

Die Automatisierung chemischer Fabriken

Von Dr. A. V. BLOM, Locarno-Monti

Allem Anschein nach tritt die Technik in eine neue Epoche ein. Auf wissenschaftlicher Basis entfalten sich Gebiete, die unsere gesamte Kultur grundlegend verändern könnten. Automatik, Elektronik und Nukleartechnik erschließen Möglichkeiten, die noch vor kurzer Zeit für utopisch gehalten wurden. Das Gespenst der Arbeitslosigkeit, die mit fortschreitender Automatisierung unser Wirtschaftsgefüge bedrohe, wird heraufbeschworen. Eine Roboterherrschaft soll uns zu Skla-

ven der Maschine machen. Derartige Schlagworte kann man nur durch nüchterne Tatsachen entkräften.

Ein dramatischer Konflikt zwischen Mensch und Maschine brach nach der Einführung der Dampfmaschine aus und führte zur industriellen Revolution, weil man die Konsequenzen nicht rechtzeitig erkannte. In England hat sie damals große Verheerungen angerichtet; daher überwacht man gerade in angelsächsischen Ländern sorgfältig die Vorgänge auf dem Arbeitsmarkt im

Zusammenhang mit der Automatisierung. Die Konferenz von Margate¹ und die Aussprachen im amerikanischen Kongreß² bieten darüber wertvolles dokumentarisches Material. Auf diesen Fragenkomplex gehen wir nicht ein, sondern beschränken uns auf technische Probleme der Chemieproduktion.

1. Was ist Automatik?

Man versteht unter Automatik den Ersatz menschlicher Arbeit durch selbsttätig und zwangsläufig wirkende technische Mittel. Als Arbeit im weitesten Sinne des Wortes gelten Folgen von Vorgängen, die nach einem bestimmten Schema ablaufen. Nicht Muskelarbeit allein, sondern bis zu einem gewissen Grade auch geistige Arbeit ist also darunter zu verstehen. Schöpferische Tätigkeit hingegen bleibt von der Automatik ausgeschlossen – und das wird oft übersehen. Sie verläuft nicht nach bestimmtem Schema! Die technischen Mittel zur Verwirklichung der Automatik faßt man unter dem Begriff Regelungstechnik zusammen. Jede Regelung beruht ihrem Wesen nach in einer Weitergabe von Informationen innerhalb eines geschlossenen Wirkungskreises, die den Zustand des Systems verändern.

Die Automatik ist auf dem Wege, eine universelle Macht zu werden; unsere Aufgabe besteht darin, sie in gewollte Bahnen zu lenken. Hierzu muß man über ihr Wesen im klaren sein. Nur dann kann man drohende Gefahren rechtzeitig erkennen und abwenden.

Der Ersatz von Muskelarbeit durch technische Mittel läßt sich bis ins früheste Altertum zurückverfolgen. Ein Schüler von LAO TSE berichtet von einem Gärtner, der mühselig seine Pflanzen mit der Wasserkanne begoß. Er wurde gefragt, ob er denn die überaus praktischen, von Tieren betriebenen Pumpvorrichtungen nicht kenne, die ihm diese Arbeit abnehmen. Darauf antwortete er: «Ich kenne diese Einrichtungen wohl, die Arbeit sparen und gute Ergebnisse erzielen; aber ich würde mich schämen, sie zu gebrauchen.» Hier ist die typische Weltanschauung des Taoismus als kontradiktorischer Gegensatz zum Konfuzianismus, der ganz im modernen Sinne lehrte, man soll versuchen, mit möglichst geringem Arbeitsaufwand die höchste Leistung zu erzielen.

Ähnliche gegensätzliche Auffassungen bestehen nach 2400 Jahren immer noch. So hörte man an der Tagung für Regelungstechnik in Heidelberg³ über die Bedeutung der Automatik für unsere Lebensführung diametral entgegengesetzte Meinungen. Ein Ingenieur aus der Praxis betrachtete sie einfach als logische Weiterentwicklung der Technik, die keinerlei Besonderheit aufzuweisen habe. Diese Auffassung könnte jedoch letzten

Endes dazu führen, zwischen Mensch und Automat keinen grundsätzlichen Unterschied zu machen. Dem widersprach aber ein Gelehrter mit der Feststellung, daß die Artmerkmale der Organismen völlig außerhalb jeder physikalischen und chemischen Konstellation liegen, so daß niemals die Gesamtheit menschlicher Tätigkeiten durch technische Mittel ersetzbar ist.

Die Automatik umfaßt von der selbsttätigen Produktion am laufenden Band bis zur elektronischen Regelung chemischer Prozesse unabsehbare Möglichkeiten. Diese neuartige Produktionstechnik ersetzt weitgehend menschliche Arbeitskraft bei der Überwachung und Steuerung von Maschinen aller Art. Sie setzt uns in den Stand, chemische Prozesse von besonderer Gefährlichkeit oder von außergewöhnlicher Empfindlichkeit gegen äußere Störungseinflüsse durchzuführen. Außerdem steigert sie die Produktivität und erhöht die Qualität der Endprodukte.

2. Begriffsbestimmungen

Wissenschaftliche und technische Gemeinschaftsarbeit zwischen Chemiker und Regelungsingenieur bedingt eine klare und eindeutige Terminologie, damit man sich gegenseitig gut verständigen kann. Begriffliche, logische und linguistische Problemkreise sind auf diesem Grenzgebiet zwischen Mathematik, Physik, Chemie und Technik vielfach miteinander verkoppelt, weshalb es nicht immer leicht ist, eine gemeinsame Sprache zu formen. Sind aber einmal die wesentlichen Grundbegriffe festgelegt, dann dürfen sie nicht mehr willkürlich angewendet werden. Sonst entsteht bald ein wüstes Durcheinander, das die Entwicklung hemmt. Eine Klärung der Begriffe und eine Sanierung der Nomenklatur kann gar nicht früh genug in Angriff genommen werden. Der Schweizerische Elektrotechnische Verein hat Leitsätze *Nomenklatur der Regelungstechnik* herausgegeben, die hier maßgebend sind. Daneben finden auch die DIN-Normen 19 226 *Regelungstechnik* und das *Glossary of Terms Used in Automatic Controlling and Regulating Systems, British Standard 1552:1949* Berücksichtigung.

Als Regelung bezeichnet man die Aufrechterhaltung einer vorbestimmten Größe (Sollwert) durch fortlaufende, vom Prozeß selber auf Grund von Messungen gelieferte Informationen (Istwerte). Der Wirkungsablauf vollzieht sich in einem Regelkreis, den man schematisch in Form eines Blockschemas darstellt. Die Regelstrecke ist der Bereich einer Anlage, beispielsweise eine chemische Apparatur oder eine ganze Fabrik, innerhalb welcher einregulierte Sollwerte gelten. Man unterscheidet zwischen stationären und dynamischen Regelstrecken. Die Differenzen zwischen Sollwert und Istwert nennt man Regelabweichungen; sie bilden das stochastische Material für die wahrscheinlichkeitstheoretische Bearbeitung.

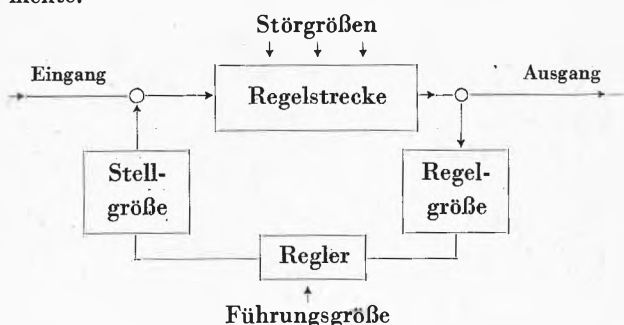
Stellgröße ist die Ausgangsgröße des Reglers. Störgrößen sind die von außen auf den Regelkreis wirkenden

¹ Margate Conference: *The Automatic Factory. What does it mean?* London 1955.

² 84th Congress United States: *Automation and Technological Change. Hearings before the Subcommittee on Economic Stabilization.* Washington D.C. 1955.

³ Tagung «Regelungstechnik» in Heidelberg vom 25. bis 29. September 1956. Berichtswerk erscheint 1957.

Größen, die innerhalb des Störbereiches liegen. Modulation bedeutet eine Verlagerung von Informationen in eine andere Schwingungslage. Das Blockschema 1 zeigt den Zusammenhang dieser verschiedenen Elemente.



Blockschema 1. Regelkreis mit Rückkopplung

Der Kraftstrom verläuft über den Regler in umgekehrter Richtung wie durch die Regelstrecke. Diese Rückkopplung ermöglicht die Selbstregulierung des Systems. Sie kommt nicht nur in der Technik, sondern auch in Organismen vor und spielt bei verschiedenen Funktionen eine große Rolle. Um irgendeine Zweckhandlung richtig durchführen zu können, müssen Muskeln aus einem Rückkopplungssystem ständig in Aktionsbereitschaft erhalten bleiben, damit sie im gegebenen Augenblick richtig reagieren. Beim Tennisspiel holt der Arm auf Grund direkter Beobachtung und bewußter Befehle zum Schlag aus. Aber die Führung des Armes bei der Schlagbewegung ist nur möglich infolge unbewußter Regelung des Systems durch Impulse aus einem Rückkopplungssystem an die unzähligen beteiligten Muskeln. Informationen aus der Umwelt, hier die Beobachtung der Flugbahn des Balles, werden dem Organismus zugeleitet und seinen Funktionen dienstbar gemacht. Das Reguliersystem wandelt sie in Impulse um, die durch Rückkopplung auf die Eingangsgröße einzuwirken vermögen. Das ist auch die Erklärung für viele Reflexbewegungen.

Eine besondere Gruppe bilden die Systeme, gekennzeichnet durch eine modulierte Folge von Impulsen, deren Modulationsparameter (Höhe, Länge, Lage, Codegruppe usw.) von Meßwerten in diskreten Zeitpunkten abhängen. Synthesen und Analysen derartiger Impulssysteme sowie die Kenntnis ihrer Stabilitätsbedingungen verdanken wir besonders J. Z. CYPKIN⁴. Solche Regelungssysteme bestehen aus einem dynamischen Element, das die Eingangsgröße in eine Serie von Impulsen verwandelt, und einem statischen Teil, dessen Übertragungsfunktionspole bekannt sein müssen.

Schließlich seien noch die elektronischen Rechengenäte kurz charakterisiert. Die programmgesteuerten Ziffernrechner (*digital computer*) lösen Probleme, die sich in eine Folge der vier arithmetischen Grundoperationen zergliedern und in eine explizit numerisch aus-

wertbare Form bringen lassen. Sie liefern also ihre Ergebnisse als Folge von Zählvorgängen.

Die Stetigrechner (*analogue computer*) dienen zur Lösung von Gleichungen und liefern die Ergebnisse in Form von Kurven. Bei ihnen besteht somit eine Analogie zwischen mathematischen Größen der Gleichung und modellmäßiger Nachbildung in Form physikalischer Größen im Rechner. Unter Modell ist lediglich die äußere Ordnung von Elementen zu verstehen und niemals ihre innere Natur. Eine Weiterentwicklung der Stetigrechner sind die Integratoren, mit denen man sogar nichtlineare Differentialgleichungen löst. Wo derartige Rechenmaschinen zur Verfügung stehen, braucht man sich nicht mehr bei der mathematischen Behandlung komplizierter Probleme der Praxis mit linearisierten und idealisierten Modellen zufriedenzugeben, bei denen oft genug wichtige Effekte vernachlässigt werden müssen. Man kann im Stetigrechner erhaltene Kurven in einem Umwandler für einen programmgesteuerten Ziffernrechner zurechtformen. Für Einzelheiten auf diesem Gebiete sei auf die Bücher von W. W. SOROKA⁵ und von C. A. A. WASS⁶ verwiesen.

3. Mathematische Grundlagen der Regelungstechnik

Gewöhnlich beschäftigt sich der Chemiker nicht gern mit Problemen der höheren Mathematik. Das Vordringen der Automatik wird ihn aber dazu zwingen, auch dieses Wissensgebiet zu beachten. Das Grundprinzip des Reglers besteht darin, alle Abweichungen von einem vorbestimmten Parameter (Sollwert) als stellvertretendes Maß für Vergleichszwecke festzuhalten. Die Meßwerte der Regelgröße (Istwerte) bilden eine statisch erfassbare Mannigfaltigkeit und unterliegen daher stochastischen Gesetzmäßigkeiten.

Das Ergebnis einzelner Messungen stellt eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit dar. Die statistische Methode besteht ihrem Wesen nach darin, aus Stichproben auf die Grundgesamtheit zu schließen. Statistische Verfahren wenden wir an, wenn eine oder mehrere Veränderliche vorliegen. Im ersten Falle wollen wir wissen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die verschiedenen Werte für die Veränderliche eintreten; wir suchen dazu den Mittelwert, die Streuung und die Form ihrer Verteilung. Die Stichproben ordnet man, nachdem ein zweckentsprechendes Klassenintervall gewählt ist. Die Zahl der Stichproben in jeder Klasse bezeichnet man als Häufigkeit; ihre Anordnung innerhalb des Klassenintervalls heißt Häufigkeitsverteilung.

Das Streuungsmaß gibt den Unterschied zwischen dem kleinsten und dem größten Einzelwert an. Mittelwerte und Streuungsmaße bilden zusammen die statistische Maßzahl. Sie ist *passend*, wenn sie mit wachsendem Umfang der Stichprobe gegen die entsprechende Maß-

⁵ W. W. SOROKA, *Analog Methods in Computation and Simulation*, New York 1954.

⁶ C. A. A. WASS, *An Introduction to Electronic Analogue Computers*, London 1955.

⁴ J. Z. CYPKIN, *Avtomatika i Telemekhanika*, Moskau 1956.

zahl für die Grundgesamtheit zustrebt. Als *wirksam* bezeichnen wir jene Maßzahlen, deren Verteilung in Stichproben gleichen Umfangs die kleinste Streuung besitzen. Wenn wir durch das Berechnen einer weiteren Maßzahl gleicher Art aus der Stichprobe keine zusätzlichen Erkenntnisse mehr herausholen können, heißt die statistische Maßzahl *erschöpfend*. Der Durchschnitt und die mittlere quadratische Abweichung gehorchen allen drei Kriterien.

Die Streuung ist übrigens identisch mit dem mittleren Fehler. Bekanntlich sinkt er mit zunehmender Zahl der Beobachtungen proportional zur Quadratwurzel aus der Zahl der Einzelbeobachtungen. Den wahrscheinlichsten Wert W für den Fehler einer Beobachtungsreihe berechnet man, wenn δ die Abweichung vom arithmetischen Mittel und N die Anzahl der Beobachtungen bezeichnen, aus der Formel

$$W = 0,67 \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{N(N-1)}}$$

Eine wichtige Frage lautet, ob Durchschnittswerte der einen Veränderlichen die Tendenz besitzen, in Verbindung mit hohen oder mit besonders niedrigen Werten der anderen Veränderlichen aufzutreten. Man kann diesen Sachverhalt auch so ausdrücken, daß eine Korrelation vorliegt, sobald die Abweichung der einen Veränderlichen von ihrem Mittelwert irgendwie verbunden erscheint mit den Abweichungen der anderen Veränderlichen von ihrem Mittelwert, ohne daß eine funktionale Beziehung besteht.

Die Summe aller Abweichungen kann durch Regelung auf ein Minimum reduziert werden, sofern die Übergangsfunktion des Systems explizit von den Augenblickswerten der Steuersignale und von der Korrelationsfunktion der Störgrößen abhängt. Das Korrelationsprinzip zur Vervollkommnung der chemischen Verfahrenstechnik heranzuziehen, hat der Autor⁷ schon vor vierzig Jahren vorgeschlagen. Damals fehlten nur elektronische Vorrichtungen, um die theoretischen Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen. Aus der zitierten Arbeit sei, da heute noch gültig, der einleitende Passus hier wiedergegeben:

«Bei der Durchführung chemischer Prozesse erhält man stets schwankende Ausbeuten. Die Reaktionsbedingungen lassen sich nicht identisch reproduzieren. Wegen der Überlagerung mehrerer Effekte ist es oft unmöglich, den Zusammenhang verschiedener Einflüsse zu erkennen. Durch geeignete Bearbeitung der Fabrikationsjournale ist es häufig möglich, mittels der neuen Methode (d. h. Korrelationsmethode) einen verschleierte Zusammenhang zwischen irgendeiner Reaktionsbedingung und dem quantitativen oder qualitativen Erfolg des Prozesses aufzudecken ...»

Seitdem man die Bearbeitung der Fabrikationsjournale durch elektronische Regelungstechnik und Kybernetik⁸ ersetzen kann, wird die stochastische Behandlung der Messungsergebnisse erst durchführbar. Zudem

⁷ A. V. BLOM, *Das Korrelationsprinzip als Hilfsmittel der Betriebskontrolle*, in *Z. angew. Chem.* 29 (1916) 409.

⁸ I. M. PESTARINI, *Some Remarks on Cybernetics*, Beitrag 73 der Zit. ³.

hat man inzwischen automatische Analysemethoden entwickelt, die Rohmaterialien, Zwischenprodukte und Endprodukte fortlaufend überwachen und bei Abweichungen vom Sollwert regulierende Impulse auslösen.

Der stochastische Prozeß der Abweichungen vom Sollwert beschäftigt sich mit dem durch Wahrscheinlichkeitsbeziehungen geregelten Verhalten. Er verläuft analog einem monotonen dynamischen System, wie H. M. PAYNTER⁹ auf der Heidelberger Tagung ausgeführt hat, und kann mit normalen statistischen Methoden bearbeitet werden.

Automatische Regelungssysteme lassen sich annäherungsweise durch eine Differentialgleichung darstellen von der Form:

$$y = k_1 x + k_2 \int x \cdot dt + k_3 \frac{dx}{dt}$$

Der erste Term liegt als Proportionalglied den sogenannten *P*-Reglern zugrunde. Der Integralterm bedingt das Verhalten der *I*-Regler. Der dritte Term drückt eine Differentialwirkung aus und führt zu den *D*-Reglern. In der Praxis ist es gewöhnlich so, daß Stabilität des Systems mit dem *P*-Regler erzielt wird. Um gewisse Störfunktionen besser überwinden zu können, schaltet man einen *I*-Regler zu. Derartige *PI*-Regelungssysteme sind manchmal in ihrer Stabilität gefährdet, und man fügt noch einen *D*-Regler zu, damit die Integralwirkung rascher ausgeübt werden kann. Alle diese verschiedenen Möglichkeiten fassen wir als *PID*-Gesetz zusammen.

Die oben angegebene Gleichung gilt für lineare Systeme. Damit keine Schwingungszustände auftreten, sind nur Lösungen mit negativem Realteil zulässig, d. h. die Koeffizienten müssen den HURWITZschen Kriterien¹⁰ gehorchen. Mit Hilfe der harmonischen Balance nach KRYLOW-BOGOLJUBOW hat K. MAGNUS¹¹ das HURWITZ-ROUTH-Kriterium in ein allgemein anwendbares Näherungskriterium verwandelt. Noch weiter ist man nach A. M. LETOV¹² im Moskauer Institut für Automatik und Telemechanik durch Anwendung der direkten Methode von LJAPUNOV gekommen. Man vermag nunmehr über die asymptotische Stabilität einer Ruhelage bestimmte Aussagen zu machen, selbst wenn die Parameterwerte *a priori* gar kein Stabilitätsgebiet aufweisen.

Beim Entwurf automatischer Regelungssysteme arbeitet man meist mit Modellen, die mit Hilfe eines analogen physikalischen Systems die mathematischen Beziehungen wiedergeben. Nach W. A. TRAPEZNIKOV und B. J. KOGAN¹³ lassen sich drei Aufgabengruppen mittels elektronischer Modelle lösen:

⁹ H. M. PAYNTER, *On an Analogy between Stochastic Processes and Monotone Dynamic Systems*, Beitrag 37 der Zit. ³.

¹⁰ H. W. BODE, *Network Analysis and Feedback Amplifiers Design*, New York 1945.

¹¹ K. MAGNUS, *Näherungskriterien für Stabilität und Gefährlichkeit in nicht-linearen Regelkreisen*, Beitrag 71 der Zit. ³.

¹² A. M. LETOV, *Die Stabilität von Regelsystemen mit nachgebender Rückführung*, Beitrag 88 der Zit. ³.

¹³ W. A. TRAPEZNIKOV und B. J. KOGAN, *Elektronische Modelle und ihre Anwendung bei der Untersuchung und beim Entwurf selbsttätiger Regelungssysteme*, Übersichtsvortrag in Zit. ³.

- a) Auswahl von Kenngrößen und Bestimmung der Struktur des Regelungssystems bei der Projektierung;
- b) Funktionsüberprüfung und Justierung des fertiggestellten Reglers an einer Modellstrecke, wobei von der Dynamik des Systems als Ganzes ausgegangen wird;
- c) Aufsuchen von Störungen, die beim Ablauf eines Regelungsvorganges eingewirkt haben.

Schließlich sei noch kurz eine mathematische Methode erwähnt, die in der Regelungstechnik eine immer größere Rolle spielt, nämlich die Frequenzgangmethode. Man wendet sie an, wo eine exakte mathematische Analyse wegen Unbestimmtheit des Systems versagt oder wo Regelungsvorgänge als nichtlineare Differentialgleichungen hoher Ordnung erscheinen. Die experimentelle Ermittlung von Frequenzgängen liefert Konstanten, die eine näherungsweise Lösung des gestellten Problems ermöglichen.

4. Verfahrenstechnische Voraussetzungen

In der chemischen Industrie liegen die Verhältnisse, soweit sie für eine automatische Kontrolle wichtig sind, ganz anders als in der Maschinenindustrie. Betrachten wir kurz die Bedingungen, die bei einem chemischen Prozeß grundsätzlich eine Anwendung der Regelungstechnik ermöglichen. Die Reaktionsgeschwindigkeit und die Temperatur des Prozesses müssen innerhalb der Grenzen liegen, die eine Verwendung normaler Meßinstrumente gestatten. Aus demselben Grunde sollten die Reaktionskomponenten nicht außergewöhnlich korrosiv sein. Natürlich sind diese Bedingungen nicht absolut bindend; für sehr kostbare Produkte lassen sich Spezialgeräte schaffen.

Die Reaktionsmasse muß ein Fließvermögen aufweisen, das die kontinuierliche Bewegung durch Rohrleitungen gestattet und in den Meßvorrichtungen keine zu große Verzögerungen verursacht. Die Fließgeschwindigkeit sollte aber im Meßbereich nie so groß werden, daß turbulente Strömungen entstehen.

Hinreichende Mengen Energie müssen verfügbar sein, damit man den Prozeß jederzeit völlig beherrscht. Fortlaufende und selbsttätige analytische Kontrolle der Rohstoffe und Endprodukte verschafft, in Verbindung mit der kontinuierlichen Überwachung des Prozesses, die Unterlagen für die Automatisierung des Betriebes. Sämtliche notwendigen Informationen über die Vorgänge innerhalb der Fabrik lassen sich in fünf Stufen zusammenfassen:

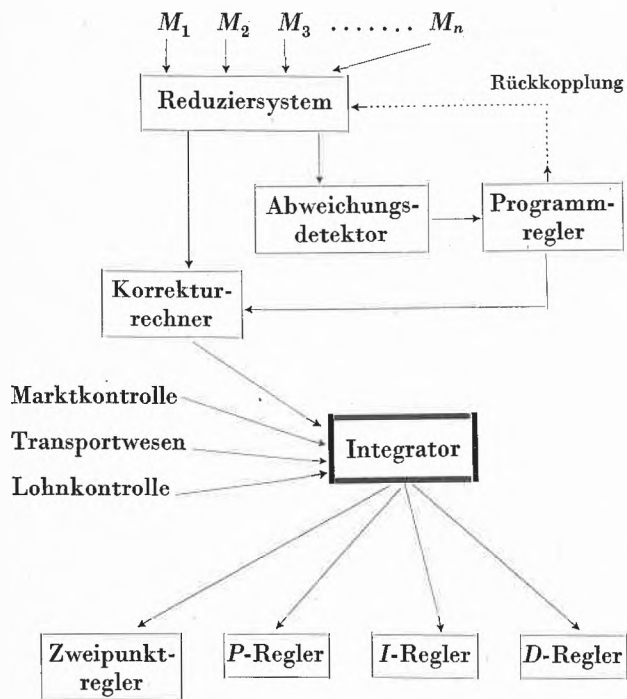
- a) *Messung* aller Parameter, die den Fabrikationsvorgang beeinflussen, wie Temperatur, Druck, Fließgeschwindigkeit, pH-Wert, Niveauhöhe in Behältern, Konzentration von Lösungen, Viskosität, Gewicht, Volumen, Dichte, Farbton usw.

- b) *Fixierung* der Messungsergebnisse durch Schreibgeräte, Zählwerke, Integratoren, Spektrographen, elektronische Kompensatoren für Mittelwertbildung, magnetische Meßwertspeicher für Fernmeßanlagen.
- c) *Übertragung* der in Impulse umgewandelten Meßwerte auf die Regler, sei es als Wirkungen auslösende Signalimpulse oder als Reflexe zwischen Signalen und beabsichtigten Korrekturen. Modulatoren dienen zur Stabilisierung der Übertragungsvorgänge, die durch pneumatische, hydraulische, elektrische, optische, akustische oder neuerdings durch elektronische Mittel verwirklicht werden.
- d) *Umsetzung in Entschlüsse* geschieht, nachdem die eingehenden Informationen ein Reduziersystem durchlaufen haben, das ausmerzt, was keine wesentliche Bedeutung für den Arbeitsprozeß besitzt. Aus den Meßwerten sucht es die innerhalb der Sollwerttoleranz liegenden heraus und leitet sie direkt in den Rechner. Außerhalb liegende Meßwerte gehen über den Abweichungsdetektor in einen Programmregler, der durch ein Rückkopplungssystem mit dem Reduziersystem verbunden ist. Die korrigierten Impulse werden dem Integrator zugeführt, der die Entschlüsse faßt, wie der Regulierungsprozeß abzuwickeln ist.

Das Blockscheema 2 zeigt schematisch eine derartige Betriebskontrolle. Die Meßwerte M_n beziehen sich auf die maßgebenden Parameter des Prozesses. Der Zeitfaktor im zweiten und dritten Term der Grundgleichung (siehe Abschnitt 3) setzt sich aus verschiedenen Verzögerungsaktionen zusammen, die im Betriebe selber und in der apparativen Ausrüstung auftreten, wie Anlaufzeiten und Reaktionsverzögerungen; Wege des Rohmaterials von Regelventil zum Reaktionsraum und des Endproduktes vom Reaktionsraum zum Meßgerät; kapazitive Effekte, wie etwa die Aufheizzeit und die Förderzeit der Reaktionsteilnehmer innerhalb der Regelstrecke; Ansprechzeit der Meßinstrumente und Übertragungsdauer bis zum Regelgerät; schließlich die Zeit zur Umsetzung der Information in einen Steuerimpuls und Übertragungsdauer vom Regler in den Korrekturmechanismus. Das Zeitverhalten ermittelt man entweder aus dem Frequenzgang oder aus der Übergangsfunktion. Seit der Einführung elektronischer Meß-, Verstärkungs- und Übertragungssysteme sind viele Zeitfaktoren fast völlig ausgeschaltet worden. *Hierin liegt die umwälzende Wirkung der Elektronik.* Der Integrator, der die korrigierten Informationen aus dem Betrieb, aus den übrigen Fabrikabteilungen und aus der Umwelt verarbeitet, ist das Kernstück der Automatik. Alle Kontroll- und Steuermaßnahmen haben sich den speziellen Erfordernissen des chemischen Prozesses sowie der Natur der Fabrikationsanlage und dem Grade der Kontrollierbarkeit anzupassen.

Das Blockscheema 2 beschreibt die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen und kennzeichnet somit ein bestimmtes physikalisches Verhalten

des Systems. Daraus ergibt sich die Wahl des Reglers. Der Zweipunktregler, der auf die Impulse bloß mit Ein- oder Ausschalten reagiert, wird angewendet, wenn sich die Regelgröße aus der Meßgröße verzögerungsfrei und mit höchster Feinfühligkeit bildet. Die Transportverzögerung darf nur klein sein gegenüber der Kapazitätsverzögerung im Prozeß. Der Proportionalregler, bei dem zwischen Sollwert und Regelfunktion innerhalb der Toleranzgrenze eine fixierte Beziehung besteht, besitzt einen weiten Drosselbereich. Er eignet sich dort, wo Belastungsänderungen im Betrieb gering sind und man mit Transportverzögerung innerhalb weiter Grenzen



Blockschema 2

Aufbau eines Regelsystems für automatische Betriebskontrolle

rechnen muß. Der Integralregler ist dadurch gekennzeichnet, daß die Korrektur der Istwert-Abweichungen abhängig von ihrer Zeitdauer erfolgt. Man muß diesen Reglertyp aber behutsam einsetzen, weil sonst die Stabilität des Systems gefährdet wird. *I*-Regler verwendet man mit Vorteil dort, wo häufige Belastungsschwankungen nicht zu vermeiden sind. Der Differentialregler besitzt die Eigenheit, gewissermaßen vorauszuahnen, was im Betrieb geschehen wird, indem er den Verlauf der Schwankungen der Variablen berücksichtigt. Diese Reglertätigkeit setzt aus, sobald die kontrollierte Variable mit dem Sollwert übereinstimmt.

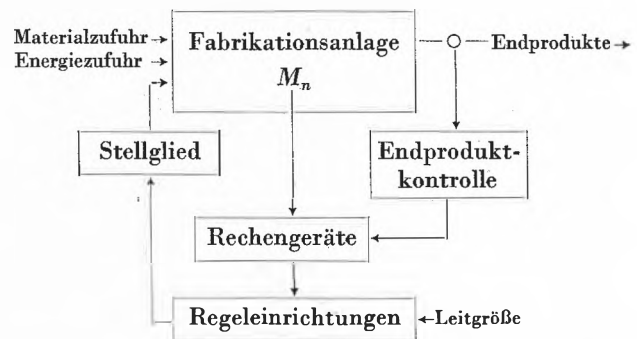
Bei kombinierten Reglersystemen kommt logischerweise zuerst der *D*-Regler, damit die vorausschauende Aktion rechtzeitig wirksam wird. Verzögerungsaktionen im Verlauf des Produktionsprozesses, Belastungsschwankungen und kapazitive Speichervorgänge sind beim Aufbau des Reglersystems aus den vier

Grundtypen zu berücksichtigen. Der Chemiker muß eine Idee haben, welche Anwendungsgebiete für die verschiedenen Reglersysteme vorwiegend in Frage kommen, worüber Tab. 1 einige Hinweise gibt.

Tab. 1. Eignung verschiedener Reglertypen für bestimmte Parameter

Parameter	P-Prinzip	I-Prinzip	D-Prinzip	PID
Druck	ja	nein	ja	—
Strömung	ja	nein	ja	—
Spezifisches Gewicht	nein	nein	ja	—
pH-Wert	nein	nein	ja	ja
Polymerisationstemperatur . . .	nein	ja	nein	—
Mischtemperatur . . .	nein	nein	ja	ja
Chargentemperatur	ja	nein	nein	—

Über Meßumwandler gelangen die Meßwerte in den Regler. Die Impulse müssen durch Verstärker so kräftig gemacht werden, daß Schwankungen des Störpegels stets sicher übertönt werden; nur dann kann man eine sinnvolle Änderung der Stellgröße bewirken. Das Blockschema 3 gibt eine Idee von der Methodik einer automatisch geregelten Fabrik.



Blockschema 3. Automatische Regelung einer Fabrikationsanlage

Elektronische Rechner lassen sich nur dann in einem Betriebe voll ausnützen, wenn man die Informationen sachgemäß einspeist. Bevor man sich für einen Maschinentyp entscheidet, muß der Betrieb genau auf den gesamten Arbeitsanfall hin analysiert werden. Ursprung, Anzahl und Zuverlässigkeit der Betriebsinformationen, Art und zeitliche Folgen der zu treffenden Entscheidungen, Ursprung und Auswertung der von außen her (Rohmaterial- und Absatzmarkt) eintreffenden Informationen spielen dabei eine entscheidende Rolle. Nur eine gründliche Untersuchung aller dieser Probleme liefert sichere Grundlagen für die Planung der Automatik.

5. Einige Beispiele aus der Praxis

In chemischen Betrieben benützt man bereits automatische Betriebskontrollen. Die feinmechanische Industrie hat für diese Zwecke viele nützliche Instrumente entwickelt, wie man an der Mustermesse in Basel sehen

konnte. Bei der rapiden Entwicklung der Automatik tauchen fortgesetzt neue Typen auf.

Die Kontrolle und Steuerung der Viskosität ist beispielsweise in der Polymerisationstechnik von großer Bedeutung. Durch Anwendung von Ultraschall eröffnen sich da neue Möglichkeiten. Die Viskosität ist nämlich eine Funktion der Abklinggeschwindigkeit von Ultraschallpulsationen eines Piezo-Quarzgenerators. Das Regelgerät besitzt eine Sonde, die in die Flüssigkeit eintaucht und alternierend als Sender und als Empfänger der Ultraschallimpulse dient. Die Meßgröße durchläuft einen Schwingungsbegrenzer, einen Detektor für Abweichungen, ein Verstärkersystem und endigt in einem Rechenggerät, das die Stromkreise für die Dosierung der Heizölzufuhr und die Produktionsgeschwindigkeit regelt.

Für die Trennung nahe verwandter Stoffe, sofern sie flüssig sind, ist die von der Petrolindustrie entwickelte Methodik der automatisch gesteuerten fraktionierten Kondensation weiterentwickelt worden. Die Glockenböden der Kondensationskolonne ersetzt man durch eine poröse Füllung, an der eine nichtflüchtige Hilfs-substanz adsorbiert ist. Im Gegenstrom wird ein inertes Gas durch die Kolonne geleitet. Unter derartigen Bedingungen lassen sich Flüssigkeitsgemische durch Destillation trennen, die allen bisherigen Trennmethoden widerstehen. Gegenüber der normalen Fraktionierung hat die neue wesentliche Vorteile. Die hohe Diffusionsgeschwindigkeit der flüssigen Phase im Gas erlaubt eine rasche Einstellung des Gleichgewichtes. Eine Trennung von Dämpfen aus permanenten Gasen ist leichter durchführbar als diejenige von Gelöstem in Lösungsmitteln. Die neuen Kolonnen arbeiten mit höchstem Nutzeffekt sogar bei sehr hoher Strömungsgeschwindigkeit und erzielen eine erstaunliche Trennschärfe. Die Regelung geschieht durch einen elektronischen Detektor, der automatisch den Gehalt an Flüssigkeitsdampf im austretenden permanenten Gas mißt und in entsprechende Impulse umsetzt. Für die Anwendung derartiger Gas-Flüssigkeits-Chromatogramme sei auf eine Arbeit von A. T. JAMES¹⁴ verwiesen. Die Identifizierung einzelner Bestandteile geschieht durch Anwendung optischer Methoden, die kontinuierlich und mit höchster Empfindlichkeit arbeiten. Die Wellenlängen des Röntgengebietes, der ultravioletten und der infraroten Spektren sowie der Elektronenstrahlung nützt man aus. Untersuchungen, die früher Tage oder Wochen in Anspruch nahmen, sind heute in wenigen Minuten erledigt. Qualitative und quantitative Analysen komplexer Mischungen sind möglich geworden, denen man früher hilflos gegenüberstand.

Zur Durchführung von Sequenzanalysen werden immer neue Geräte entwickelt. Aus der Praxis der Dow Chemical Co. hat kürzlich PORTER HART¹⁵ einige Neu-

¹⁴ A. T. JAMES, *Chem. Process Ing. J.* 36 (1955) 95.

¹⁵ PORTER HART, *Analytical Instrumentation for Continuous Chemical Processing*, Beitrag 70 der Zit. 3.

konstruktionen beschrieben. Ein kontinuierliches Titriergerät, das in einer Suspension fortlaufend die Alkalinität kontrolliert, sei erwähnt. Da es unmöglich war, zuverlässige Durchschnittsmuster laufend dem Betrieb zu entnehmen, behalf man sich mit einem Aggregat von drei Pumpen. Die erste dosiert den Zufluß von soviel Wasser zu jeder Probe, daß die suspendierten Kristalle gerade gelöst werden; die zweite befördert die abgemessene Menge der Lösung ins Titriergefäß und die dritte besorgt den Zufluß von Normalsalzsäure, geregelt durch ein pneumatisch gesteuertes pH-Kontrollgerät.

Geringe Mengen von Chlor in Abgasen kontrolliert man durch Ultraviolet-Absorptionsmessungen. Zwei Photozellen, die eine in reiner Luft, die andere im fraglichen Abgas, bilden aus der Differenz der beiden Photoströme die Impulse für das Registriergerät.

Zum Nachweis chlorierter Kohlenwasserstoffe in Abwässern ist eine kleine Krackanlage geschaffen worden, die fortlaufend die Proben behandelt. Die geringsten Spuren von abgespaltenem Chlor machen die Probe leitend, was in einer Leitfähigkeitszelle automatisch festgestellt und durch ein Alarmsignal bekanntgemacht wird.

Den Gefrierpunkt eines Stoffes als Kriterium seiner Reinheit bestimmt man in einem Kristalldetektor mit automatischem Regler. Das Kontrollgerät mit Temperaturregistrierung ermöglicht eine zuverlässige Steuerung des Prozesses, aus dem die Proben kontinuierlich entnommen werden.

Derartige automatisierte Analysenmethoden liefern dem Chemiker erschreckende Mengen Daten, die ohne mechanisierte und elektronische Hilfsmittel überhaupt nicht zu bewältigen wären. Die einlaufenden Informationen registriert man auf Lochkarten oder Magnetbändern, und Rechenmaschinen besorgen die Auswertung. Je nach der vorliegenden Aufgabe verwandelt man die Meßwerte in Steuerimpulse oder benützt sie auf andere Weise.

Welche gewaltige Bedeutung die Automatik für die Chemieproduktion besitzt, erkennt man besonders aus der Erdölverarbeitung. Fraktionierung des Rohöls, Krackung der Zwischenfraktionen, Aufarbeitung der Krackgase in petrochemischen Fabriken, alle diese Betriebe werden von einigen Technikern in sauberen und lärmfreien Kontrollräumen überwacht und gesteuert. Zunächst benützte man meist pneumatisch getätigte Regelsysteme. Seitdem man nach der Frequenzgangmethode die größten regelungstechnischen Probleme mit hoher Präzision vorausberechnen kann, sind weitere Fortschritte auf diesem Gebiete gemacht worden. Als Beispiel sei die neue Platformeranlage einer amerikanischen Raffinerie erwähnt, die D. M. BOYD¹⁶ berechnet und konstruiert hat. Sie wird durch elektronische Regelung vollständig automatisch betrieben und hat sich gegenüber dem pneumatischen Übertragungssystem außerordentlich gut bewährt.

¹⁶ D. M. BOYD, *Why Electronic Process Control?* in *J. Instr. Soc. Amer.* 1 (1954) 16-9.

Derartige apparative Verbesserungen wirken auf die chemische Verfahrenstechnik umwälzend. Wir stehen ja in den ersten Anfängen dieser neuen Epoche. In kurzer Zeit wird man außer gewaltiger Steigerung der Produktivität bisher für unmöglich gehaltene Reinheitsgrade der Fabrikate erreichen. Was das für Ausgangsprodukte der Makromolekularchemie bedeutet, ist evident. Chemiefasern, Kunststoffe und Synthesekautschuk werden davon profitieren. Aus der anorganischen Chemie sei an Germanium erinnert, das nicht mehr als ein einzi-

ges Fremdatom auf 1 Million Ge-Atome für die Anwendung in Transistoren haben darf. Auch Silicium, Titan und andere Grundstoffe finden immer weitere Anwendungsgebiete, je höhere Reinheitsgrade man in automatisierten Betrieben erreicht.

Der Chemiker muß sich also mit den Erfordernissen der Automatik vertraut machen, so daß er seinen Betrieb der neuen Verfahrenstechnik anpassen kann, wo es sich bei der Planung als wirtschaftlich und vorteilhaft erweist.