

Aus dem Psychologischen Institut der Universität Regensburg

Die kognitive Regelung dynamischer Systeme und der Einfluß analoger versus digitaler Informationsdarbietung

Von R. Hübner

Mit 2 Abbildungen

Modelle kognitiven Regelverhaltens

Durch die fortschreitende Technisierung der Umwelt des Menschen werden in vielen Bereichen manuelle Regelaufgaben durch kognitive Regel- bzw. Kontrollaufgaben ersetzt. Entsprechend besteht ein zunehmender Bedarf an Modellen, die das Verhalten des Menschen speziell bei solchen Aufgaben beschreiben. Allgemein können solche Situationen charakterisiert werden durch einen Regelkreis. Ein zu steuerndes System überträgt dem Regler bestimmte Systemgrößen, der sie bestimmten Vorgaben entsprechend zu Stellgrößen verarbeitet. Diese gehen dann an das System zurück und beeinflussen es in eine möglichst den Vorgaben entsprechende Richtung. Die Art und Güte der Beeinflussung kann dabei sehr unterschiedlich sein und hängt entscheidend von den Qualitäten des Reglers ab.

Auch im Rahmen psychologischer Forschung wird das kognitive Regelverhalten des Menschen untersucht. In diesem Zusammenhang spricht man auch von „komplexem Problemlösen“ oder der „Steuerung dynamischer Systeme“ (für eine Übersicht siehe Funke, 1985). Dabei werden keine realen Systeme verwendet, sondern lediglich mathematische Modelle, die auf einem Rechner simuliert werden. Dies bietet die Möglichkeit, in Realzeit langwierige Systemverläufe innerhalb kurzer Zeit im Labor nachzuvollziehen. Die meisten Untersuchungen in diesem Bereich zeichnen sich dadurch aus, daß sie quantitative dynamische Systeme verwenden, deren Verlauf in der Zeit diskret ist.

Bis jetzt gibt es nur wenig Modellansätze, die kognitives Regelverhalten zu beschreiben versuchen. Hübner (1987) hat versucht, das klassische Konzept des *Problemraumes*, wie es von Klix (1972) und Newell und Simon (1972) erarbeitet wurde, auf den Bereich der kognitiven Steuerung dynamischer Systeme zu übertragen. Als dynamisches System wurde das Modell eines sogenannten *Gasabsorbers* verwendet (vgl. Lapidus und Luus, 1967). Da dieses System auch in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, soll es hier genauer beschrieben werden:

Ein Gasabsorber ist eine chemische Anlage, in der ein Gas in einer Flüssigkeit gelöst wird. In dem verwendeten Modell läuft eine Lösungsflüssigkeit von oben durch drei siebartige Plattformen hindurch und wird dabei von einem entgegenfließenden Luft/Gasgemisch durchströmt. Dabei wird ein Teil des Gases in der Flüssigkeit gelöst (für eine detailliertere Beschreibung s. Hübner, 1987). Das mathematische Modell ist ein Differenzgleichungssystem der Art:

$$x(k+1) = Ax(k) + bu(k)$$

Aus dem Psychologischen Institut der Universität Regensburg

Die kognitive Regelung dynamischer Systeme und der Einfluß analoger versus digitaler Informationsdarbietung

Von R. Hübner

Mit 2 Abbildungen

Modelle kognitiven Regelverhaltens

Durch die fortschreitende Technisierung der Umwelt des Menschen werden in vielen Bereichen manuelle Regelaufgaben durch kognitive Regel- bzw. Kontrollaufgaben ersetzt. Entsprechend besteht ein zunehmender Bedarf an Modellen, die das Verhalten des Menschen speziell bei solchen Aufgaben beschreiben. Allgemein können solche Situationen charakterisiert werden durch einen Regelkreis. Ein zu steuerndes System überträgt dem Regler bestimmte Systemgrößen, der sie bestimmten Vorgaben entsprechend zu Stellgrößen verarbeitet. Diese gehen dann an das System zurück und beeinflussen es in eine möglichst den Vorgaben entsprechende Richtung. Die Art und Güte der Beeinflussung kann dabei sehr unterschiedlich sein und hängt entscheidend von den Qualitäten des Reglers ab.

Auch im Rahmen psychologischer Forschung wird das kognitive Regelverhalten des Menschen untersucht. In diesem Zusammenhang spricht man auch von „komplexem Problemlösen“ oder der „Steuerung dynamischer Systeme“ (für eine Übersicht siehe Funke, 1985). Dabei werden keine realen Systeme verwendet, sondern lediglich mathematische Modelle, die auf einem Rechner simuliert werden. Dies bietet die Möglichkeit, in Realzeit langwierige Systemverläufe innerhalb kurzer Zeit im Labor nachzuvollziehen. Die meisten Untersuchungen in diesem Bereich zeichnen sich dadurch aus, daß sie quantitative dynamische Systeme verwenden, deren Verlauf in der Zeit diskret ist.

Bis jetzt gibt es nur wenig Modellansätze, die kognitives Regelverhalten zu beschreiben versuchen. Hübner (1987) hat versucht, das klassische Konzept des *Problemraumes*, wie es von Klix (1972) und Newell und Simon (1972) erarbeitet wurde, auf den Bereich der kognitiven Steuerung dynamischer Systeme zu übertragen. Als dynamisches System wurde das Modell eines sogenannten *Gasabsorbers* verwendet (vgl. Lapidus und Luus, 1967). Da dieses System auch in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, soll es hier genauer beschrieben werden:

Ein Gasabsorber ist eine chemische Anlage, in der ein Gas in einer Flüssigkeit gelöst wird. In dem verwendeten Modell läuft eine Lösungsflüssigkeit von oben durch drei siebartige Plattformen hindurch und wird dabei von einem entgegenfließenden Luft/Gasgemisch durchströmt. Dabei wird ein Teil des Gases in der Flüssigkeit gelöst (für eine detailliertere Beschreibung s. Hübner, 1987). Das mathematische Modell ist ein Differenzgleichungssystem der Art:

$$x(k+1) = Ax(k) + bu'(k)$$

Aus dem Psychologischen Institut der Universität Regensburg

Die kognitive Regelung dynamischer Systeme und der Einfluß analoger versus digitaler Informationsdarbietung

Von R. Hübner

Mit 2 Abbildungen

Modelle kognitiven Regelverhaltens

Durch die fortschreitende Technisierung der Umwelt des Menschen werden in vielen Bereichen manuelle Regelaufgaben durch kognitive Regel- bzw. Kontrollaufgaben ersetzt. Entsprechend besteht ein zunehmender Bedarf an Modellen, die das Verhalten des Menschen speziell bei solchen Aufgaben beschreiben. Allgemein können solche Situationen charakterisiert werden durch einen Regelkreis. Ein zu steuerndes System überträgt dem Regler bestimmte Systemgrößen, der sie bestimmten Vorgaben entsprechend zu Stellgrößen verarbeitet. Diese gehen dann an das System zurück und beeinflussen es in eine möglichst den Vorgaben entsprechende Richtung. Die Art und Güte der Beeinflussung kann dabei sehr unterschiedlich sein und hängt entscheidend von den Qualitäten des Reglers ab.

Auch im Rahmen psychologischer Forschung wird das kognitive Regelverhalten des Menschen untersucht. In diesem Zusammenhang spricht man auch von „komplexem Problemlösen“ oder der „Steuerung dynamischer Systeme“ (für eine Übersicht siehe Funke, 1985). Dabei werden keine realen Systeme verwendet, sondern lediglich mathematische Modelle, die auf einem Rechner simuliert werden. Dies bietet die Möglichkeit, in Realzeit langwierige Systemverläufe innerhalb kurzer Zeit im Labor nachzuvollziehen. Die meisten Untersuchungen in diesem Bereich zeichnen sich dadurch aus, daß sie quantitative dynamische Systeme verwenden, deren Verlauf in der Zeit diskret ist.

Bis jetzt gibt es nur wenig Modellansätze, die kognitives Regelverhalten zu beschreiben versuchen. Hübner (1987) hat versucht, das klassische Konzept des *Problemraumes*, wie es von Klix (1972) und Newell und Simon (1972) erarbeitet wurde, auf den Bereich der kognitiven Steuerung dynamischer Systeme zu übertragen. Als dynamisches System wurde das Modell eines sogenannten *Gasabsorbers* verwendet (vgl. Lapidus und Luus, 1967). Da dieses System auch in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, soll es hier genauer beschrieben werden:

Ein Gasabsorber ist eine chemische Anlage, in der ein Gas in einer Flüssigkeit gelöst wird. In dem verwendeten Modell läuft eine Lösungsflüssigkeit von oben durch drei siebartige Plattformen hindurch und wird dabei von einem entgegenfließenden Luft/Gasgemisch durchströmt. Dabei wird ein Teil des Gases in der Flüssigkeit gelöst (für eine detailliertere Beschreibung s. Hübner, 1987). Das mathematische Modell ist ein Differenzgleichungssystem der Art:

$$x(k+1) = Ax(k) + bu'(k)$$

Hierbei ist:

$x(k) = [x_1 \ x_2 \ x_3]'$ der Zustandsvektor zum Zeitpunkt k ,
 $u(k)$ die Inputgröße (hier ein Skalar) zum Zeitpunkt k ,
 A die 3×3 Systemmatrix und
 b die 3×1 Inputmatrix (hier ein Vektor).

Jede der drei Komponenten des Zustandsvektors x beschreibt das Verhältnis von Gas zu Lösungsflüssigkeit auf den einzelnen Plattformen. Die Inputvariable u beschreibt das Verhältnis von Gas zu Luft des Luft/Gasgemisches bei der Gaszufuhr. Speziell wurde als Modell des Gasabsorbers folgendes Differenzgleichungssystem verwendet:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 0,365 & 0,219 & 0,066 \\ 0,186 & 0,421 & 0,219 \\ 0,048 & 0,186 & 0,365 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0,019 \\ 0,100 \\ 0,389 \end{bmatrix} u(k)$$

In dem Experiment von Hübner (1987) bestand das Problem für die Probanden darin, durch gezielte Veränderung der Inputvariablen den Zustand des Gasabsorbers zu einem vorgegebenen Sollzustand zu regeln, wobei die Abweichungen aller Zustandsvariablen von den Sollwerten unmittelbar beobachtbar waren. Als Optimierungskriterium wurde vorgegeben, den Sollzustand mit einer minimalen Anzahl von Schritten, d. h. Inputeingaben, zu erreichen. Die Erfüllung dieses Kriteriums entspricht einer zeitoptimalen Regelung. Als Ergebnis zeigte sich, daß die Probanden nicht in der Lage waren, zeitoptimal zu regeln bzw. die zeitoptimale Regelung aufgrund der Beobachtung der Abweichungen der Systemzustände zu erlernen. Der Grund dafür war, daß ein quadratisches Optimierungskriterium (siehe unten) verwendet und nicht aufgegeben wurde.

Obwohl sich diese Ergebnisse gut mit dem Problemraumkonzept beschreiben lassen, wie Hübner (1987) gezeigt hat, wird durch diese Ergebnisse aber auch ein Zusammenhang mit bereits aus dem Bereich des manuellen Tracking bekannten systemtheoretischen Modellen deutlich. Dort wird auch das quadratische Optimierungskriterium verwendet.

Im Bereich der kognitiven Regelung dynamischer Systeme gibt es inzwischen einige interessante Ansätze, in denen versucht wird, systemtheoretische Konzepte zu verwenden (vgl. z. B. Thalmaier, 1979; van Bussel, van den Hof und Hajdasinski 1985). Hier soll gezeigt werden, wie optimaltheoretische Regelmodelle übertragen werden können, wie sie aus dem Bereich des manuellen Tracking bekannt sind.

Bei Modellen des manuellen Tracking werden zwei Modellierungsansätze unterschieden, zum einen den älteren *quasilinearen* Ansatz und zum anderen den neueren *optimaltheoretischen* Ansatz (vgl. Johanssen, Boller, Donges und Stein, 1977). Beim quasilinearen Ansatz werden die manuellen Regelleistungen des Menschen mithilfe linearer Übertragungsfunktionen zu approximieren versucht. Eine hinzuaddierte stochastische Restgröße repräsentiert die mit dem jeweiligen Modell nicht erklärbaren Anteile.

Beim optimaltheoretischen Ansatz dienen auch lineare Modelle zur Beschreibung manuellen Regelverhaltens, allerdings solche, die sich aus den Ergebnissen der optimalen Regelungs- und Schätztheorie aus dem Bereich der linearen Prozesse ergeben. Allgemein wird bei der Modellierung des manuellen Regelverhaltens des Menschen davon ausgegangen, daß er die Fähigkeit zur Selbsteinstellung seiner Struktur und Parameter besitzt

mit dem Ziel, die Übertragungseigenschaften des Regelkreises, in dem er Regler ist, zu optimieren. Als Optimierungskriterium wird bei dem quasilinearen Ansatz die Minimierung des mittleren Fehlerquadrates angenommen (Marienfeld, 1970). Beim optimaltheoretischen Ansatz wird folgendes verallgemeinertes Optimierungskriterium angenommen:

$$J[x(0), M] = \sum_{k=1}^M [x'(k) Q x(k) + u'(k-1) R u(k-1)]$$

M gibt die Anzahl der zur Verfügung stehenden Regelschritte an. Q und R sind angemessen gewählte positiv semi-definite oder definit symmetrische Matrizen. Sind Q und R beispielsweise Einheitsmatrizen, dann ergibt sich als Kriterium die ungewichtete Quadratsumme der Terme. Die Minimierung des mittleren Fehlerquadrates ist hier als Spezialfall bei $R=0$ und Q =Einheitsmatrix enthalten.

Die entsprechenden Inputwerte zu den Regelungen lassen sich rekursiv berechnen (vgl. z. B. Lapidus und Luus, 1967):

$$\begin{aligned} u(k) &= -K_{M-k} x(k) \\ K_{M-k} &= [B'(Q + J_{M-k-1})B + R]^{-1} B'(Q + J_{M-k-1})A \\ J_{M-k} &= A'(Q + J_{M-k-1})(A - BK_{M-k}) \end{aligned}$$

mit der Anfangsbedingung $J_0=0$.

Für den Fall $M=\infty$ ergibt sich eine stationäre Lösung mit K =konstant, die zu einer feed-back Regelung führt, d. h., daß der Input nur aus dem momentanen Systemzustand berechnet wird:

$$\begin{aligned} K &= [B'(Q + J)B + R]^{-1} B'(Q + J)A \\ J &= A'(Q + J)(A - BK) \end{aligned}$$

Für den Gasabsorber ergibt sich auch bei der rekursiven Berechnung bei mehr als 6 Zeitpunkten eine stationäre Lösung. So ist etwa für das quadratische Optimierungskriterium schon für $M > k > 6$ eine stationäre Lösung gegeben:

$$u(k) = -[0,402 \ 0,881 \ 1,066] x(k)$$

Da nun der Mensch als Regler im gut trainierten und gut motivierten Zustand bestimmte psychophysische Eigenschaften aufweist, gilt ein technisches (mathematisches) System, das die gleichen Eigenschaften hat, als ein Modell des menschlichen Regelverhaltens (vgl. Johannsen, Boller, Donges und Stein, 1977). Die Modelle beziehen sich dabei meist auf die manuelle Regelung durch Rauschen gestörter dynamischer Systeme.

In Abbildung 1 ist das Blockschaltbild eines Regelkreises (vereinfacht) nach dem optimaltheoretischen Ansatz wiedergegeben. Die durch weißes Rauschen gestörte Systemdynamik wird über einen Beobachtungsvorgang an den Regler Mensch übermittelt. Der Beobachtungsvorgang beinhaltet die technischen Gegebenheiten der Darstellung sowie die Wahrnehmungsfähigkeit, aus den dargebotenen Größen die ersten Ableitungen zu extrapolieren. Die um eine Totzeit verzögerten und mit Beobachtungsrauschen überlagerten Größen gelangen dann als wahrgenommene Größen in das Anpaßglied, von wo aus die beabsichtigte Stellgröße mit motorischem Rauschen überlagert und mit einer neuromuskulären Verzögerung als tatsächliche Regelgröße in das System eingeht.

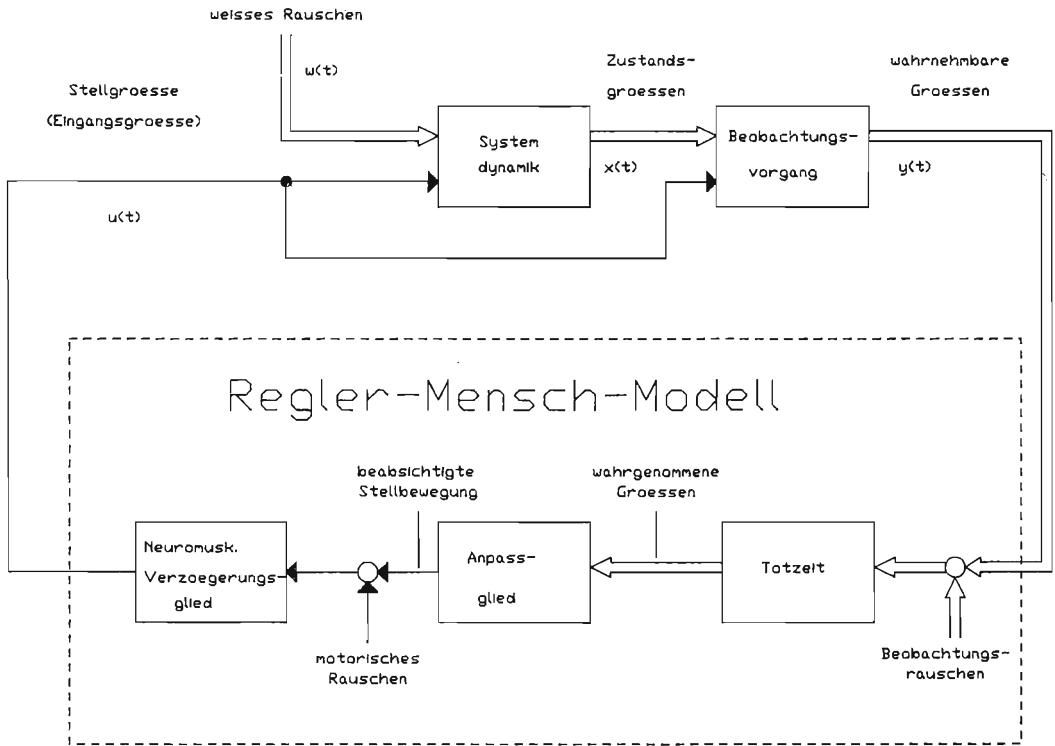


Abb. 1. Allgemeines Blockschaltbild eines Regelkreises nach dem optimaltheoretischen Ansatz (nach Johannsen, Boller, Donges und Stein, 1977 S. 163)

Bei einem solchen groben Modell ist die Spezifizierung des Anpaßgliedes die schwierigste Aufgabe. Berücksichtigt man die Forderung, daß es ein im Sinne der Minimierung des Gütekriteriums optimaler Regler sein soll, so ergeben sich zwei Hauptbestandteile des Anpaßgliedes; zum einen ein Kalman-Filter zur Schätzung des jeweiligen Systemzustandes und zum anderen die optimale deterministische Rückführung dieses Systemzustandes. Durch die Verzögerung bei der Informationsaufnahme (Totzeit) kommt in der Regel noch ein die Verzögerung kompensierendes Prädiktionsglied hinzu (vgl. Johannsen, Boller, Donges und Stein, 1977).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist ja, kognitive Regelungsvorgänge zu untersuchen. Wenn wir in Analogie zu dem optimaltheoretischen Ansatz auch bei der kognitiven Regelung ähnliche Gedanken zugrunde legen, dann sieht ein solches Modellschema wesentlich einfacher aus. Zum einen braucht die Totzeit nicht berücksichtigt werden. Zum anderen fällt bei unmittelbarer Beobachtung der Zustandsgrößen der Kalman-Filter weg. Somit ist für diesen Fall allein das optimale deterministische Rückführungsglied ein potentielles Modell für das kognitive Regelungsverhalten des Menschen, also beispielsweise für die Regelung des Gasabsorbers die oben angegebene stationäre Lösung. Wenn man nun nicht genau diese Lösung als Modell verwenden will, so kann man wenigstens über die Struktur dieser Gleichung die Klasse möglicher Modelle festlegen.

Ob eine solche Struktur einer linearen Gleichung als Modell für die kognitive Regelung dienen kann, ist eine empirisch zu klärende Frage. Eine Möglichkeit ist, die Koeffizienten der Gleichung mithilfe empirischer Daten zu schätzen. Diese geschätzten Parameter könnten dann mit den optimalen verglichen werden.

Die Parameterschätzung des oben angegebenen Modells fällt allgemein unter das Problem der Systemidentifikation. Allerdings treten in diesem Fall besondere Schwierigkeiten auf, da sich das zu identifizierende System – hier also der Regler – in einem geschlossenen Regelkreis befindet (vgl. Akaike, 1967; Box und MacGregor, 1974). Dadurch ist der Input des Reglers nicht unabhängig von seinem vorherigen Output. Eine Variation der unabhängigen Größe für die Systemidentifikation wird somit nicht vom Experimentator vorgenommen, was zu Annahmeverletzungen hinsichtlich der Verwendung üblicher statistischer Verfahren der Parameterschätzung führt. Zwar gibt es inzwischen eine Reihe von Lösungsvorschlägen für dieses Problem (für einen Überblick s. Gustavson, Ljung und Söderström, 1977), die aber mit erheblichem Aufwand verbunden sind.

Um dieses Problem zu umgehen, ist in dem hier vorzustellenden Experiment die unmittelbare Beobachtung der Zustandsgrößen gegeben. Dadurch, daß bei der feed-back Regelung die Beobachtung des jeweiligen Systemzustandes ausreicht, um die Regelgröße zu bestimmen, können die Zustandsgrößen auch einzeln und unabhängig voneinander dargeboten werden, was die Kontrolle durch den Versuchsleiter garantiert.

In dieser Arbeit wird nun nicht getestet, ob speziell die oben angegebene optimale Lösung als Modell gelten kann, sondern die allgemeinere Frage untersucht, ob überhaupt mit so relativ einfachen *linearen* Modellen kognitiven Regelungsverhaltens bei Systemen oben genannter Art gute Vorhersagen möglich sind.

Arten der Informationsdarbietung

In dieser Arbeit soll auch einer anderen, bis jetzt wenig beachteten Frage nachgegangen werden. Bei den meisten Untersuchungen zur kognitiven Regelung dynamischer Systeme werden im Gegensatz zu Untersuchungen manuellen Regelungsverhaltens die Systemgrößen numerisch, d. h. digital dargeboten. Wenn es Ähnlichkeiten zwischen den Modellen kognitiven und sensomotorischen Regelverhaltens gibt, hat dann die digitale versus analoge Darbietung der Systemgrößen keinen Effekt?

Die eigenen Erfahrungen bei der Durchführung von Experimenten im Zusammenhang mit der kognitiven Regelung dynamischer Systeme haben gezeigt, daß Probanden durch die digitale Darbietung zu intensivem Rechnen angeregt werden. Die Frage ist nun, welche Verarbeitungsprozesse entsprechend den unterschiedlichen Darbietungsarten der Systemgrößen induziert werden. Denkbar wäre z. B., daß die Probanden bei analoger Darbietung die Größen irgendwie „messen“, d. h. ihnen Zahlen zuordnen, und dann mit den so gewonnenen Meßwerten wie bei digitaler Darbietung weiterarbeiten.

Seit dem Aufkommen von Displays ist die Frage nach dem Effekt unterschiedlicher Informationsdarbietung Untersuchungsgegenstand der Ergonomie (vgl. Kantowitz und Sorkin, 1983). Bei solchen Untersuchungen wurden bis jetzt aber hauptsächlich Leistungs-

parameter wie Ablesegeschwindigkeit, Ablesegenauigkeit usw. verglichen (z. B. Hitt, 1961; Schultz, 1961). Erst in jüngerer Zeit werden auch komplexere Verhaltensmaße verglichen. So haben z. B. Schwarte und Howell (1985) *Entscheidungsverhalten* bei analoger versus digitaler Informationsdarbietung untersucht.

In dieser Arbeit wird der Einfluß von analoger versus digitaler Informationsdarbietung auf die Steuerung dynamischer Systeme untersucht. Als Leistungsparameter werden dabei die Zeit, die zur Regelung verwendet wird, und die Güte der Regelung verwendet.

Methoden

Mit zwei Gruppen à 10 Psychologiestudenten der Universität Regensburg wird das Experiment durchgeführt. Nachdem die Probanden eine verbale Beschreibung des Gasabsorbers gelesen haben, sollen sie den Gasabsorber über 210 Durchgänge so steuern, daß die Abweichungen der Systemvariablen vom Sollzustand (Nullzustand) so gering wie möglich sind. Die Probanden können das System nur dadurch beeinflussen, indem sie den Gasanteil des Luft/Gasgemisches bei der Gaszufuhr erhöhen oder verringern. Nach jedem dritten Regelungsschritt tritt eine „Störung“ auf, d. h. eine zusätzliche Abweichung, die es zu beseitigen gilt. Die Störung wird so realisiert, daß ein neuer, unabhängiger Zustand dargeboten wird, was den Probanden aber nicht bekannt ist. Die dazu benötigten 70 Zustände werden zufällig gewählt, sind aber für alle Probanden gleich.

Das Experiment wird mit einem Olivetti M24 gesteuert. Einer Gruppe (A) werden die Systemgrößen analog dargeboten. Dies wird so realisiert, daß den Probanden auf dem Bildschirm neben einer schematischen Darstellung des Gasabsorbers drei horizontale Balken dargeboten werden, die in Höhe der jeweiligen Plattform sind und deren Länge in eine positiv bzw. negativ markierte Richtung die entsprechende positive bzw. negative Abweichung vom Sollwert anzeigt. Die Systemgrößen werden mit 10 multipliziert und auf ganzzahlige Werte gerundet. Der Rechner wird im Graphikmodus betrieben mit einer Auflösung von 640×400 Punkten auf der $21,5 \text{ cm} \times 16,5 \text{ cm}$ Bildschirmfläche. Die Höhe der horizontalen Balken beträgt 10 Punkte und die maximale Länge 200 Punkte in jede Richtung. Jeder Punkt länglicher Ausrichtung entspricht dem Wert 1.

Die Probanden stellen ohne Zeitbegrenzung die Inputgröße mithilfe einer Maus ein. Durch die Bewegung der Maus wird die Länge eines vertikalen Balkens manipuliert, der entsprechend obiger Transformation die Inputgröße repräsentiert. Die Breite dieses Balkens beträgt 10 Punkte und die maximale Höhe 100 Punkte in jede Richtung. Dadurch ist eine Beschränkung der Inputgröße in beide Richtungen auf maximal 100 gegeben. Nachdem die Inputgröße eingestellt ist, drücken die Probanden auf eine Taste auf der Maus, wodurch das System mit dieser Einstellung für einen Schritt simuliert wird. Danach erfolgt eine neue Einstellung usw.

Der anderen Gruppe (B) werden die Größen numerisch auf dem Bildschirm dargeboten. Dazu werden die berechneten Systemgrößen ebenfalls mit 10 multipliziert und dann auf ganzzahlige Werte gerundet. Auch bei dieser Gruppe erfolgt die Einstellung der Inputgröße mithilfe der Maus. Durch die Bewegung der Maus wird aber hier der Wert einer

Zahl in einem Fenster auf dem Bildschirm manipuliert. Die Inputgröße ist entsprechend der analogen Bedingung begrenzt. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Gruppen besteht also in der Art der Informationsdarbietung bzw. -eingabe.

Die Probanden jeder Gruppe nehmen an zwei Sitzungen teil. Die Teilnahme wird auf die pflichtmäßig zu erbringenden Versuchspersonenstunden angerechnet.

Ergebnisse

Um die Leistung hinsichtlich der geforderten Aufgabe zu beurteilen, wird als abhängige Variable zuerst die Summe der quadratischen Abweichungen vom Nullzustand über alle Durchgänge außer den 70 unabhängig vorgegebenen (den Störungen) verwendet. Eine 2×2 faktorielle Varianzanalyse (Darbietungsart \times Durchgang) mit Meßwiederholung auf einem Faktor (Durchgang) ergibt dann folgendes Ergebnis:

Nur der Faktor Darbietungsart ist signifikant ($F=6,68$, $df=1/18$, $p<0,05$), wobei die Gruppe mit der analogen Darbietung die leistungsstärkere ist ($m_A=3,46$, $s_A=0,72$; $m_B=4,62$, $s_B=1,84$).

Als weitere abhängige Variable wird die Summe der quadratischen Abweichungen der Inputwerte vom optimalen Input (wie oben angegeben) verwendet. Diesmal gehen bei der Berechnung nur die 70 vorgegebenen Zustände mit ein, denn nur sie sind invariant über die Personen. Hier ergibt sich ein ähnliches Bild. Nur der Faktor Darbietungsart ist signifikant ($F=6,26$, $df=1/18$, $p<0,05$) mit ($m_A=11,81$, $s_A=4,20$; $m_B=21,16$, $s_B=12,37$).

Als Maß für die benötigte Zeit wird die mittlere Dauer (in msec) von der Darbietung der Systemzustände auf dem Bildschirm bis zum Drücken der Maustaste verwendet. Bei einer 2×2 faktoriellen Varianzanalyse mit Meßwiederholung auf einem Faktor ist sowohl der Faktor Darbietungsart ($F=5,70$, $df=1/18$, $p<0,05$) als auch der Faktor Durchgang ($F=5,48$, $df=1/18$, $p<0,05$) signifikant. Die Gruppe mit der analogen Darbietung benötigt weniger Zeit ($m_A=638,78$, $s_A=231,63$; $m_B=1042,38$, $s_B=510,31$). Ferner wird beim zweiten Durchgang weniger Zeit benötigt ($m_1=909,87$, $s_1=494,93$, $m_2=771,29$, $s_2=380,44$).

Zur Beantwortung der Frage, inwieweit lineare Modelle angemessen sind, wird ebenfalls eine 2×2 faktorielle Varianzanalyse mit Meßwiederholung auf einem Faktor gerechnet. Als abhängige Variable wird der durch ein lineares Modell (lineare Regression) aufgeklärte Varianzanteil verwendet. Zur Berechnung dieser Größe (R^2) wird eine multiple lineare Regression über die 70 unabhängig dargebotenen Zustände bei jedem Probanden berechnet. Die drei Zustandsvariablen dienen als unabhängige Variablen und die Inputvariable als abhängige Variable. Die Regression wird nur über die 70 unabhängig dargebotenen Zustände gerechnet, weil dadurch die oben genannten Schwierigkeiten bei der Parameterschätzung umgangen werden.

Als Ergebnis zeigt sich, daß der Faktor Darbietungsart nicht signifikant ist ($m_A=0,67$, $s_A=0,19$; $m_B=0,73$, $s_B=0,22$), aber der Faktor Durchgang ($F=11,61$, $df=1/18$, $p<0,05$) ($m_1=0,64$, $s_1=0,22$; $m_2=0,75$, $s_2=0,19$). Interessanterweise gibt es hier eine signifikante

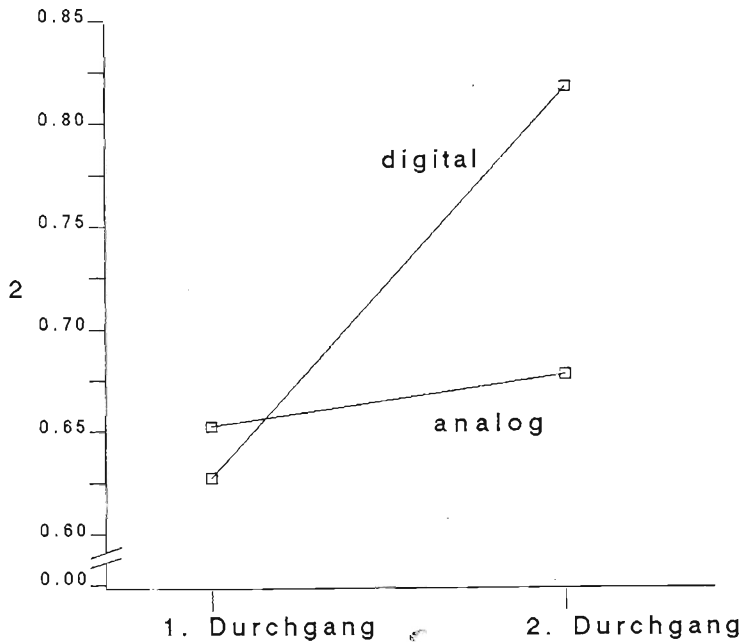


Abb. 2, Ergebnis der zweifaktoriellen Varianzanalyse (Darbietungsart \times Durchgang) mit Meßwiederholung auf einem Faktor (Durchgang) und der aufgeklärten Varianz (R^2) durch ein lineares Modell als abhängige Variable

Interaktion ($F=7,23, df=1/18, p<0,05$), die durch Abbildung 2 veranschaulicht wird. Für den Faktor Darbietungsart liegt somit eine disordinale Interaktion vor, und, wie Anschlußtests zeigen, für den Faktor Durchgang eine ordinale Interaktion.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, daß die analoge Informationsdarbietung hinsichtlich der gestellten Aufgabe zu besseren Leistungen führt als die digitale Informationsdarbietung. Auch wird bei der analogen Informationsdarbietung weniger Zeit benötigt. Da wegen des verwendeten Maßes die jeweils verwendete Zeit für die Informationsaufnahme und -verarbeitung, sowie die Einstellung der Inputgröße nicht voneinander zu trennen sind, ist eine genauere Analyse der Gründe des Zeitunterschiedes nicht möglich. Die Durchgänge und damit die Wiederholungen haben auf die Güte keinen signifikanten Einfluß, es wird beim zweiten Durchgang lediglich weniger Zeit verwendet.

Wenn auch nicht zwingend, so ist es im Hinblick auf die Ergebnisse doch plausibel anzunehmen, daß keine Kodierung der analog dargebotenen Größen in eine, der digitalen Form entsprechende stattfindet. Denn geht man davon aus, daß für eine solche Kodierung Zeit benötigt wird und dabei „Meßfehler“ gemacht werden, dann hätte bei deren Durchführung die Gruppe mit der analogen Darbietung mehr Zeit als die mit der digitalen benötigt und wäre leistungsschwächer gewesen. Das Ergebnis ist aber genau entgegen-

gesetzt. Daraus nun zu schließen, daß bei der digitalen Darbietung analog kodiert wird, ist kaum gerechtfertigt.

Vielmehr scheint es so zu sein, daß durch beide Darbietungsarten unterschiedliche Verarbeitungs- bzw. Kontrollstrategien induziert werden. Darauf weist insbesondere das Ergebnis der Linearität hin. Auch wenn für beide Darbietungsarten ein erheblicher Teil der Varianz des Regelverhaltens durch ein lineares Modell aufgeklärt werden kann, dann aber vermutlich für beide Gruppen aus unterschiedlichen Gründen. Bei der analogen Darbietung wird lineares Verhalten gezeigt, weil das verlangte optimale Verhalten linear ist und das gezeigte Verhalten dem in etwa entspricht. Bei der digitalen Darbietung wird lineares Verhalten gezeigt, vermutlich weil es vor allem einfach ist. Es scheint so zu sein, daß sich die Probanden nach längerem Probieren auf eine möglichst einfache (lineare) Formel festlegen und diese dann weiterhin anwenden, auch wenn sie nicht optimal ist. Diese Interpretation wird vor allem durch die Interaktion gestützt. Es ist anzunehmen, daß die Bedingung mit der digitalen Darbietung einen größeren kognitiven Aufwand erfordert, wofür auch die benötigte Zeit spricht.

Die Ergebnisse zeigen nur relativ grobe Unterschiede zwischen den Bedingungen auf, so daß letztere ex post facto Interpretation spekulativ ist. Sicher sind auch andere Interpretationen möglich. Die Beantwortung der sich daraus ergebenden weitergehenden Fragen nach den kognitiven Ursachen der gefundenen Unterschiede muß späteren Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Jedoch zeigen die Ergebnisse deutlich, daß die Verwendung von digitalen Darbietungsformen bei Untersuchungen zur kognitiven Regelung dynamischer Systeme nicht unproblematisch ist und auf keinen Fall als Äquivalent zu einer Verwendung von analogen Darbietungsformen angesehen werden darf.

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit der kognitiven Regelung dynamischer Systeme wird die Frage untersucht, inwieweit einfache lineare Modelle zur Beschreibung kognitiven Regelverhaltens angemessen sind. Ferner wird die Frage nach dem unterschiedlichen Effekt digitaler versus analoger Darbietung der Systemgrößen auf verschiedene Leistungsparameter untersucht. Als Ergebnis eines Experimentes zeigt sich, daß die analoge Darbietung der Systemgrößen zu einer besseren Regelung in kürzerer Zeit führt. Bei beiden Darstellungsarten werden große Varianzanteile durch einfache lineare Modelle aufgeklärt. Jedoch legen die Ergebnisse nahe, daß die Ursache dafür bei beiden Bedingungen verschieden ist. Während bei der analogen Darbietung die Linearität durch das annähernd optimale Verhalten bedingt ist, kann bei der digitalen Darbietung die Vermeidung eines größeren kognitiven Aufwandes als Ursache der Linearität angesehen werden.

Summary

In connection with the cognitive control of dynamical systems the question is investigated how adequate simple linear models are to describe the cognitive control behaviour. Moreover, it is investigated if the digital versus analog presentation of the system quantities has different effects on certain performance indexes. The result of an experiment shows that the analog presentation leads to better control in less time.

Both presentation modes lead to great proportions of variance explained by simple linear models. How-

ever, the result suggests that the reason is different for both conditions. Under the analog presentation the linearity is the result of an approximately optimal behaviour whereas the linearity under the digital presentation can be regarded as the result of the avoidance of great cognitive effort.

Резюме

В связи с когнитивной регуляцией динамических систем исследуется вопрос о том, насколько простые линейные модели пригодны для описания когнитивной регуляции поведения. Далее рассматривается вопрос о различных эффектах, которые числовые и аналоговые способы представления системных величин, оказывают на параметры результатов. Эксперимент приводит нас к выводу о том, что аналоговое представление системных величин обеспечивает за более короткое время лучшую регуляцию.

При обоих способах представления линейные модели объясняют большую часть данных. Результаты исследования однако показывают, что причины этого в обоих случаях разные. Если при аналоговом представлении линейность определяется почти оптимальным поведением, при числовом представлении причиной линейности можно считать стремление избежать больших когнитивных затрат.

Literatur

- Akaike, H.: Some problems in the application of the cross-spectral method. In: Proceedings of an advanced seminar on spectral analysis of time series. Hrsg.: Harris, B. New York: Wiley 1967. S. 81–107.
- Box, G. E. P.; MacGregor, J. F.: The analysis of closed-loop dynamic-stochastic systems. *Technometrics* 16 (1974) 391–398.
- Funke, J.: Problemlösen in komplexen computersimulierten Realitätsbereichen. *Sprache & Kognition* 3 (1985) 113–129.
- Gustavsson, L. L.; Söderström, T.: Identification of processes in closed loop – identifiability and accuracy aspects. *Automatica* 13 (1977) 59–75.
- Hitt, W. D.: An evaluation of five different abstract coding methods – Experiment IV. *Human Factors* 3 (1961) 120–130.
- Hübner, R.: Eine naheliegende Fehleinschätzung des Zielabstandes bei der zeitoptimalen Regelung dynamischer Systeme. *Z. exp. ang. Psychol.* 34 (1987) 38–53.
- Johannsen, G.; Boller, H. E.; Donges, E.; Stein, W.: *Der Mensch im Regelkreis*. München – Wien: Oldenbourg-Verlag 1977.
- Kantowitz, B. H.; Sorkin, R. D.: *Human factors: Understanding people-systems relationships*. New York: Wiley & Sons 1983.
- Klix, F.: *Information und Verhalten*. Bern – Stuttgart – Wien: H. Huber 1971.
- Lapidus, L.; Luus, R.: *Optimal control of engineering processes*. Waltham – Massachusetts – Toronto – London: Blaisdell Publishing Company 1967.
- Marienfeld, H.: Modelle für den Regler Mensch – ein Praktikumsversuch. In: *Der Mensch als Regler*. Hrsg.: Oppelt, W.; Vossius, G. Berlin: VEB Verlag Technik 1970. S. 19–42.
- Newell, A.; Simon, H. A.: *Human problem solving*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall 1972.
- Schultz, W. G.: An evaluation of graphic trend displays. *Human Factors* 3 (1961) 99–107.
- Thalmaier, A.: Zur kognitiven Bewältigung der optimalen Steuerung eines dynamischen Systems. *Z. exp. angew. Psychol.* 26 (1979) 388–421.
- Van Bussel, F. J. J.; Van den Hof, P. M. J.; Hajdasinski, A. K.: A cognitive human operator model: the single-input single-output (SISO) case. *Int. J. syst. sci.* 16 (1985) 337–350.

Eingegangen im April 1987

Anschr. d. Verf.: Dipl.-Psych. R. Hübner
 Institut für Psychologie der Universität Regensburg
 Universitätsstr. 31, D - 8400 Regensburg