

Probleme der Kopplung Maschine–Rechenautomat

Von TINO GÄUMANN

Physikalisch-Chemisches Institut der ETH-Lausanne

Summary

The coupling of an instrument with a computer poses several problems that are discussed. Since different types of analog-digital converters can be used, their operation is described in detail. A general scheme of coupling different instruments to one computer is given.

1. Einleitung

Die Kopplung eines Rechenautomaten mit einer oder mehreren Apparaturen verlangt eine Verbindung zwischen drei Medien, die prinzipiell inkompatibel miteinander sind: Rechenmaschine, Apparatur und Mensch. Die Schwierigkeit ist, daß drei verschiedene Sprachen gesprochen werden: die Rechenmaschine digital, die Apparatur im allgemeinen analog, der Mensch je nach



Abb. 1. Die Verbindung zwischen Rechenautomat (CPU) und Außenwelt geht über Dolmetscher (interfaces)

Schulbildung und Geburtsort. Es sind daher Dolmetscher notwendig (siehe Abb.1), welche die Verbindung zwischen den einzelnen Teilen bewerkstelligen. Der englische Ausdruck hierfür lautet «interface». Diese Umsetzer stellen den Kontakt zwischen dem Automaten und der Umwelt her. Ihre Aufgaben sind die folgenden:

1. Zwei Sprachen sprechen.
2. So simultan wie möglich übersetzen.
3. So genau wie möglich übersetzen.

Ein Teil der Rechenmaschine übernimmt die Verbindung zwischen den Rechenregistern und den Umsetzern. Dieser Teil wird üblicherweise mit I/O (input-output) abgekürzt. Die verschiedenen Automaten unterscheiden sich zum Teil stark in der Organisation dieses Teils, vor allem in der Art und Weise, wie den verschiedenen Eingängen und Ausgängen Prioritäten zugeordnet werden können und wie leicht sie eine Anpassung an verschiedene Umsetzer erlauben.

Ein großer Rechenautomat erlaubt im Prinzip den gleichzeitigen Anschluß einer größeren Zahl von Ap-

paraturen. Da aber seine Rechengeschwindigkeit nicht wesentlich verschieden von derjenigen eines Mini-computers ist, resultiert nur dann ein Vorteil, wenn sehr viele Daten in kurzer Zeit anfallen, die einem komplexen Rechenprozeß unterworfen werden oder die mit vielen andern gespeicherten Daten, z.B. Bibliotheksspektren, verglichen werden sollen. Die langen und in ihrer Übertragungsgeschwindigkeit begrenzten Zuleitungen ergeben häufig unüberwindliche Probleme. Deshalb geht man je länger je mehr dazu über, dem großen Rechenautomaten Minicomputer vorzuschalten. Diese übernehmen die erste Datenverarbeitung und die direkte Steuerung der Apparatur.

Ein Minicomputer wird nur mit wenigen Apparaturen gleichzeitig gekoppelt. Seine gedrängte Größe gestattet seine Aufstellung direkt neben der Apparatur. Die Programmier- und die Erdungsprobleme werden damit einfacher. Die damit verbundene Einsparung an Zeit, um das Ganze zum Funktionieren zu bringen, soll nicht unterschätzt werden und kann über 90% betragen. Die arithmetischen Operationen, die von einem Datenerfassungssystem verlangt werden, sind in den meisten Fällen sehr einfach; hingegen wird eine sofortige Resultatausgabe und bei der direkten Kopplung (on-line-Betrieb) eine sofortige Steuerung der Apparatur auf Grund der eingehenden Resultate verlangt.

Nur ein Kleincomputer kann diese Bedingungen erfüllen. Es soll aber nicht verschwiegen werden, daß die Inbetriebnahme einer solchen Anlage einige Erfahrung verlangt und daß generell die Aussagekraft eines Experimentes nicht größer wird, weil seine Daten durch einen Rechenautomaten ausgedruckt werden. Der Einsatz einer Rechenmaschine rechtfertigt sich in den folgenden Fällen:

1. Routinearbeiten, wie sie beispielsweise bei sich wiederholenden Analysen mit einem Gas-Chromatographen auftreten. Die Auswertung der Resultate nimmt weniger Zeit in Anspruch; gleichzeitig vergrößert sich aber die Gefahr, daß ein fehlerhaftes Funktionieren der Apparatur zu spät erkannt wird.
2. Große Mengen von Zahlen fallen stoßweise innerhalb kurzer Zeit an.
3. Eine Apparatur soll gesteuert werden. Hier ist nicht nur an das evidente Beispiel einer chemischen Prozeßsteuerung zu denken, sondern auch an die Steuerung analytischer Geräte. Die Resultate können so häufig verbessert werden.
4. Die gemessenen Zahlen werden weiterverarbeitet. Hier wäre z.B. die Erhöhung der Empfindlichkeit durch periodische Messung, wie sie beim «signal-averaging» angewandt wird, oder die Entwicklung der Fourier-Spektrographen zu nennen. Da die Erkenntnisse der Informationstheorie auch langsam in der Chemie Eingang finden, ist eine gesteigerte Verwendung von Minicomputern auch im Forschungslabor vorzusehen.
5. Zur Ausbildung des Chemikers.

2. Kopplung Mensch-Maschine

Da ein Rechenautomat nur «binär» versteht, ist ein Umsetzer (compiler) zwischen Mensch und Maschine notwendig. Das Problem, die verschiedenen Ein- und Ausgänge anzusteuern, verbietet im allgemeinen die Verwendung von Programmiersprachen von hohem Niveau wie Fortran, Algol usw. Die Sprache der Wahl ist in den meisten Fällen das sogenannte «Assembler». Diese Sprache ist etwas von Fabrikat zu Fabrikat der Maschinen verschieden, da die Anzahl der Befehle, die zur Verfügung stehen, etwa im Verhältnis von 1:2 variieren kann. Neben der Organisation des I/O-Teils kommt diesem Befehlsvorrat wohl die größte Bedeutung bei der Wahl einer Maschine zu. Da vor allem den Ungeübten die Programmierung einer Verbindung Maschine-Apparatur, insbesondere für den Fall einer Steuerung, sehr viel Zeit verlangt, ist in jedem Fall genau zu überlegen, ob sich eine solche Kopplung rentiert, vor allem, da die Qualität der Resultate nicht in allen Fällen verbessert wird.

3. Kopplung Rechenautomat-Apparatur

Das Prinzipschema dieser Kopplung ist in Abb. 2 zusammengestellt. Die Apparatur mißt eine Größe, z.B. einen Druck. Diese stellt für den Automaten das Eingangssignal dar. Es ist ein Analogsignal, d.h. es ändert sich mehr oder weniger stetig als Funktion der Zeit. In einem ersten Umsetzer (transducer) wird es in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dieser Umsetzer ist in allen Apparaturen vorhanden, die gestatten, ein Voltmeter oder einen elektrischen Schreiber anzuschließen. Wie jeder Umsetzer kann auch dieser das Signal nur verschlechtern.

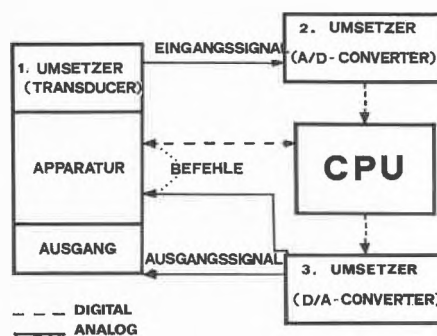


Abb. 2. Vereinfachtes Blockschema der Kopplung Apparatur-Rechenautomat (CPU)

Als Beispiel sei der Elektrometervverstärker eines Flammenionisationsdetektors in einem Gas-Chromatographen erwähnt. Der Detektor besitzt inhärent einen dynamischen Bereich von besser als $1:10^5$ (100 db), d.h. Signale, die sich um den Faktor von 1 zu 100 000 unterscheiden, werden linear wiedergegeben. Da üblicherweise ein Potentiometerschreiber mit einem dynamischen Bereich von 1:200 (30 db) zur Signalaufzeichnung an den Gas-Chromatographen angeschlossen wird, sind nur in seltenen Fällen Verstärker eingebaut, die den großen dynamischen Bereich verarbeiten können. Übersteigt ein Signal den

Meßbereich, so wird dieser «von Hand» umgeschaltet. Diese Umschaltung läßt sich auch vom Rechenautomaten steuern, ist aber nicht notwendig, wenn der Verstärker den gleichen dynamischen Bereich wie der Detektor besitzt.

Dieser erste Umsetzer ist fast immer in der Apparatur vorhanden und liefert ein analoges Ausgangssignal. Da der Rechenautomat nur digitale Signale verarbeiten kann, muß das Signal in einem zweiten Umsetzer (analog-digital converter, Abkürzung A/D) «quantisiert» werden. Die kontinuierliche analoge Spannung wird dabei in ein diskontinuierliches digitales Signal umgewandelt. Diese Umwandlung modifiziert das Eingangssignal sehr erheblich, und eine Kenntnis dieses Umwandlungsprozesses ist wesentlich. Deswegen wird ihm das 4. Kapitel dieser Arbeit gewidmet.

Es gibt Detektoren, die bereits digitale Signale abgeben, z. B. der Elektronenvervielfacher eines Massenspektrometers, der die eintreffenden Ionen als digitale Impulse weitergibt. Aus historischen Gründen wird im ersten Umsetzer dieses Signal in eine analoge Spannung integriert und muß nachher in einem zweiten Umsetzer wieder digitalisiert werden, obschon die Impulsfolgerate die direkte digitale Übertragung gestatten würde. Der Grund liegt darin, daß normalerweise in der Massenspektroskopie das Signal auf einen schnellen Schreiber gegeben wird und damit auf einen teuren schnellen Zähler verzichtet werden kann.

Der Rechenautomat kann direkte Befehle in digitaler Form empfangen oder ausgeben, beispielsweise einen Impuls, der den Beginn oder das Ende einer Messung anzeigt. Für Steuerungszwecke wird von der Apparatur in vielen Fällen ein analoges (proportionales) Signal verlangt. Das binäre Signal des Automaten wird deshalb in einem dritten Umsetzer (digital-analog converter, Abkürzung D/A) in eine analoge Spannung umgesetzt. Dasselbe ist der Fall, wenn das Ausgangssignal auf dem Schreiber der Apparatur wiedergegeben werden soll. Da die Schreiber relativ langsam sind, über einen geringen dynamischen Bereich verfügen und meistens einfach elektrisch isolierbar sind, bereitet dieser Teil der Kopplung in Apparatur-Maschine in den wenigsten Fällen elektrische oder Programmierschwierigkeiten. Sehr häufig wird man auf die analoge Darstellung verzichten und das Resultat über einen Drucker (z. B. eine Schreibmaschine, Teletype) digital ausgeben. Dabei gehen oft Details der Kurvenform verloren, die für den Praktiker von Nutzen sein können. Schnelle Linien- und Punktdrucker sind für die Anwendung mit Mini-computern meist außerhalb des tolerierten Budgetbereichs, so daß das Ausdrucken der Resultate oft mehr Zeit in Anspruch nimmt als ihre Messung und Verarbeitung. Die Aufnahme eines Spektrums benötigt meist nur einige Sekunden (für optische Spektren muß hierfür ein Fourier-Spektrograph wegen seines Multiplexvorteils eingesetzt werden), seine Ausgabe ein Mehrfaches davon. Dies ist nicht unbedingt ein Nachteil, wenn die Spektren nicht in zu rascher Folge anfallen und die Kapazität der Rechenmaschine nicht zu klein ist. Sonst wird mit Vorteil ein Magnetspeicher (englisch: disk) eingesetzt.

4. Analog-Digital-Umsetzer

Diese Umsetzer lassen sich vereinfachend in drei Gruppen einteilen:

1. Methode der sukzessiven Approximation.
2. Umwandlung der Spannung in eine proportionale Zeit.
3. Umwandlung der Spannung in eine proportionale Frequenz.

Für alle drei Gruppen existieren eine Reihe von Abarten und Verfeinerungen, die jedoch das prinzipielle Verhalten nicht verändern. Ein Umsetzer ist im wesentlichen durch seine Auflösung und seine Geschwindigkeit charakterisiert. Die Auflösung wird definiert durch die Anzahl der bits. Besitzt der Umsetzer einen dynamischen Bereich von 11 bit, so ist seine maximale Auflösung $1 : 2^{10} = 1 : 1024$, da ein bit für das Vorzeichen verwendet wird. Ist das maximale Signal 1 Volt, so wird das Signal in Einheiten von 1 mV aufgelöst. Jedes zusätzliche bit vergrößert die Auflösung (und den Preis) um einen Faktor 2. Die Geschwindigkeit wird in Hz, d. h. der maximal möglichen Anzahl Messungen pro Sekunde, angegeben. Die Regel ist, daß eine größere Anzahl von bits mit einer Verringerung der Meßgeschwindigkeit erkauft wird.

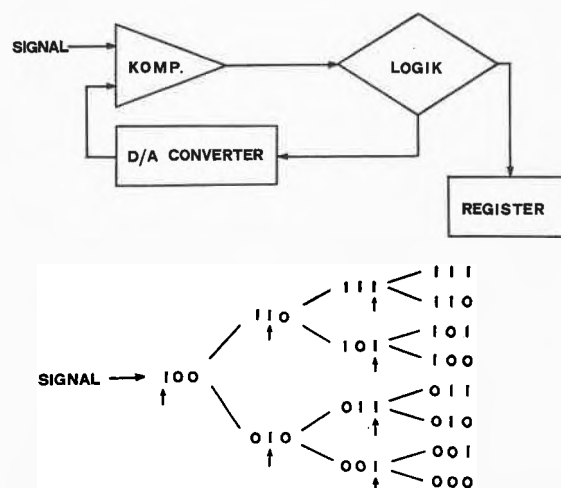


Abb. 3. Analog-Digital-Umsetzer auf der Basis der sukzessiven Approximation

In Abb. 3 ist die Methode der sukzessiven Approximation dargestellt. Als Beispiel diene ein Umsetzer für positive Signale mit einer Auflösung von 3 bit. Er besteht aus einer logischen Schaltung (Logik), welche die Konversion steuert, einem Digital-Analog-Umsetzer, einem Komparator, welcher das Eingangssignal mit dem Ausgang des D/A-Umsetzers vergleicht, und einem Register, welches das Resultat der Umwandlung temporär speichert. Die maximale Spannung, welche der Umsetzer verarbeitet, betrage 8 V. Seine Auflösung ist demzufolge 1 V. Der Umsetzprozeß ist der folgende: In einem ersten Schritt wird zu Beginn der Messung das Signal

während einer kurzen Periode (aperture time) integriert und gespeichert (sample-and-hold amplifier).

Diese Integrationszeit, die zumeist ein Bruchteil einer Mikrosekunde beträgt, darf nicht verwechselt werden mit der reziproken Meßfrequenz, welche die Zeit darstellt, die für den Umsetzprozeß notwendig ist. Sie betrage beispielsweise 1 Millisekunde, d.h. daß alle Millisekunden das Signal für den Bruchteil einer Mikrosekunde integriert wird. Für über 999⁰/₁₀₀₀ der Zeit hat das Signal keinen Einfluß auf die Konversion. Wenn es sich während dieser Zeit ändert, wird dies vom Umsetzer auch nicht bemerkt! In einem zweiten Schritt gibt die Logik dem D/A-Converter den Befehl, das Signal 4 V auszugeben. Der Komparator (Komp.) vergleicht diese 4 V mit dem im ersten Schritt integrierten Signal. Ist es gleich groß oder größer, gibt er an die Logik den Befehl, im Register eine Eins an die erste Stelle zu setzen. Die Logik verlangt in einem weiteren Schritt vom D/A-Converter die Ausgangsspannung 6 V. Diese wird vom Komparator wiederum verglichen. Je nach Fall wird eine Eins oder eine Null in die zweite Stelle des Registers gesetzt und der Prozeß mit 7 V bzw. 5 V wiederholt. Ergab der erste Vergleich im zweiten Schritt eine Spannung kleiner als 4 V, so sind die Spannungen für die folgenden Schritte zuerst 2 V, hierauf 3 V bzw. 1 V. Dieser Prozeß kann im Prinzip auf beliebige Anzahl bits ausgedehnt werden, oberhalb 12 bit werden jedoch die Anforderungen an die Elektronik sehr hoch. Diese Art Umsetzer ist sehr schnell (etwa 100 μ s für 10 bit) und relativ billig. Er erfreut sich demzufolge großer Beliebtheit.

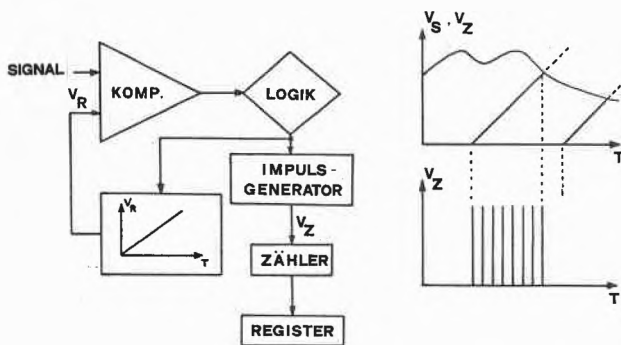


Abb. 4. Analog-Digital-Umsetzer, der eine Spannung in ein zeitproportionales Signal umsetzt

Die Umwandlung der Spannung in eine Zeit ist in Abb. 4 dargestellt. In einem ersten Schritt startet ein Generator, der hier den D/A-Converter der Abb. 3 ersetzt, einen linearen Sägezahn. Gleichzeitig geht ein Befehl an einen Impulsgenerator, Impulse konstanter Frequenz zu erzeugen, die in einem Zähler gezählt werden. Der Komparator vergleicht die zeitlineare Spannung des Sägezahns mit dem Signal. Im Moment, wo beide übereinstimmen, geht ein Signal an die Logik, die den gesamten Prozeß stoppt.

Im Zähler ist die Anzahl der Pulse und somit die Zeit, die seit Beginn des Sägezahns verlaufen ist, aufgezeich-

net. Da die Sägezahnspannung linear der Zeit ist, ist somit die Zahl im Zähler proportional der Spannung des Signals. In einem letzten Schritt wird die Zahl des Zählers in das Register gegeben, der Zähler auf Null gestellt und allenfalls der Prozeß neu begonnen. Dieser Umsetzprozeß, der in zahlreichen Variationen existiert, ist in einem gewissen Sinne das analoge Gegenstück zum digitalen Umsetzer der Abb. 3. Beiden ist gemeinsam, daß sie während eines sehr kurzen Bruchteils der Zeit das Signal effektiv messen. Ihre Genauigkeit ist begrenzt, ihre Meßgeschwindigkeit hoch.

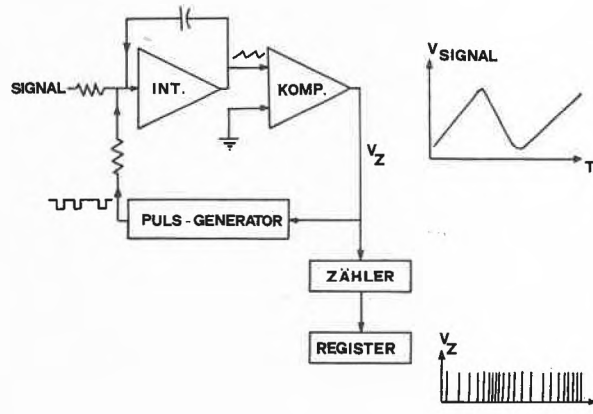


Abb. 5. Analog-Digital-Umsetzer, der eine Spannung in eine proportionale Frequenz verwandelt

Der Spannungsfrequenzwandler der Abb. 5 arbeitet grundsätzlich anders, indem er kontinuierlich mißt. Das positive Signal und ein Impulsgenerator, der negative Impulse konstanter Amplitude und Länge abgibt, werden in einem Integrator (Int.) zusammengezählt und integriert. Dieses Verfahren mißt die elektrische Ladung des Signals in kleinen konstanten Einheiten und kann, wie die Schaltung der Abb. 4, ohne weitere Komplikationen nur Signale einerlei Polarität messen. Das Signal wird im Integrator integriert, bis sein Ausgang die Ansprechschwelle des Komparators erreicht. In diesem Moment gibt dieser einen Impuls an den Pulsgenerator. Dieser schickt eine negative Ladungsmenge in den Integrator, die genügt, um den Ausgang wieder auf Null zu stellen. Der Integrationsprozeß beginnt von neuem. Die Pulse bilden eine Impulsfolge, deren Frequenz mit der Größe des Eingangssignals variiert. Große Signale ergeben hohe Frequenzen, kein Signal ergibt die Frequenz Null. Die Frequenz wird während einer bestimmten Zeit gemessen und das Resultat in das Register transferiert. Dieser Umsetzer verwendet im Gegensatz zu den andern Typen das ganze Signal für die Messung. Der Unterschied ist in Abb. 6 dargestellt. Für ein breites Signal werden beide Arten von Umsetzern ähnliche Signale ergeben. Signale, deren Dauer kürzer ist als die Meßzeit, gehen in den ersten beiden Umsetzern verloren. Die Spannungsfrequenzumwandlung ist neben der Potentiometrie die genaueste Meßmethode für die Spannungsmessung und erreicht eine Genauigkeit von einigen ppm.

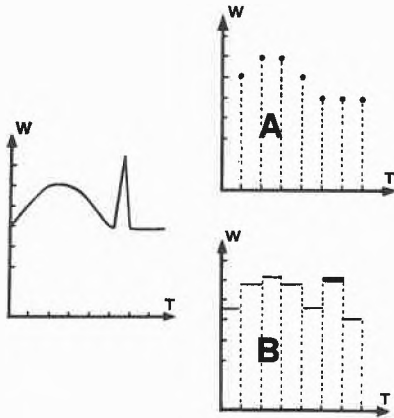


Abb. 6. Vergleich zwischen den Methoden der sukzessiven Approximation und der zeitproportionalen Umsetzung einerseits (A) und der Spannungsfrequenzumwandlung andererseits (B)

Die Auflösung kann im Prinzip beliebig weit getrieben werden, da aber die höchsten Frequenzen etwa 100 kHz bis 1 MHz betragen, ist die Meßdauer entsprechend lang. Dieser Konverter ist ideal geeignet für langsame Vorgänge, die einen großen dynamischen Bereich erfordern. Er ist sehr unempfindlich gegen Störspannungen (Netz-frequenz!), er ist leider auch die teuerste Version der drei Umsetzerarten.

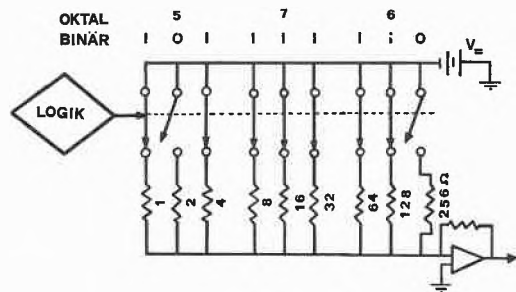


Abb. 7. Prinzip des Digital-Analog-Umsetzers

5. Digital-Analog-Umsetzer

Im Gegensatz zum A/D-Converter ist die Rückübersetzung eines digitalen in ein analoges Signal im Prinzip relativ einfach. Sie ist in Abb.7 dargestellt. Sie benützt die Tatsache, daß die Verstärkung eines rückgekoppelten Operationsverstärkers in erster Näherung durch das Verhältnis Rückkopplungswiderstand : Eingangswiderstand bestimmt ist. Eine logische Schaltung betätigt elektronische Schalter gemäß dem Binärwort, das umgesetzt werden soll. Die einzuschaltenden Widerstände besitzen Werte, die umgekehrt proportional zu ihrem binären Gewicht sind. Die Ausgangsspannung des Verstärkers ist somit proportional der (konstanten) Eingangsspannung und dem Leitwert der eingeschalteten Widerstände.

6. Anschluß mehrerer Apparaturen

Der Fall, daß mehrere Apparaturen an den gleichen Rechenautomaten angeschlossen sind, ist in Form einer

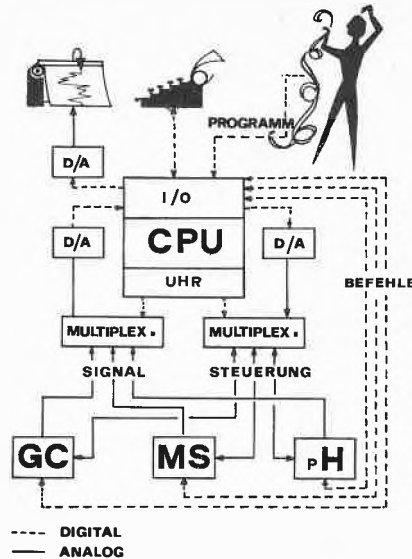


Abb. 8. Anschluß mehrerer Apparaturen an einen Rechenautomaten (CPU)

Zusammenfassung des bisher Gesagten in Abb. 8 dargestellt. Ein erstes, sehr wichtiges Problem ist die Priorität. Es ist nicht zu verhindern, daß mehrere der angeschlossenen Apparaturen zur gleichen Zeit die Rechenmaschine beanspruchen wollen. Ein Teil der Maschine hat daher die Aufgabe, zu entscheiden, wem die höchste Priorität zukommt. Die andern Kunden kommen auf die Warteliste. Diese Programmierung scheint im Prinzip einfach, ist aber häufig sehr schwierig durchzuführen. Es ist daher meist einfacher, den umgekehrten Weg zu beschreiten: Die Maschine entscheidet von sich aus, welche Apparatur abgefragt werden soll. Der Unterschied scheint minim zu sein, bedeutet aber in den meisten Fällen eine sehr große Vereinfachung der Programmierung. Da die Rechenmaschine nur ein Resultat auf einmal verarbeiten kann, ist nicht für jede Apparatur ein separater A/D-Converter notwendig. Ein Umschalter schaltet auf Befehl des Automaten die Meßstellen selbständig um. Der englische Fachausdruck hierfür lautet «multiplexer». Es kann nicht genug empfohlen werden, dreipolige Eingänge (positive und negative Seite des Signals und Erde) zu benützen, da andernfalls die Erdprobleme oft fast unüberwindlich sind. Der Rechenautomat muß im Fall eines Umschalters eine Uhr beinhalten, welche die Steuerung der regelmäßigen Abfrage übernimmt. Mit einem zweiten Umschalter wird der Ausgang für die proportionalen Steuersignale umgeschaltet. Für Zustandsmeldungen (Beginn und Ende der Messung usw.) sind separate Direkteingänge vorgesehen. Ausgänge für die Resultatausgabe, z. B. Schreiber für analoge Darstellungen und Drucker (Teletype) für digitale Signale, vervollständigen die Anlage. Letzterer wird in den meisten Fällen noch für die Konversation zwischen Operateur und Maschine verwendet (Art der Programme, eventuell Eichfaktoren). Es wird kaum möglich sein, mehr als drei verschiedene Appara-

turen miteinander zu betreiben, vornehmlich, wenn die eine derselben (Massenspektrograph) sehr viele Resultate pro Zeiteinheit liefert. Zusammenfassend seien die folgenden wesentlichen Punkte festgehalten, die uns für die Kopplung Apparatur-Rechenmaschine für letztere wesentlich scheinen:

1. Organisation des Eingang-Ausgang-Teils (I/O) und der Prioritäten.
2. Anzahl der Befehle.
3. Kapazität des Speichers (im wesentlichen eine finanzielle Frage).
4. Common-mode-ratio der A/D-Converter, d.h. die Toleranzgrenze gegenüber Störsignalen (Erdungsprobleme).
5. Falls schnelle Messungen oder ein Magnetspeicher vorgesehen sind, Möglichkeit des Direktzugangs zum Speicher (memory).
6. Falls kompliziertere mathematische Operationen auszuführen sind (z. B. Polynome höheren Grades), festprogrammierte Operationen (in hardware) für zweifache Wortlänge oder gleitendes Komma. Der Zeitgewinn kann hierbei zwischen einem Faktor 10 bis 100 ausmachen.