

Einleitung

AEG-TELEFUNKEN beschäftigt sich nicht nur auf dem Gebiet des Digitalrechnens, sondern die Firma ist auch die einzige in Deutschland und auf dem Kontinent, die sich gleichzeitig mit der Entwicklung und dem Vertrieb von Analogrechnern befaßt.

Analogrechner verschiedener Größen- und Genauigkeitsklassen haben für technisch-wissenschaftliche Anwendungen ihren festen Platz in Lehre und Forschung an Hochschulen und anderen technischen Ausbildungsstätten. Darüber hinaus gewinnen sie insbesondere in der industriellen Forschung und Entwicklung ständig an Bedeutung. Dazu tragen wesentliche anwendungstechnische Vorteile bei, die Analogrechner für den Ingenieur bei der Bearbeitung dynamischer Probleme, der Lösung von

Differentialgleichungen und Differentialgleichungssystemen, bei der Simulation dynamischer Vorgänge im Rahmen eines regelungstechnischen Gesamtsystems und bei der Simulation des Verhaltens technischer Geräte und Einrichtungen außerordentlich effektiv machen.

Seit nunmehr vier Jahren im Rahmen der Analogrechnerentwicklung eine wesentliche Aktivität auf dem Gebiet des hybriden Rechnens hinzugekommen. Unter diesem Oberbegriff versteht man definitionsgemäß die Verbindung analoger und digitaler Hardware für das Erreichen besonderer Verwendungsziele auf dem Gebiet technisch-wissenschaftlicher Problembearbeitung.

Das hybride Rechnen hat sich – ausgehend von den Analogrechnern – entwickelt, um einerseits die Anwendungs-

möglichkeiten des reinen Analogrechners zu erweitern, andererseits aber Lücken bei solchen Problembearbeitungen zu füllen, die ein Digitalrechner aus sachlichen und wirtschaftlichen Gründen nicht oder nur sehr unbequem, unübersichtlich und vor allem teuer durchzuführen imstande ist.

Hybrides Rechnen kann in zwei Ausbaustufen betrieben werden, durch hybride Analogrechner oder Hybridrechner und durch hybride Rechnersysteme oder Hybridsysteme. Beim hybriden Analogrechner wird ein schneller und hochgenauer Präzisionsanalogrechner durch die Hinzunahme von speziellen, freiprogrammierbaren Digitalelementen (wie Gatter, Flipflops, Schieberegister usw.) erweitert, die zur problemorientierten Steuerung des Analogteils dienen. Ein hybrides Rechnersystem besteht in

einer Zusammenschaltung kompletter Digitalrechner mit hybriden Analogrechnern über spezielle elektronische Einrichtungen, wobei die Programmierung eines solchen Systems auf der Basis der bekannten problemorientierten Programmiersprachen durch Erweiterungen dieser Sprachen erfolgt (z. B. FORTRAN-HYBRID).

AEG-TELEFUNKEN hat sowohl hybride Präzisionsanalogrechner mit seinen Typen RA 800 HYBRID und RA 770 [1] im Lieferprogramm als auch Hybridsysteme mit dem Typ Hybrides Rechner-system HRS 900 bzw. HRS 860.

Aufbau und Einsatzgebiete hybrider Rechensysteme

Ein hybrides Rechensystem besteht aus drei Anlageteilen; einem Digitalrechner, einem elektronischen Koppelwerk und einem hybriden Präzisionsanalogrechner. Digitalrechner und Analogrechner müssen Einrichtungen haben, die sie für den möglichst effektiven gekoppelten Betrieb geeignet machen, sind aber sonst normale Anlagen ihres Typs und als solche auch getrennt für solche Aufgaben verwendbar, bei denen die hybride Problembearbeitung nicht erforderlich ist.

Die Verbindung der beiden Rechenanlagen übernimmt ein hybrides Koppelwerk, das in einem separaten Gestellschrank eine Anzahl von Grundtypen elektronischer Koppelemente enthält, deren Anzahl wiederum vom gewünschten Ausbau der Anlage abhängt. Das Koppelwerk ist über Kabel sowohl mit einem oder mehreren Eingabe-Ausgabewerken des Digitalrechners als auch mit der Steuerelektronik, dem Analogprogrammierungsfeld und dem Digitalprogrammierungsfeld des Analogrechners verbunden. Es wickelt den Austausch von Synchronisierungsbefehlen, Steuersignalen und von Rechendaten ab, die in Umsetzern von analoger in digitale Wertedarstellung bzw. umgekehrt gewandelt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten hybrider Rechensysteme haben sich in den letzten Jahren, ausgehend von zuerst singulären Bedürfnissen in der Luftfahrtindustrie, immer mehr ausgeweitet. Hybride Rechensysteme versuchen die Vorteile der beiden beteiligten Anlagentypen zu vereinigen und die bei alleiniger Verwendung auftretenden Nachteile durch Verlagerung der schwachen Stelle auf den jeweils anderen Anlagepartner zu vermeiden.

Die Vorteile des Digitalrechners beruhen auf seinem praktisch unbegrenz-

ten Speichervermögen für Daten und Tabellen von Funktionswerten, seiner Fähigkeit, abhängig vom Zustand seines Programms logische Programmverzweigungen durchführen zu können, seiner primär nicht eingegrenzten Genauigkeit der Wertedarstellung und der hohen Geschwindigkeit bei der Abarbeitung einfacher arithmetischer Verknüpfungen. Für technisch-wissenschaftliche Rechnungen, bei denen die Lösung von Differentialgleichungen und Differentialgleichungssystemen in vielen Fällen von Wichtigkeit ist, reicht die dabei erreichbare Lösungsgeschwindigkeit häufig jedoch nicht aus. Diese auf den ersten Blick erstaunliche Tatsache hat ihre Ursache darin, daß zur Lösung von Differentialgleichungen die Durchführung von Integrationen erforderlich ist, die ein Digitalrechner jedoch wegen seines Arbeitsprinzips nicht unmittelbar vornehmen kann. Es ist vielmehr die Einschaltung sogenannter numerischer Integrationsverfahren erforderlich, bei denen Integrationen durch eine Folge arithmetischer Ausdrücke ersetzt werden, die der Digitalrechner nacheinander abarbeitet. Die Zahl der je Integrations-schritt erforderlichen einfachen Rechenschritte steigt dadurch unter Umständen jedoch so stark, daß die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit des Digitalrechners dies in vielen Fällen zeitlich nicht mehr zu kompensieren vermag. Die Nachteile zeigen sich dabei nicht nur durch zeitraubende und daher teure Rechnungen, sondern vielmehr auch in der Unlösbarkeit schneller Echtzeitprobleme, bei denen der Versuch, die Lösung in der gleichen Zeit herbeizuführen, in der auch der simulierte technische Vorgang dieselbe Lösung zeigen würde, an der zu geringen Rechengeschwindigkeit des Digitalrechners scheitert.

Die Tatsache, daß selbst große und teure Digitalrechner Differentialgleichungen nur in Zeiten lösen können, die einem höchsten Frequenzanteil der als Lösung zu erwartenden Zeitfunktion von weniger als 10 Hz entspricht und bei mittleren Digitalrechnern dieser Wert auf weniger als 4 Hz sinkt, macht jedem Fachmann das Problem einsichtig. Selbst bei einfachen Simulationsaufgaben treten im allgemeinen schon wesentlich höhere Frequenzen in den Lösungen auf [2]. Das Problem der zu geringen Rechengeschwindigkeit, d. h. der zu großen dynamischen Fehler in digitalen Simulationsprogrammen, ist ein Problem der Abbrechfehler des im Programm verwendeten numerischen

Integrationsverfahrens und hängt damit von der verwendeten Formel und der Schrittweite ab, wird jedoch unangenehmerweise auch durch beides noch nicht eindeutig beschrieben. Schrittweitenprobleme ließen sich durch Geschwindigkeitssteigerung und Abbrechfehlerprobleme durch die Verwendung mehrschrittiger Integrationsformeln mit hoher Fehlerordnung beseitigen. Nicht erfaßbar sind jedoch die Schwierigkeiten, durch die Anwendung von Differenzenmethoden potentielle Instabilitäten in die der Simulationsaufgabe zugrunde liegenden Differentialgleichungssysteme einzuschleppen und damit gerade wegen der numerischen Integration eine Lösungssituation erscheinen zu lassen, die das Problem selbst gar nicht liefert. Die Fehlerhaftigkeit ist aber auf andere Weise kaum nachweisbar, was die Problembearbeitung in völlig falsche Richtungen weisen kann. Es existiert bis heute außer notwendigen Bedingungen keine hinreichende Bedingung für die Stabilität und damit auch keine Beurteilungsgrundlage für die Verwendungsfähigkeit einer bestimmten Integrationsformel.

Angesichts dieser Schwierigkeiten sind Analogrechner deutlich im Vorteil, da ihnen ein spezielles Rechenelement, der elektronische Integrierer, zur Verfügung steht, durch den Lösungen von Differentialgleichungen mit Frequenzanteilen von > 100 Hz ohne weiteres möglich sind. Der generelle Vorteil des Analogrechners ist also die wesentlich höhere Rechengeschwindigkeit, ergänzt durch eine außerordentlich einfache Programmierung technisch-wissenschaftlicher Aufgabenstellungen und eine leichte Änderungsmöglichkeit für die Parameter des Problems.

Die Genauigkeit des Analogrechners ist mit maximal 0,01 % für technische Rechnungen praktisch in jedem Falle ausreichend. Seine schwachen Stellen, das mangelnde Speichervermögen großer Datenmengen und die geringen Fähigkeiten zu logischen Verknüpfungen werden gerade durch den Digitalrechner besonders effektiv kompensiert. In dieser Weise schließt sich der Kreis der Überlegungen, der zur Kombination der beiden Rechner-typen in einem hybriden Rechensystem geführt hat. Das Problem der Simulation und insbesondere auch der Echtzeitsimulation durchzieht praktisch alle technischen und wissenschaftlichen Disziplinen. Maschinenbau, Fahrzeugbau, chemische Reaktionskinetik, Kernverfahrenstechnik und Reaktorbau, technische Chemie der

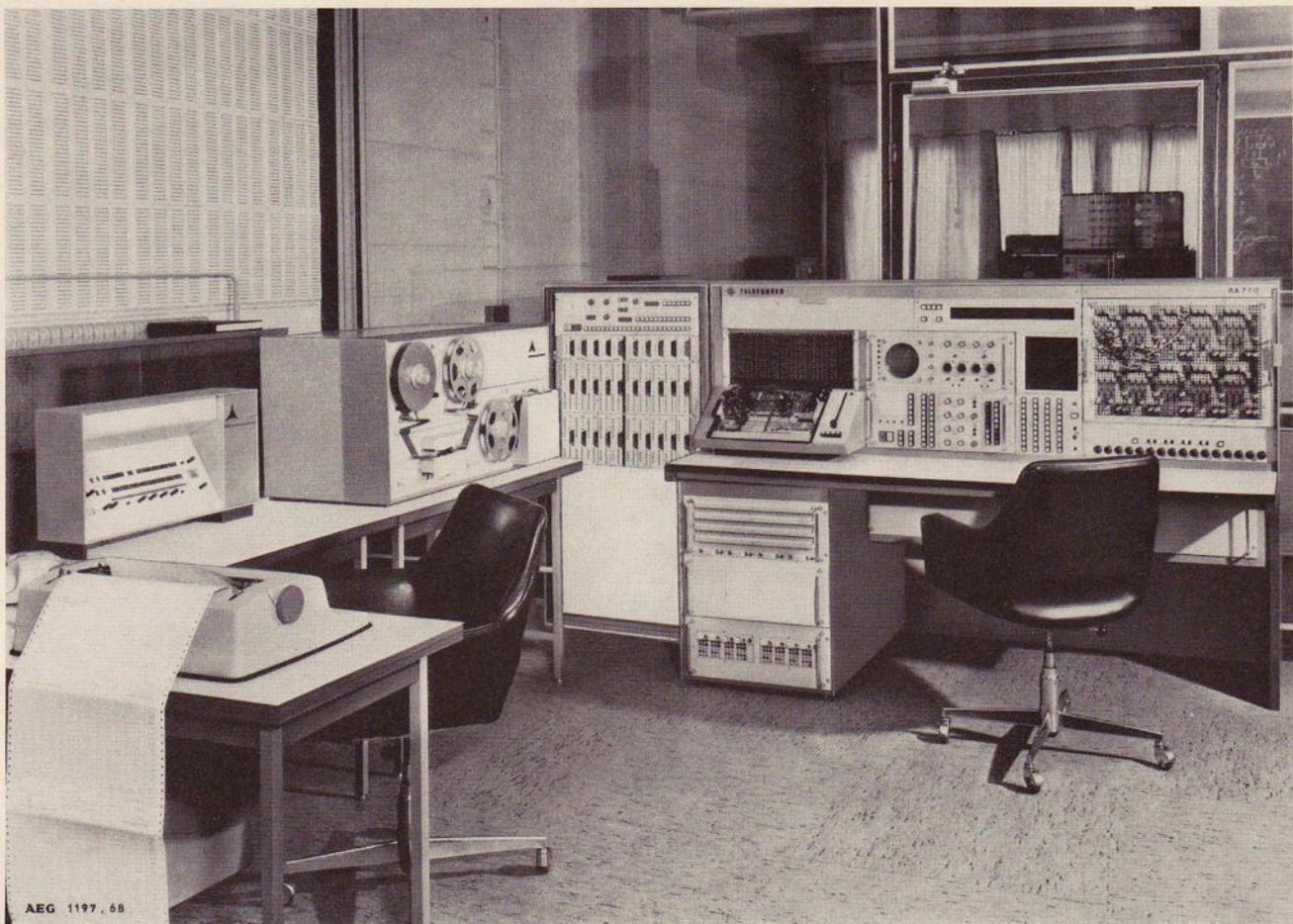


Bild 1. Das Hybride Rechnersystem HRS 900; rechts: Hybrider Präzisionsanalogrechner RA 770, links daneben: Hybrides Koppelwerk HKW 900, links: Bedienpult des Digitalrechners 90-40

Verfahrenstechnik, Biologie, Physiologie und Medizin, Biotechnik und nicht zuletzt die klassischen Gebiete des hybriden Rechnens, die Luft- und Raumfahrt, haben wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten für hybride Rechnersysteme und teilweise auch Aufgabenstellungen, die ohne solche Systeme aus sachlichen Gründen oder wegen zu hoher Kosten und Unübersichtlichkeit der rein digitalen Simulation überhaupt nicht in Angriff genommen werden können.

Hybride Rechnersysteme haben den zusätzlichen Vorteil, daß die Kombination relativ kleiner und damit billiger Digitalrechner mit ebenfalls nicht teuren Analogrechnern insgesamt Anlagenkosten entstehen läßt, die weit unter denen eines reinen Digitalrechners liegen, der unter den bereits genannten Einschränkungen bezüglich Bandbreite der Lösung nur mit erheblich mehr technologischem Aufwand auf die gleiche Rechenleistung käme.

Die Anwendungsmöglichkeiten von hy-

briden Rechnersystemen liegen weiterhin bei der automatischen Optimierung von Vielparametersystemen, bei statistischen Untersuchungen stochastischer Prozesse einschließlich der statistischen Variation von Einflußgrößen innerhalb simulierter Systeme und bei der Lösung partieller Differentialgleichungen. Allen Anwendungsmöglichkeiten stehen wiederum Anwendungsprobleme in allen oben genannten technischen und wissenschaftlichen Disziplinen gegenüber, wobei besonders die schnelle und elegante Lösungsmöglichkeit für viele Typen partieller Differentialgleichungen eine in der Zukunft noch gar nicht abzusehende praktische Bedeutung erlangen wird [3].

Das Hybride Rechnersystem HRS 900

Das Telefunken-Hybridsystem mit der Typbezeichnung Hybrides Rechnersystem HRS 900 besteht aus dem Präzisionsanalogrechner RA 770 mit den Nebenrechnern RA 775 und RA 776,

dem Digitalrechner 90-40 und dem hybriden Koppelwerk HKW 900 (Bild 1). Präzisionsanalogrechner und Koppelwerk sind Eigenentwicklungen von AEG-TELEFUNKEN, der Digitalrechner stammt aus der Fertigung der französischen Firma CII und ist der Lizenznachbau eines speziell in Hybridsystemen bewährten Rechners der amerikanischen Firma SDS. Die technischen Anforderungen an einen innerhalb eines hybriden Rechnersystems wirkungsvoll einsetzbaren Digitalrechner können allgemein unter dem Begriff Prozeßrechner-eigenschaften zusammengefaßt werden, die Ausstattung mit Programmsystemen muß dagegen den Standard eines technisch-wissenschaftlichen Rechners erreichen oder übertreffen. Da die Entwicklung des hybriden Koppelwerks auf die systembedingten und technologischen Gegebenheiten der Eingabe-Ausgabe-Werke Rücksicht nehmen muß, die Erarbeitung eines für den Benutzer effektiven hybriden Programm-

systems nur auf der Basis eines gesicherten Standardprogrammsystems erfolgen kann und der sich über Jahre erstreckende Vorlauf bis zur Freigabe für den Markt zu beachten ist, muß der Digitalrechner unter besonderen Gesichtspunkten ausgewählt werden, insbesondere auch deshalb, weil seine getrennten Verwendungsmöglichkeiten im normalen Rechenzentrumsbetrieb für technisch-wissenschaftliche Aufgaben und Datenverarbeitung ein wesentliches Beurteilungsmerkmal für den potentiellen Käufer eines hybriden Rechnersystems sein werden. In der weiteren Verfolgung dieser Linie wird demnächst ein weiteres System, das Hybride Rechnersystem HRS 860, bei AEG-TELEFUNKEN zur Verfügung stehen. Dieses System benutzt den in Eigenentwicklung entstandenen Digitalrechner TR 86, der sämtliche geforderten Bedingungen erfüllt und für den Koppelwerk- und Programmentwicklungen in bedingter Parallelität durchgeführt werden.

Der Analogrechner

Der Analogrechner muß für das volle Ausnutzen der im hybriden Rechnersystem liegenden Einsatzmöglichkeiten vom Typ eines Präzisionsanalogrechners sein, wie ihn der RA 770 darstellt (Bild 2).

Folgende Merkmale zeichnen ihn aus:

Allgemeine Merkmale:

Hohe statische Genauigkeit der Rechenelemente ($\leq 0,01\%$).

Hohe dynamische Genauigkeit, d. h. große Bandbreite und kleine Phasenfehler der Rechenelemente.

Kurze Repetierzeiten.

Spezielle Merkmale:

Mehrere genaue Zeitgeber mit großem Einstellbereich.

Servopotentiometer mit Einstellung durch Externgeräte (Lochstreifenleser, Digitalrechner).

Externwahl aller Rechenelemente durch digital verschlüsselte Adresseneingabe.

Externsteuerung der Betriebsarten, der Betriebszustände von Integrieren und Analogspeichern und der Stellungen von Komparatorschaltern durch digital verschlüsselte Steuerbefehleingabe.

Abfragemöglichkeit der Betriebsarten der umschaltbaren Rechenverstärker (Integrierer/Summierer) und der Komparatorverstärker durch Externgeräte.

Ausgabe von Steuerbefehlen an Externgeräte.

Die speziellen Merkmale sind Voraussetzung für einen Hybridsystembetrieb, der sowohl bezüglich kurzer Rechenzeiten als auch flexibler Programmierung ein Optimum erreichen soll.

Die allgemeinen Merkmale sind durch die Entwicklung moderner Rechenelemente sowie durch Verwendung einer Referenzspannung von 10 V realisiert, wodurch große Bandbreiten bei kleinem Leistungsumsatz ohne Einbuße an statischer Genauigkeit möglich werden.

Die speziellen Merkmale werden durch Verwendung eines digitalen Bediengerätes erfüllt. Es enthält ausschließlich digitale Schaltelemente, aus denen eine größere Anzahl von Zeitgebern (z. B. zur Erzeugung verschiedener Rechen-, Halte- und Pausenzeiten) sowie digitale Auswahlstellungen zur Einstellung der Betriebsarten und zur Adressierung und Anwahl der Rechenelemente aufgebaut sind. Ein Anwahlregister ermöglicht die digitale Eingabe von binär verschlüsselten Adressen aus Externgeräten (z. B. Digitalrechnern).

Zusätzlich zum digitalen Bediengerät ermöglicht ein Digitalzusatz die Durchführung der bei den speziellen Merkmalen genannten Steuer- und Abfrageoperationen. Der Digitalzusatz besteht aus dem für einen Programmierer von der Rechnerfrontseite her frei zugänglichen Magazinteil zur Aufnahme von 24 Steckkarten mit digitalen Schaltelementen und einer pultförmigen Aufnahmevorrichtung für auswechselbare Digitalprogrammierungsfelder (DPF).

Auf den 24 Magazinplätzen sind in beliebiger Verteilung Steckkarten mit einer jeweils größeren Anzahl von digitalen Elementen, wie Flipflops, Monoflops, Schieberegistern, Zählern, Invertiern, NAND- und NOR-Gliedern einsetzbar. Die Ein- und Ausgänge dieser Elemente liegen auf Buchsen des DPF. Sie werden dort mit Kurzschlußsteckern und Programmierschnüren, ähnlich wie die Elemente des Analogprogrammierungsfeldes (APF), programmiert.

Die digitalen Elemente erfüllen zwei Aufgaben. Sie gestatten einmal die Programmierung digitaler Steuerschaltungen, wie sie bei der Erweiterung eines Analogrechners zu einem sogenannten hybriden Analogrechner notwendig werden. Die Steuerung der digitalen Schaltung geschieht dabei durch die Takte der Zeitgeber des digitalen Bediengerätes oder durch feste Takte. Zum anderen dienen die digitalen Elemente als Zwischenglieder in Form einer frei-programmierbaren Logik zur Steuerung diverser Rechner- und Elementefunktionen des Analogrechners sowie zum Entschlüsseln, Umsetzen und Rückmelden dieser Funktionen oder auch digitaler Signale von Externgeräten. Die entsprechenden Eingänge der Steuerleitungen und Ausgänge der Meldeleitungen liegen ebenfalls auf dem DPF und werden dort direkt auf Ausgänge oder Eingänge von digitalen Elementen programmiert. Der Digitalzusatz bildet daher auch den frei-programmierbaren Teil des Koppelwerks zwischen Analogrechner und Digitalrechner. Auf dem

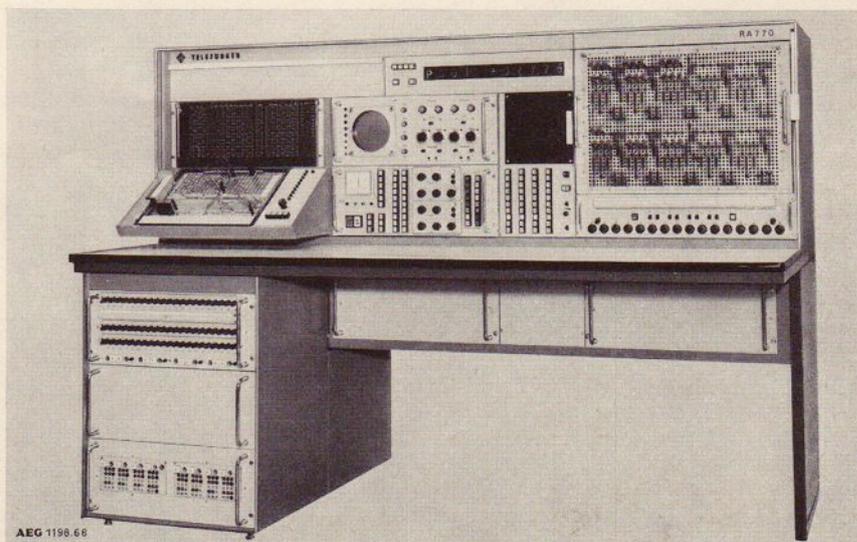


Bild 2. Der hybride Präzisionsanalogrechner RA 770

DPF spielt sich ein nicht unwesentlicher Teil der Programmierung eines hybriden Problems ab.

Für den Empfang und die Weitergabe von digitalen Steuerinformationen angeschlossener Digitalrechner enden bzw. beginnen auf dem DPF Systemverbindungsleitungen. Sie sind über das hybride Koppelwerk, in dem die notwendige Pegeladaption stattfindet, direkt mit dem in Frage kommenden Anschlußstellen des Digitalrechners verbunden. Ihre Anzahl hängt nur von dem gewünschten Ausbaumumfang des Koppelwerk-Steuerteils bzw. vom Ausbau des Digitalrechners mit entsprechenden Anschlußstellen ab.

Der Digitalrechner

Für den Einsatz im Hybriden Rechner-system HRS 900 weist der Digitalrechner 90-40 eine besonders günstige Kombination von Merkmalen auf, von denen insbesondere die mit 6 und 7 bezeichneten wesentlich, die mit 8 und 9 bezeichneten Voraussetzung sind.

1. Rein duale Wertedarstellung (schnelle Arithmetik),
2. 24 bit Wortlänge (genaue Darstellung von Gleitkommazahlen),
3. Schneller Grundtakt (6 MHz),
4. Kurze Zyklus- und Speicherzugriffszeiten (1,75 bzw. 0,8 μ s),
5. Schnelle Festkomma-, Gleitkomma- und Schiftoperationen (z. B. Festkommaaddition 3,5 μ s), Gibson-Mix 11 μ s,
6. Automatischer blockweiser Datentransfer zwischen Kernspeicher und Peripherie (Interlace) mit 3,5 μ s je Wort,
7. Ein- und Ausgabe von Steuersignalen getrennt von den normalen Eingabe-Ausgabe-Datenkanälen (PIN POT- und EOM-Befehle),
8. Abfrageleitungen (sense lines), aufgerufen durch SKS-Befehle zur programmierbaren Abfrage angeschlossener Peripherieeinrichtungen auf das Vorhandensein von Einzelbit-signalen,
9. Unterbrechungsleitungen (interrupt lines) mit verschiedenen und vom Programm her aktivierbaren Vorrangstufen zur Programmunterbrechung durch Einzelbitsignale von Peripherieeinrichtungen.

Diese Merkmale gestatten die Verwendung des Digitalrechners im Hinblick auf einen besonders wirtschaftlichen Aufbau des Koppelwerks, günstige Zeitverhältnisse beim Datentransfer in beiden Richtungen und übersichtliche Programmierung hybrider Rechenprobleme.

Durch hohe interne Verarbeitungsgeschwindigkeit und hohe Eingabe-Ausgabe-Raten lassen sich die in einem geschlossenen Verarbeitungskreis aus Digital- und Analogrechner auftretenden Verzögerungen des Datenaustausches mit der Gefahr daraus resultierender Instabilität der Lösung von vornherein verringern. Die Genauigkeit der Wertedarstellung hat mit 24 bit ein günstiges Optimum, um einmal einen ausreichenden Wertebereich realisieren zu können und zum anderen zusätzliche Informationsbits zur Ansteuerung von Glättungseinrichtungen zur Verfügung zu haben. Diese Glättungseinrichtungen sind ausgabeseitig in Zusammenhang mit dem Digital-Analog-Umsetzer in Hardware realisiert und gestatten die Ausgabe von Funktionen nicht als Folge diskreter Werte, d. h. als Treppenfunktion, sondern als kontinuierliche Funktion mit Geradenapproximation zwischen den Stützstellen. Sie wirken als Filter erster Ordnung und setzen die Gefahr der Anfachung potentieller Instabilitäten wesentlich herab.

Der automatische blockweise Datentransfer verhilft dem Hybridsystem gegenüber einem normalen Eingabe-Ausgabe-Kanal nochmals zu einer Steigerung der Datenübertragungsgeschwindigkeit. Bei einer normalen Datenübertragung durch Programm, bei der zusätzlich Adressenrechnungen durchzuführen sind, benötigt man eine Folge mehrerer Befehle, mit etwa 20 μ s Rechenzeit.

Die Belegzeit des Digitalrechners bei der Ein- und Ausgabe von Datenworten läßt sich durch die automatische blockweise Eingabe aber entscheidend verringern. Ein nachrüstbarer Interlace-Zusatz sorgt für einen direkten Datentransfer zwischen Peripheriegerät und Kernspeicher ohne Eingriff durch das laufende Programm. Dies ist bei der Übertragung von Datenblöcken mit einer bestimmten Anzahl von Datenwörtern wichtig. Das Interlace enthält zwei Register für die Adresse des ersten Wortes und für die Anzahl der zu übertragenden Wörter. Es führt die gesamte Adressenrechnung selbständig durch. Die Belegzeit des Rechners für die Übertragung eines Datenwortes wird dadurch auf zwei Speicherzyklen von 3,5 μ s herabgesetzt.

Innerhalb eines hybriden Rechner-systems ist die Verwendung der Interlace-Einrichtung häufig notwendig, da auf diese Weise ein schneller Transfer mehrerer parallel zu übertragender Funktionswerte bei verringertem Zeitaufwand möglich ist.

Der Digitalrechner kann bis zu 32 K-Wörtern im Kernspeicher ausgebaut werden. Für die Verwendung in einem hybriden Rechnersystem wird mit Rücksicht auf das erforderliche Programmsystem ein Ausbau auf mindestens 8 K, besser 12 K benötigt. Neben der Kontrollschreibmaschine und einer Lochstreifen-Ein-Ausgabe sind als Mindestausstattung zwei Magnetbandgeräte für den Betrieb des zur Verfügung stehenden Hybridprogrammsystems erforderlich. Für den Rechner existieren alle bekannten und gebräuchlichen Peripheriegeräte, von denen speziell Lochkartenleser und Schnelldrucker abwicklungstechnisch weitere Vorteile auch beim hybriden Rechnen bringen.

Das hybride Koppelwerk

Wesentliche Grundlage für die Planung des Hybriden Rechnersystems HRS 900 bildeten die bereits beschriebenen Eigenschaften des Analog- und des Digitalrechners. Das hybride Koppelwerk HKW 900 hat dazu die Aufgabe, die Rechen- und Steuerinformationen zwischen den unterschiedlich arbeitenden und unterschiedlich programmierten Systemteilen in hinreichend kurzer Zeit zu übertragen.

Im hybriden Koppelwerk HKW 900, das speziell für das Hybridsystem HRS 900 entwickelt wurde, sind Rechen- und Steuerwortübertragung völlig getrennt geführt. Hieraus ergibt sich eine sehr flexible und zugleich für den Benutzer leicht überschaubare Programmierung. Darüber hinaus erleichtert eine Reihe von Programmhilfen, z. B. ein hybrides Betriebsprogrammsystem, ein Überwachungsprogramm und eine spezielle FORTRAN-Erweiterung, die Anwendung.

Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit wurden bei der Entwicklung des Koppelwerks HKW 900 an vielen Stellen neue Wege beschritten:

Die Digital-Analog-Umsetzer (DAU) dienen nicht nur zur Konvertierung digitaler Signale, sondern sie sind zusätzlich auch zur Multiplikation des digitalen Eingangssignals mit einem Analogwert bzw. zur Extrapolation/Interpolation der Ausgabewerte des Digitalrechners umschaltbar.

Multiplexer und Abtast- und Halteverstärker sind zu einer Schaltungseinheit mit extrem hoher Genauigkeit zusammengefaßt.

Der Analog-Digital-Umsetzer erreicht eine Konversionsrate von 300 ns/bit (4 μ s für die Konversion eines Analogwertes mit 14 bit Genauigkeit).

Die Art der Rechendatenübertragung auf den verschiedenen Leitungen (random access, zyklisch), die Blocklänge der Ein- und Ausgabedaten usw. ist vom Digitalprogramm vorgebar.

Die Einstellung aller für eine Rechnung wichtigen Parameter, z. B. Zykluszeit, Betriebsart der DAU usw., wird vom Programm vorgenommen, um Bedienfehler zu vermeiden.

Das Koppelwerk HKW 900 verteilt sich auf einen Schrank A (Bild 3) und ein Magazin B. Schrank A steht neben dem Analogrechner. Er enthält alle Einheiten, die zur Erhöhung der Störsicherheit direkt bei den analogen Rechenelementen untergebracht sein müssen, also insbesondere die Digital-Analog-Umsetzer, Multiplexer und Analog-Digital-Umsetzer. Magazin B befindet sich im Schrank des Digitalrechners. Es enthält alle Einheiten, die aus technischen Gründen vorteilhaft in der Nähe des Digitalrechners installiert werden, also die Steuerwerke für Rechendaten- und Steuerwortübertragung. In Sonderfällen sind die Elemente dieses Magazins auch in einem gesonderten Schrank neben dem Digitalrechner unterzubringen.

Bis auf den Analog-Digital-Umsetzer, der eine in sich abgeschlossene Baueinheit bildet, sind alle übrigen Elemente des Schrankes A auf Steckeinheiten aufgebaut, die von der Vorderseite in offene Magazine eingeschoben werden. Die Karten haben breite Rücken, auf denen die erforderlichen Bezeichnungen aufgedruckt sind und die insbesondere durch entsprechende Ausparungen an Hand von Anzeigelampen das Ablesen der jeweiligen Registerstellungen gestatten. Hierdurch wird das Verfolgen des Rechenablaufs und das Auffinden von Fehlerursachen ermöglicht. Die Bauweise hat außerdem den Vorteil, daß sich die Anzahl der Datenkanäle und bestimmte Komfortstufen der Datenübertragung — ausgehend von geringen Bestückungen — in kleinen Schritten erweitern lassen, was der Wirtschaftlichkeit zugute kommt.

Der gesamte Informationsfluß teilt sich in die beiden Gruppen Übertragung von Steuerwörtern und Übertragung von Rechendaten.

Steuerwortübertragung

Eine Steuerwortübertragung findet in beiden Richtungen (Digital-Analog- und Analog-Digital-Richtung) statt. Ausgangspunkte sind in beiden Systemteilen jeweils mehrere Register und externe Anschlußstellen. Das Koppel-

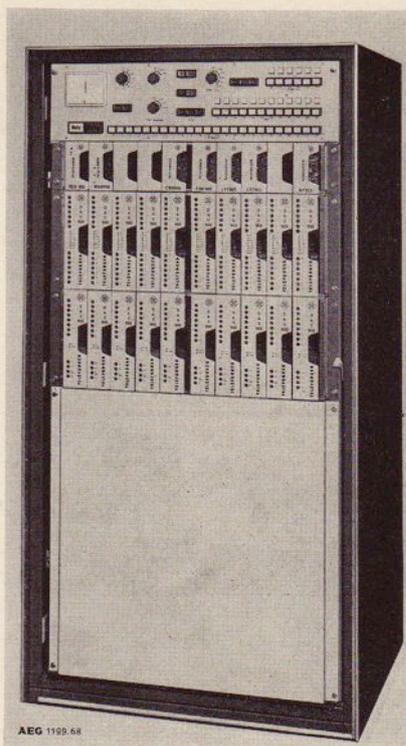


Bild 3. Das hybride Koppelwerk HKW 900 Schrank A mit Wartungsfeld (oben) und halber Umsetzerbestückung

werk HKW 900 übernimmt die Umsetzung, zeitliche Ablaufsteuerung und Verteilung der Steuerwörter. In Digital-Analog-Richtung geschieht die Ausgabe aus dem Digitalrechner nicht über die normalen Eingabe-Ausgabe-Kanäle sondern unabhängig davon durch eine zusätzliche sogenannte Parallelausgabe über POT-Befehl (PIN/POT-Kanal) und durch eine Einzelsignalausgabe über EOM-Befehl.

Ein POT-Befehl lädt ein Parallelausgaberegister mit Puffereigenschaften, von wo aus die Steuerinformation entsprechend dem EOM-Befehl an folgende Einheiten des Analogrechners bzw. des Koppelwerks automatisch weitergegeben wird:

Steuerprogrammregister	SPR
Auswahladreßregister	AAR
Digitalzusatz	DEX 802
Zykluszeitregister	ZZR

Folgende Befehlsklassen werden übertragen:

- Betriebsartenbefehle,
- Anwahlbefehle,
- Einzelsteuerbefehle und
- Zykluszeitbefehle.

Betriebsartenbefehle bewirken das automatische Setzen des Steuerprogrammregisters SPR und damit eine externe

Betriebsartensteuerung des Analogrechners. Das SPR wirkt auf die Steuerung des digitalen Bediengerätes im Analogrechner und ersetzt die dort normalerweise zu betätigende Handsteuerung über Drucktasten für

- Dauerrechnen,
- Repetierendes Rechnen,
- Rechnen mit Halt,
- Iterativ automatisch,
- Iterativ Hand,
- Potentiometereinstellen,
- Pause,
- Rechnen,
- Halt,
- Dynamisches Prüfen und
- Statisches Prüfen.

Die Taste *Weiter* ist durch einen EOM-Befehl ersetzt.

Anwahlbefehle setzen automatisch das Anwahladreßregister AAR im Bediengerät des Analogrechners und erlauben damit die Anwahl von 600 Elementen in einem Haupt- und zwei Nebenrechnern. Ein spezieller Anwahlbefehl verursacht die gleichzeitige Anwahl und Einstellung eines Servopotentiometers durch Aktivierung des Servoantriebes mit richtiger zeitlicher Zuordnung.

Mit Einzelsteuerbefehlen werden freiprogrammierbare Elemente des Digitalzusatzes im Analogrechner gesetzt.

Es stehen mindestens zwölf, auf Wunsch maximal 24 Leitungen zur Verfügung.

Durch einfaches Verbinden der entsprechenden Anschlüsse auf dem Digitalprogrammierungsfeld lassen sich unter anderen folgende Funktionen steuern: Verschiedene Betriebsarten des Analogrechners,

- Einzelsteuerung von Integrierern und
- Analogspeichern,
- Steuerung mechanischer und elektronischer Digital-Analog-Schalter,
- Steuerung von Schrittschaltern und
- Steuerung von Ausgabegeräten.

Die digitalen Elemente gestatten dabei die Programmierung von Schaltungen, z. B. zur Entschlüsselung, Umschlüsselung und Verzögerung der Einzelsteuerbefehle.

Eine charakteristische Größe bei der Behandlung eines Rechenproblems in einem hybriden Rechnersystem ist die Zykluszeit (frametime). Als Zykluszeit wird die Zeit definiert, die zwischen zwei Startbefehlen für die Übertragung von Rechendaten in den Digitalrechner vergeht. Innerhalb der Zykluszeit laufen definitionsgemäß folgende Vorgänge ab: Abfrage einer bestimmten im Programm festgelegten Anzahl von Analogwerten bzw. Analog-Digital-Übertragungskanälen,

Umsetzung der abgefragten Analogwerte in Digitalwerte,

Transport des gesamten Datenblocks, d. h. der festgelegten Anzahl von umgesetzten Analogwerten, in den Kernspeicher,

Verarbeitung der Einzeldaten in einem Programm,

Ausgabe der Ergebnisse als Datenblock von Digitalwerten,

Umsetzung der Digitalwerte in Analogwerte mit anschließender Eingabe in den Analogrechner.

Die vorzubegebende Zykluszeit muß also größer sein als die Summe der für die Einzelvorgänge benötigten Zeiten. Die Zykluszeit wird über das Digitalprogramm eingestellt, um Bedienfehler zu vermeiden, wie sie bei manueller Einstellung auftreten können. Durch Setzen des Zykluszeitregisters lassen sich Zykluszeiten zwischen 1 ms und 1 s vorgeben. Sie werden durch Auszählen von Grundtakt des im Analogrechner vorhandenen zentralen Taktgenerators mit einem Zeitfehler 10^{-5} abgemessen.

Abfragebefehle haben die Wirkungsrichtung vom Analogrechner zum Digitalrechner, werden jedoch vom Digitalrechner ausgelöst. Mit dem Befehl SKS prüft der Digitalrechner Abfrageleitungen (sense lines) und bewirkt entsprechend dem Abfrageergebnis Programmverzweigungen. Im Koppelwerk wird dazu die im Digitalrechnerprogramm vorgegebene Leitungsadresse entschlüsselt und die entsprechende Abfrageleitung durchgeschaltet. Neun Abfrageleitungen sind für allgemeine Steueraufgaben reserviert, maximal 36 weitere Abfrageleitungen lassen sich wahlweise zum Digitalzusatz des Analogrechners durchschalten. Die erforderliche Anzahl richtet sich nach den speziellen Forderungen des Benutzers.

Die Eingänge der Abfrageleitungen stehen auf Programmierbuchsen des Digitalprogrammierfeldes zur Verfügung und können mit den Ausgängen der freiprogrammierbaren digitalen Elemente des Digitalzusatzes, mit Komparatorausgängen bzw. speziellen Signalleitungen direkt beschaltet werden.

Unterbrechungsbefehle wirken in Analog-Digital-Richtung und werden vom Analogrechner aufgerufen. Sie ermöglichen den Eingriff in das Programm des Digitalrechners.

Sechs Unterbrechungsleitungen sind für allgemeine Steueraufgaben reserviert. Maximal 26 weitere Unterbrechungsleitungen lassen sich wahlweise zum Digitalzusatz des Analogrechners durchschalten. Die erforderliche Anzahl richt-

et sich nach den speziellen Forderungen des Benutzers. Die Eingänge der Unterbrechungsleitungen stehen auf Programmierbuchsen des Digitalprogrammierfeldes zur Verfügung und können mit den Ausgängen der freiprogrammierbaren digitalen Elemente mit den Komparatorausgängen bzw. mit speziellen Signalleitungen direkt beschaltet werden. Die Numerierung entspricht ihrer Vorrangstufe.

Rechendatenübertragung

Die digitale Zahlendarstellung im Digitalrechner verlangt, daß die kontinuierlichen Rechenspannungen des Analogrechners in digitale Werte umgesetzt werden müssen, um sie der digitalen Weiterverarbeitung zugänglich zu machen. Umgekehrt können vom Digitalrechner stets nur digitale Werte geliefert werden, die in analoge Rechenspannungen umzuwandeln sind. Im Falle einer Funktionsdarstellung soll sich diese Spannung stetig entsprechend dem Funktionsverlauf ändern. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, für jede der beiden Datenübertragungsrichtungen spezielle Umsetzerelemente vorzusehen.

Analog-Digital-Richtung

Für die Datenübertragung in Analog-Digital-Richtung liegen die Eingangsbuchsen auf dem Analogprogrammierfeld des Analogrechners. Maximal lassen sich 32 Übertragungsleitungen für die Analog-Digital-Richtung vorsehen. Das Aufschalten von Rechenspannungen geschieht über Programmierschnüre durch normales Verbinden mit den Ausgängen von Rechenelementen außer bei Koeffizientenpotentiometern, die über ein eigenes Anwahlsystem erreicht werden. Die Eingänge der Übertragungsleitungen sind fortlaufend numeriert.

Die Eingänge der Übertragungsleitungen sind mit einem Multiplexer verbunden. Der Multiplexer ist ein elektronischer Umschalter, der eine Auswahl der Übertragungsleitungen treffen kann und für eine jeweils konstante Zeit eine Leitung auf die nachfolgenden Umsetzerelemente durchschaltet. Der Multiplexer kann die Übertragungsleitungen in drei Betriebsarten abfragen, die sich jeweils vom Digitalprogramm vorgeben lassen:

Fortlaufende Abfrage (sequentielle Abfrage),

Abfrage mit willkürlichem Zugriff (random access) und

Dauerabfrage einer Leitung (Sonderfall von 2).

Bei fortlaufender Abfrage arbeitet gleichzeitig die automatische blockweise Eingabe. Durch einen EOM-Befehl wird dem Multiplexer die Adresse der Übertragungsleitung mitgeteilt, bei der die Abfrage beginnen soll. Im Digitalrechnerprogramm ist angegeben, wie lang der Block der Eingabewörter zu sein hat, d. h., wieviele Leitungen nacheinander abzufragen sind.

Bei Abfrage mit willkürlichem Zugriff werden vom Digitalprogramm laufend die Adressen der abzufragenden Leitungen vorgegeben. Die Eingabe geschieht mit normalen Programmbefehlen, d. h. ohne Verwendung der automatischen blockweisen Eingabe.

Bei Dauerabfrage bleibt der Multiplexer auf einer Übertragungsleitung stehen. Die Eingabe läßt sich mit und ohne automatischen Blocktransport durchführen. Die erste Möglichkeit dient dem Funktionstransport, d. h. der Übertragung von abgetasteten Zeitfunktionen. Die zweite Möglichkeit wird zur Einzelwortübertragung, z. B. bei Potentiometereinstellung, benutzt.

Auf den Multiplexer folgt normalerweise ein Abtast- und Halteverstärker. Er soll die von einem Multiplexer durchgeschaltete analoge Rechenspannung eine vorgegebene Zeit konstant halten, um bei der nachfolgenden Analog-Digital-Umsetzung Fehler durch Änderung der Eingangsgröße während des Umsetzvorganges zu vermeiden.

Im HKW 900 wird ein neu entwickelter Multiplexer verwendet, der als Bestandteil bereits einen Abtast- und Halteverstärker enthält. Die wesentlichen technischen Daten dieses MAH 900 sind

Statischer Fehler

10^{-4}

(nach Abgleich $3 \cdot 10^{-5}$)

Einstellzeit auf 10^{-4}

$10 \mu\text{s}$

Haltefehler über $50 \mu\text{s}$

$< 1 \text{ mV}$.

Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, einen Abtast- und Halteverstärker in jeder Leitung vor dem Multiplexer anzuordnen. Der prinzipielle Vorteil dieser Anordnung besteht darin, daß zu einem Abtastzeitpunkt die anstehenden Spannungswerte auf allen Kanälen gleichzeitig gespeichert werden, also keine zeitlichen Verschiebungen gegeneinander auftreten. Da jedoch die im anderen Fall auftretenden Fehler bei den kurzen Übertragungszeiten in Analog-Digital-Richtung meist vernachlässigbar sind, empfiehlt sich aus Wirtschaftlichkeitsgründen die Verwendung eines einzigen Abtast- und Halteverstärkers.

Der Analog-Digital-Umsetzer (ADU) setzt Analogspannungen in einen dual verschlüsselten Digitalwert von 14 bit einschließlich Vorzeichenbit um. Seine wesentlichen Daten sind:

Umsetzzeit für 14 bit
 $4 \mu\text{s}$
 Genauigkeit
 $\pm 0,01 \% \pm \frac{1}{2} \text{ LSB}$

Digital-Analog-Richtung

Die Ausgabe von Daten aus dem Digitalrechner geschieht ebenfalls über den normalen Eingabe-Ausgabe-Kanal in Zusammenhang mit der Einrichtung zum automatischen blockweisen Datentransport. Anders als bei der Datenübertragung in Analog-Digital-Richtung ist für jeden Übertragungskanal in Digital-Analog-Richtung ein eigener Digital-Analog-Umsetzer (DAU) vorgesehen. Die Leitungsadressregister für die Digital-Analog-Umsetzer und analogen Multiplexer sind identisch. Maximal lassen sich 40 Digital-Analog-Umsetzer einbauen. Das Einspeichern und Umsetzen von Digitalwerten erfolgt für die Umsetzer nacheinander unter Kontrolle des Digitalrechnerprogramms.

Eine gleichzeitige Umsetzung der Analogspannungen nach Beendigung der Ausgabe läßt sich vorsehen, erfordert jedoch einen Mehraufwand wegen des zusätzlichen Bedarfs an Pufferspeichern. Die Ausgänge der Umsetzer werden über Kabel auf Programmierbuchsen des Analogprogrammierungsfeldes geführt. Die Analogspannungen stehen dort so lange zur Verfügung, bis ein neuer Digitalwert vom Digital-Analog-Umsetzer geliefert wird. Von den entsprechenden Programmierbuchsen wird mit Programmierschnüren direkt auf die analogen Rechenelemente weiterverbunden.

Im Koppelwerk HKW 900 werden speziell entwickelte Digital-Analog-Umsetzer DAU 900 verwendet, die eine Umschaltung auf verschiedene Betriebsarten ermöglichen.

Wesentliche technische Daten sind:

Anzahl der Bits einschließlich Vorzeichen

14

Anzahl der Zusatzbits für Extrapolation/ Interpolation

8

Umsetzzeit (für 0,01 % Endwertfehler)

$5 \mu\text{s}$

Genauigkeit

$\pm 0,01 \% \pm \frac{1}{2} \text{ LSB}$

Die im Koppelwerk HKW 900 eingesetzten Digital-Analog-Umsetzer DAU 900 können bei Erweiterung mit der Glättungseinheit DAS 900 durch zwei

Kennbits auf vier verschiedene Betriebsstellungen umgeschaltet werden:

Umsetzen,
 Multiplizieren,
 Extrapolieren, fein, und
 Extrapolieren, grob.

Die Kennbits sind nur einmal zu übertragen und brauchen bis zur Änderung der Betriebsart nicht wiederholt zu werden. Die verschiedenen Betriebsarten berücksichtigen insbesondere den Einsatz der Digital-Analog-Umsetzer in einem hybriden Rechnersystem und finden sich bei keinem der zur Zeit auf dem Markt befindlichen Umsetzer. Sie dienen einerseits zur Erhöhung der Genauigkeit bei der Funktionsausgabe und bieten andererseits zusätzliche Rechenmöglichkeiten und Bedienungskomfort.

Die gesamte Stellenzahl der DAU 900 mit Glättungseinheit DAS 900 beträgt 24 bit und entspricht damit der Stellenzahl des Digitalrechners 90-40 und des Ausgabekanals, der die Digital-Analog-Umsetzer parallel auf 24 Leitungen ansteuert.

Die 24 Bits teilen sich auf in

2 bit: Kennbits für einen der insgesamt vier Betriebszustände
 14 bit: Wertedarstellung einer rein dual verschlüsselten Zahl einschließlich Vorzeichen (Funktionswert)
 8 bit: Wertedarstellung einer rein dual verschlüsselten Zahl (Inkrement je Zykluszeit)

Betriebsart Umsetzen

Umsetzen ist die Grundbetriebsart des Digital-Analog-Umsetzers DAU 900. Bei entsprechender Kennung der beiden Steuerbits sind die 14 bit (13 bit + Vorzeichenbit) der Normalumsetzung aktivierbar mit einem resultierenden Quantisierungsfehler von maximal $0,61 \cdot 10^{-4}$. Bezugsspannungen des Umsetzers sind $\pm 10 \text{ V}$ (Referenzspannung des Präzisionsanalogrechners), die bei dieser Betriebsart intern am Digital-Analog-Umsetzer anliegen.

Betriebsart Multiplizieren

Bei entsprechender Kennung der beiden Steuerbits sind wieder die 14 bit der Normalumsetzung aktivierbar. Als Referenz wird jetzt jedoch eine am Analogprogrammierungsfeld gewählte Analogspannung verwendet, die am Ausgang des Digital-Analog-Umsetzers das Produkt aus dem Digitalwert der Digitalrechnerausgabe mit dem vom Präzisionsanalogrechner gelieferten Analogspannungswert erscheinen läßt.

Diese sogenannte variable Referenzspannung wird auf dem Analog-Programmierungsfeld auf eine Programmierbuchse geschaltet, die jedem Ausgang des Digital-Analog-Umsetzers zugeordnet ist. Die Verbindung kann auch in anderen Betriebsarten des Digital-Analog-Umsetzers gesteckt bleiben, da sie nur in dieser speziellen Betriebsart aktiv wird. Der multiplizierende Digital-Analog-Umsetzer DAU 900 hat zwei prinzipielle Vorteile. Einmal erhöht die zusätzliche Produktbildungsmöglichkeit die Anzahl der im Analogrechner zur Verfügung stehenden Multiplizierer. Zum anderen hat diese Multiplikation nicht die grundsätzlich durch physikalische Grenzen beschränkte Genauigkeit der sonst im Analogrechner verwendeten Multiplizierertypen. Es steht also ein hochgenaues Rechenelement zur Verfügung, das zudem am Analogrechner Rechenelemente (Multiplizierer und Rechenverstärker) einsparen hilft. Durch geeignete schaltungstechnische Maßnahmen sind die dynamischen Fehler extrem klein gehalten. Sowohl der dynamische Nullpunktfehler als auch der dynamische Produktfehler sind bei 1 kHz noch kleiner als 10^{-4} .

Betriebsart Interpolieren/Extrapolieren (mit großer und kleiner Schrittweite)

Bei entsprechender Kennung der beiden Steuerbits übernimmt der Digital-Analog-Umsetzer DAU 900 mit Glättungszusatz DAS 900 einen Funktionswert, der mit 14 bit angeboten wird, und ein Inkrement, das mit 8 bit verarbeitet werden kann. Der Funktionswert wird umgesetzt, wie unter der Betriebsart Umsetzen bereits beschrieben. Aus dem digital angegebenen Inkrement bildet der Umsetzer mit Hilfe einer variablen Referenz

$$U_T \sim \frac{1}{\text{Zykluszeit}} \text{ eine Spannung}$$

$$U_I \sim \frac{\text{Inkrement}}{\text{Zykluszeit}}$$

die anschließend aufintegriert und zum Funktionswert addiert wird. Damit erzeugt der Digital-Analog-Umsetzer einen linearen Übergang zwischen zwei Funktionswerten.

Das Inkrement wird vom Digitalrechner über ein Unterprogramm gebildet, wobei zwei Verfahren möglich sind:

Der zukünftige Wert ist im Rechner bereits bekannt (Laufzeit-, Funktionspeicheranwendungen). Dann ist das Inkrement durch Subtraktion exakt er-

mittelbar, der Digital-Analog-Umsetzer wirkt interpolierend.

Der zukünftige Wert ist nicht bekannt und muß durch Differenzverfahren aus vergangenen Werten approximiert werden. Der Digital-Analog-Umsetzer wirkt dann extrapolierend.

Für diese Glättungsoperationen sind zwei Maximalwerte des Inkrements vorgesehen: 1 % bzw. 10 % der Einheitsspannung. Das Inkrement wird wegen der Darstellung durch 8 bit mit einer relativen Genauigkeit von 0,5 % verarbeitet. Der extra-/interpolierende Digital-Analog-Umsetzer DAU 900 mit Glättungszusatz DAS 900 liefert am Ausgang also nicht eine Treppenkurve (Filter nullter Ordnung), wie dies bei herkömmlichen Umsetzern der Fall ist, sondern einen Polygonzug, d. h., er wirkt wie ein Filter erster Ordnung.

Das Programmsystem

Von größter Wichtigkeit für das Ausnutzen der potentiell in einem hybriden Rechnersystem liegenden Vorteile ist ein Programmsystem, das dem Benutzer ein Höchstmaß an Komfort und Programmiervereinfachung bietet. Die zu bearbeitenden Aufgaben erreichen einen Grad der Komplexität, daß einfache Programmiervorschriften, die den Anwender auf den Stand einer Arbeit in Maschinenkode oder auch Assemblersprache zwingen, für den praktischen Betrieb nicht zumutbar sind. Es besteht die Gefahr, daß sich die Schwierigkeiten der ohnehin erforderlichen gleichzeitigen digitalen und analogen Programmierens einschließlich der notwendigen Beachtung des bestehenden Ineinandergreifens der Programme unverhältnismäßig erhöhen und die Vorteile des hybriden Rechnersystems nicht zur Wirkung kommen.

Innerhalb eines hybriden Rechnersystems hat der Digitalrechner aus praktischen Gründen eine Führungsrolle, da er wegen seiner Speichermöglichkeiten, die sich auch auf Befehlsabläufe erstrecken, in jedem Fall die Rolle eines Einstellrechners übernehmen kann. Der Analogrechner wird in bekannter Weise auf seinem Analogprogrammierungsfeld unter Hinzuziehung der Digitalelemente des Digitalzusatzes programmiert. Die Steuerung des Rechenablaufs, Einstellung der Servopotentiometer, Aktivierung der Ein- und Ausgabegeräte wie Oszillographen, XY-Schreiber, Kurvenfolger usw., die der Operateur sonst durch Betätigung von Tasten veranlaßt, sind in einem hybriden Rechnersystem neben den übrigen

Aufgaben Sache des Digitalrechners. Vom Digitalrechner erwartet man daher eine normal übliche Ausstattung mit Assemblern und Kompilern für problemorientierte Sprachen, in die sich Anweisungen für die zusätzlichen Funktionen des hybriden Rechners nahtlos und ohne die unumgängliche zusätzliche Belastung für den Programmierer einfügen lassen.

Daß auch Assembler und nicht nur problemorientierte Sprachen in die Überlegungen einbezogen werden müssen liegt daran, daß beim Arbeiten auf Assemblerebene die bekannten Geschwindigkeitsvorteile erreichbar sind, die der geübte Programmierer bei der Bearbeitung von zeitkritischen Problemen in Anspruch nehmen will. Dafür bietet das Arbeiten mit einer entsprechenden Kompilersprache dem gelegentlichen oder ohne Sonderforderungen arbeitenden Benutzer die gewünschte große Bequemlichkeit. Zu diesen Hybriderweiterungen von Assemblern und Kompilern sind dann noch Spezialprogramme, vor allem in Form von Testprogrammen, erforderlich, um die Fehlersuche zu erleichtern und in vielen Fällen das Durcharbeiten komplizierter Hybridprogramme mit den diversen Fehlermöglichkeiten auf der analogen und digitalen Seite überhaupt erst zu ermöglichen.

Für die hybride Programmierung in einer problemorientierten Sprache hat sich Fortran auf der Welt generell durchgesetzt. Das Hybride Rechnersystem HRS 900 verwendet ein Real-Time-Fortran RTF, das für die speziellen Belange des hybriden Rechnens entwickelt wurde. Die besonderen Vorteile sind ein besonderes Kellerungssystem, mit dem alle Unterprogramme in RTF rekursiv aufgerufen werden können, sowie die Tatsache, daß sich Unterbrechungsprogramme in RTF definieren und anschließen lassen. Von besonderer Wichtigkeit ist, daß außerdem Fortran-Statements und Maschinenbefehle in Assemblerkode beliebig miteinander gemischt werden dürfen.

Für den Digitalrechner 90-40 gibt es zwei unterschiedlich große Assembler, *Symbol* und *Meta-Symbol*. Beide Assembler stehen unter der Regie eines Betriebssystems *Monarch* und haben eine formatfreie Eingabe.

Extern definierte Adressen oder Unterprogramme, insbesondere auch extern definierte POPs (programmierte Operatoren), sind zugelassen. Die durch die Assembler erzeugten Binärprogramme können durch einen ebenfalls unter der

Regie von *Monarch* stehenden Lader geladen werden. Der Lader besorgt dann die Montage der verschiedenen extern definierten Programmteile, insbesondere auch den automatischen Anschluß von Bibliotheksprogrammen aus der *Symbol/Meta-Symbol*-Bibliothek.

Meta-Symbol ist ein sehr effektiver Assembler, der im Gegensatz zu *Symbol* insbesondere die Definition von Makrobefehlen zuläßt. Die Zahl der Parameter dieser Makrobefehle ist variabel, und die Makrobefehle können auch außerhalb des aufrufenden Programms definiert sein. Mit *Meta-Symbol* lassen sich alle in *Symbol* geschriebenen Programme assemblieren, jedoch nicht umgekehrt.

Neben dem bereits erwähnten Kompiler für *Real-Time-Fortran* steht dem Digitalrechner ein *Algol-60*-Kompiler und ein *Fortran-II*-Kompiler zur Verfügung, wobei letzterer bis auf die doppelt genaue und komplexe Arithmetik sowie die Booleschen Anweisungen viele Eigenschaften von *Fortran IV* besitzt. Mit allen Kompilern können Kodeprozeduren verarbeitet werden.

Zur Durchführung der hybriden Operationen stehen drei verschiedene Unterprogrammepakete zur Verfügung.

Für die Programmierung in *Symbol* wurden 25 POPs geschrieben. Diese POPs übernehmen die Steuerung des Analogrechners, die Anwahl der Rechenelemente, die Einstellung der Potentiometer, den Rechendatenaustausch und die Umrechnung zwischen der Zahlendarstellung des Analog- und Digitalrechners. Eingeschlossen in diese POPs ist eine sehr sorgfältige Fehlerdiagnostik.

In *Meta-Symbol* werden die Hybridoperationen durch spezielle Makrobefehle durchgeführt. Entsprechend den weitgespannten Möglichkeiten, die *Meta-Symbol* in dieser Hinsicht bietet, ist eine äußerst flexible Programmierung des Hybridsystems möglich.

Wie bereits erwähnt, läßt sich bei Problemen, für die die Rechengeschwindigkeit des Digitalrechners genügend groß ist, das Hybridsystem in *Real-Time-Fortran* programmieren. Auch in dieser Sprache steht dem Benutzer eine Kollektion von Unterprogrammen zur Verfügung, die den Verkehr mit dem Analogrechner regelt.

Von den zusätzlich vorhandenen Sonderprogrammen, deren Anzahl über 15 liegt, sind das hybride Testprogramm *Hytrol*, das Programm zum automatischen Prüfen von Anlogschaltungen *Statet*, das Testprogramm *Examiner*

für die Zentraleinheit, das Funktionstestprogramm *Hyttest* für das Koppelwerk HKW 900, Funktionstestprogramme für die Analogrechner-Steuerfunktion und die Servopotentiometer sowie Genauigkeitstestprogramme für die Umsetzer des HKW 900 in ihren verschiedenen Betriebsarten besonders zu erwähnen, weil ohne sie ein von zeitraubenden Störungen freier Hybridbetrieb kaum durchzuführen ist. So kehrt z. B. der Benutzer mit *Hytrol* in Dialogform über die Kontrollschreibmaschine. Auf diese Weise läßt sich nicht nur das gesamte hybride Rechner-system in allen Funktionen von der

Schreibmaschine steuern, sondern auch die zum Teil in der Hardware des HKW 900 bereits eingebauten Prüfmöglichkeiten werden für den Benutzer voll aktiviert, so daß ihm direkt Fehlerhinweise zugeschrieben werden.

Bei *Statetest* wird die auf dem Analogrechner gesteckte Schaltung dem Digitalrechner in einer besonderen Sprache auf Lochstreifen oder -karten verschlüsselt eingegeben. Das Programm prüft anschließend, ob die Beschreibung und die wirkliche Schaltung übereinstimmen und ob die analogen Rechenelemente der Schaltung funktionstüchtig sind, wobei durch automatische Verstellung

von Servopotentiometern der Versuch für günstige Korrekturen übernommen wird.

Schrifttum

- [1] R. Schwarz: Vom Analogrechner zum hybriden Präzisionsanalogrechner RA 770. Techn. Mitt. AEG-TELEFUNKEN (1968). 2. Beih. Datenverarb. S. 19-23.
- [2] G. Haußmann: Die Rechenleistung hybrider Rechnersysteme im Vergleich zum Digitalrechner. Vortrag auf dem DVL-Symposium „Hybridrechner in Luft- und Raumfahrt“ am 9. 10. 1967 in Meersburg.
- [3] P. Albrecht: Behandlung parameterabhängiger Probleme auf einem hybriden Analogrechner. Elektron. Rechenanlagen 10 (1968) 1, S. 26-33.