Regelungen mit Stellanschlägen und Begrenzungen

Autor(en): **Glattfelder, Adolf Hermann**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **89 (1998)**

Heft 17

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902100

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Verbesserungen der Regelgüte sind meist mit erhöhten Stellbewegungen verbunden. Damit machen sich die stets vorhandenen Stellgrössenanschläge stärker bemerkbar. Ebenso können betriebliche Grenzen von weiteren Variablen in der Anlage häufiger tangiert werden. Dies bedeutet, dass die Regelaufgaben nichtlinear werden. Gelöst werden diese einerseits durch Optimierung der Trajektorie im Sinne einer optimalen Steuersequenz (Maximumprinzip bzw. Modellprädiktive Regelung) oder andererseits durch Beibehalten der linearen Regelung für kleine Auslenkungen und Hinzufügen weiterer Rückführungen, die bei grossen Auslenkungen aktiv werden. In der Praxis wird der zweite Weg in der Form von Anti-Wind-up- bzw. Override-Reglern verbreitet benutzt, wobei die Regelungen meist noch empirisch-intuitiv entworfen werden. Im folgenden wird an einem Beispiel aus der Mechatronik gezeigt, wie sich solche Regelungen systematisch entwerfen und analysieren lassen.

Regelungen mit Stellanschlägen und Begrenzungen

■ Adolf Hermann Glattfelder

Steigende Anforderungen an die Regelgüte von Regelkreisen bedeuten unter anderem, dass bei sonst gleichen Bedingungen stärkere und schnellere Stellbewegungen auftreten. Damit wird zum einem das Stellorgan auch häufiger vorübergehend «übersteuert», das heisst, es werden die stets vorhandenen Sättigungen häufiger fühlbar. Zum anderen werden infolge der stärkeren Stellbewegungen oft Ausgangsgrössen der Regelstrecke ihre betrieblichen Grenzwerte überschreiten. Typische Beispiele sind zu grosse Temperaturdifferenzen beim raschen Aufwärmen dickwandiger Bauteile, Überhitzung der Wicklungen hochdynamischer Servoantriebe, zu hohe Geschwindigkeiten bzw. Drehzahlen bei Positionsregelungen usw. Es treten also bei der linearen Regelung, wie sie für kleine Auslenkungen ausgelegt wurde, im Betrieb bei grösseren Auslenkungen Beschränkungen der Bewegung auf. Man spricht bei der ersten obigen Gruppe von Input Constraints, bei der zweiten von Output Constraints (Bild 1).

Für den Entwurf solcher Regelungen gibt es im wesentlichen zwei Gruppen von Methoden. Die erste basiert auf der Theorie optimaler Systeme mit Beschränkungen und damit auf dem Maximumprinzip, zum Beispiel [1,2]. Die klassische Lösung führt auf eine optimale Steuerfolge $u^*(t)$, die dann in einem zweiten Schritt aus dem momentanen Bewegungszustand $\boldsymbol{x}(t)$ abzuleiten ist (sog. Syntheseaufgabe). Bei schnelligkeitsoptimalen Systemen entstehen so die Bang-Bang-Regler mit ihren erzeugenden Schaltkurven bzw. Schaltflächen im Zustandsraum. Im letzten Jahrzehnt wurden numerische Verfahren entwickelt, die auf der Online-Optimierung der Trajektorie unter Einbezug der Beschränkungen beruhen. Sie haben mittlerweile in der praktischen Anwendung unter der Bezeichnung Model Predictive Control eine breite Akzeptanz gefunden, zum Beispiel [3].

Bei der zweiten Gruppe von Entwurfsverfahren (z.B. [4] und dortige Referen-

Adresse des Autors
Prof. Dr. sc. techn. *Adolf Hermann Glattfelder*
Institut für Automatik, ETH Zentrum
8092 Zürich, Email glattfelder@aut.ee.ethz.ch

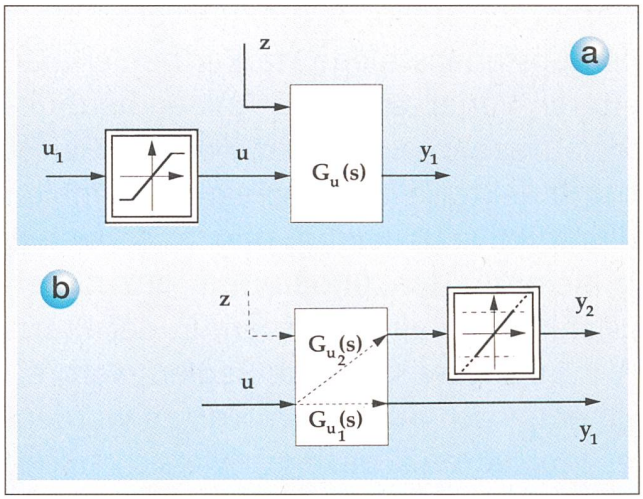

Bild 1 Eingrössen-Regelstrecken mit
a Stellanschlägen (Input Constraints)
b Begrenzungen weiterer Ausgangsgrössen (Output Constraints)

zen) legt man in einem ersten Schritt eine lineare Regelung aus. Sie soll für kleine Auslenkungen um den Auslegungs-Betriebszustand die geforderte Regelgüte erbringen. Dann benützt man diese Regelung einfach für grössere Auslenkungen weiter, trotz transientem Berühren der Anschläge. Dabei wird sich das Regelverhalten verschlechtern, unter Umständen bis zur Instabilität. Bei solch ungenügendem Regelverhalten ergänzt man in einem zweiten Schritt die lineare Regelstruktur mit intuitiven Zusätzen derart, dass man von Graceful Degradation sprechen kann.

Damit stellt sich die Frage, ob die End-Ruhelage der Regelung asymptotisch stabil ist, wie gross der Anziehungsbereich ist und auch wie gross der Verlust an Optimalität ausfällt. Im folgenden soll eine Einführung in diese zweite Gruppe von Verfahren gegeben werden. Zunächst werden die Aufgabenstellung herausgearbeitet und die Lösungskonzepte dargestellt. Dann wird der Entwurfsgang an einem Fallbeispiel aus der Mechatronik über drei Etappen hinweg gezeigt. Besondere Bedeutung wird dabei der nichtlinearen Stabilitätsanalyse zukommen.

Die Aufgabenstellung und die Lösungsansätze

Im Rahmen dieser Einführung beschränken wir uns auf Eingrössen-Regelungen. Wir gehen auf die Elemente Regelstrecke, Regler, Nichtlinearität und Auslenkungsmodell ein.

Die Regelstrecke

Wir gehen von einem linearen, zeitinvarianten Modell des Stellverhaltens aus, das für kleine Auslenkungen um den Auslegungs-Betriebspunkt der Regelstrecke gültig ist. Es kann demgemäss durch die Übertragungsfunktion $G_u(s)$ dargestellt werden. Dieses Modell wird im folgenden vereinfachend im ganzen ausgefahrenen Betriebsbereich weiterverwendet, auch wenn dieses gegen dessen Ränder hin ungenau sein sollte. Die Regelstrecke muss selbst nicht asymptotisch stabil sein; sie darf also einen oder mehrere Pole auf der Imaginärachse oder gar in der rechten Halbebene haben. Alles andere würde die praktische Anwendbarkeit des Entwurfsganges unbrauchbar einschränken.

Regler

Wie bereits erwähnt, wird ein linearer Regler eingesetzt, der im Hinblick auf den Schmalbereichsbetrieb um den Auslegungspunkt entworfen wird. Die Wahl der Entwurfsmethode ist frei; sie kann sich also ganz nach der Spezifikation des Schmalbereichsbetriebs richten. Dabei soll jedoch das Regelgütepotential dieser Schmalbereichsregelung voll in dem Sinne ausgeschöpft werden, dass zur Erzielung eines akzeptablen Weitbereichsverhaltens keine Apriori-Abstriche an der Regelgüte gemacht werden. Das Ergebnis dieses Entwurfs ist eine Regler-Übertragungsfunktion $G_{R1}(s)$. Dabei muss $G_{R1}(s)$ selbst nicht asymptotisch stabil sein und darf damit insbesondere auch Integralanteile aufweisen.

Das Auslenkungsmodell

Im Sinne der klassischen Regelungstechnik und der Anwendungsnähe gehen wir von Soll-Wert-Sprüngen aus. Im Gegensatz zu linearen Regelungen wird hier die Sprunghöhe $r_1(t)$ wichtig. Sie sei «klein», wenn $u_1(t)$ die Anschläge gerade nicht berührt, und «gross» entspreche dem im Betrieb maximal vorkommenden Wert. Damit ist auch gleich der erforderliche Anziehungsbereich festgelegt. Er ist also stets beschränkt, und ein Stabilitätsnachweis «im Ganzen» ist nicht zwingend nötig.

Bei der nichtlinearen Stabilitätstheorie (vgl. z.B. [5]) steht das Eigenverhalten hin zur Ruhelage im Nullpunkt im Vordergrund. Wir stellen diesen Zusammenhang her, indem wir mittels einer Koordinatentransformation die Endruhelage in den Nullpunkt schieben. Dann betrachten wir die Sprungantwort als von einer entsprechend verschobenen Anfangsruhelage ausgehend. Und diese Anfangsruhelage können wir uns erreicht denken durch das Aufbringen der entsprechenden Anfangsbedingungen im Zeitpunkt des Soll-Wert-Sprunges bei $t=0$. Somit wird anstelle der Führungssprungantwort das äquivalente Eigenverhalten betrachtet.

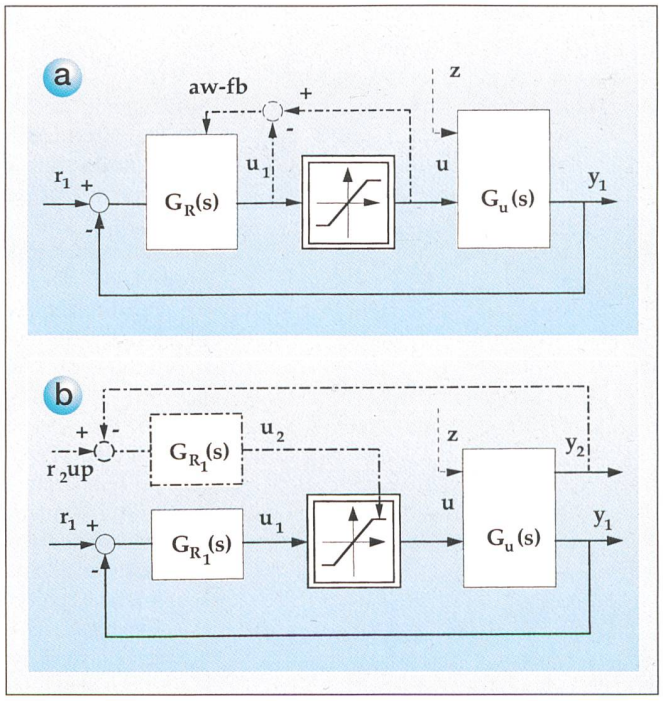

Bild 2 Regelkonzepte
a Anti-Wind-up Feedback (für Input Constraints)
b Override Control (für Output Constraints)

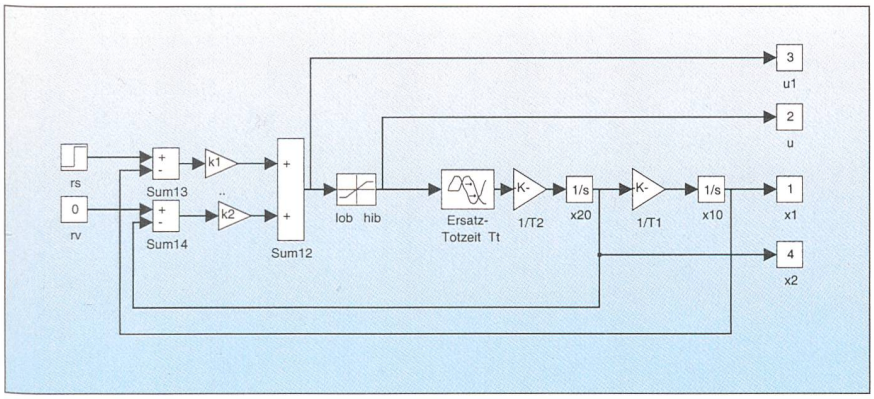

Bild 3 Die Positionsregelung (als Simulink-Modell)

Die Nichtlinearität

Für den Fall der Stellanschläge (Input Constraints) sind eine Reihe präzisierender Annahmen zu treffen (Bild 1a), die aus der Sicht der praktischen Anwendung wiederum möglichst wenig einschränkend sein dürfen. Wir gehen davon aus, dass Anschläge nur im Stellorgan auftreten und dass sonst nirgends weitere Nichtlinearitäten vorkommen. Weiter sind nur Hubanschläge und keine zusätzlichen Geschwindigkeitsanschläge vorhanden, so wie dies Bild 1a vorwegnimmt. Die Hubanschläge sind zeitinvariant. Die Steigung der Kennlinie dazwischen ist konstant gleich eins.

Weiter setzen wir voraus, dass das Stellsignal $u_1(t)$ in der Anfangs-Ruhelage (gemäss Abschnitt «Das Auslenkungsmodell») wie in der End-Ruhelage im Inneren des Arbeitsbereiches des Stellorganes liegt, und zwar in einem endlichen Abstand von den Anschlägen, derart dass eine Schmalbereichsregelung um diese beiden Betriebspunkte möglich ist. Mit anderen Worten sollen die Anschläge nur für grössere Auslenkungen und transient fühlbar werden.

Im Falle der Begrenzung (Output Constraints) beschränken wir uns auf den Fall einer Ausgangsgrösse (Bild 1b)

$$y_{2\,lo} \le y_2(t) \le y_{2\,hi}$$

mit den Betriebsgrenzwerten y_{2lo}; y_{2hi}. Diese sind zeitinvariant und so gelegt, dass y_2 sowohl für die Anfangs- wie für die End-Ruhelage im Inneren dieses Intervalles liegt und in endlichem Abstand von den Grenzwerten. Damit soll wiederum eine lineare Schmalbereichsregelung für hinreichend kleine Auslenkungen möglich sein. Weiter ist die Übertragung $u \rightarrow y_2$ linear und zeitinvariant, das heisst beschreibbar durch $G_{u2}(s)$. Schliesslich sind keine weiteren Nichtlinearitäten (Hysterese, Anschläge usw.) fühlbar.

Lösungsansätze

Für den Fall der Stellanschläge hat sich der sogenannte Anti-Wind-up-Ansatz (Bild 2a) durchgesetzt. Er ist eine Verallgemeinerung des Anti-Reset-Wind-up(ARW)-Zusatzes für den PI-Regler, der das Weglaufen des Integralanteiles bei Berühren des Stellanschlages verhindert und ihn zudem auf einen günstigen Anfangswert beim Übergang in den Schmalbereich setzt. Auf diesem Gebiet ist eine rege internationale Forschungstätigkeit zu beobachten (z.B. [4, 6, 7, 8, 9]).

In gleicher Weise stammt der Lösungsansatz für den Fall der Begrenzung (Bild 2b) ebenfalls aus der Praxis [10, 11, 12]. Man spricht von Begrenzungsregelung oder Override Control. Dabei wird in einem zweiten linearen Regler $G_{R2}(s)$ eine Stellgrösse $u_2(t)$ derart erzeugt, dass $y_2(t)$ dem «bedrohten» Grenzwert y_{2hi} entlangläuft. Weiter erfolgt das «Umschalten» zwischen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ «stossfrei» über einen Minimalwertauswähler oder (äquivalent) durch Positionierung des oberen Anschlages entsprechend $u_2(t)$. Begrenzungen nach unten y_{2lo} (in Bild 2b nicht gezeichnet) werden gleichermassen implementiert und laufen dann über einen Maximalwertauswähler [12].

Interessanterweise werden solche Schaltungen in der Praxis gerne benützt; die Forschung hat sich hingegen erst wenig damit beschäftigt.

Ein Fallbeispiel

Es geht um die Positionsregelung einer reibungsfrei gelagerten Punktmasse, bei der die Stellkraft sehr verzögerungsarm erzeugt werden soll und bei der schnelle, präzise Sensoren den Ort und die Geschwindigkeit erfassen. Zugrunde liegt eine Werkzeugmaschinenachse für die Hochgeschwindigkeitszerspanung [13, 14]. Als Antrieb dient ein Linearmotor, der eine Beschleunigungsfähigkeit bis 50 m/s² bereitstellt. Diese soll durch die Regelung auch wirklich «ausgefahren» werden. Gefordert wird eine dimensionslose Reglerverstärkung $k_1 \ge 500$ und eine überschwingfreie Führungssprungantwort für ein dimensionsbefreites $r_1 \le 0.10$.

Die Regelstrecke

Bild 3 zeigt das lineare Modell der Regelstrecke in dimensionsbefreiter Form

$$G(s) = \frac{1}{s^2 T_1 T_2} e^{-sT_t} \qquad (1a)$$

mit den Daten:

$$T_1 = \frac{s_R}{v_R} = \frac{0.10\ m}{2.0\,m/s} = 50 \cdot 10^{-3} s \qquad (1b)$$

und

$$T_2 = \frac{m_R v_R}{F_R} = \frac{200\,kg\ 2m/s}{8\,kN} = 50 \cdot 10^{-3} s \qquad (1c)$$

sowie

$$T_t = 0.5 \cdot 10^{-3} s \qquad (1d)$$

Mit T_t sind die restlichen Verzögerungen von Stellantrieb, Regelalgorithmus und Sensoren nach oben abgeschätzt.

Für hinreichend tiefe Frequenzen kann die Stellübertragungsfunktion der Regelstrecke rational gebrochen approximiert werden durch:

$$G_u(s) \approx \frac{1}{s^2 T_1 T_2} \qquad (2a)$$

Weiter gilt für den Arbeitsbereich bzw. die Anschläge des Stellorgans:

$$-100\% \le u(t) \le +100\%$$
$$-8\ kN \le F_u(t) \le +8kN \qquad (2b)$$

Der Regler

Bild 3 zeigt die gewählte Reglerstruktur; es handelt sich um einen klassischen P-Regler für die Position (auf einen I-Anteil wurde bewusst verzichtet, wie es bei solchen Antrieben gängige Praxis ist) mit einer P-Aufschaltung der Geschwindigkeit. Die Reglereinstellwerte werden mittels Polfestlegung bestimmt. Dazu wird die Approximation $G_u(s)$ nach Gleichung (2) verwendet.

Die charakteristische Gleichung des geschlossenen Kreises lautet

$$1 + G_{offen}(s) \approx 1 + G_u \cdot G_{R1}$$
$$= 1 + \frac{k_2 s T_1 + k_1}{s^2 T_1 T_2} = 0 \qquad (3a)$$

oder

$$0 = s^2 T_1 T_2 + s T_1 k_2 + k_1 \qquad (3b)$$

was zu vergleichen ist mit

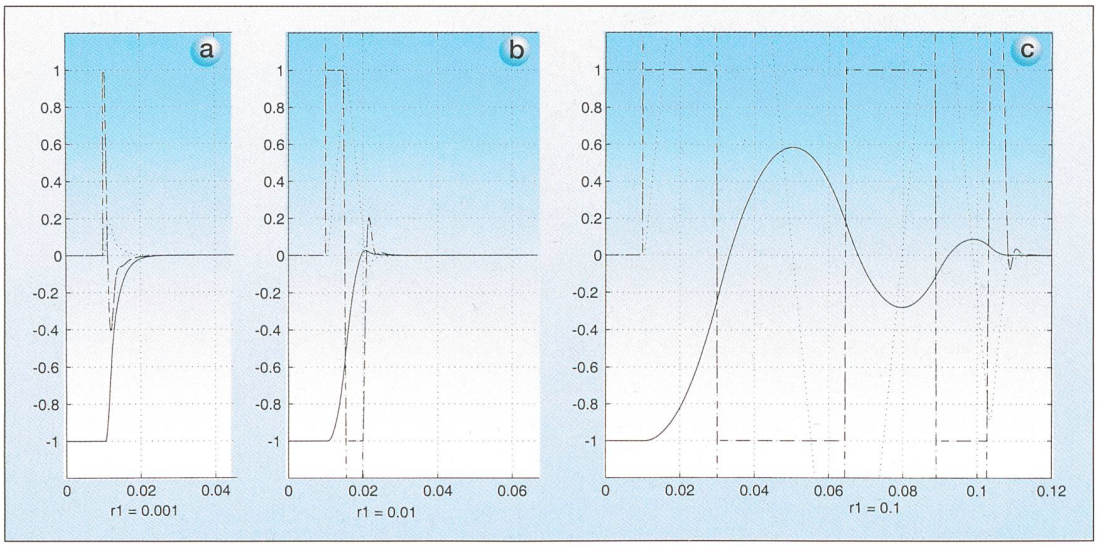

Bild 4 Führungssprungantworten des Regelkreises mit Stellanschlägen
mit $r_1 = 0.001$ (a), $r_1 = 0.01$ (b), $r_1 = 0.1$ (c)

$$s^2+s2\Omega+\Omega^2=0 \qquad (3c)$$

mit Ω als Bandbreite des geschlossenen Kreises.

Durch Koeffizientenvergleich ergibt sich

$$k_1=\Omega^2 T_1 T_2 \qquad (4a)$$

$$k_2=2\,\Omega\, T_2 \qquad (4b)$$

Dabei ist Ω in genügendem Abstand von der kritischen Kreisfrequenz ω_{T_t} infolge der Totzeit T_t zu wählen. Aus

$$\omega_{T_t} T_t = \frac{\pi}{2} \qquad (5a)$$

das heisst

$$\omega_{T_t} T_2 = 100\frac{\pi}{2} \qquad (5b)$$

ergibt sich bei einem Abstand Faktor 5:

$$\Omega T_2 = 20\frac{\pi}{2} \qquad (5c)$$

eingesetzt in die Bestimmungsgleichungen für die Reglereinstellwerte

$$k_1=(10\pi)^2 \cong 1000$$

und

$$k_2=2(10\pi)\cong 62.8 \qquad (5d)$$

Mit anderen Worten bleibt die Sprungantwort linear bis $r_1=0.001$, das heisst bis auf 1% der spezifizierten Sprunghöhe.

Die Führungssprungantworten

Bild 4 zeigt das transiente Verhalten für drei Führungssprunghöhen:

$r_1 = 0.001$ (a), $r_1 = 0.01$ (b), $r_1 = 0.1$ (c)

Im Schmalbereichfall (a) ergibt sich eine Ausregelzeit von rund 0,01 s. Im Fall (b) entspricht das Antwortverhalten nahezu dem zeitminimalen Übergang (in ca. 0,01 s) mit einem leichten Überschwingen. Dieses verschwindet, wenn die Soll-Wert-Sprunghöhe etwas verkleinert wird ($r_1=0.009$). Für Fall (c) ist das Verhalten völlig unbrauchbar.

Die Stabilitätsanalyse

Zu untersuchen ist die äquivalente Eigenbewegung hin zur Ruhelage im Nullpunkt: Ist sie nachweisbar asymptotisch stabil? Und ist der Anziehungsbereich hinreichend gross? Dazu haben sich die sogenannten Sektor-Kriterien (Kreis- und Popov-Kriterium) als zweckmässig erwiesen [5]. Wir bauen hier auf dem Kreistest auf, der etwas einfacher zu handhaben ist, aber auch etwas konservativere Aussagen als der Popov-Test macht.

Als erstes muss der Regelkreis in «kanonischer Form» vorliegen, was durch einfaches Umzeichnen geschieht, Bild 5a, mit

$$G(s)=-G_{1offen}(s)=-G_{R1}(s)\cdot G_{u1}(s) \qquad (6a)$$

und hier wie in Gleichung (3)

$$G(s)=\frac{k_2 sT_1+k_1}{s^2 T_1 T_2}e^{-sT_t} \approx \frac{k_2 sT_1+k_1}{s^2 T_1 T_2} \qquad (6b)$$

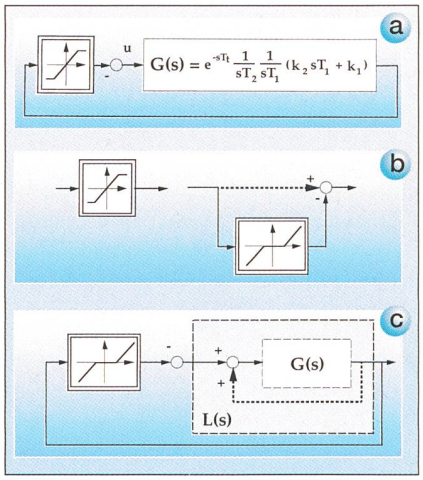

Bild 5 Zur Stabilitätsuntersuchung des Regelkreises mit Stellanschlägen

a die direkt entstehende kanonische Form (nicht geeignet)
b die Umformung der Nichtlinearität
c die neue, nunmehr geeignete kanonische Form

Weiter ist der Kreistest nur dann anwendbar, wenn der lineare Systemteil in dieser kanonischen Form asymptotisch stabil ist. Dies ist im allgemeinen nicht der Fall (vgl. Abschnitte «Die Regelstrecke» und «Der Regler»), so auch hier nicht. Man kann dies aber durch eine Lineartransformation erreichen. Dazu wird die Sättigungskennlinie ersetzt durch eine Parallelschaltung gemäss Bild 5b [12]. Entsprechend modifiziert sich der lineare Systemteil (Bild 5c):

$$L(s)=-\frac{G_{1\,offen}}{1+G_{1\,offen}}=-1.0+\frac{1}{1+G_{1\,offen}}$$

$$=-1.0+\frac{chP(G_{1\,offen})}{chP(G_{1\,geschl.})} \qquad (7)$$

wobei chP für das charakteristische (Nenner-)Polynom der entsprechenden Übertragung steht. Hier ist nun $L(s)$ aufgrund des Entwurfs der linearen Schmalbereichsregelung sicher voraussetzungskonform asymptotisch stabil.

In unserem Fallbeispiel wird:

$$L(s)=-1.0+\frac{s^2 T_1 T_2}{s^2 T_1 T_2+sT_1 k_2+k_1}$$

$$=-1.0+\frac{s^2}{(s+\Omega)^2} \qquad (8)$$

Der nichtlineare Systemteil (Bild 6) besteht aus der Totzonen-Kennlinie mit Flankensteigung eins ausserhalb der Anschlagswerte. Der aktive Teil dieser Kennlinie ist eingeschlossen zwischen der unteren Sektorgrenze mit Steigung a=0 also $(1/a)=\infty$. Damit degeneriert der Kreis, aufgespannt durch die Punkte $-(1/a)+j0$ und $-(1/b)+j0$, zur Vertikalen mit dem Fusspunkt bei $-(1/b)$.

Weiter berechnet sich die Steigung b der oberen Sektorgrenze gemäss Bild 6 zu:

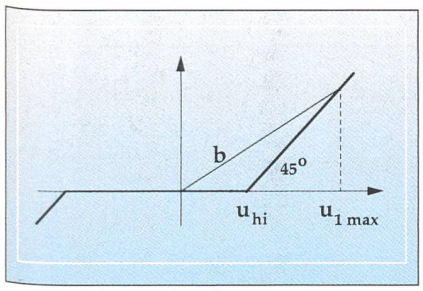

Bild 6 Die neue Sektor-Nichtlinearität

$$b = \frac{u_1 - u_{hi}}{u_1} \tag{9a}$$

und daraus

$$\Delta = \frac{1}{b} = \frac{u_1}{u_1 - u_{hi}} = 1.0 + \frac{u_{hi}}{u_1 - u_{hi}}$$
$$\approx 1.0 + \frac{u_{hi}}{u_1(+0)} = 1.0 + \frac{u_{hi}}{k_1 x_1(+0)} \tag{9b}$$
$$= 1.0 + \frac{u_{hi}}{\Omega^2 T_1 T_2 x_1(+0)}$$

Für den grafischen Stabilitätstest [5, 12] kann man weiter vereinfachend bei beiden Subsystemen den Summanden –1.0 weglassen, so dass:

$$L^-(s) = \frac{s^2}{(s+\Omega)^2} = \frac{(s/\Omega)^2}{((s/\Omega)+1)^2}$$

und (10)

$$\Delta^- = \frac{u_{hi}}{\Omega^2 T_1 T_2 x_1(+0)}$$

Man ersieht, dass in diesem speziellen Fall die Nyquist-Kontur (Ortskurve) $L^-(j\omega)$ unabhängig von der Wahl von Ω ist – es ändert sich nämlich nur die Frequenzkotierung – und dass sich die Test-Vertikale bei $-\Delta^-$ wie folgt verschiebt:

- nach links (in Richtung mehr Stabilitätsreserve) mit steigendem Arbeitsbereich des Stellorgans u_{hi}
- nach rechts (in Richtung weniger Stabilitätsreserve) mit steigender relativer Polverschiebung $(\Omega T_1)^2$ (d.h. steigender spezifizierter Regelgüte) und auch mit steigender Anfangsauslenkung $x(+0)$ (d.h. steigender Soll-Wert-Sprunghöhe r_1).

Bild 7 zeigt den grafischen Stabilitätstest, erzeugt mit einigen wenigen Zeilen Matlab. Für den Fall (a) in Bild 4 liegt $-\Delta^-$ bei $-\infty$. Es entsteht folglich sicher kein Schnittpunkt, und das Schmalbereichsverhalten ist asymptotisch stabil. Im Fall (b) treten knapp zwei Schnittpunkte auf. Deshalb ist asymptotische Stabilität nicht mehr nachweisbar. Reduziert man jedoch die Sprunghöhe auf r_1=0.009, dann ergeben sich gerade keine Schnittpunkte mehr, und das Eigenverhalten ist noch nachweisbar asymptotisch stabil.

Im Fall (c) hingegen reicht die Nyquist-Kontur weit nach links über die Testgerade hinaus. Auch hier ist kein Stabilitätsnachweis mehr möglich. Da der Test konservativ ist, kann nicht der Schluss gezogen werden, dass sich der geschlossene Kreis nun instabil verhalte, sondern es ist einfach «keine Aussage» mehr möglich. Erfahrungsgemäss ist jedoch in einer solchen geometrischen Situation mindestens mit viel zu schwacher Dämpfung zu rechnen, so wie in Bild 4c gezeigt.

Abhilfemassnahmen

Es gibt hierzu eine Vielzahl von Ansätzen. Im folgenden sind drei mögliche Varianten herausgegriffen.

Reduktion von Ω

Das Ziel dieser Massnahme ist, den nachweisbaren Anziehungsbereich auf den benötigten Betriebswert zu bringen. Dazu muss die Testgerade nach links geschoben werden, bis sich für den «Gross»-Fall $r_1 = 0.1$ gerade keine Schnittpunkte mehr ergeben. Als einziger freier Parameter in der Liste zu Gleichung (10) bleibt dann noch der Wert für Ω [7]; er müsste gemäss Gleichung (10) um einen Faktor von ungefähr $(10)^{1/2}$ reduziert werden. Die (hier nicht gezeigte) Simulation der Führungssprungantwort zeigt, dass das Regelverhalten (Bild 4c) jetzt dem akzeptablen Ablauf nach Bild 4b mit einer Ausregelzeit von etwa 0,04 s vergleichbar wird. Dadurch reduziert sich allerdings auch die Steifigkeit (Störunterdrückung) der Schmalbereichsregelung um einen Faktor von ungefähr 10. Diese Massnahme ist zwar sehr einfach, aber nicht konform mit den eingangs gemachten Vorgaben. Deshalb wird sie hier nicht weiterverfolgt.

Reduktion der transienten Auslenkungen

Der Stabilitätstest zeigt, dass die Anfangsphase der Führungssprungantwort massgebend ist, weil der Regelfehler dort am grössten ist. Mit anderen Worten überfordert das Anlegen des Sprunges bei weitem die Möglichkeit der Anlage, diesem Sprung zu folgen. Wenn man statt dessen einen «vernünftigeren» Soll-Wert-Verlauf $r(t)$ vorgibt, der sich weniger weit von der maximal realisierbaren Trajektorie $y(t)$ entfernt, dann wird auch der geforderte Anziehungsbereich nachweisbar. Allerdings ist die Erzeugung dieser Trajektorie etwas aufwendiger. Diese interessante Alternative (vgl. z.B. [15]) soll hier aus Platzgründen nicht weiterverfolgt werden.

Geschwindigkeitsbeschränkungen

Die Erscheinungen in Bild 4c lassen sich auch so interpretieren, dass in der ersten Beschleunigungsphase derart viel kinetische Energie aufgebaut wird, dass sie in der Bremsphase (wegen der Anschläge) nicht mehr zeitgerecht auf null abgebaut werden kann. Damit dies möglich bleibt, müsste die Annäherungsgeschwindigkeit an die Ruhelage auf den Wert begrenzt bleiben, wie er in Bild 4b (d.h. für r_1=0.01) erreicht wird.

Regelungen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen

Realisieren lässt sich das obige Konzept direkt als Begrenzungsregelung gemäss Bild 1b [16]. Als Begrenzte $y_2(t)$ wird die Geschwindigkeit $x_2(t)$ zurück-

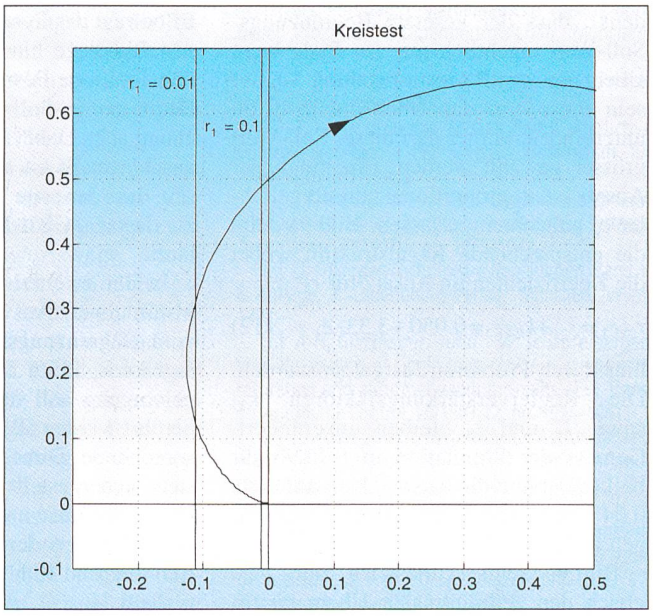

Bild 7 Der grafische Stabilitätstest für die drei Fälle (a), (b) und (c) in Bild 4

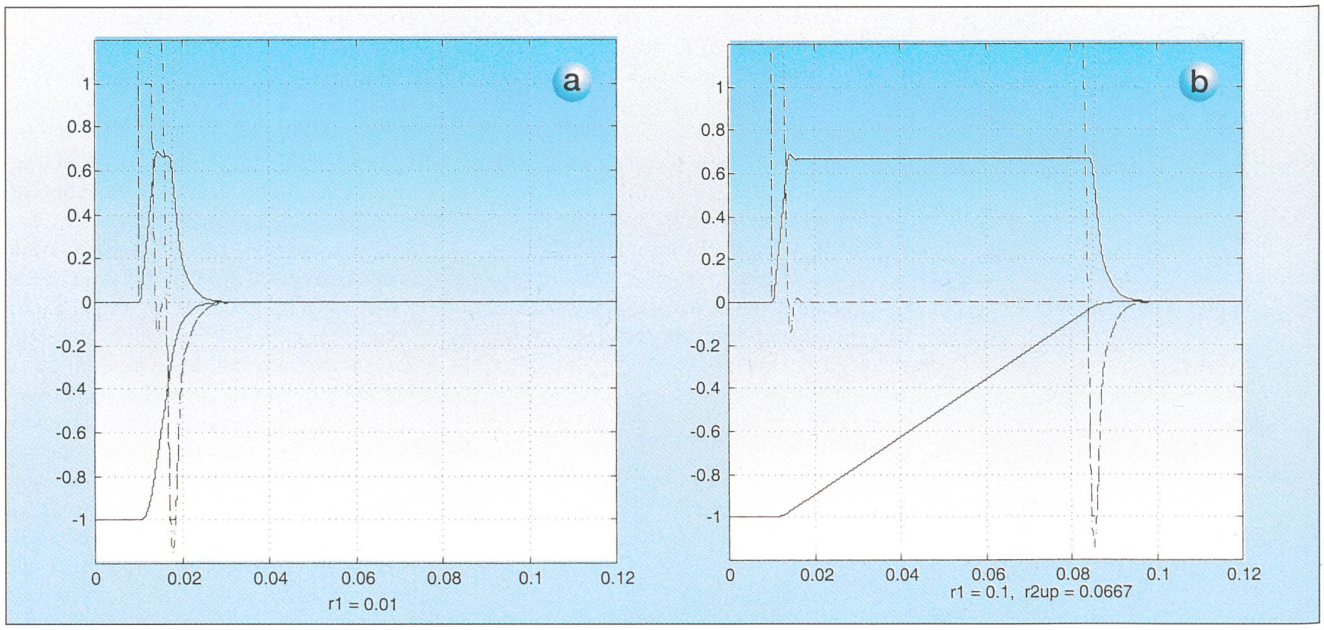

Bild 8 Die Führungssprungantworten mit Geschwindigkeitsbegrenzung
auf konstanten Soll-Wert, für $r_1 = 0.01$ (a) und $r_1 = 0.1$ (b)

geführt. Als Begrenzungs-Soll-Wert ist gemäss obiger Überlegung $r_2(t)=0{,}0667$ gesetzt. Da die Übertragungsfunktion $G_2(s)=Y_2(s)/U(s)$ erster Ordnung ist, wird ein P-Regler gewählt (auf den Integralanteil wird wiederum verzichtet), und dessen Verstärkungsfaktor k_{21} wird der Einfachheit halber gleich jenem der Geschwindigkeitsrückführung im Positionsregelkreis gesetzt, vergleiche Gleichung (4):

$$k_{21} = k_2 \approx 62.8 \qquad (11)$$

Die Simulation in Bild 8 zeigt, dass nun auch für den Fall (c) das Überschwingen verschwindet. Die Ausregelzeit ist mit etwa 0,08 s noch recht gross. Man kann sie verkürzen, wenn man bedenkt, dass der gesetzte Begrenzungs-Soll-Wert eigentlich nur am Ende beim Übergang zur Positionsregelung so tief sein muss, um das Überschwingen zu unterbinden. Vorher darf dieser Soll-Wert grösser gewählt werden. Ein möglicher Ansatz ist, r_2 proportional zum Regelfehler e_1 zunehmen zu lassen. Bild 9a zeigt die entsprechende Regelstruktur, wobei die Koeffizienten im Ansatz für r_2

$$r_2(e_1)=r_{20}+k_R \cdot e_1=0.050+3.33 \cdot e_1 \qquad (12)$$

hier durch Probieren festgelegt wurden. Die Reglerverstärkungsfaktoren k_{21} sowie k_1 und k_2 bleiben unverändert. Gemäss der Simulation in Bild 9b für Fall (c) ist nun die Ausregelzeit auf etwa 0,04 s halbiert. Es tritt kein Überschwingen auf.

Bild 9c zeigt schliesslich zum Vergleich den zeitminimalen Übergang (in ca. 0,032 s), wie er mit dem System in Bild 9a bei $k_R=4.82$ genau genug erreicht werden könnte.

Der Vorteil der Begrenzungsregelung gegenüber dieser zeitminimalen Steuerung ist, dass sie deutlich weniger empfindlich auf Parameterunsicherheiten reagiert, denn gemäss Bild 9b liegt $u(t)$ auf der Bremstrajektorie innerhalb der Anschläge, so dass noch Reserve für ein allenfalls benötigtes stärkeres Bremsen vorhanden ist.

Auch für die Begrenzungsregelungen lässt sich die *nichtlineare Stabilitätsanalyse* mit derselben Methodik durchführen [16]. Man denkt sich dazu den Transienten in Bild 9b in zwei Phasen zerlegt. In der ersten ist der Begrenzungskreis aktiv. Er bewegt das System aus der verschobenen Ruhelage hin auf die geschwindigkeitslimitierte Bewegung in der Nähe des Begrenzungs-Soll-Wertes gemäss Gleichung (12). Dabei stösst $u_2(t)$ an die Stellanschläge. Es ist also zuerst nachzuweisen, dass der erste Teil der Bewegung hin zu dieser «Gleit-Ruhelage» stabil verläuft.

In der zweiten Phase transferiert der Minimalwert-Auswähler die Regelung vom Begrenzungskreis auf den Hauptregelkreis. Beim anschliessenden Ausregelvorgang soll der Stellanschlag nicht berührt werden (Bild 9b), was durch entsprechende Dimensionierung von $r_2(t)$ stets sichergestellt werden kann. Mithin ist als zweites nachzuweisen, dass der Übergang von der Gleit-Ruhelage längs $r_2(t)$ zur End-Ruhelage bei $r_1(t)=0$ stabil verläuft.

Für die erste Phase ist zu betrachten:

$$L_2^-(s)=\frac{1}{1+G_{2\,offen}}=\frac{s^2T_1T_2}{s^2T_1T_2+sT_1k_{21}+k_Rk_{21}} \qquad (13a)$$

und

$$\Delta_2^- = \frac{u_{hi}}{u_2(+0)-u_{hi}} = \frac{u_{hi}}{k_{21}r_2(+0)-u_{hi}} = \frac{u_{hi}}{k_{21}\left(r_{20}+k_R\left|x_1(+0)\right|\right)-u_{hi}} \qquad (13b)$$

Bild 10a zeigt den grafischen Stabilitätstest. Für $k_R=0$ wird der nachweisbare Anziehungsbereich unendlich gross. Er schrumpft mit steigendem k_R. Für die hier gewählten Parameterwerte r_{20} und k_R kann die Stabilität bis $r_1(+0)=0.1$ nachgewiesen werden, jedoch nicht mehr für «übergrosse» Auslenkungen $r_1(+0)=1.0$.

Für die zweite Phase des Transienten muss der Stabilitätstest mit dem Minimalwert-Auswähler verwendet werden [12]. Allgemein ist dann zu betrachten:

$$L_1^- = \frac{1+G_{2\,offen}}{1+G_{1\,offen}} = \frac{chP(G_{2\,geschl.})}{chP(G_{2\,offen})}\,\frac{chP(G_{1\,offen})}{chP(G_{1\,geschl.})} \qquad (14)$$

mit $y_2'=y_2-k_Ry_1$ (15)

das heisst

$$1+G_{2\,offen}=1+k_{21}\left(\frac{1}{sT_2}-k_R\frac{1}{s^2T_1T_2}\right) = \frac{s^2T_1T_2+sT_1k_{21}-k_Rk_{21}}{s^2T_1T_2} \qquad (16a)$$

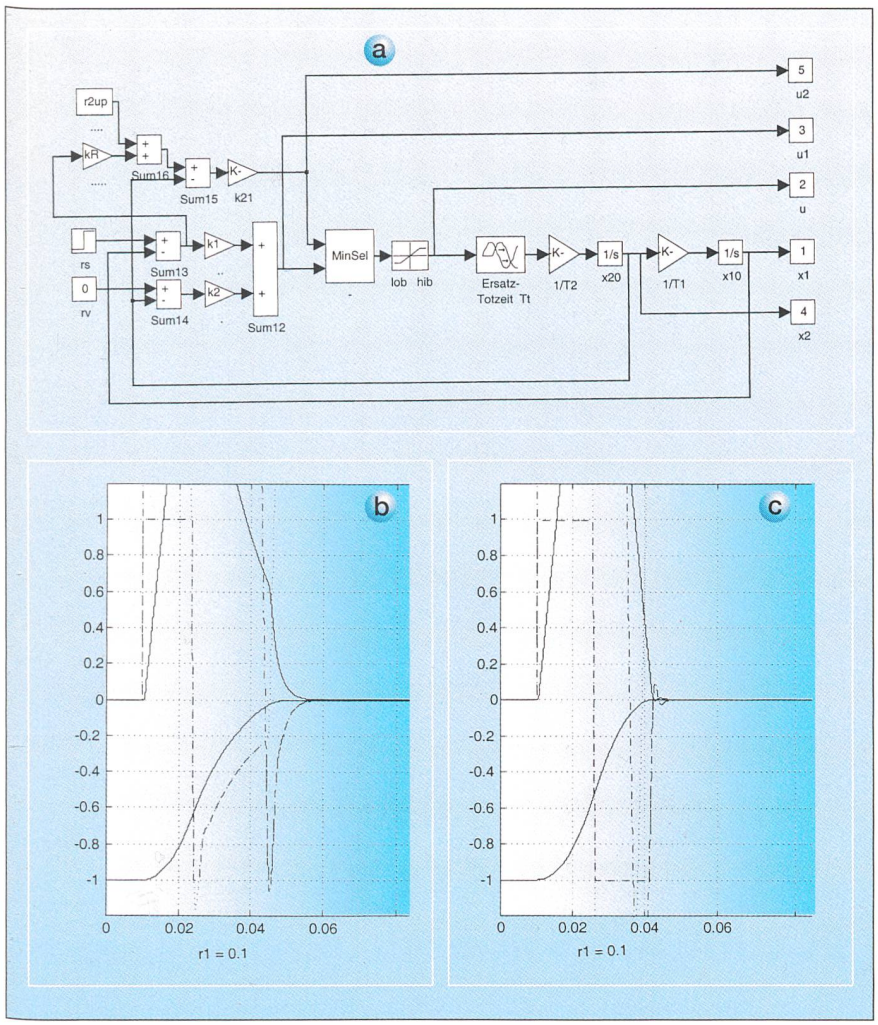

Bild 9 Das Regelsystem mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf einen Soll-Wert, der mit steigendem Positionsfehler linear zunimmt

a die Struktur (als Simulink-Modell)
b «abgestimmtes» Führungsverhalten
c praktisch zeitoptimales Verhalten zum Quervergleich

schliesslich

$$L_1^- = \frac{1+G_{2\,offen}}{1+G_{1\,offen}}$$

$$= \frac{(s/\Omega)^2 + 2(s/\Omega) - (k_R k_{21}/k_1)}{((s/\Omega)+1)^2} \qquad (16b)$$

und

$$\Delta_2^- = \frac{k_{21} r_{20}}{u_1(+0) + u_2(+0) - k_{21} r_{20}} \qquad (16c)$$

wobei einzusetzen ist

$$u_1(+0) = k_1 x_1(+0) - k_2 x_2(+0) \text{ und } u_2(+0) := 0 \qquad (17)$$

Der grafische Stabilitätstest Bild 10b weist nach, dass diese zweite Phase ebenfalls stabil verläuft, und zwar bis zur übergrossen Auslenkung $r_1(+0) = 1.0$.

Zusammenfassend ist damit das Verhalten im ganzen spezifizierten Betriebsbereich nachweisbar asymptotisch stabil.

Zusammenfassung

Ausgangspunkt war die Feststellung, dass steigende Anforderungen an die Regelgüte mit den neueren Methoden des Entwurfs linearer Regelungen zwar effizient erfüllt werden können, dass aber dann auch stärkere Stellbewegungen auftreten, welche häufiger das Stellorgan mit seinen Anschlägen übersteuern. Zur Meisterung dieser Situation gibt es zwei unterschiedliche Entwurfswege, einen deduktiven (Lösung des Optimierungsproblems) und einen induktiven (Zwei-Schritt-Entwurf) mittels Anti-Wind-up- bzw. Override-Reglern. Er kann auch als eine Entwurfsmethode der sukzessiven Beseitigung von Engpässen, bzw. der schrittweisen Verbesserung, bezeichnet werden.

Der Nachteil dieses zweiten Weges ist eine Einbusse an Optimalität. Die Vorteile sind die Einfachheit – die Funktionsweise lässt sich vergleichsweise leicht erklären – und die grössere Unempfindlichkeit des Regelverlaufs gegenüber kleinen Störauslenkungen, Rauschen, nichtmodellierter Dynamik und Abweichungen der Regelstreckenparameter (Grund: keine reine Steuerung bis an die Stellanschläge, sondern geschlossene Regelkreise).

Diese Methode bewegt sich – wie das Beispiel zeigt – stets im Spannungsfeld zwischen Strukturmodifikationen, transientem Verhalten und nichtlinearen Stabilitätseigenschaften. Eine zentrale Rolle spielen das Experiment, die Simulation und ebenso die «guten Ideen» zur Verbesserung des Verhaltens. Der Beitrag der Theorie, der Analyse, ist beispielsweise, die Äquivalenz unterschiedlicher Strukturen zu untersuchen, für klare Versuchsbedingungen zu sorgen, die erst Quervergleiche ermöglichen, und das Herausarbeiten der relevanten Parameterkombinationen, um so Modifikationen bzw. Versuchsreihen gezielter planen zu können.

Die Methode wurde hier an einem konkreten Fallbeispiel zweiter Ordnung aus der Mechatronik dargestellt. Sie lässt sich allgemein für verschiedenste Prozesse auch höherer Ordnung anwenden (z.B. [13, 17]), dann auch für Regelungen mit Integralanteil, für den «stossfreien» Hand/Automatik-Transfer, für abgetastete Ausführungen, für Systeme mit Anschlägen sowohl auf dem Stellhub wie auch auf der Stellgeschwindigkeit, Mehrgrössen-Regelungen und vieles mehr. Interessant ist auch die Klärung des genaueren Zusammenhanges mit dem deduktiven Ansatz im Sinne des MPC.

Literatur

[1] *L.S. Pontrjagin:* Mathematische Theorie optimaler Prozesse. R.-Oldenbourg-Verlag, München, Wien, 1964.

[2] *R. Bellmann:* Dynamic Programming. Princeton University Press, 1957.

[3] *T.J.J. v.d. Boom:* Model Based Predictive Control. Lern-Modul der Schweiz. Gesellschaft für Automatik, 1997, Nr. 6.

[4] *J.K. Park und C.H. Choi:* Dynamical anti-reset windup method for discrete-time saturating systems. Automatica, 33(1997)6, pp. 1055–1072.

[5] *O. Föllinger:* Nichtlineare Regelungen. Band 1, 8. Auflage, R.-Oldenbourg-Verlag, München, Wien, 1998.

[6] *A.H. Glattfelder und W. Schaufelberger:* Stability analysis of single loop control systems with saturation and anti-reset-windup circuits. IEEE Trans. on Automatic Control. 28(1983)12, pp. 1074–1081.

[7] *P. Hippe und Chr. Wurmthaler:* Controller and plant windup prevention in MIMO loops with input saturation. Proc. Europ. Control Conf. (ECC) '97, Brussels, vol. 6, part B, FR-A G2, (493).

[8] *M.V. Kothare und M. Morari:* Stability analysis of anti-windup control systems: a review and some generalizations. Proc. Europ. Control Conf. (ECC) '97, Brussels, vol. 6, part B, FR-A G7, (558).

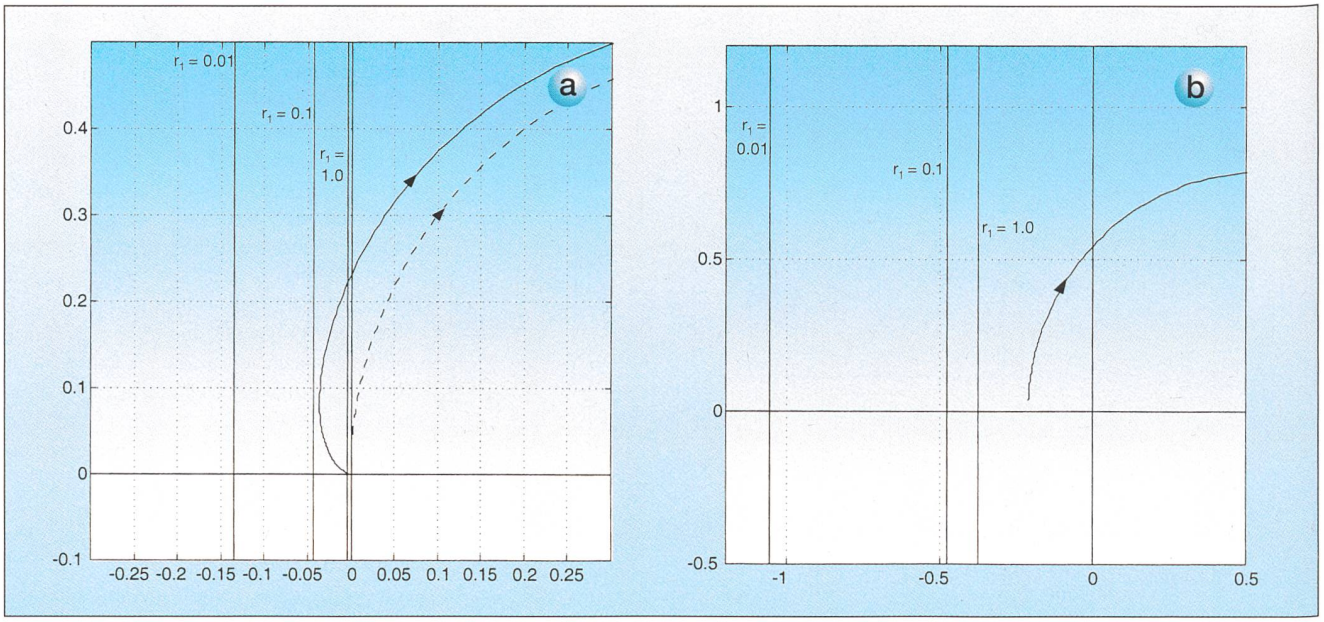

Bild 10 Grafischer Stabilitätstest für das System Bild 9b

a für die erste Phase hin zur Gleit-Ruhelage b für die zweite Phase zwischen Gleit- und End-Ruhelage

[9] *A. R. Teel und N. Kapoor:* The L_2 anti-windup problem: its definition and solution. Proc. Europ. Control Conf. (ECC) '97, Brussels, vol. 6, part B, FR-A G3, (494).

[10] *P.S. Buckley:* Designing override and feed-forward controls. Control Enginnering, 18(1971)8, pp. 48–51 and 18(1971)9, pp. 82–85.

[11] *A. H. Glattfelder:* Regelungssysteme mit Begrenzungen. R.-Oldenbourg-Verlag, München, Wien, 1974.

[12] *A. H. Glattfelder und W. Schaufelberger:* Stability of discrete override and cascade-limiter single loop control systems. IEEE Trans. on Automatic Control, 33(1988)6, pp. 532–540.

[13] *O. Zirn:* Beitrag zum Entwurf von Vorschubantrieben für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Diss. ETH Zürich, Nr. 11676, 1996.

[14] *O. Zirn und A. H. Glattfelder:* Stability analysis for the design of fast axis feed drives. Proc. Europ. Control Conf. (ECC) '97, Brussels, vol. 6, part B, FR-A G1, (492).

[15] *A. H. Glattfelder und W. Schaufelberger:* Stability of trajectory generator control systems with anti-windup. Proc. CESA '96 Multiconference, Symp. on Control, Optimization and Supervision, July '96, Lille, Vol. 2, pp. 1020–1025.

[16] *A. H. Glattfelder, Chr. Eck, W. Schaufelberger:* Stability analysis of two different anti-windup systems. Proc. of 3rd European Control Conference, Sept. 95, Rom, Vol. 2, pp. 1492–1496.

[17] *M. Derighetti, Chr. Frei, A. H. Glattfelder, A. M. Zbinden:* Modellbasierte Regelung in der Anästhesie. AT-Automatisierungstechnik, 46(1998)11 (im Druck).

Systèmes de régulation avec saturations de commande et contraintes de sortie

Une performance plus poussée des systèmes de régulation est liée à une augmentation des déflections de la variable de commande. Par conséquence les saturations de l'organe de commande se feront sentir plus frequemment aussi bien que d'autres variables du processus atteindront leurs limites opérationnelles plus souvent, c'est-à-dire des contraintes d'entrée et de sortie doivent être inclus dans le modèle du processus. De ce fait la synthèse du régulateur est un problème non-linéaire. Il y a deux méthodes générales de solution. La première consiste à appliquer la commande optimale en utilisant le principe de Pontrjagine ou la méthode de commande prédictive basée sur modèle. La deuxième approche est d'abord la synthèse d'un régulateur linéaire pour les déflections restraintes, et ensuite d'une augmentation par des rétroactions nonlinéaires simples afin d'améliorer la performance pour les plus amples déflections. Ces structures dites d'anti-wind-up et d'override control sont souvent utilisées en pratique, mais leur conception reste intuitive et empirique. L'article ci-dessus démontre la conception systématique d'une boucle de réglage de position. Le développement de méthodes plus systématiques d'analyse et de synthèse est visé par un programme de recherche à l'Institut d'Automatique à l'EPF Zurich.