

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 62 (1971)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Computeranwendungen in der Regelungstechnik  
**Autor:** Mansour, M.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915869>

#### 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:** 11.01.2026

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

# Computeranwendungen in der Regelungstechnik

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 22. Juni 1971 in Zürich  
von M. Mansour, Zürich

62-503.55

## 1. Einführung

Der Einsatz von Computern in der Regelungstechnik ist eine Selbstverständlichkeit geworden. Computer können sowohl «On-line» als auch «Off-line» verwendet werden (Fig. 1).

## COMPUTERANWENDUNGEN IN DER AUTOMATIK

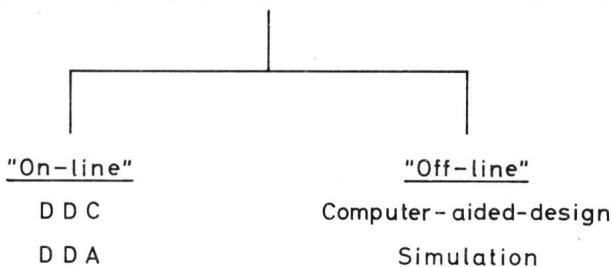


Fig. 1  
Computeranwendungen in der Automatik

In der direkten digitalen Regelung DDC (Direct Digital Control) übernimmt der Digitalrechner die Funktion des Reglers. Dank seiner Fähigkeiten, die Daten zu speichern und logische Entscheide zu treffen, ist er dazu geeigneter als der Analogregler. In der DDA (Digital Directed Analog) besteht die Aufgabe des Digitalrechners darin, die Führungsgrößen der analoggeregelten Kreise zu liefern. In diesem Vortrag sollen nur die «off-line» Anwendungen des Computers besprochen werden. Einige «off-line» Anwendungen, die den Entwurf von Regelsystemen erleichtern, sind die folgenden:

- Wurzelortskurven, Frequenzgang, Zeitverhalten;
- Parameter-Optimierung;
- Zustandsrückführung;
- Identifikation;
- Sensitivitätsanalyse;
- Analoge und hybride Simulation;
- «On-line» Control auf dem Hybridrechner.

## 2. Wurzelortskurven, Frequenzgang, Zeitverhalten

Fig. 2 zeigt ein einfaches Regelsystem mit Übertragungsfunktion des Prozesses  $G(p)$ , Verstärker  $K_v$  und Kompensator

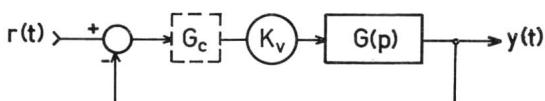


Fig. 2  
Einfaches Regelsystem

mit Übertragungsfunktion  $G(p)$   
Kompensator (Regler)  $G_c$   
Verstärker  $K_v$

Beispiel:  $G(p) = \frac{1}{p(p+1)(p+5)}$

$G_c = p + 2$

$G_c(p)$ . Gewünscht ist das Regelsystem ohne den Kompensator zu analysieren und den Einfluss von verschiedenen Kompensatoren zu untersuchen. Das kann mit Hilfe des Rechners erfolgen. Für den Prozess 3. Ordnung sieht man in Fig. 3 die Wurzelortskurven (WOK) mit der Verstärkung  $K_v$  als Parameter. Der Computer berechnet die Ortskurven, ausgehend von den Polen des Prozesses. Er zeigt den Verlauf auf dem Bildschirm in einigen Sekunden. Andere Informationen über das System, z. B. die kritische Verstärkung, werden gedruckt, so dass man in der Lage ist, die richtige Verstärkung zu wählen. Das Verhalten des Systems kann verbessert werden, indem Kompensationsglieder eingebaut werden. Fig. 4 zeigt den Einfluss des P-D-Reglers ( $G_c = p + 2$ ) auf die WOK. Dieser Regler führt eine Nullstelle bei  $-2$  ein, welche stabilisierend auf das System wirkt, so dass mit grösserer Verstärkung gearbeitet werden kann.

Fig. 5 zeigt den Frequenzgang desselben Beispiels ohne Kompensator für verschiedene Verstärkungen und Fig. 6 den

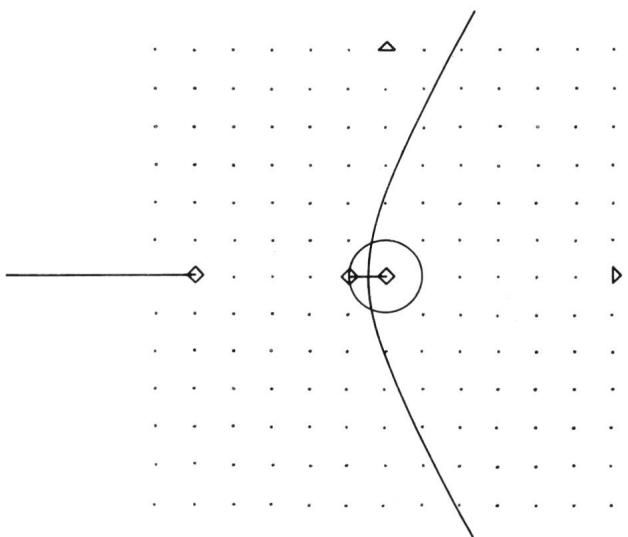


Fig. 3  
Wurzelortskurven  
◊ Pol  
○ Nullstelle

Frequenzgang mit Kompensator, welcher stabilisierend wirkt. Dieser Entwurf mit Computer wird in der obligatorischen Vorlesung «Automatik und Regelungstechnik» an der Abteilung für Elektrotechnik der ETHZ berücksichtigt. Es existieren auch Programme, die das Zeitverhalten eines linearen Regelsystems in geschlossener sowie in graphischer Form liefern. Diese Programme dienen der Beurteilung des Systems und der Wahl des Reglers [1]<sup>1</sup>.

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

### 3. Parameter-Optimierung

Auf Fig. 7 sieht man das Problem der Parameter-Optimierung. Hier ist die Struktur des Reglers bekannt, aber die Parameter des Reglers sind nach einem Gütekriterium zu bestimmen. Die Lösung dieses Problems kann mit dem Rechner automatisiert werden. Durch ein geeignetes Suchverfahren (z. B. eine Gradientenmethode) kann der Rechner die optimalen Parameter bestimmen. Die Behandlung vom numerischen Optimierungsverfahren ist im Buch von Drenick [2] gut beschrieben.

Die Optimierung mit der Methode der dynamischen Programmierung sowie mit dem Maximumprinzip (Lösung der

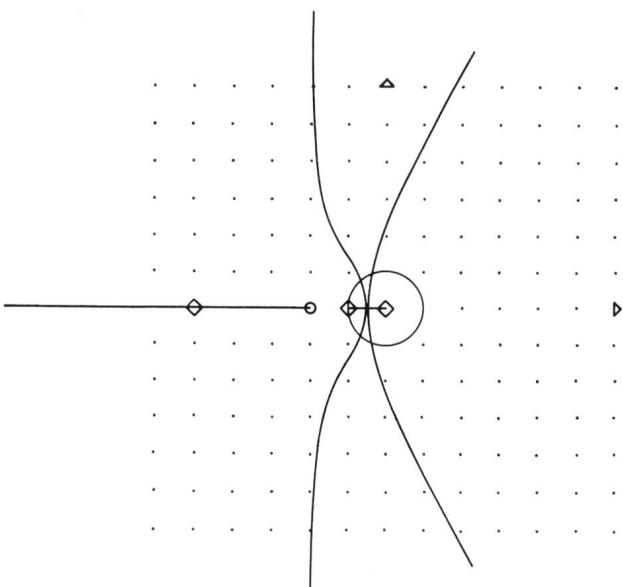


Fig. 4  
Wurzelortskurven des kompensierten Systems  
Bezeichnungen siehe Fig. 3

Zweipunkt-Randwertaufgabe) ist eine Aufgabe für den Rechner.

### 4. Zustandsrückführung

Die moderne Theorie der Automatik hat gezeigt, dass die Rückführung aller Zustandsgrößen des Prozesses ein besseres

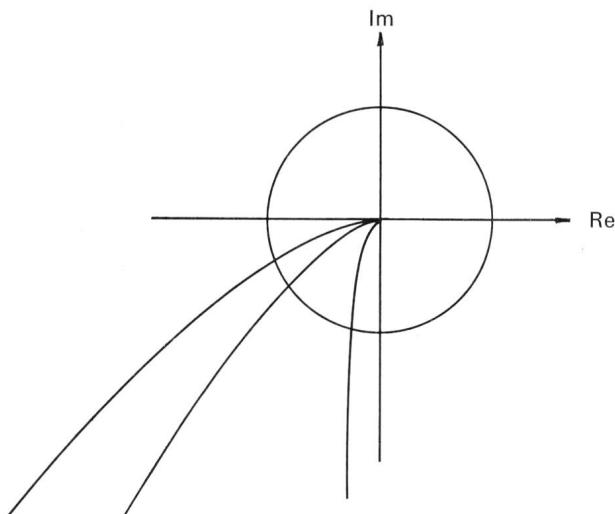


Fig. 6  
Frequenzgangkurven des kompensierten Systems

Verhalten ergibt. Ebenso zeigt die Theorie, dass die Optimierung eines linearen Systems mit quadratischer Zielfunktion zu einer linearen Rückführung aller Zustandsgrößen führt.

Die Rückführkoeffizienten können mit verschiedenen numerischen Methoden «Off-line» berechnet werden.

Fig. 8 zeigt das Prinzip der Zustandsrückführung, wo der Regler oder Computer den Steuervektor aus dem Zustandsvektor berechnet. Es existieren auch Programme, wo die Rückführkoeffizienten für eine gewünschte gesamte Übertragungsfunktion berechnet werden können [1].

### 5. Identifikation

Die Aufstellung des mathematischen Modells ist eine der ersten Aufgaben der Automatik.

Fig. 9 zeigt ein Prinzipschema der Identifikation. Die Eingangs- und Ausgangssignale des Prozesses werden gemessen,

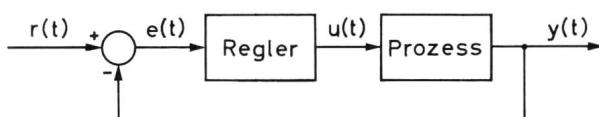


Fig. 7  
Parameter Optimierung  
Struktur des Reglers bekannt  
Parameter des Reglers sind nach einem Gütekriterium zu bestimmen

und der Rechner kann die Übertragungsfunktion bestimmen. Es ist auch möglich, anhand der Messungen am Prozess die Systemmatrix sowie die Übergangsmatrix (Fundamentalmatrix) zu berechnen. Die verwendeten Signale können normale Betriebssignale oder absichtlich für die Identifikation eingeführte Signale (z. B. Schrittfunktion, Sinusfunktion variabler Frequenz) sein. Stochastische Signale können ebenfalls verwendet werden, wobei der Rechner die Korrelationsfunktionen berechnet, um den Prozess zu identifizieren.

Die Identifikation kann «Off-line» oder «On-line» erfolgen. Letztere ist für die adaptive Regelung, bei der der Rechner, je nach dem Resultat der Identifikation, die Parameter der Regelung einstellt, geeignet.

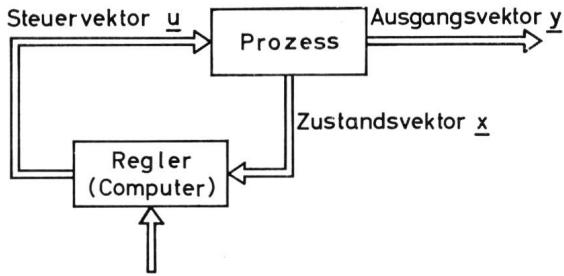


Fig. 8  
Zustandsrückführung

## 6. Sensitivitätsanalyse

Bei Regelsystemen ist es oft interessant, den Einfluss der verschiedenen Parameter des Systems zu ermitteln. Dies kann durch die Sensitivitätsanalyse erreicht werden. Als Beispiel sei hier das Programm SENSIT erwähnt [1]. Das System mit Zustandsrückführung ist gegeben durch:

$$x = A \cdot x(t) + b \cdot u(t)$$

$$u(t) = K \cdot r(t) - k' x(t)$$

Das Programm SENSIT liefert die Variation der Pole des Regelsystems, wenn ein Element in  $A$ ,  $b$ ,  $k$  oder  $K$  variiert.

## 7. Analoge und hybride Simulation

Dynamische Prozesse lassen sich mit technischer Genauigkeit auf dem Analog- oder Hybridrechner simulieren. Nach Fig. 10 geht man von einem physikalischen System aus. Das mathematische Modell wird durch physikalische Überlegungen,

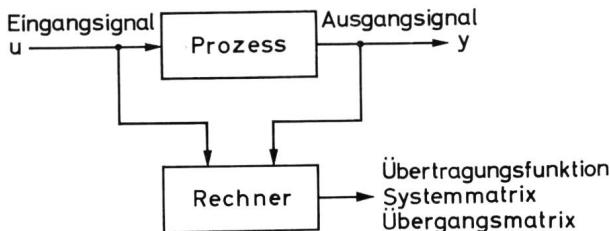


Fig. 9  
Identifikation

und/oder Anwendung einer Identifikationsmethode anhand von Messungen, erstellt. Je nach Prozess eignet sich ein Digital-, Analog- oder Hybridrechner. Der Hybridrechner verdient hier die Aufmerksamkeit, da er erwartungsgemäß keinen Platz bei anderen Vorträgen dieser Tagung findet.

Bevor die Anwendungsmöglichkeiten des Hybridrechners erwähnt werden, sei zuerst ein solcher Rechner besprochen.

Fig. 11 zeigt die drei Hauptteile eines echten Hybridrechners. Der Analogrechner wird durch ein Interface mit dem Digitalrechner gekoppelt. Der Datenaustausch zwischen beiden Rechnern geschieht durch den Interface. Sowohl skalare als auch logische Größen können ausgetauscht werden. Normalerweise besteht die Möglichkeit, die Potentiometer vom Digitalrechner automatisch einzustellen sowie die «Mode» der Analogrechner zu steuern. Umgekehrt kann das Analogprogramm vom Analogrechner automatisch unterbrochen werden und andere Unterprogramme können zum Laufen gebracht werden.

Neuerdings kann das Analogprogramm durch den Digitalrechner vollständig aufgestellt und gesteuert werden. Diese

Neuheit gibt dem Hybridrechner den entscheidenden Vorteil gegenüber den Simulationssprachen, wie CSMP und MIMIC. Für eine Beschreibung des Aufbaus, der Arbeitsweise und Anwendungsmöglichkeiten des Hybridrechners (besonders desjenigen der ETHZ) sei auf [3] verwiesen.

Von Seiten des Ingenieurs ist der Hybridrechner dem Digitalrechner in einigen Anwendungsbereichen weit überlegen, z. B. Simulation von grossen Systemen, die durch eine grosse Anzahl von Differentialgleichungen beschrieben werden. Was man für solche Systeme auf dem Digitalrechner in Stunden erreicht, kann man auf dem Hybridrechner in Sekunden bekommen. Zudem ist der Hybridrechner für Ingenieure den physi-

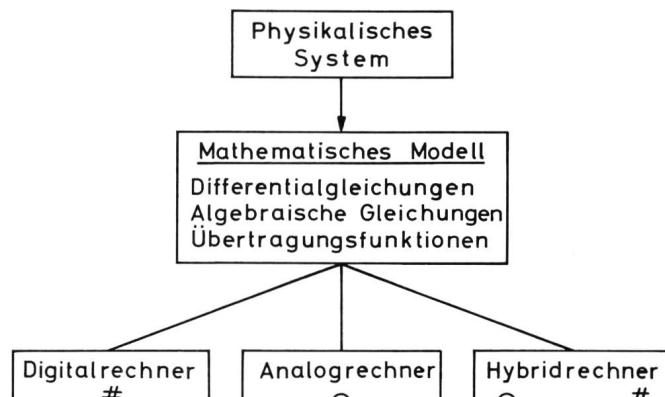


Fig. 10  
Simulation

kalischen Verhältnissen näher, was von grossem Vorteil ist. In kurzer Zeit kann man den Einfluss verschiedener Parameter des Reglers auf das Verhalten des Systems untersuchen sowie Iterationsverfahren benützen, um den Regler optimal einzustellen.

## 8. On-Line Control auf dem Hybridrechner

Eine wichtige Anwendungsmöglichkeit des Hybridrechners in der Automatik ist die Simulation digital geregelter Systeme

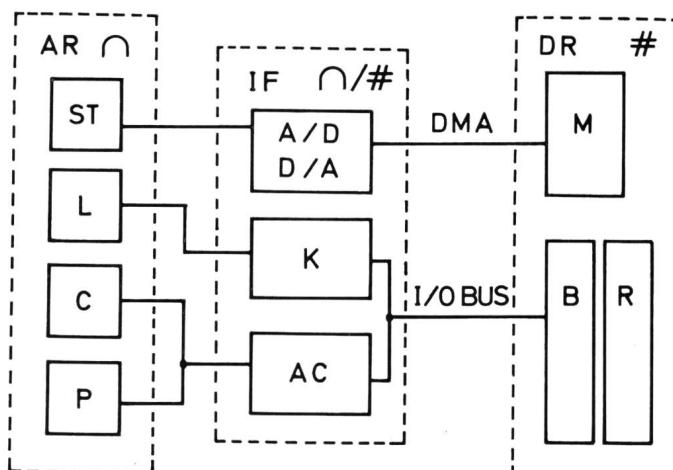


Fig. 11  
Kopplung in einer Hybridanlage  
Prinzipschema

AR Analogrechner, ST Steckbrett, L Logikeinheit, C Steuereinheit, P Servopotentiometer, IF Interface, K Kommandoleitungen, AC Analog Control, DR Digitalrechner, M Speicher, B Befehlsteil, R Rechen-einheit, DMA Direkt-Zugriffskanal, I/O Bus Ein-/Ausbaleitungen

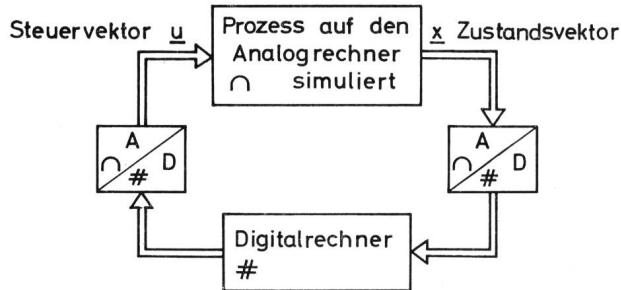


Fig. 12  
«On-Line» Control auf dem Hybridrechner

(Fig. 12). Der Prozess wird auf dem Analogrechner simuliert, und der Digitalrechner übernimmt die Regelung. Hier arbeitet der Ingenieur mit einem Modell, das der Wirklichkeit nahe steht. Man kann in Echtzeit verschiedene Regelalgorithmen untersuchen. Als Beispiel nenne ich hier das Problem der automatischen Landung eines Verkehrsflugzeuges, das am Lehrstuhl für Automatik zuerst auf dem Hybridrechner untersucht wurde, bevor der Regelalgorithmus auf dem DC-9-Simulator der Swissair realisiert werden konnte [4].

Sowohl DDC (Direct Digital Control) als auch DDA (Digital Directed Analog) Algorithmen können auf dem Hybridrechner untersucht werden.

### 9. Schlusswort

In diesem Vortrag sind einige Anwendungsmöglichkeiten der elektronischen Rechner in der Automatik kurz gestreift. Die Automatik ist heute vom Einsatz des Rechners Off-line und On-line geprägt. In der Zukunft wird der Computer in der Regelung von verschiedenen Prozessen die Hauptrolle übernehmen. Um das zu erreichen, wird in den meisten Fällen eine Off-line-Untersuchung wiederum durch Einsatz des Rechners notwendig.

### Literatur

- [1] J. L. Melsa: Computer programs for computational assistance in the study of linear control theory. New York, McGraw-Hill, 1970.
- [2] R. F. Drenick: Die Optimierung linearer Regelsysteme. München/Wien, Oldenbourg, 1967.
- [3] P. E. Wegmann: Aufbau, Arbeitsweise und Anwendungsmöglichkeiten des Hybridrechners der ETH Zürich. Neue Technik 12(1970)A3, S. 123...132.
- [4] H. A. Nour Eldin: Computergesteuertes Landungssystem für Verkehrsflugzeuge. Neue Technik 12(1970)A1, S. 1...14.

### Adresse des Autors:

Prof. Dr. M. Mansour, Vorsteher des Lehrstuhles für Automatik der ETHZ, Gloriastrasse 35, 8006 Zürich.

## Mitteilungen aus den Technischen Prüfanstalten des SEV Communications des Institutions de contrôle de l'ASE

### Radiostörung durch Sekundärmodulation von Wärmeapparaten

Im Bull. des SEV 60(1969)20 vom 27. 9. 69, S. 975, wurde mitgeteilt, dass die Materialprüfanstalt des SEV im Einvernehmen mit der Generaldirektion der PTT — versuchsweise für 2 Jahre — darauf verzichte, die bei Wärmeapparaten durch Sekundärmodulation verursachte Radiostörung gemäss Ziff. 3.8 der Radio-Störschutzverfügung vom 27. 4. 1966 bei der sicherheitstechnischen Prüfung zu beanstanden.

Da in den letzten zwei Jahren keine vermehrten Klagen wegen Störungen durch Sekundärmodulation eingegangen sind, wird die in Frage stehende Lockerung im Einvernehmen mit der Generaldirektion der PTT bis ca. anfangs 1974 verlängert, d. h. bis zum Zeitpunkt einer zu erwartenden Revision der Radiostörschutzverfügung vom 27. April 1966.

### Perturbations radioélectriques par modulation secondaire causées par des appareils électrocalorifiques

Dans le Bulletin de l'ASE de 1969, n° 20, page 975, il avait été communiqué que, d'entente avec la Direction générale des PTT, la Station d'essai des matériaux de l'ASE renonçait — à titre d'essai pour une durée de 2 ans — à formuler des réclamations, lors de l'épreuve de sécurité, au sujet des perturbations causées par modulation secondaire dans des appareils électrocalorifiques, selon le chiffre 3.8 de l'Ordonnance du 27 avril 1966, relative à la protection contre les perturbations radioélectriques.

Les réclamations au sujet de perturbations par modulation secondaire n'ayant pas été plus nombreuses durant ces deux dernières années, le renoncement en question a été prorogé, d'entente avec la Direction générale des PTT, jusqu'au début de 1974, c'est-à-dire jusqu'au moment d'une revision probable de l'Ordonnance du 27 avril 1966.