Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 71 (1980)

Heft: 19

Artikel: Der Mensch als Regler technischer Systeme

Autor: Profos, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905287

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.12.2025

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

Der Mensch als Regler technischer Systeme

Von P. Profos

1. Einleitung

Bei einer Abschiedsvorlesung sind dem Dozenten weder sein Auditorium noch dessen Erwartungen und Wünsche hinsichtlich des Themas der Vorlesung genauer bekannt. Ein Hochschulinstitut lebt von der öffentlichen Hand und verbraucht erhebliche Mittel. So hat das Institut für Mess- und Regeltechnik während seines zwanzigjährigen Bestehens, je nachdem, wie man rechnet, zwischen 10 und 15 Millionen Franken für Unterricht und Forschung gekostet. Es wäre daher verständlich, wenn vom abtretenden Institutsleiter eine Art Rechenschaftsbericht gewünscht würde darüber, welche Aktivposten dieser respektablen Ausgabe gegenüberstehen. Nun ist aber eine solche Berichterstattung bereits an anderen Stellen erfolgt und zum Teil auch publiziert worden. Ausserdem wäre es kaum möglich, anders als in summarischer Form über das gesamte Wirken zu berichten, und mit trockenen Statistiken möchte ich Sie nicht langweilen.

Interessanter scheint es mir, aus den verschiedenen Forschungsthemen, an denen unser Institut gearbeitet hat, ein einzelnes von allgemeinerem Interesse herauszugreifen. Der gewählte Gegenstand: «Der Mensch als Regler technischer Systeme», stand zwar nicht im Zentrum unserer Arbeiten – unser Hauptinteresse galt rein technischen Fragen. Aber er ist als ausgesprochen interdisziplinäres Thema doch sehr typisch für das Gebiet der Mess- und Regeltechnik und auch für einen ganzen Sektor unserer Forschungsarbeit, nämlich die *Kybernetik*.

Ich möchte gleich klarstellen, dass es keineswegs darum geht, heute unseren Institutsbeitrag an der Erforschung des Problemkomplexes «der Mensch als Regler technischer Systeme» herauszustellen. Vielmehr möchte ich versuchen, Ihnen einen Überblick über die weltweit an vielen Stellen geleistete sehr grosse Arbeit zu vermitteln; unser Beitrag dazu war nur ein Baustein an diesem zwar schon stattlichen, aber noch längst nicht fertigen Erkenntnisgebäude.

Überarbeitete Fassung der Abschiedsvorlesung vom 1. Juli 1980 an der ETH Zürich.

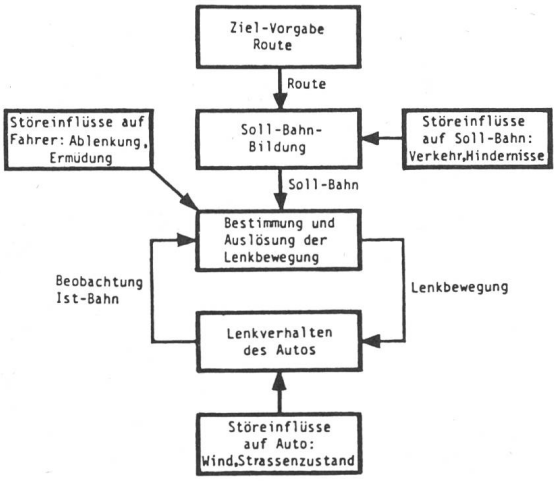

Fig. 1 Schematische Darstellung der Vorgänge bei der Handregelung am Beispiel der Lenkung eines Autos

2. Fragestellungen

007;

Ich möchte zunächst versuchen, zu erläutern, worum es bei der Fragestellung überhaupt geht und warum sich der Ingenieur und speziell der Regelungstechniker mit solchen Problemen befasst. Betrachten wir dazu das bekannte Beispiel des Autolenkers (Fig. 1). Wir gehen davon aus, dass er sich vorgenommen habe – oder dass ihm aufgetragen wurde, eine bestimmte Route zu fahren. Die Bahn, die er seinen Wagen fahren lassen will, ist damit grob vorgegeben. Im einzelnen hängt die Soll-Bahn, welcher der Wagen folgen muss, aber von zahlreichen Einflüssen ab, die auf der Autokarte nicht eingetragen sind: vom Verkehr, von Baustellen und anderen Hindernissen, denen er ausweichen muss.

Diesem Soll-Weg entsprechend wird der Lenker in das Steuerrad eingreifen, wobei die tatsächlich gefahrene Bahn bekanntlich noch stark vom Lenkverhalten des Autos mitbestimmt wird, das seinerseits von äusseren Bedingungen wie Strassenzustand, Seitenwind usw. abhängt. Der Fahrer muss dabei dauernd die tatsächlich gefahrene Bahn mit der Soll-Bahn vergleichen und durch fortwährendes Korrigieren eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Soll- und Ist-Verlauf herbeizuführen bestrebt sein. Wenn ihm das nicht gelingt, so ist im günstigsten Fall ein Blechschaden das Resultat seines Fehlverhaltens. Neben ungenügender Fahrroutine kann ein solches Versagen auch durch Ablenkung, Übermüdung, Alkohol u.a. hervorgerufen sein.

Hätte man statt des Autolenkers den Steuermann eines Schiffes, den Piloten eines Flugzeuges, den Operateur eines Hubstaplers oder Kranes betrachtet, so würde sich ein gleich strukturiertes Blockschema ergeben, dasjenige der Handregelung. Der Mensch ist hierbei in einen *Wirkungskreis* eingeschaltet, in dem er die gleiche Funktion übernimmt, wie im technischen Regelkreis der *Regler*.

Nun stellt sich hier die für unsere Betrachtung entscheidende Frage: *Wie verhält sich der Mensch beim Ausüben einer solchen Reglerfunktion?* Weitere damit zusammenhängende Fragen sind etwa: Ist sein Verhalten dem eines technischen Reglers ähnlich oder nicht? Versagt er in dieser Funktion unter bestimmten Bedingungen?

Derartige Fragestellungen sind zunächst für den *Ingenieur* von grösstem Interesse. Dieser entwirft ja technische Einrichtungen, wie etwa ein Flugzeug, unter der Voraussetzung, dass der Mensch sie dann auch beherrschen, d.h. in unserem Sinne *regeln* kann. Der Konstrukteur solcher Einrichtungen sollte also das Verhalten eines Menschen als Regler kennen.

Wenn man aber wieder etwa ans Auto denkt, so gehen diese Fragen doch eigentlich *alle* an. Erlebt man nicht täglich, dass der Mensch als «Regler seines Autos» zwar sein Fahrzeug meistens beherrscht, aber eben doch recht oft auch dabei versagt? Die Unfallstatistiken sprechen deutlich genug: 1977 gab es allein in der Schweiz 105922 Verkehrsunfälle mit 32508 Unfallopfern, davon 1302 Tote und fast 15000 Schwerverletzte. Dabei waren nur 1,2% der Unfälle auf technische Mängel, dagegen 84% auf menschliches Versagen zurückzuführen.

Die Bedeutung der Frage «Wie verhält sich der Mensch als Regler technischer Systeme?» geht also weit über die Tech-

nik hinaus. Sie berührt primär die *Sicherheit des Menschen*, daneben auch die Sicherheit der von ihm benutzten *technischen Einrichtungen*, wobei oft sehr bedeutende volkswirtschaftliche Werte im Spiel sind. Schliesslich hat die Frage auch eine rein wissenschaftliche Seite, indem nicht nur der Ingenieur sich Entwurfsgrundlagen, sondern auch der Physiologe von solchen Untersuchungen eine Vertiefung des Verständnisses neuromuskulärer und mentaler Vorgänge erhofft.

Der Ingenieur ist sich der Bedeutung der menschlichen Eigenschaften im Zusammenhang mit der Technik heute sicher bewusst. Damit er sie aber in seine Überlegungen und Berechnungen einbeziehen kann, reichen qualitative Angaben etwa von der Art des Blockschemas nicht aus. Vielmehr benötigt er zahlenmässige oder sogar formelmässige, jedenfalls quantitative Angaben. Aus der Grundfrage «Wie verhält sich der Mensch als Regler?» ergeben sich für ihn daher sofort die weiteren Fragestellungen:

– Wie kann man dieses Verhalten quantitativ *erfassen?*

– Wie kann man es quantitativ *beschreiben* und für den Ingenieur nutzbar machen?

Damit kommen wir zum Kern unserer Betrachtungen.

3. Untersuchungsmethoden

Es liegt nahe, dass angesichts unserer zurzeit noch sehr lückenhaften Kenntnisse über die Funktionsweise des menschlichen Gehirns nur experimentelle Untersuchungsmethoden in Frage kommen können. Da es sich zudem um ein Verhalten des Menschen als Antwort auf zeitlich veränderliche Vorgänge im zu regelnden technischen System handelt, also, um mit dem Regeltechniker zu sprechen, um ein *dynamisches Verhalten*, war es naheliegend, Methoden und Hilfsmittel der Regeltechnik heranzuziehen.

Man hat schon bei den ersten derartigen Untersuchungen festgestellt, dass zwar das menschliche Verhalten demjenigen eines technischen Reglers sehr ähnlich sein kann, daneben aber auch grundsätzlich andere Züge aufweist. Vor allem verfügt der Mensch, im Gegensatz zu allen noch so perfekten Automatismen, über den freien Willen, die freie Entscheidung, d.h. z.B., er kann regeln wollen oder auch nicht wollen! Voraussetzung für alle Untersuchungen über das bewusste menschliche Regelverhalten – und nur davon ist in unserem Zusammenhang die Rede – ist also, dass die Versuchsperson motiviert werden kann.

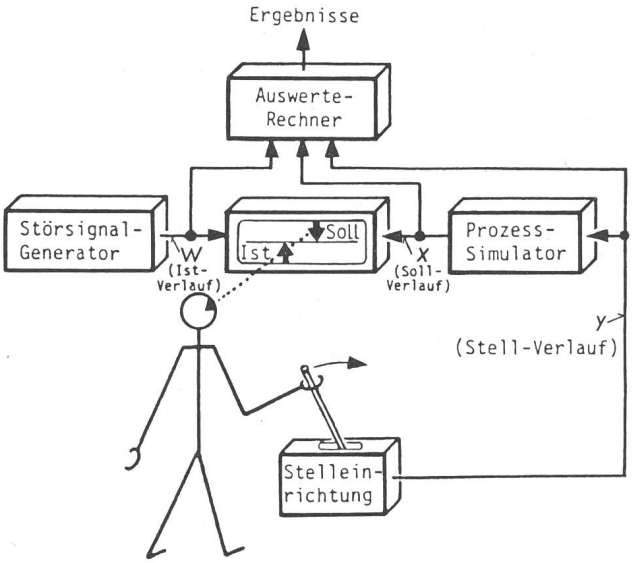

Fig. 2 Schematische Darstellung des grundsätzlichen Versuchsaufbaus für die Untersuchung der menschlichen Regeleigenschaften

Ferner muss bei solchen Untersuchungen auch die Tatsache beachtet werden, dass der Mensch beim Regeln lernt, es besser und besser zu machen, und dass er dabei eine erstaunliche Anpassungsfähigkeit an den Tag legt. Hierzu sind dem Ingenieur allerdings gewisse Parallelen aus der Technik in Form adaptiver bzw. lernender Automaten bekannt.

Ohne Analogie in der Technik ist hingegen wieder die reversible Beeinträchtigung der Güte des menschlichen Regelverhaltens durch die Ermüdung. Für andere leistungsverschlechternde Faktoren wie Ablenkung, Krankheit, Stress, Alkohol usw. könnte man vielleicht mehr oder weniger zutreffende Analogien in der Technik finden.

Schon aus dieser noch lückenhaften Aufzählung von Verhaltensmerkmalen geht hervor, dass beim Experimentieren mit dem «Menschen als Regler» sehr umsichtig und behutsam vorgegangen werden muss, und ebenso beim Auswerten und Deuten der Messergebnisse.

Es sind zahlreiche zum Teil raffinierte Einrichtungen und Experimentiermethoden entwickelt worden. Der prinzipielle Aufbau der Versuchseinrichtungen ist fast immer derselbe und entspricht der Darstellung in Fig. 2. Ein Störsignal-Generator erzeugt einen Soll-Verlauf für den Ausgangszustand des zu regelnden Prozesses (z.B. Soll-Bahn beim Auto), der auf einem Anzeigegerät durch einen Zeiger wiedergegeben wird. Die Versuchsperson hat die Aufgabe, durch entsprechenden Eingriff in die Stellvorrichtung (Lenkrad) den Prozess so zu regeln, dass der Ist-Wert des Prozess-Ausgangszustandes dem Soll-Wert möglichst genau folgt. Dabei wird das Prozessverhalten (Lenkverhalten des Autos) aus versuchstechnischen Gründen meist durch einen Prozeßsimulator (d.h. einen Computer) nachgebildet. Die Auswertung, d.h. die mathematische Analyse der Soll- und Ist-Wert-Verläufe und ihres Zusammenhanges, erfolgt durch einen Auswertrechner.

4. Auswertungsmethoden

Bei solchen Versuchen fallen zunächst die zeitlichen Verläufe der Grössen w, x und y (Fig. 2) als primäre Ergebnisse an, aus denen auf das Verhalten des Probanden wie auch auf dasjenige des geregelten Prozesses geschlossen werden kann. Meist wird das Prozessverhalten während eines Versuches konstant gehalten und stellt dann einen Versuchsparameter dar. Andere solche Parameter sind durch die gerätetechnische Ausbildung von Anzeige- und Stellgerät gegeben, weitere durch die Umgebungsbedingungen wie Raumklima, Beleuchtungsverhältnisse, Lärmpegel usw. Wichtige, aber quantitativ kaum fassbare Parameter sind Motivation, Trainingsgrad, leistungsmindernde Einflüsse wie z.B. Krankheit u.a.

Die rechnerische Auswertung bezieht sich vor allem auf die genannten Grössen w, x und y. Hierfür bietet die Mess- und Regeltheorie verschiedene Methoden an, wobei insbesondere Fourier-Analyse und Korrelationsrechnung unentbehrliche Hilfsmittel sind. Dank den heute zur Verfügung stehenden Rechengeräten ist der damit verbundene, relativ grosse Rechenaufwand kein Problem mehr.

Im einzelnen richtet sich die Art der Auswertung danach, welchem Zweck die Ergebnisse dienen sollen. Hierbei gibt es zunächst zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten. Einerseits beurteilt man in summarischer Weise mit Hilfe eines

Gütemasses lediglich die relative Qualität des menschlichen Regelverhaltens und bringt sie in Abhängigkeit zu den Versuchsparametern. Diese *statistische Güteanalyse* wird dann benützt, wenn nicht das menschliche Verhalten als solches interessiert, sondern der Einfluss der Versuchsparameter auf dasselbe im Vordergrund steht, also etwa die relative Eignung verschiedener Bedienelemente bewertet oder der Einfluss der Ermüdung untersucht werden soll. Diese Auswertungsart wird daher besonders häufig bei anthropotechnischen Experimenten angewandt.

Bei der zweiten Auswertungsart interessiert primär nicht das Regelergebnis, sondern gewissermassen die Art und Weise, wie es zustande kam, d.h. also das *dynamische Verhalten* des Menschen. Um ein solches Verhalten zu beschreiben, bedient man sich verschiedener mathematischer Modelle. Man unterscheidet hierbei sog. nichtparametrische Modelle von parametrischen. Beide Modellarten sind zur Beschreibung des menschlichen dynamischen Verhaltens benutzt worden. Bei der ersten Art wird das gemessene Verhalten meist in Kurvenform dargestellt, vor allem in Form des sog. Frequenzgangs. Parametrische Modelle dagegen beschreiben das dynamische Verhalten mit Hilfe eines Satzes von mathematischen Gleichungen, deren Koeffizienten eben die «Parameter» darstellen. Diese Beschreibungsform ist besonders leistungsfähig, da sie vor allem die Voraussage des menschlichen Verhaltens auch unter von den Versuchsbedingungen abweichenden Verhältnissen durch Berechnung oder, in der Fachsprache, durch Simulation erlaubt. Das parametrische Modell gestattet zudem einen Einblick in das Zustandekommen des Verhaltens und damit eine Vertiefung des Verständnisses des dynamischen Geschehens. Natürlich ist, wie immer bei experimentell gewonnenen Modellen, Vorsicht bei ihrer Deutung geboten. Die Tatsache, dass das menschliche Verhalten durch einen Gleichungssatz gut wiedergegeben werden kann, heisst natürlich nicht, dass insbesondere die im menschlichen Gehirn sich abspielenden Vorgänge wirklich durch einen Mechanismus zustande kommen, wie er unseren Gleichungen entspräche. Trotzdem sind solche Modelle ausserordentlich nützlich.

5. Forschungsergebnisse im Überblick

Im folgenden soll versucht werden, einen Überblick über die heute vorliegenden Forschungsergebnisse zu vermitteln. Dazu werden aus der Fülle des Materials einige typische Beispiele herausgegriffen.

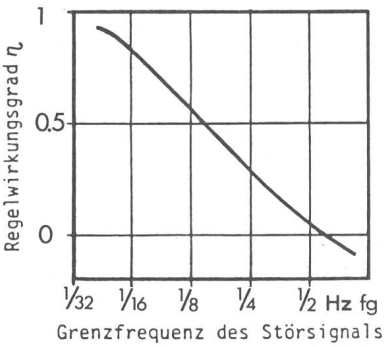

Fig. 3 Beispiel für die Abnahme des Regelwirkungsgrades bei steigender Dichte der Störfolge [1]
Störsignal: Markov Rauschen
$G_s = 1/(1 + 0{,}1\ s)^3$ komplexe Übertragungsfunktion

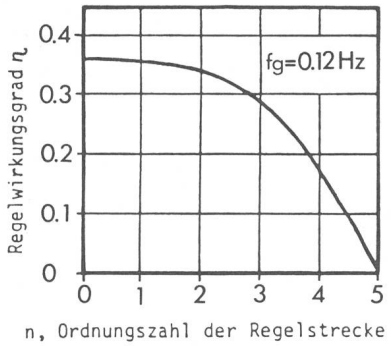

Fig. 4 Beispiel für die Abnahme des Regelwirkungsgrades bei steigendem Schwierigkeitsgrad der Regelaufgabe [1]
Die Ordnungszahl der Regelstrecke ist ein Mass für den Schwierigkeitsgrad
Störsignal: Markov-Rauschen
f_g Grenzfrequenz des Störsignals
$G_s = 1/(1 + 0{,}1\ s)^n$ komplexe Übertragungsfunktion

5.1 Statistische Güteanalyse

Zunächst seien einige Resultate der statistischen Güteanalyse betrachtet. Als Gütemass wird in der Regel der mittlere quadratische Regelfehler

$$E_m = \frac{1}{T} \int_0^T (x_{ist} - x_{soll})^2 \, dt$$

benutzt, und zwar bezogen auf den Fehler E_0, der ohne Regelwirkung entstehen würde. Mit der Grösse $\eta = 1 - E_m/E_0$ ist folglich eine Art menschlichen Regelwirkungsgrades definiert. Dieser Wirkungsgrad ist $1 = 100\,\%$, wenn der Regelfehler E_m verschwindet, und null, wenn der Regelfehler ebenso gross wird, wie wenn gar nicht geregelt würde, d.h., wenn $E_m = E_0$.

Die folgenden Ergebnisse gelten alle für den Fall eines eingeübten, nicht merklich ermüdeten Operateurs und für stationäre stochastische, d.h. zufallsbedingte Störungen.

In Figur 3 ist dargestellt, wie der Wirkungsgrad η abnimmt, wenn die Grenzfrequenz der Störungen wächst, also wenn die Störungen immer schneller erfolgen. Man sieht, dass die Versuchsperson unter den gegebenen Umständen klar überfordert ist, wenn das Störsignal wesentliche Frequenzanteile von 1 Hz und darüber enthält. η wird dann null oder gar negativ, d.h., der Mensch verschlechtert den Vorgang durch sein Eingreifen noch.

Figur 4 zeigt, dass die Güte des menschlichen Regelverhaltens nicht nur vom Verlauf der Störungen, sondern auch von den Eigenschaften des zu regelnden Prozesses abhängt. Unter sonst gleichbleibenden Bedingungen fällt der Regelwirkungsgrad um so schlechter aus, je höher die Ordnungszahl n und damit der Schwierigkeitsgrad des zu regelnden Prozesses – im Fachjargon auch Regelstrecke genannt – ist.

Figur 5 zeigt die Auswirkung der Ermüdung der Versuchsperson auf ihren Regelwirkungsgrad. Die beiden dargestellten Kurven stellen den zeitlichen Verlauf der Abweichung des Wirkungsgrades vom Wert dar, der von der ausgeruhten Versuchsperson erzielt wird, wobei in beiden Fällen derselbe Prozess zu regeln ist. Die Auswirkung der Ermüdung des Probanden kommt nach einer gewissen Zeit gleichbleibender Regelgüte durch zuerst schwaches, dann immer schnelleres Absinken des Wirkungsgrades zum Ausdruck. Die Ermüdungs-

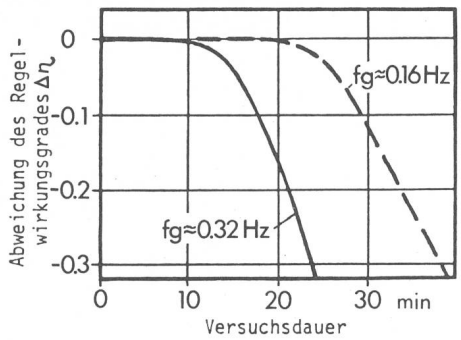

Fig. 5 Beispiel für die nach Dichte der Störfolge unterschiedliche Ermüdungswirkung [1]
Störsignal: Markov-Rauschen
f_g Grenzfrequenz des Störsignals
$G_s = 1/(1 + 0{,}1\,s)^3$ komplexe Übertragungsfunktion

wirkung manifestiert sich bei rascher erfolgenden Störungen deutlich früher; die Dauer gleichbleibender Regelgüte ist im Falle $f_g = 0{,}32$ Hz etwa die Hälfte derjenigen im Falle $f_g = 0{,}16$ Hz. Auf das Autofahren übertragen, würde das etwa heissen, dass man um so schneller ermüdet, je schneller man fährt.

5.2 Nichtparametrische Modelle

Als einfaches Darstellungsmittel des dynamischen Verhaltens wurden die nichtparametrischen Modelle genannt, von denen die Frequenzgangdarstellung besonders übersichtlich ist. Sie bringt das Verhalten der Versuchsperson unter der Voraussetzung sinusförmiger Störung des Prozesses zum Ausdruck. Die Reaktion der Versuchsperson ist dabei von der Frequenz der Störung abhängig, und zwar wirkt sich dies sowohl auf die Amplitude wie auf die Phasenlage der Reaktionsbewegungen aus. Der Frequenzgang kann allerdings beim Menschen, im Gegensatz zu einem technischen Regler, nicht direkt gemessen werden, sondern muss aus dem Verhalten bei stochastischer Störung berechnet werden.

Figur 6 zeigt einige typische Frequenzgangkurven: die obere Kurvengruppe gibt die Amplitudenabhängigkeit, die untere die Phasenabhängigkeit von der Frequenz wieder. Je zwei Kurven gleicher Darstellungsart gehören zusammen. Das ausgezogen gezeichnete Kurvenpaar (1) wurde beim Regeln einer verzögerungsfreien Proportional-Regelstrecke, das gestrichelte (2) bei einer einfach integrierenden, das punktierte (3) bei einer doppelt integrierenden Regelstrecke gewonnen.

Diese Frequenzgangkurven können direkt mit solchen von technischen Reglern verglichen werden. Dabei ergibt sich das verblüffende Resultat, dass sich der Mensch im Falle $G_s = k$ annähernd wie ein PI-Regler[1]), im Falle $G_s = k/s$ wie ein P-Regler[1]) und im Falle $G_s = k/s^2$ wie ein PD-Regler[1]) verhält. Das heisst, dass der Mensch unbewusst sein Regelverhalten dem dynamischen Verhalten des zu regelnden Prozesses anpasst, und dies nicht nur, indem er die Intensität seiner Reaktionen ändert, sondern indem er je nach Fall ganz verschiedenartig reagiert. Der Regeltechniker würde von einer automatischen Anpassung der Reglerstruktur bzw. des Regelalgorithmus sprechen. Schon nicht parametrische Modelle weisen also auf die menschliche Fähigkeit der Autoadaptation des dynamischen Verhaltens hin. Es wird noch auf dieses Phänomen zurückgekommen.

Die Versuchsergebnisse von Figur 6 waren unter stationären Bedingungen mit eingeübten, nicht ermüdeten Probanden zustande gekommen. Das gilt auch für die nächsten Beispiele, die aus der grossen Zahl der entwickelten parametrischen Modelle herausgegriffen wurden.

5.3 Parametrische Modelle

Die Mehrzahl solcher Modelle besteht im wesentlichen aus zwei Teilen: einem Teil, der die Signalübertragung in Sinnesorganen, Nervenbahnen und Muskeln repräsentiert, und einem zweiten Teil, der die Signalverarbeitung im Zentralnervensystem des Menschen abbildet (Fig. 7). Die Modellstruktur des ersten, des neuromuskulären Teils, leiten die meisten Forscher aus unserem Wissen über die Vorgänge der Reizfortpflanzung in den Nervenbahnen und der Muskelbetätigung ab. Wesentlich für die Modellbildung ist dabei das Auftreten einer endlichen Lauf- oder Totzeit von einigen Zehntelsekunden Dauer für den Informationstransport. Daneben treten weitere Verzögerungserscheinungen auf, die durch verschiedene Vorgänge im neuromuskulären System bedingt sind. Die Modellstruktur des zweiten, also des mentalen Teils, hat dagegen ihren Ursprung in der Regeltechnik. Man hat hier mehr oder weniger direkt die für technische Regler entwickelten mathematischen Modelle übernommen.

Bei all diesen Modellen werden die Koeffizienten der Gleichungen, also Verstärkungsfaktoren und Zeitkenngrössen, aus Versuchen ermittelt. Hierfür stellt die Theorie der Prozessidentifikation spezielle Rechenverfahren zur Verfügung.

Ein sehr einfaches Modell, welches das stationäre menschliche Regelverhalten aber bereits recht gut wiederzugeben

[1]) P = proportional, PI = proportional-integral, PD = proportional-differentiell.

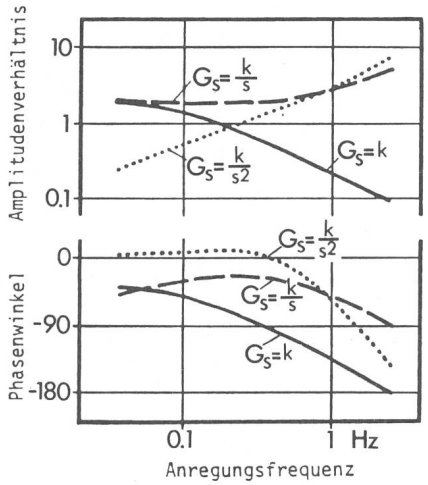

Fig. 6 Gemessene Frequenzgangkurven des menschlichen Regelverhaltens bei verschiedenen Regelstrecken-Typen [2]

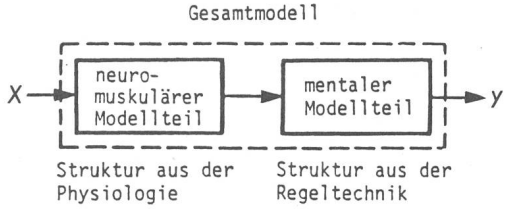

Fig. 7 Grundsätzlicher Aufbau einer Gruppe parametrischer Modelle des menschlichen Regelverhaltens

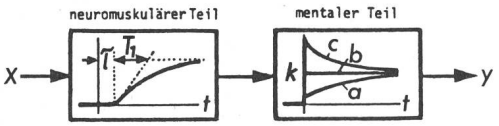

Fig. 8 Modell von Mc Ruer et al. [3]

$$G_M = \frac{e^{-s\tau}}{1+sT_1} \cdot k \frac{1+sT_2}{1+sT_3}.$$

$\tau \approx 0{,}15\ s$; $T_1 \approx 0{,}3\ s$ (wenig veränderlich)

k und T_2/T_3 stark veränderlich

erlaubt, ist dasjenige von *Mc Ruer* und Mitarbeitern. Figur 8 zeigt die Blockschemadarstellung. Das dynamische Verhalten der beiden Blöcke ist durch die jeweils eingezeichneten Sprungantworten veranschaulicht. Dabei weist die Sprungantwort des neuromuskulären Teils immer denselben Charakter auf, und die Zeitkenngrössen τ und T_1 ändern sich vergleichsweise wenig. Ganz anders ist das dynamische Verhalten des mentalen Teils. Hier ist nicht nur der Verstärkungsfaktor k in weiten Grenzen veränderlich; auch der Charakter der Sprungantworten ist je nach Fall ganz verschieden.

Die mathematische Darstellung dieses Sachverhalts ist durch die unter dem Blockschema angeschriebene komplexe Übertragungsfunktion gegeben. Der Regelungstechniker erkennt im Ausdruck rechts (mentaler Modellteil) das ihm wohlbekannte Lead-Lag-Element. Der Charakter der Sprungantwort dieses Elementes wird hierbei durch das Zeitkonstanten-Verhältnis T_2/T_3 bestimmt, das entsprechend der menschlichen Anpassungsfähigkeit im Bereich von etwa zwei Zehnerpotenzen variieren kann.

Mit einem derartigen Modell kann man das folgende Experiment machen: Unter den gleichen Voraussetzungen wie bei einem parallel durchgeführten Versuch mit menschlichem Regler können die optimalen Werte der Regler-Parameter k, T_2 und T_3 berechnet werden, wenn man sich ein Optimierungskriterium vorgibt. Ein entsprechend gebauter und eingestellter Regler würde dann also unter den gegebenen Bedingungen den bestmöglichen Regelablauf bewirken. Vergleicht man die so berechneten Parameterwerte mit den aus dem Versuch ermittelten, so stellt man eine erstaunlich gute Übereinstimmung fest, wenn als Optimierungskriterium der auch in der Technik übliche minimale quadratische Regelfehler gewählt wird. Ein gut eingeübter Operateur erzielt also innerhalb der ihm gesetzten natürlichen Grenzen in jedem Falle annähernd den praktisch bestmöglichen Regelablauf.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, das einfache Modell von *Mc Ruer* zu verfeinern im Sinne einer noch besseren Wiedergabe des menschlichen Verhaltens. Aus der Vielzahl dieser Modellansätze sei hier nur noch das Modell nach *Magdaleno* und Mitarbeitern gezeigt. Es erlaubt eine präzisere Nachbildung des dynamischen Verhaltens sowohl im neuromuskulären als auch im mentalen Bereich, allerdings um den Preis einer erheblichen Modellkomplikation (Fig. 9). Man erkennt in den fett geschriebenen Formelteilen wieder die vom Modell von *Mc Ruer* her bekannten Bausteine (Totzeit, Verzögerung im neuromuskulären Teil, Lead-Lag-Element). Dazu kommen die Ergänzungen, die beim mentalen Modellteil vor allem die bessere Wiedergabe des Verhaltens im niederfrequenten Bereich bezwecken, beim motorischen Modellteil eine differenziertere Darstellung der Vorgänge im Muskel einschliesslich der Möglichkeit eines oszillatorischen Verhaltens (Schwinger zweiter Ordnung).

Alle bisher betrachteten Modelle sind linear und zeitinvariant. Gewisse Einzelheiten des menschlichen Regelverhaltens lassen sich indes prinzipiell nicht mit linearen Modellen beschreiben. Es sind deshalb auch verschiedene Ansätze zu nichtlinearen und unstetigen Modellen zu verzeichnen. Namentlich die mit solchen Modellen verbundenen mathematischen Schwierigkeiten haben jedoch deren Weiterentwicklung nicht recht vorankommen lassen.

Vielversprechend ist dagegen eine Entwicklung in Richtung optimaltheoretischer Modelle. Hierbei werden Hilfsmittel der modernen Regeltheorie eingesetzt, insbesondere optimale Regel- und Schätzmethoden. Wichtig ist dabei die in manchen Fällen begründbare Annahme, dass der Mensch die Fähigkeit habe, aus angezeigten Grössen auch deren erste zeitliche Ableitung zu extrahieren. Mit derartigen Modellen ist es im Prinzip möglich, etwa den annähernd zeitoptimalen Regelablauf von Handregelsystemen bei sprungartigen Sollwertänderungen nachzubilden, wie ihn z.B. geschickte Kranführer erzielen. Zudem eignen sich solche Modelle speziell auch zur Beschreibung des menschlichen Verhaltens bei der gleichzeitigen Regelung mehrerer Prozesse, wie dies z.B. beim Auto und besonders beim Flugzeug der Fall ist. Solche mehrschleifige Regelsysteme können mit den Methoden der höheren Automatik formal besonders elegant behandelt werden, allerdings um den Preis höherer Abstraktion.

Bis jetzt ist die Entwicklung solcher Modelle allerdings noch nicht sehr weit gediehen; jedenfalls sind erst für wenige, relativ einfache Fälle bislang Lösungen bekannt geworden. Ein typisches Beispiel eines solchen Modells ist in Figur 10 vereinfacht dargestellt. Der wichtigste Unterschied gegenüber den bisher betrachteten Modellen besteht darin, dass zunächst durch ein sog. Kalman-Filter das nicht zum eigentlichen Signal x gehörende, aber unvermeidliche Messrauschen z_m möglichst gut unterdrückt wird. Anschliessend wird durch

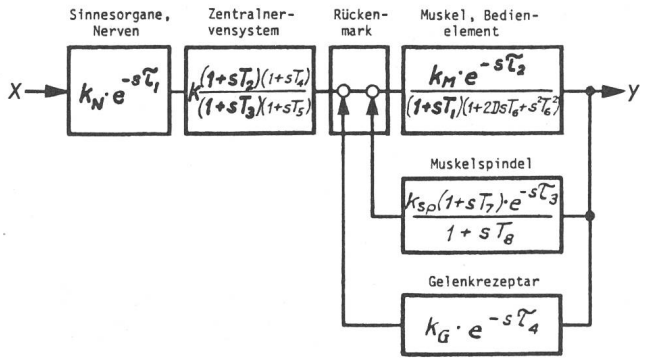

Fig. 9 Modell von Magdaleno et al. [4]

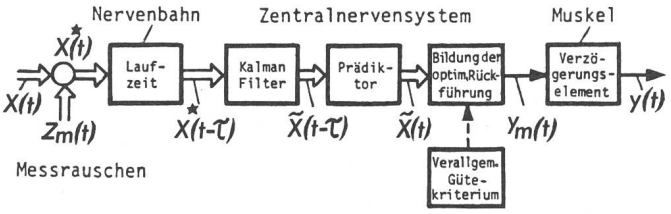

Fig. 10 Optimaltheoretisches Modell von Kleinmann et al. [5]

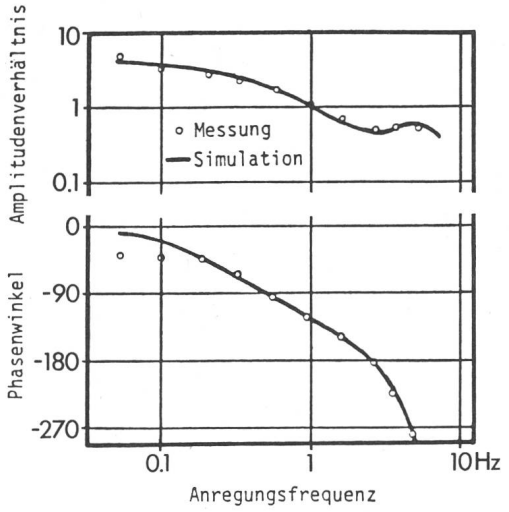

Fig. 11 Vergleich gemessener Frequenzgangwerte mit den nach dem Modell von Kleinmann berechneten Kurven

einen sog. Prädiktor versucht, die in den Nervenbahnen verursachte Totzeit τ rückgängig zu machen. In einem weiteren Modellteil wird schliesslich das optimale, an den Muskel zu übertragende Signal y_m gebildet, das über die Muskelkontraktion die Stellbewegung y bewirkt.

Die mit solchen Modellen erzielte Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation ist bemerkenswert gut, wie ein Zahlenbeispiel belegen mag. Figur 11 gibt den äquivalenten Regler-Frequenzgang für den Fall einer Regelstrecke mit verzögertem Proportionalverhalten wieder. Nur im ganz niederfrequenten Bereich treten nennenswerte Abweichungen auf.

5.4 Autoadaptive Modelle

Alle bisher betrachteten Modelle sind nur unter der Voraussetzung zeitinvarianter Prozesseigenschaften und quasistationärer Störeinflüsse gültig. Über die Anpassvorgänge bei sich ändernder Prozessdynamik (z.B. bei starker Änderung der Ladung eines Autos oder der Flughöhe eines Flugzeuges) oder bei sich wandelndem Störcharakter (z.B. Übergang von langsamer zu sehr schneller Autofahrt) vermögen sie nichts auszusagen, auch nichts über den Lernvorgang beim ersten Kontakt mit einem neuen, unbekannten Prozess (Beispiel: Erlernen des Radfahrens).

Will man versuchen, auch diese Einübvorgänge durch ein Modell zu reproduzieren, so ist eine Modellstruktur erforderlich, die über die bisher vorgestellten Strukturen grundsätzlich hinausgeht. Sie muss Elemente enthalten, welche eine selbsttätige quasioptimale Anpassung des dynamischen Verhaltens des Menschen an Änderungen der Prozessdynamik und/oder des Störcharakters möglich machen. Damit betreten wir ein Feld, das noch weitgehend Neuland ist. Wohl liegen eine Anzahl von Vorschlägen für solche autoadaptive Modelle vor. Doch ist man bis jetzt über qualitative Modellvorstellungen kaum hinausgekommen. Trotzdem möchte ich zum Abschluss der Betrachtungen über mathematische Modelle noch ein typisches Beispiel zeigen, das autoadaptive Modell von *Ziebolz-Kelley*.

Ein vereinfachtes Blockschaltbild davon zeigt Figur 12. Der oben im Schema dargestellte Teil entspricht z.B. dem Realzeitmodell von *Mc Ruer*. Daneben denkt man sich im Zentralnervensystem ein «schnelles» Modell von Prozess und Regler implementiert, das dazu dient, die optimalen Reglerparameter iterativ zu ermitteln. Zunächst wird dabei von einem auf Grund früherer Erfahrungen im Gedächtnis gespeicherten Modell ausgegangen. Die damit bestimmten Parameterwerte werden an das Realzeitmodell übermittelt und in der Folge beobachtet, ob das damit erzielte wirkliche Regelverhalten mit dem des schnellen Modells, d.h. mit der Vorstellung übereinstimmt. Wenn nicht, wird das schnelle Modell und sukzessive auch das Realzeitmodell im Rahmen des Möglichen so lange variiert, bis die Übereinstimmung praktisch erreicht worden ist. Dieser Vorgang entspricht dem Einüben.

Leider sind meines Wissens noch keine mit solchen oder ähnlich strukturierten autoadaptiven Modellen gemachten quantitativen Versuche bekanntgegeben worden, obwohl heute die theoretischen und technischen Voraussetzungen dafür durchaus vorhanden wären. Dagegen wurde die Einübphase im Zusammenhang mit anthropotechnischen Studien ziemlich eingehend untersucht, und man weiss zum Beispiel, dass sich die statistische Regelgüte etwa nach einem Exponentialgesetz verbessert. Fallweise und individuell sehr verschieden kann die Dauer der Einübphase sein. Man weiss es z.B. vom Autofahren!

6. Schlussbetrachtungen

Es ist längst aus der Physiologie bekannt, dass der menschliche Organismus bei den zahllosen, unbewusst ablaufenden inneren Regelvorgängen (wie etwa der Körpertemperaturregelung) erstaunliche Regelleistungen erbringt. Man stellt heute fest, dass der Mensch auch ähnlicher Leistungen fähig ist, wenn er bewusst auf seine Umgebung einwirkt. Das wäre an sich nicht so überraschend, solange es sich um natürliche, atavistische Verhaltensweisen handelt, die der Mensch sich etwa im Zusammenhang mit Nahrungssuche, Jagd und Kampf im Laufe seiner langen Entwicklung angeeignet hat. Dass er sich aber auch im Zusammenwirken mit technischen Systemen, also in Situationen, auf die er sozusagen biologisch gar nicht vorbereitet ist, trotzdem zweckmässig und nach dem Einüben sogar praktisch optimal verhält, das ist gerade auch für den Ingenieur in hohem Masse erstaunlich. Man wird zu der Feststellung geführt, dass der Mensch im Rahmen seiner naturgegebenen Grenzen über Möglichkeiten der Informationsverarbeitung verfügt, die denen der modernsten, ausgeklügeltsten technischen Regeleinrichtungen durchaus vergleichbar sind. Hinsichtlich Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit übertrifft er technische Gebilde sogar bei weitem.

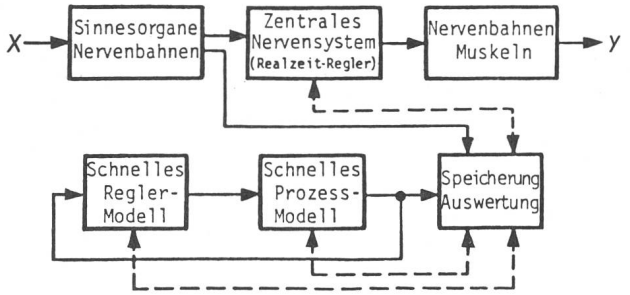

Fig. 12 Vereinfachtes Blockschema eines autoadaptiven Modells des menschlichen Einübe- und Regelverhaltens nach Ziebolz und Kelley [6]

Man stellt aber auch fest, dass der menschlichen Fähigkeit der Regelung technischer Systeme deutliche Grenzen gesetzt sind, vor allem, weil die Schnelligkeit seiner Reaktionen limitiert ist. Diese Grenzen werden gegebenenfalls noch weiter eingeengt durch mangelnde Einübung, Ermüdung, Erkrankung und andere Faktoren. Sie zu bestimmen, ist eine Aufgabe von Wissenschaft und Technik. Sie dann aber auch zu respektieren, ist dagegen vor allem eine Frage des menschlichen Verantwortungsbewusstseins.

Aber auch wenn man diese dem Menschen gesetzten Grenzen sieht, faszinierend bleibt es doch, was die Natur im Laufe der biologischen Entwicklung – ganz ohne moderne Regeltheorie – fertig gebracht hat. Angesichts der stupenden Zweckmässigkeit des Wirkens namentlich des menschlichen Zentralnervensystems drängt sich die Frage auf, ob dazu der Darwinsche Selektionsmechanismus, die blosse Auslese aus zufällig erzeugten Mutationen nach dem Prinzip der grössten Überlebenschance, wirklich hinreichte. Ich kann diese Frage nicht beantworten. Aber vielleicht darf ich sie Ihnen, verehrte Zuhörer, mit auf den Heimweg geben.

Literatur

[1] *P. Profos:* Über die Grenzen der Handregelung linearer Regelstrecken unter stochastischem Störeinfluss. Neue Technik 13(1971)1, S. 6...11.

[2] *W. Stein:* Vergleichende Untersuchung einachsiger manueller Regelvorgänge und Beurteilung ihrer linearen Modellierung. Forschungsinstitut Anthropotechnik Meckenheim, Bericht Nr. 21, 1974.

[3] *D. McRuer* a.o.: Human pilot dynamics in compensatory systems: Theory, models and experiments with controlled element and forceing function variations. Ohio, Wright-Patterson Air Force Base, 1965 (AFFDL-TR 65–15, July 1965).

[4] *R. E. Magdaleno* and *D. T. McRuer:* Experimental validation and analytical elaboration for models of the pilot's neuromuscular subsystem in tracking tasks. Nasa Contractor Report CR 1757. Washington, National Aeronautics and Space Administration, 1971.

[5] *D. L. Kleinmann* a.o.: An optimal control model of human response. Part I: Theory and validation. Automatica 6(1970)3, p. 357...369.

[6] *C. R. Kelley:* Manual and automatic control. A theory of manual control and its application to manual and to automatic systems. New York/London/Sydney, John Wiley, 1968.

Adresse des Autors

Prof. Dr. *P. Profos*, Büelweg 11, Winterthur.