeitkonstanten T_i im Rückführpfad mit dem eines idealen PI-Reglers verglichen werden. Die Reglerparameter sind in beiden Fällen unabhängig von der Regelabweichung, was bei dem Vergleich natürlich wesentlich ist. Diese beiden Reglertypen wurden nun mit der Regelstrecke 5. Ordnung zusammenschaltet und jeder für sich auf Störverhalten und Führungsverhalten optimiert. Es wurde der Einfachheit halber als Kriterium der aperiodische Grenzfall gewählt. Beim Führungsverhalten (Sollwertverstellung) ergaben sich keinerlei Unterschiede im zeitlichen Verlauf. Beim Störverhalten (Laständerung) wurden Unterschiede erkennbar, wie es im Bild 4 gezeigt wird. Die Unterschiede sind zwar nicht wesentlich, aber doch bei der hohen Ordnungszahl der Strecke bedeutend. Wie der Stellgrößenverlauf zeigt, ist bei dem nichtlinearen Regler eine kleinere Proportionalbereichseinstellung (größere Verstärkung) zulässig. Stellt man beim nichtlinearen Regler dieselben Reglerparameter wie beim idealen linearen Regler ein, dann erhält man auch dasselbe Regelverhalten. Bei dem nichtlinearen Regler muß es sich also um eine Verbesserung der Stabilität handeln, was man leicht bei einer Stabilitätsprüfung feststellt. Die Stabilität des nichtlinearen Systems wird im wesentlichen durch das symmetrische Relaisglied mit Totzone und Hysterese bestimmt. Der Regelvorgang ist beim nichtlinearen Regler dann bereits beendet, wenn die Regelabweichung kleiner als der Abfallwert $\varepsilon_0 = 0,1\%$ ist. Nimmt man diesen Bereich beim idealen linearen PI-Regler auch insofern in Anspruch, daß

man die Regelgröße innerhalb dieser Zone schwingen läßt, dann ist dasselbe Regelergebnis möglich.

Wie dieser Versuch zeigt, lassen sich nichtlineare PI-Regler bauen, mit denen Regelergebnisse erzielt werden können, die solchen mit idealem linearen PI-Regler gewonnenen entsprechen. Solche nichtlineare Regler sind technisch gesehen weit weniger kritisch in ihrem Aufbau und manchmal auch universeller in ihrer Anwendbarkeit. Es spielt dabei z. B. keine wesentliche Rolle, ob der Stellmotor eine Wellenleistung von einigen bis zu einigen hundert Watt hat, das symmetrische Relaisglied mit Totzone und Hysterese kann immer dasselbe sein.

Von Bedeutung kann bei einem technischen Regler dieser Art auch das Zeitverhalten des Relaisgliedes sein. Ein solches technisches Relaisglied hat immer eine Grenzfrequenz, d. h. ein solches Relaisglied wirkt wie ein Tiefpaß. Durch die Vorschaltung von Filtern mit ganz bestimmten Eigenschaften lassen sich alle möglichen Frequenzgänge und Beschreibungsfunktionen realisieren. Man kann bestimmte Frequenzbereiche der Schwankung einer Regelgröße ausblenden, kann Unempfindlichkeit gegen statistische Schwankungen der Regelgröße erreichen, es auf minimale Betätigung der Schaltorgane (2) und anderes mehr abzielen.

DER NICHTLINEARE PI-REGLER MIT GESTEUERTER RÜCKFÜHRUNG

Will man das Regelverhalten des untersuchten nichtlinearen PI-Reglers ($T_y \ll T_i$) weiter verbessern, dann gibt es dazu sicher mehrere Wege. Bildet man den Differentialquotienten der Regelgröße und schaltet diesen auf, dann erreicht man sicher dasselbe, was mit einem idealen linearen PID-Regler erreicht werden kann. Entsprechende Versuche bestätigen das auch, man kann den nichtlinearen PID-Regler mit dem idealen linearen PID-Regler vergleichen (siehe Bild 5).

Durch welche Maßnahmen, das ist die nächste Frage, könnte sich das Regelverhalten des nichtlinearen Reglers ohne Beeinträchtigung der Stabilität verbessern lassen. In Bild 6 ist das Störverhalten eines idealen linearen PID-Reglers bei Optimierung auf den aperiodischen Grenzfall an einer Regelstrecke 5. Ordnung gezeigt. Wie man sieht, läuft die Stellgröße mit einer relativ kleinen Überschwungung in die neue Beharrung ein. Der zur Verfügung stehende Stellbereich kann aus Stabilitätsgründen nicht in Anspruch genommen werden. Durch größere Inanspruchnahme des Stellbereiches wäre es durchaus denkbar, daß das Regelergebnis noch verbessert werden kann.

In Bild 7 ist das Blockschaltbild eines nichtlinearen Reglers gezeigt, in dessen Rückführungspfad über ein Begrenzungsglied abhängig vom Betrag der

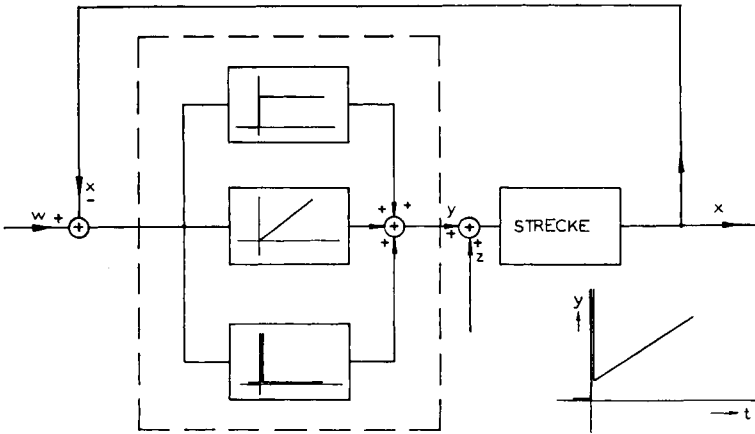


Bild 5.—Idealer linearer PID-Regler an Regelstrecke höherer Ordnung.

Regelabweichung X_w verzögert eingegriffen wird. Ohne diese Begrenzungseinrichtung unterscheidet sich dieser Regler nicht von dem schon bekannten nichtlinearen PI-Regler. Ist die Regelabweichung kleiner $|\varepsilon_1|$, dann liegt eine totale Begrenzung im Rückführpfad vor, der Regler ist ohne Rückführung. Überschreitet ein Eingangssignal den Wert $\pm \varepsilon_1$, dann wird der Stellmotor über den Dreipunktschalter in die Endlage gehen. Mit zunehmender Regelabweichung und Zeit wird dann die Begrenzung zeitverzögert aufgehoben, der Regler arbeitet mit Rückführung. Die Begrenzung wird

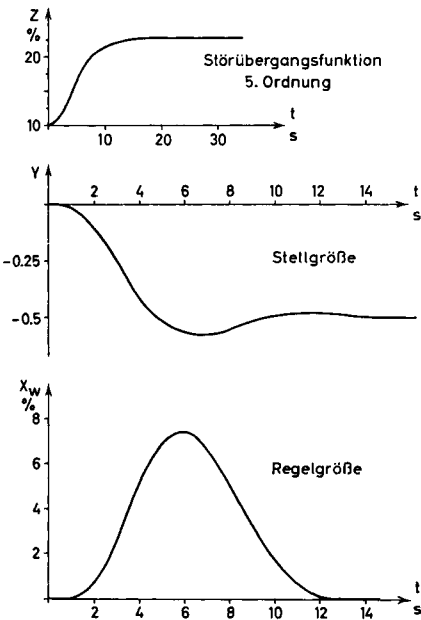


Bild 6.—Störverhalten beim idealen linearen PID-Regler an Strecke 5. Ordnung.

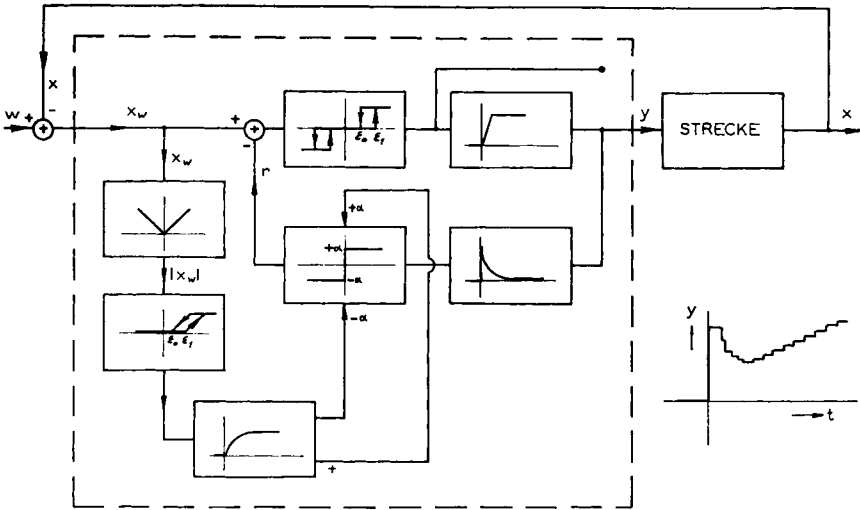


Bild 7.—Nichtlinearer PI-Regler mit gesteuerter Rückführung an Regelstrecke höherer Ordnung.

langsamer aufgehoben, d. h. der Stellmotor bleibt länger in der Endlage, wenn die Verzögerungszeit T_v des Verzögerungsgliedes im Steuerpfad größer ist. Man hat also bei diesem nichtlinearen Regler mit gesteuerter Rückführung durch die Einstellung der Verzögerungszeit im Steuerpfad die Vorhaltewirkung besser in der Hand als beim idealen linearen PID-Regler. Der Stellmotor erreicht wirklich die Endlage, seine Verharrungszeit ist einstellbar. Natürlich muß der Ansprechwert des Dreipunktschalters auch sehr klein sein, damit bei Überschreitung desselben der Stellmotor in die Endlage schießen kann. Ansonsten kann ein idealer linearer PID-Regler dadurch überlegen sein, daß er auf Grund des Differentialquotienten der Eingangsgröße schon viel früher Stellgrößenänderungen einleitet.

Dieser nichtlineare Regler mit gesteuerter Rückführung wurde mit einer Regelstrecke 5. Ordnung zusammengeschaltet. Er wurde einerseits in seinem Regelverhalten mit dem nichtlinearen PI-Regler und andererseits mit dem idealen linearen PID-Regler verglichen. Die Optimierung wurde erst einmal ohne Steuerpfad in der Rückführung wie bei dem nichtlinearen PI-Regler gewählt. Nach der Hinzunahme des Steuerpfades wurde die Verzögerungszeit des Steuerpfades an die Verzögerungszeit der Regelstrecke angepaßt.

Beim Führungsverhalten (Sollwertverstellung) konnte die Regelgüte eines idealen linearen PID-Reglers leicht überboten werden. Welche Verbesserungen beim Störverhalten (Laständerung) erreicht werden konnten, wird in Bild 8 gezeigt. Mit optimierter Verzögerungszeit geht die Amplitude der Störung um den Faktor ca. 4 und die Ausregelzeit um den Faktor ca. 2,6 gegenüber dem nichtlinearen PI-Regler zurück. Vergleicht man das

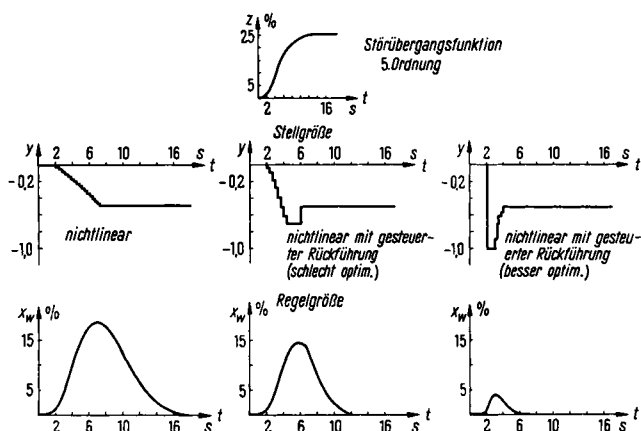


Bild 8.—Störverhalten beim nichtlinearen PI-Regler mit gesteuerter Rückführung im Vergleich zum nichtlinearen PI-Regler.

erreichte Störverhalten mit dem Regelergebnis eines idealen PID-Reglers, Bild 6, dann ist die Amplitude um den Faktor ca. 1,8 kleiner und die Ausregelzeit um den Faktor 2 kürzer. Weitergehende Verbesserungen wären durch die Herabsetzung des Ansprechwertes $\pm \varepsilon_1$ sicher möglich, konnten aber am Analogrechner nicht erreicht werden.

Die Stabilität des Systems ist mit der eines linearen PID-Reglers vergleichbar, die Reglerjustierung ist jedoch weniger kritisch. Die Stabilität des Systems hängt wesentlich davon ab, daß das Begrenzungsglied erst bei Regelabweichungen $|x_w| \leq |\varepsilon_0|$ in die totale Begrenzung zurückgenommen wird (siehe Bild 7). Natürlich kann man bei diesem Regler sehr leicht durch die Vorschaltung von Filtern mit ganz bestimmten Eigenschaften Frequenzbereiche ausblenden, kann Unempfindlichkeit gegen statistische Schwankungen der Regelgröße und anderes mehr erreichen.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch eine systematische Untersuchung von nichtlinearen Reglern an einer Regelstrecke 5. Ordnung am Analogrechner konnte gezeigt werden, daß sich das Regelverhalten durch die Einfügung von Nichtlinearitäten verbessern läßt. Durch eine vom Betrag der Regelabweichung abhängige, zeitverzögert wirkende Begrenzung des Rückführpfades bei einem nichtlinearen PI-Regler konnte ein nichtlinearer Regler entwickelt werden, dessen Führungsverhalten (Sollwertänderung) dem idealen linearen PID-Regler leicht überlegen ist. Beim Störverhalten (Laständerung) ist er dem linearen idealen PID-Regler weit überlegen. Bei diesem Regler wird der dritte Einstellparameter an die Verzugszeit (Ordnung) der Regelstrecke angepaßt. Die Optimierung auf Führungsverhalten oder Störverhalten ist weniger kritisch.

Durch die Vorschaltung von Filtern mit vorgegebenen Eigenschaften lassen sich bei nichtlinearen Reglern alle möglichen Frequenzgänge und Beschreibungsfunktionen realisieren. Man kann bestimmte Frequenzbereiche der Schwankung einer Regelgröße ausblenden, kann Unempfindlichkeit gegen statistische Schwankungen der Regelgröße erreichen, es auf minimale Betätigung der Schaltorgane und anderes mehr abzielen.

Wir sind der Meinung, daß die Möglichkeiten, die eine bewußte Ausnutzung von Nichtlinearitäten im Regler bietet, heute noch lange nicht ausgeschöpft sind. Selbst die derzeit bekannten und gesicherten Ergebnisse scheinen noch nicht Allgemeingut der Regelungstechniker zu sein, wozu dieser Bericht beitragen soll.

LITERATUR

1. BÖHNER, A., *Siemens-Z.* **34**, 564 (1960).
2. FRIEBE, E., *Siemens-Z.* **34**, 578 (1960).
3. HERSCHEL, R., *Regelungstechnik* **7**, 240 (1958).
4. HOPKIN, A. M., *Trans. AIEE* **70**, 631 (1951).
5. LEWIS, I. B., *Trans. AIEE* **71**, 449 (1951).
6. LERNER, A. J., *Automatika i Telemekhanika* **13**, 133, 429 (1952).
7. MATUSCHKA, H., Nichtlinearitäten im Regler zur Verbesserung der Regelgüte, S. 172–182. Heidelberger Regelungskongreß, 1956.
8. SCHLICK, K., *Siemens-Z.* **31**, 482 (1957).
9. SCHWARTZ, I. W., *Trans. AIEE* **71**, 401 (1951).
10. SILVA, L. M., Nonlinear Optimization of Relay Servomechanisms. University of California, 1953.
11. SILVA, L. M., *Trans. ASME* 1955, S. 1317–1323.