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: 76 (1985)

Heft: 11

Artikel: Praktischer Nutzen neuer Regeltheorien

Autor: Stutz, T.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904623

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: 09.07.2025

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

Praktischer Nutzen neuer Regeltheorien

Th. Stutz

Es wird erklärt, weshalb die Regelungstechnik auf gute theoretische Grundlagen angewiesen ist und weshalb die fortgeschrittene Theorie das Lösen von besonders anspruchsvollen Regelaufgaben gestattet. Eine leicht verständliche Anwendung wird beschrieben, die in der alten Analogtechnik nicht hätte gleichwertig realisiert werden können. Sie zeigt, dass ein blosses «Digitalisieren» genauigkeitsmässiger Engpässe nicht denselben Nutzen wie die moderne Problemlösung im Zustandsraum bringt.

On montre pourquoi la technique de la régulation requiert de bonnes bases théoriques et pourquoi les progrès de la théorie permettent de résoudre des problèmes de réglage particulièrement ardus.
Un exemple d'application, facile à comprendre, illustre bien qu'il n'aurait pas pu être réalisé par l'ancienne technique analogique avec des performances équivalentes. Cette application montre également qu'une «digitalisation», destinée surtout à résoudre les problèmes particuliers posés par la précision requise, n'apporterait finalement pas autant d'avantages que la solution moderne qui consiste à travailler dans l'espace d'état.

Adresse des Autors
Prof. Dr. *Theo Stutz*, dipl. El.-Ing. ETHZ, Contraves AG, Postfach, 8052 Zürich.

Einleitung

In der Regelungstechnik ist der Abgrund zwischen Theorie und Praxis sehr gross. Es gibt einerseits erfahrene Entwerfer anspruchsvoller geregelter Systeme, die aktuelle Publikationen der Theoretiker nicht lesen können, und anderseits Theoretiker, die öffentlich erklären, keine Zeit für Gedanken über die praktische Anwendbarkeit ihrer Theorien zu haben. Diese Situation darf einen nicht gleichgültig lassen. Es liegen wertvolle geistige Arbeiten brach, wenn sich die Theoretiker mit der Anerkennung ihrer Theoretikerkollegen begnügen und die Praktiker mit dem Beifall (oder wenigstens Neid) ihrer Praktikerkollegen.

Wegen dieser Erkenntnis stand der neunte Weltkongress der International Federation of Automatic Control (IFAC) vom Juli 1984 in der Brückenstadt Budapest unter dem Motto «a bridge between control science and technology».

Der praktische Nutzen dieses Brükkenbaus, der technischen Verwertung moderner theoretischer Arbeiten, soll im folgenden dargestellt werden an einem typischen schweizerischen Industrieprodukt hoher feinmechanischer Präzision, der elektromechanischen Lagesteuerung in einem optischen Visiergerät. Dieses Produkt lebt einerseits von der sehr raschen digitalen Signalverarbeitung in einem Digitalrechner eigener Fabrikation. Es ist aber erst in dieser eleganten Form realisierbar geworden durch den Entwurf im Zustandsraum für diskontinuierliche Systeme.

Warum brauchen wir neue Theorien?

Nach eigener Erfahrung fällt uns älteren Elektrikern die Einsicht schwer, dass sich theoretische Grundlagen unseres Faches ändern können. Wir sind uns gewöhnt, dass sich nur in anderen Fächern spekulative Theorien ablösen, etwa in der Teilchenphysik oder in der Kosmologie. Für unsere elektromagnetischen Felder gelten die Maxwellschen Gleichungen seit 1873 unverändert.

Dadurch vergisst man leicht, dass auch altbekannte, unbestrittene Zusammenhänge wieder zweckmässiger formuliert werden müssen, wenn sich die Fragestellungen der Anwender einer Theorie ändern. Gerade am Beispiel von Maxwells Feldtheorie wird klar, dass sie zwar umfassend gilt, für praktischen Gebrauch jedoch zweckentsprechend spezieller formuliert werden muss, für Gleichstrommaschinen anders als für optische Erscheinungen.

Ganz ähnlich ist es mit den verschiedenen Aspekten der Systemtheorie, der uns hier interessierenden gemeinsamen Grundlage von Nachrichten- und Regelungstechnik. Auch hier bewirken veränderte technische Randbedingungen, dass neue Fragen an die alten, längst mathematisch dargestellten Zusammenhänge gestellt werden. Es soll im folgenden verständlich gemacht werden, dass diese neu formulierten Antworten den heutigen Bedürfnissen der Praktiker viel weiter entgegenkommen. Mit ihnen kann man für Aufgaben der Regelungstechnik raffiniertere Lösungsmethoden wählen, die mehr Freiheitsgrade erfassen und dadurch mehr Nebenbedingungen erfüllen können. Trotzdem bleiben diese überblickbar, und auch die grössere Anzahl von Parametern lässt sich optimal dimensionieren.

Zur Systemtheorie vor 1960

Dass die Fourier- und die Laplace-Transformation den Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich mathematisch exakt beschreiben, darf als bekannt vorausgesetzt werden. Weniger allgemein bekannt ist die Tatsache, dass sie als Funktionaltransformationen unstetig sind. Wenn eine

Folge von Funktionen im einen Bereich gegen eine gewisse Zielfunktion strebt, so strebt im anderen Bereich die Folge der Transformierten dieser Funktion nicht notwendigerweise gegen die Transformierte der Zielfunktion.

Beim Realisieren frequenzabhängiger Schaltungen, der Filter, wirkt sich die Forderung der Kausalität einschränkend aus: Bei jedem Filter kann in jedem Zeitpunkt ein Ausgangssignal nur verursacht werden durch Eingangssignale, die bis zu diesem Zeitpunkt eingetroffen sind. Es kann Signalereignisse nur verzögern. Wahrsager, die ein später ankommendes Signal voraussagen können, gibt es nicht.

Die genannten Einschränkungen wirken sich verschieden aus, wenn folgende drei Anwenderkreise ihre Aufgabestellungen an die Systemtheorie herantragen:

1. In der *Elektroakustik* interessiert vor allem die übertragene Signalamplitude als Funktion der Frequenz. An Phasen- beziehungsweise Laufzeitfehler hat man sich im Konzertsaal und bei der Lautsprecherwiedergabe gewöhnt. Ein einzelnes menschliches Ohr ist für alle Schallereignisse, die die zeitliche Auflösung der Hörnerven überschreiten, ein reiner Fourieranalysator. Dementsprechend spezifizieren die Korrekturfilter der Elektroakustik im allgemeinen nur den Realteil des komplexen Übertragungsmasses. Man verbessert den Amplitudengang auf Kosten des Phasenganges.

2. In der *Impulsübertragungstechnik* (Fernsehen, Datenübertragung usw.) ist der Real- und der Imaginärteil des Übertragungsmasses gleich wichtig. Der zeitliche Verlauf des Signals darf bei der Übertragung nicht verformt werden. Weil aber der Empfangsort eine spätere Bezugszeit haben darf als der Sendeort, gibt es auch hier einen freien Parameter für Korrekturfilter: Die um verschiedene Beträge verspätet eintreffenden Signalkomponenten werden einzeln im Filter je um so viel verzögert, dass alle die gleiche Gesamtverzögerung aufweisen. Bezogen auf die spätere Bezugszeit verwirklicht ein solches Filter positive und negative Laufzeiten.

3. In der *Regelungstechnik,* speziell für im Regelkreis umlaufende Signale, kann man keine zweite Bezugszeit einführen. Ob sich die unvermeidliche Verzögerung eines Filters vorteilhaft auswirken kann, lässt sich nicht durch Postulate der unter 1. und 2. beschriebenen guten Signalwiedergabe beurteilen, sondern allein aus dem Studium des ganzen geregelten Systems.

Diese besondere Problematik des Rückkopplungskreises haben die Pioniere der Nachrichtentechnik schon früh erkannt. Das 1945 erschienene Buch von *Hendrik W. Bode* «Network Analysis and Feedback Amplifier Design» zeigt die besonderen Anstrengungen der Theoretiker auf diesem Gebiet. Es wird heute noch zitiert in der Systemtheorie. Eine richtige Theorie wird nie falsch, höchstens unhandlich.

Die Impuls-Code-Modulation (PCM) und die digitale Signalverarbeitung

Es wird behauptet, dass jene Pioniere der Nachrichtentechnik sich nicht nur der begrenzten Möglichkeiten analoger Filterschaltungen in Rückkopplungskreisen bewusst gewesen seien, sondern einen möglichen Ausweg durch die digitale Impuls-Code-Modulation (PCM) bereits damals diskutiert hätten, als 1947 die Bell Telephone Laboratories die erste Telephonleitung mit PCM vorführten *(C.E. Shannon, H.S. Black, H. Nyquist, D.D. Grieg, W.M. Goodall, B.M. Oliver, J.R. Pierce).*

Die grundlegenden Vorteile der PCM durch die beliebig dimensionierbare Quantisierung der darzustellenden Messgrössen und die Unempfindlichkeit gegen Störungen sind in [1] zusammengestellt und sollen hier nicht wiederholt werden.

Die obenerwähnten Pioniere formulierten bereits die Gleichwertigkeit der zeitdiskreten Signalverarbeitung mit der kontinuierlichen durch den Probensatz (Sampling Theorem), nach dem eine Funktion der Zeit vollkommen gleichwertig durch ihre diskreten Werte in äquidistanten Zeitpunkten dargestellt werden kann, sofern sie keine Frequenzkomponenten oberhalb einer bekannten Grenzfrequenz enthält und sofern diese tiefer liegt als die halbe Abtastfrequenz.

Für den Regelungstechniker bedeutet der Übergang zu PCM:

- Alle Mess- und Steuergrössen werden durch richtig gewählte Quantisierungsschritte einer endlichen Anzahl von Stufen zugeordnet,
- diese Stufen werden als Zahlen in einem Zahlensystem dargestellt, und
- diese Zahlen werden in einem richtig gewählten Zeittakt als Zahlenfolgen erfasst, verarbeitet und an die Regelstrecke ausgegeben.

Damit wird die Genauigkeit der Signalverarbeitung beliebig wählbar mit der Konsequenz, dass interessantere Reglerstrukturen realisierbar werden. So kann man jetzt mit jeder interessierenden Grösse einzeln mathematische Operationen durchführen. Man ist nicht mehr wie in der Analogtechnik gezwungen, ausschliesslich eine möglichst kleine Differenz der interessierenden Grössen, das Fehlersignal auszuwerten, damit die begrenzte Genauigkeit der das Signal verarbeitenden Elemente nicht ins Gewicht fällt. Nun lassen sich alle in einem geregelten System vorkommenden Freiheitsgrade zur optimalen Dimensionierung ausnützen. Insbesondere kann man das Führungsverhalten und das Störungsverhalten weitgehend unabhängig voneinander den Spezifikationen anpassen. Man kann auch andere denkbare Strukturen des Systems studieren, zum Beispiel wie man den allfälligen Vorteil zusätzlicher Messstellen ausnützen kann.

Für den vorliegenden Zusammenhang mit einer immer raffinierteren Regelungstechnik ist es besonders interessant, dass PCM eine einheitliche Realisierung aller denkbaren Filteroperationen durch transversale und rekursive Digitalfilter erlaubt. Da in einem kausalen, linearen System jede Zahl der Zahlenfolge am Ausgang eine Linearkombination der bis zu diesem Zeitpunkt an den Eingängen hereingenommenen Zahlen ist, kann man eine in Analogtechnik beliebig komplizierte Struktur immer durch ein einziges kanonisches Digitalfilter ersetzen, das nur speichern, mit konstanten Koeffizienten multiplizieren und addieren kann. Daraus folgt:

- Die für Filterzwecke entwickelten Digitalschaltungen können viel einfacher sein als die für Universalrechner gebauten,
- die Parameter (Koeffizienten) dieser Filter können durch übergeordnete Rechenvorgänge sehr leicht verändert werden. Ohne wesentlichen Mehraufwand an Hardware lässt sich so der alte Traum der sich selbsttätig optimierenden Filter und Regler verwirklichen.

Vergleicht man einen solchen Digitalregler mit dem entsprechenden Prinzipschema in Analogtechnik, so ist es vollständig gleichwertig, ob man

im Analogschema zusätzliche Signalpfade einführt mit beliebigen linearen Operatoren (auch Integratoren) oder ob man kostenlos die Koeffizienten des Digitalfilters entsprechend ändert. Man gewinnt durch diese Technik an Universalität, verliert aber die Anschaulichkeit der früheren Übereinstimmung von Verdrahtung und Blockschema.

Es dürften immer weniger Leute bereit sein, für diese Anschaulichkeit Nachteile in Kauf zu nehmen oder gar einen Mehrpreis zu bezahlen. Man hat umgekehrt Mehrpreise bezahlt, als seit etwa 1960 kostspielige regelungstechnische Aufgaben mit den damals noch teuren Digitalrechnern gelöst wurden, wie etwa der Betrieb von Zementfabriken oder von grossen elektrischen Verteilnetzen. Mit universellen Digitalrechnern wurden auch mathematisch anspruchsvolle Aufgaben gelöst, wie etwa die fortlaufenden Bahnkorrekturen in der Raumfahrt.

Veränderte wirtschaftliche Bedingungen

Die praktische Einführung der PCM und der digitalen Signalverarbeitung wurde vor allem ermöglicht durch eine wirtschaftliche Rahmenbedingung: Bekanntlich ist es der Halbleiterindustrie gelungen, elektronische Schaltungen für normierte Funktionen der digitalen Informationsverarbeitung in weniger als 30 Jahren um rund eine Million mal billiger herzustellen. Diese in der ganzen Technikgeschichte wohl erstmalige Preisentwicklung bewirkte unter anderem, dass die viel kompliziertere PCM heute sogar in der Unterhaltungselektronik angewendet wird, zum Beispiel in den «Compact Discs».

Damit können auch Regelschaltungen um Zehnerpotenzen komplexer gestaltet werden, ohne in den Herstellkosten teurer zu werden. Das einzige Argument für alte, bewährte Lösungen der Analogtechnik ist die Furcht vor grossen Entwicklungs- und Erprobungskosten bei einer Umstellung.

Somit wünscht sich die Regelungstechnik heute ungefähr folgendes von den nützlichsten theoretischen Entwicklungsgrundlagen:

- Keine Rücksichtnahme auf die Analogtechnik mit ihren aus Genauigkeitsgründen eingeschränkten Strukturen,
- umfassende Formulierung aller Wunschvorstellungen für ein geregeltes System,
- möglichst weitgehende mathematische Systematisierung der Entwurfsarbeit bis zur Anpassung an die Rechner, die zum Entwurf, zum Dimensionieren, zum Simulieren und als Regler verwendet werden.

Zur Zustandsraum-Methode

Den eben erwähnten Bedarf für eine umfassendere Theorie hat glücklicherweise die Systemtheorie erkannt. Beispielsweise begründete damit 1960 *R.E. Kalman* die Publikation seiner Arbeit «On the General Theory of Control Systems». Darin konnte er die Begriffe der Steuerbarkeit und der Beobachtbarkeit populär machen, aber auch die Darstellung eines Systems durch Zustandsgrössen, wie dies schon vorher Theoretiker wie *Ljapunow, Pontryagin* und *Bellman* getan hatten.

Diese Methode des Zustandsraumes leistet tatsächlich mehr als die Eingangs-Ausgangs-Beschreibung eines Systems, weil neben den Ein- und Ausgangssignalen auch alle inneren variablen Grössen als Zustandsgrössen erfasst werden. So lässt sich jederzeit das zukünftige Verhalten des Systems voraussagen. Sogar der Einfluss allfälliger nichtlinearer Elemente kann so als Funktion der Zeit dargestellt werden. Eine konzentrierte Form der Schreibweise wird mit Hilfe der alten mathematischen Disziplin der linearen Algebra erreicht: Dank ihrer Matrizen können alle beteiligten Differentialgleichungen durch eine Vektor-Differentialgleichung erster Ordnung dargestellt werden. Diese lässt sich, falls nötig, umrechnen in die gebrochen rationale Übertragungsfunktion oder andere Begriffe der «alten» Theorie. In der zeitdiskreten Darstellung beschreiben solche Matrizen unmittelbar die vom Digitalfilter auszuführenden Rechenschritte.

Wer gelernt hat, Systeme von Differentialgleichungen direkt zu lösen oder dies mit Verwendung der Laplace-Transformation noch eleganter zu tun, wird bei einfachen Beispielen mit Recht einwenden, der Zustandsformalismus sei umständlicher. Der letztgenannte kann aber viel leichter in die Sprache der digitalen Filter und Rechenautomaten übersetzt werden, und diese allein bewältigen Systeme hoher Ordnungszahlen.

Interessanterweise gilt diese Beschränkung nicht nur für die analytischen Fähigkeiten des Menschen, sondern auch für seine körpereigenen Bewegungssteuerungen, was in einer Fernsehsendung zum ETH-Jubiläum 1980 so gezeigt wurde: Ein digitaler Zustandsregler konnte zwei aufeinandergestellte Stangen durch Bewegen des untersten Endes stabil halten; einem berufsmässigen Balance-Artisten gelang dies nicht.

Sicherheitshalber sei auf zwei mögliche Missverständnisse hingewiesen:

1. Die hier empfohlenen Rechneranwendungen entsprechen in folgendem nicht den bekannteren kaufmännischen Rechneranwendungen: Der Regelungstechniker spielt nicht die Rolle des Buchhalters, dem vom Computer Arbeit abgenommen wird, sondern diejenige des Organisationsberaters, der sich immer wieder in neue Rechneranwendungen hineindenken muss. Für solche Anwendungsfragen der digitalen Zustandsregler sei auf den Aufsatz [2] verwiesen.

2. Wegen der beschriebenen Überlegenheit der Zustandsmethode und der Digitalregler für Systeme grosser Ordnungszahlen könnte leicht übersehen werden, dass sie auch für einfache Systeme Vorteile bieten können. So geben sie unter anderem einen Überblick über mögliche Zusatzbedingungen, die sich beim Entwurf ohne Mehraufwand berücksichtigen lassen. Der Rest dieses Aufsatzes sei daher dem angekündigten Anwendungsbeispiel gewidmet, das mit Hilfe der Zustandsdarstellung konstruktiv viel einfacher gestaltet werden konnte.

Ein digital zustandsgeregelter Spiegelantrieb

An dem in Figur 1 wiedergegebenen Fliegerabwehrgeschütz ist das in Figur 2 gezeigte Visier Gun-King angebaut. In diesem wird die vom Richtschützen benützte Visierlinie nach zwei Steuergrössen eines digitalen Vorhaltrechners laufend gegenüber der Geschützachse bis um etwa ±15° verdreht. Zu diesem Zweck führen die Strahlengänge des Richtfernrohrs und des Laser-Distanzmessers über einen beweglichen Spiegel, der in Figur 3 im Schnitt und in Figur 4 fotografisch wiedergegeben ist.

In unserem regelungstechnischen Zusammenhang interessieren nur die beiden Spiegelantriebe für die beiden Koordinaten mit ihren Regelkreisen und den zeitdiskreten Zustandsreglern, die im gleichen felddiensttaugli-

Fig. 1 Fliegerabwehrgeschütz mit Visier Gun-King

Der Schütze schiesst selbständig auf Flugziele, indem er manuell (servounterstützt mit Steuerknüppel) sein Geschütz derart bewegt, dass das Ziel im Fadenkreuz seines Zielfernrohres bleibt. Illustrationsbeispiel der vorliegenden Arbeit ist die automatische Steuerung dieser Visierlinie in ihrer Lage gegenüber dem Geschütz, wodurch der richtige Vorhalt gewährleistet wird. Damit werden die Geschosse nach demjenigen Raumpunkt abgeschickt, in dem sich das Ziel nach Ablauf der Geschossflugzeit befinden wird. Zur Berechnung dieser optimalen Vorhaltwinkel kennt der unter dem Sitz des Schützen sichtbare Digitalrechner die Geschütz-Drehwinkel, das Resultat der automatischen Laser-Distanzmessung und die Munitionsdaten.

chen Digitalrechner der Firma Contraves untergebracht sind, der schon in der erwähnten Vorhaltrechnung die beiden Steuergrössen erzeugt. (Sein Gehäuse ist in Figur 1 unter dem Sitz zu sehen.)

Damit der Grundgedanke der Ausnützung der heute billigen Rechnerintelligenz durch eine dieser angepasste Theorie klar wird, soll mit der Erklärung grundlegender Probleme aller Nachlaufsteuerungen begonnen werden.

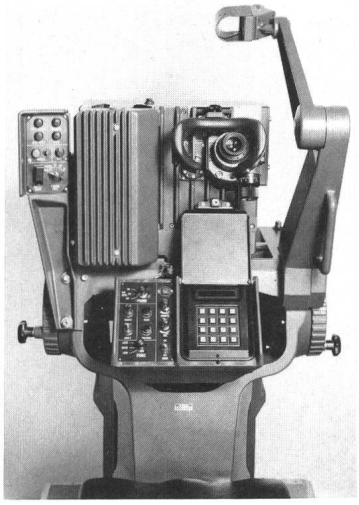


Fig. 2 Das Visier Gun-King mit der Einblicköffnung des Zielfernrohrs

Die optische Achse des Zielfernrohrs, die Visierlinie des Schützen bei der Zielverfolgung, führt über einen Spiegel. Zur automatischen Einstellung des bei Figur 1 erwähnten Vorhalts muss dieser Spiegel um zwei Koordinatenachsen sehr genau gedreht werden.

Grenzen beim Entwurf von Nachlaufsteuerungen

Mit Hilfe eines aus elektrischen und mechanischen Strecken bestehenden Regelkreises soll eine Drehbewegung fortlaufend auf denjenigen Winkelwert geregelt werden, der im Moment von der dem System zugeführten Steuergrösse verlangt wird. Je kleiner dabei die zulässigen örtlichen und zeitlichen Toleranzen sind und je «zackigere» Bewegungen verlangt werden können, um so schwieriger ist die technische Beherrschung dieser Aufgabe. Beim Entwurf eines derartigen elektromechanischen Antriebssystems stösst man vor allem auf folgende Grenzen:

1. Der elektro-mechanische Wandler, der Motor, hat Grenzen in der Leistung, dem Drehmoment und der Drehzahl. Diese könnte man dem Problem entsprechend wählen, doch kommt dazu die physikalisch begrenzte Leistungsdichte, die schon bei leerlaufenden Motoren aller Grössen die Beschleunigungsmöglichkeit begrenzt. Ein Motor kann nichts rascher beschleunigen als sich selbst.

2. In der mechanischen Verbindung zwischen dem Motor, dem Messelement für die erreichte Position und dem zu bewegenden Teil hat jede Deformation eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die daraus folgende Verspätung kann kein Regler ungeschehen machen. Sie verunmöglicht das regelungstechnische Unschädlichmachen rascher Störungen.

3. Der mechanisch-elektrische Wandler, das Messelement, hat örtliche und zeitliche Genauigkeitsgrenzen.

4. Eine in der Praxis feststellbare Grenze für die Erfüllung anspruchsvoller Nachlaufaufgaben liegt in unvollkommenen Reglern, die der Vermeidung von Regelschwingungen mehr Reaktionsgeschwindigkeit und Störungsunempfindlichkeit opfern, als grundsätzlich nötig wäre.

Diese vier Grenzen wirken wie Glieder einer Kette: Es hätte keinen Sinn, diejenigen für teures Geld zu verbessern, die in einem konkreten Fall gar nicht kritisch sind. Es ist eine Erfahrungstatsache, dass man nur selten Antriebe antrifft, die an den nicht überschreitbaren physikalischen Grenzen anstossen. Zwischen diesem oberen Grenzfall und den unvollkommen geregelten Antrieben besteht ein dankbares Tätigkeitsgebiet für intelligentere Regler wie die hier beschriebenen zeitdiskreten Zustandsregler. Sie sind zwar in der Wirkungsweise komplizierter, aber dank moderner Digitaltechnik genauer und in der Herstellung billiger. Für ihren Entwurf muss allerdings ein leistungsfähiger Rechner zum Berechnen und Simulieren zur Verfügung stehen.

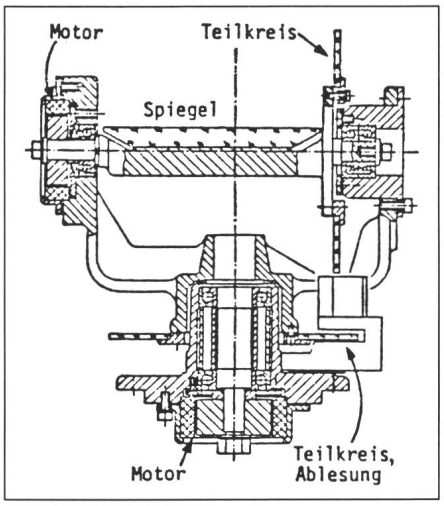


Fig. 3 Schnittzeichnung der Spiegelhalterung

Die Zeichnung zeigt die Halterung des um zwei orthogonale Achsen drehbaren Spiegels mit den zwei Elektromotoren (Torquemotoren) und die zwei Drehwinkelmessungen durch Teilkreise (131 072 Schritte) und Fotozellenablesung. In der mittleren Gebrauchslage ist der Spiegel um die horizontale Achse um etwa 45° gedreht.

Was die alte Theorie nicht als realisierbar erkannt hätte

Für den vorliegenden Spiegelantrieb ist nicht nur nach den soeben gemachten Überlegungen ein besonders günstiger Regler entwickelt worden.

Fig. 4 Ansicht des Spiegels von Figur 3

Der Entwurf in der Zustandsdarstellung zeigte den Weg, um ohne Mehrkosten in der Hardware zwei zusätzliche Eigenschaften einzubauen, die im vorliegenden Fall für den Erfolg massgebend sind:

- der Betrieb ohne Tachogenerator und
- das Optimieren des Störungsverhaltens gegen die unvermeidlichen Reibungskräfte.

Während die bisher üblichen präzisen Antriebe mit direkt angekoppelten Gleichstrommotoren einen Tachogenerator zur Geschwindigkeitsmessung enthalten, war es hier aus konstruktiven Gründen dringend erwünscht, zur Erfassung der Drehbewegung nur die Positionsmessung durch Striche eines Teilkreises zu verwenden. Tachogeneratoren, die für diese Anwendung sowieso zu gross wären, geben als Folge unvermeidlicher elektromagnetischer Streufelder schon im Stillstand eine Störspannung ab, die unzulässig gross ist gegenüber dem Messsignal beim zu erfassenden Langsamlauf.

Ohne diese Geschwindigkeitsmessung würde aber ein klassischer Regler mit Fehlersignalbildung nur die Differenz zwischen der Steuergrösse und der quantisierten Lage der Drehbewegung kennen. Über eine allfällige Bewegung in der Lücke zwischen zwei benachbarten der 131 072 Quantensprünge fehlt einem solchen einfachen Regler jede Information. Der Zustandsregler hingegen kennt getrennt voneinander den bisherigen zeitlichen Verlauf des Motordrehmomentes, den Verlauf der Steuergrösse und die Zeitpunkte des Passierens der Teilstriche. Unter der Voraussetzung, dass der Abstand dieser Teilstriche und die Rechentaktfrequenz im Verhältnis zu den servotechnischen Zeitkonstanten richtig gewählt sind, schätzt der Zustandsregler die Drehgeschwindigkeit besser, als sie ein Tachogenerator handelsüblicher Qualität messen könnte.

Damit ist gezeigt: Der beschriebene Spiegelantrieb ist ein Beispiel eines präzisen schweizerischen Industrieproduktes, das in der vorliegenden, vorteilhaften Form ohne Digitaltechnik und moderne Regeltheorie nicht hätte verwirklicht werden können.

Unbestritten ist die handwerkliche Tradition unserer Grossväter in der Feinmechanik und die Stärke der Schweizer, Computer gewinnbringend auf Franken und Rappen loszulassen. Möge stets eine genügende Anzahl grauer Hirnzellen, aktiviert durch gute Theorien, das Universalwerkzeug Digitaltechnik auch der Schweizer Feinmechanik zugute kommen lassen.

Die hier dargelegten Erkenntnisse über die Vorteile der Zustandsdarstellung stützen sich zu einem beträchtlichen Teil auf interne Arbeiten des kürzlich verstorbenen Mitarbeiters dipl. Ing. *A. Müller*.

Literatur

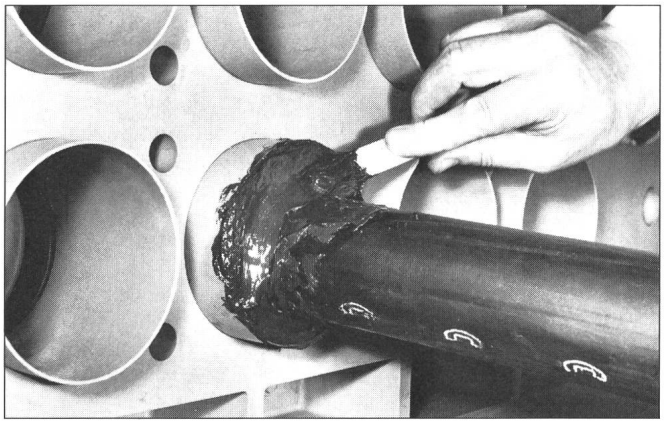
[1] *Theo Stutz:* Wodurch können Erbauer und Anwender automatischer Steuerungen von der Digitaltechnik profitieren. Vortrag der 31. SGA-Tagung über die Vorteile der Digitaltechnik in der Automatik, 22. Sept.1972 in Zürich. Neue Technik, 15(1973)2, S. 49...56.

[2] *Jürg Ulrich:* Hinweise zur Anwendung des diskreten Zustandsreglers in der Praxis. Bulletin SEV/VSE 76(1985)11, S. 630...636.

Atelier Erhard Meier

dicht?

Mit dem neuen
Abdichtungssystem Scotchcast 9580
keine Frage mehr.



Scotchcast 9580 ist ein spachtelbares, elastisches Polyurethan-Harz:
für garantiert gas- und wasserdichte Abdichtungen von Kabelkanälen, Kabel-, Gas- und Wasserrohreinführungen in Gebäude; auch für Dichtungen zwischen Rohr und Mauerwerk.

- unbrennbar
- ausgezeichnete Haftung z.B. auf Ton, PVC, PE, Beton, Eternit
- flexibel, kann bei Bedarf wieder entfernt werden
- schnelle, einfache Verarbeitung

Wir informieren Sie gerne. Verlangen Sie noch heute die Unterlagen Scotchcast 9580.

3M (Schweiz) AG
Abt. Elektroprodukte
8803 Rüschlikon
Durchwahl 01 724 93 51

3M

contraves

Ein bedeutendes Schweizer Elektronikunternehmen, das Geräte, Anlagen und Systeme für die Luftraumverteidigung, Weltraumtechnik, Industrie und Medizin entwickelt. Contraves-Produkte zeichnen sich weltweit durch Qualität, Präzision und Fortschritt aus.

contraves
Contraves AG
CH-8052 Zürich
Schaffhauserstrasse 580

Ein Unternehmen des Oerlikon-Bührle Konzerns

Günstiger
kauft man bei uns
Qualitäts-Sprechanlagen

Wir führen über
150 verschiedene Apparate.
Neuen Katalog anfordern!

LITEMA 8967 Widen
057 - 33 50 80

Moderne Mess- und Leittechnik
für die Wasser- und Energiewirtschaft

DOKW Greifenstein (A)
Für dieses Donaukraftwerk lieferten wir Pegelmessungen, Rechengefällsmessungen, Wehrstellungsmessungen, Schleusenüberwachungen, Fallhöhenvorgabeeinrichtungen, Zeitfolgemelder RIDAT-ZFM und Oberwasserpegelregler aufgebaut mit dem frei konfigurierbaren Prozessregelsystem RIDAT-SRO.

rittmeyer

Rittmeyer AG
Telefon 042 33 19 91

Postfach 2143
CH-6300 Zug 2

ETG UNITRO
STÖRMELDESYSTEME

Die neue Generation Klartext-Störmeldedrucker

Klartext-Störmeldedrucker mit einer Auflösung von weniger als 5 Millisekunden baut ETG-UNITRO schon seit Jahren.

Mit der neuen Generation dieser Geräte ist ETG-UNITRO einen Schritt weiter gegangen. Dank EEPROM-Textspeichern, RS423-Schnittstelle für Monitor und weiterentwickelter Betriebssoftware entstand ein flexibles, anwenderfreundliches Informationssystem: aktueller Betriebszustand Ihrer Anlage auf dem Bildschirm und lückenloses, zeitfolgerichtiges Protokoll auf dem Drucker.

S+K

Schärer + Kunz AG
8021 Zürich, Postfach 820
Telefon 01 - 64 20 44
Telex 822 823 eska ch