

INFORMATIKWERK

Der elektronische Rechenautomat ER 56

Von R. Basten und H.-J. Dreyer · Stuttgart



STANDARD ELEKTRIK LORENZ

Sonderdruck aus **SEL-Nachrichten 1959, Heft 4**
Herausgeber: Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart-Zuffenhausen, Hellmuth-Hirth-Straße 42

Der elektronische Rechenautomat ER 56*

Von R. Basten und H.-J. Dreyer · Stuttgart

DK 681.14-83

Charakteristisch für digitale Rechenautomaten ist das Vorhandensein einer Programmsteuerung, die nach Eingabe einer Arbeitsanweisung und der erforderlichen Anfangswerte die gesamte Rechnung selbsttätig abwickelt. Zuse verwendet hierfür in seiner Z 4 (1945) eine mehrfache Lochstreifensteuerung, die erstmals wiederholt aufrufbare Unterprogramme in Form von Lochstreifenschleifen benutzt. Im ENIAC, dem ersten schnellen elektronischen Rechenautomaten, wird das Programm durch Steckverbindungen zwischen Rechenelementen, Ziffernleitungen und Steuerleitungen und von Hand gesetzte Steuerungsschalter festgelegt [1]. Burks, Goldstine und von Neumann haben etwa zur gleichen Zeit in ihrer grundlegenden Arbeit über die logische Struktur von Rechenautomaten die Wahl eines einheitlichen Speichers für Zahlen und Befehle richtungweisend begründet [2]. Die Gleichstellung der beiden Informationsgruppen ermöglicht auf bequeme Art das Rechnen mit Befehlen, insbesondere mit den in ihnen vorkommenden Adressen. Damit können beispielsweise in Programmschleifen gleichbleibende Operationsvorschriften automatisch mit jeweils verschiedenen Operanden ausgeführt werden, etwa die Elemente einer Produktmatrix aus jeweils einer Zeile bzw. einer Spalte der Ausgangsmatrizen. Der Gedanke eines einheitlichen Speichers wurde erstmals in EDVAC [3] und EDSAC [4] verwirklicht.

In der weiteren Entwicklung der elektronischen Rechenautomaten läßt sich das Bestreben verfolgen, durch geeignete innere Organisation mehrere Vorgänge im Rechner gleichzeitig ablaufen zu lassen. Beispielsweise wird dazu beim Rechnen mit Befehlen ein Adressenrechenwerk mit Indexregistern und eigenem Addierwerk benutzt; bei der Eingabe und Ausgabe werden Pufferspeicher zwischengeschaltet, die während der eigentlichen Rechnung Information mit niedriger Geschwindigkeit von außen aufnehmen bzw. dorthin abgeben, sie jedoch mit hoher Geschwindigkeit in den Arbeitsspeicher weitergeben bzw. von dort übernehmen.

Pufferspeicher sind – technisch gesehen – meist vom gleichen Typ wie der Arbeitsspeicher, der das im Augenblick ablaufende Programm oder Programmstück und das zugehörige Zahlenmaterial enthält. Pufferspeicher sind aber auf Grund ihrer Einordnung in die Gesamtstruktur des betreffenden Rechenautomaten und der damit verbundenen besonderen Aufgaben nicht in derselben Weise für den eigentlichen Programmablauf nutzbar wie der Arbeitsspeicher selbst. Beim ER 56 wurde eine gute Nutzung aller Einheiten des Rechners durch eine Grundstruktur angestrebt, bei der kein Unterschied zwischen Arbeitsspeicher und Pufferspeicher besteht und die verschiedenartigen Operationen weitgehend gleichzeitig ablaufen können.

1. Grundstruktur des ER 56

Die gesamte Kapazität an Ferritkernspeichern des ER 56 ist im Arbeitsspeicher vereinigt. Dieser besteht aus einer frei wählbaren Anzahl getrennter Speichereinheiten gleicher oder ver-

schiedener Größe, die voneinander unabhängig sind und gleichzeitig arbeiten können. Diesen gleichberechtigten Ferritkern-Teilspeichern des Arbeitsspeichers stehen alle übrigen „Werke“ des ER 56 gegenüber: Kommandowerk, Rechenwerk, alle Ergänzungsspeicher und Eingabe- und Ausgabegeräte. Der Informationsfluß zwischen Teilspeichern und Werken wird – wie aus dem Strukturdiagramm des ER 56 (BILD 1) ersichtlich – vom elektronischen Koordinatenschalter vermittelt. Jedes Werk kann mit jedem Teilspeicher in Verbindung treten, und mehrere solcher Verbindungen können ohne gegenseitige

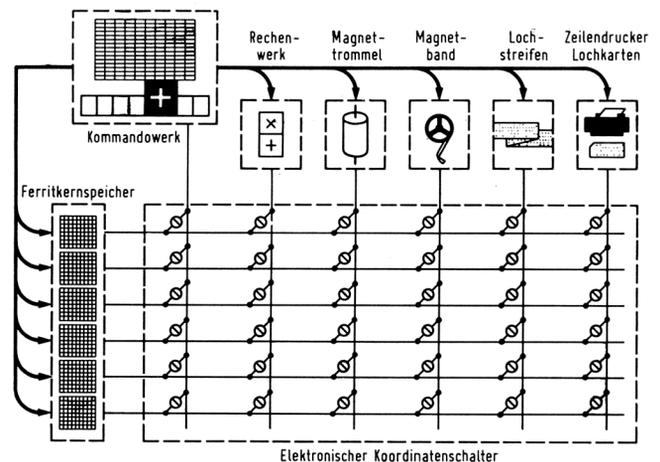


Bild 1 Strukturdiagramm des ER 56

Störung gleichzeitig bestehen. Die zentrale Steuerung im Kommandowerk stellt die elektronischen Durchschaltungen in den Kreuzungspunkten nach dem jeweiligen Rechenprogramm her und sorgt für reibungslosen Ablauf und die Einhaltung der Reihenfolge der Programmschritte.

Diese Struktur des Gesamtsystems läßt die einzelnen Ferritkern-Teilspeicher in wechselnder Folge als Arbeitsspeicher oder als Pufferspeicher wirksam werden. Sie ist auch die Grundlage für den gleichzeitigen Ablauf von Operationen wie Rechnen, blockweises Übertragen von und zu den verschiedenen Ergänzungsspeichern, Lesen, Stanzen, Drucken usw.

Die damit erreichte gute Ausnutzung des gesamten Ferritkernspeichers und die Zeiteinsparungen durch den mehrgleisigen Operationsablauf tragen zur hohen Wirtschaftlichkeit des ER 56 bei. Die Grundstruktur des ER 56 bietet darüber hinaus die Möglichkeit, sowohl die Ferritkern-Teilspeicher des Arbeitsspeichers als auch die Art und Anzahl der Ergänzungsspeicher (Magnettrommeln, Magnetbänder usw.) sowie Eingabe- und Ausgabegeräte (Lochstreifen-, Lochkarten-, Analoggeräte, Drucker usw.) ganz nach Wunsch auszuwählen. Die Möglichkeit, beliebige Zusammenstellungen solcher Einheiten

*) Erweiterter Nachdruck aus „Elektronische Rechenanlagen“, 1 (1959), H. 2, S. 60...67.

an den elektronischen Koordinatenschalter anzuschließen, gestattet dem Benutzer, die Rechenanlage seinen Problemen oder betrieblichen Gegebenheiten entsprechend auszurüsten und sie später an geänderte Anforderungen anzupassen.

2. Zentrale Steuerung der Anlage

Das Kommandowerk steuert die Zusammenarbeit der verschiedenen Einheiten der ER 56-Anlage und die richtige Reihenfolge der Befehle bei der Programmausführung. Die Steuerung der Operationsabläufe im einzelnen ist nicht Aufgabe des Kommandowerkes, sondern wird dezentral von den betreffenden Werken vorgenommen. Für die Abwicklung des reibungslosen, mehrgleisigen Operationsablaufes gibt es bei jedem Werk einen „Werkmerker“ und eine Gruppe von „Teilspeichermerkern“. Das sind Flipflops, deren Stellung angibt, ob dieses Werk noch mit der Ausführung einer Operation beschäftigt ist, und mit welchem Teilspeicher es gegebenenfalls noch in Verbindung steht. Die Teilspeichermerker nehmen auch die elektronische Durchschaltung der einzelnen Kreuzungspunkte des elektronischen Koordinatenschalters vor.

Beim Ablauf eines Programms ruft das Kommandowerk einen Befehl nach dem anderen aus dem Arbeitsspeicher ab, führt gegebenenfalls eine Adressenumrechnung aus und prüft an Hand der Stellung der genannten Merker, ob das Werk und der Teilspeicher, die in diesem Befehl angesprochen werden, frei sind. Wenn beide Freimeldungen vorliegen, wird erstens die Operationsangabe des Befehls zu diesem Werk übertragen und dessen Werkmerker gesetzt, womit die Ablaufsteuerung für die Operation angestoßen ist. Zweitens wird in der Gruppe der Teilspeichermerker dieses Werkes der dem angesprochenen Teilspeicher zugeordnete Merker gesetzt. Dadurch ist auch der Teilspeicher „belegt“ und der das Werk und den Teilspeicher verbindende Kreuzungspunkt des elektronischen Koordinatenschalters durchgeschaltet. Drittens wird noch die Adressenangabe des Befehls zum angesprochenen Teilspeicher übertragen und dort die Speicherzelle gewählt. Damit hat das Kommandowerk alles für die Ausführung dieses Befehls vorbereitet. Das Werk steuert den weiteren Ablauf des betrachteten Befehls und liefert den Arbeitstakt für den mit ihm verbundenen Ferritkern-Teilspeicher. Sobald die in diesem Ablauf enthaltene Informationsübertragung zwischen Teilspeicher und Werk beendet ist, löscht die Ablaufsteuerung den Teilspeichermerker, so daß der Teilspeicher schon für weitere Befehlsabläufe zur Verfügung steht, auch wenn das Werk noch durch die Verarbeitung der Information belegt ist. Dadurch überlappen sich Befehlsausführung und Befehlsaufruf in den meisten Fällen auch dann, wenn Befehle und Operanden im gleichen Teilspeicher stehen, was bei Unterprogrammen häufig vorkommt.

Während der Ausführung des betrachteten Befehls ruft das Kommandowerk den nächsten Befehl – Freimeldung des ihn enthaltenden Teilspeichers vorausgesetzt – aus dem Arbeitsspeicher und veranlaßt seine Ausführung, wenn er ein freies Werk und einen freien Teilspeicher beansprucht. Andernfalls bleibt das Kommandowerk in Wartestellung, bis die Freimeldung vollständig ist.

Auf diese Weise wird erreicht, daß die verschiedenen Eingabe- und Ausgabeoperationen sowie Blockübertragungen zwischen den Ferritkern-Teilspeichern des Arbeitsspeichers und den Ergänzungsspeichern gleichzeitig und neben der eigentlichen Rechnung ablaufen.

Der elektronische Koordinatenschalter stellt die Verbindung zwischen den Werken und den Ferritkern-Teilspeichern in beiden Richtungen her. Man kann ihn sich in zwei Ebenen

ausgeführt denken, eine Ebene für Übertragungen von Werken zu Teilspeichern, die andere für Übertragungen von Teilspeichern zu Werken. Wenn ein Werk ausschließlich Eingabefunktion oder Ausgabefunktion hat, wird die betreffende Spalte des elektronischen Koordinatenschalters nur zur Hälfte ausgenutzt. Aus diesem Grunde können Spalten „gesplittet“ ausgeführt werden. Sie sind dann mit getrennten Werkkernen und Gruppen von Teilspeichermerkern für die Eingaberichtung und die Ausgaberrichtung ausgerüstet. Eine gesplittete Spalte dient also zum Anschluß eines Eingabegerätes und eines Ausgabegerätes nebeneinander, wobei die beiden Geräte unabhängig voneinander mit verschiedenen Teilspeichern zusammenarbeiten können.

3. Verschlüsselung der Dezimalziffern

Für die Null-Eins-Verschlüsselung der Dezimalziffern wurde der (2 aus 5)-Code gewählt. Dem höheren Aufwand bei der Speicherung steht gegenüber, daß jeder einzelne, möglicherweise auftretende Fehler durch eine formale Code-Prüfung mit Sicherheit erkannt werden kann. Innerhalb der Schaltungen für die Ausführung der arithmetischen Operationen wird der (1 aus 10)-Code benutzt; der in einem späteren Abschnitt beschriebene Aufbau der Rechenschaltungen führt darüber hinaus zu einer Prüfung der arithmetisch richtigen Ausführung der Grundrechenarten.

4. Befehlsliste

Die Befehlsliste des ER 56 berücksichtigt das bequeme Programmieren von Routinearbeiten, enthält andererseits aber auch viele spezielle Operationen, die beim Aufbau komplizierter Programme und knapper, leistungsfähiger Bibliotheksprogramme nützlich sind. Besonders berücksichtigt wurden Operationen zur inneren Programmorganisation.

Das Kommandowerk enthält ein Adressenrechenwerk mit zehn Indexregistern und einer eigenen Addier/Subtrahier-Einheit. Neun Indexregister stehen für automatische Adressenumrechnung der Befehle jeweils vor ihrer Ausführung zur Verfügung. Das neunte Indexregister ist identisch mit dem Befehlsfolgezähler, wodurch das direkte Programmieren mit relativen Adressen sehr einfach wird. Das zehnte Register ist das spezielle Rücksprungregister, das bei Sprüngen automatisch den alten Stand des Befehlsfolgezählers übernimmt und durch besondere Befehle zugänglich ist. Zwanzig Befehle dienen dem direkten Arbeiten mit den Indexregistern, unter anderem für Vergleiche, deren Ergebnisse für bedingte Sprünge zur Verfügung stehen.

Die Rechenbefehle selbst sind sehr vielseitig. Arithmetik in festem Komma ist für 13 Dezimalen und Vorzeichen, aber auch für 6 Dezimalen und Vorzeichen, gerundet und ungerundet vorhanden; auch Arithmetik in gleitendem Komma für 11 Dezimalen und Vorzeichen bei einem Exponentenbereich ± 49 ist eingebaut. In beiden Fällen gibt es auch die notwendigen Befehle für das Rechnen mit mehrfacher Zahlenslänge. Bei gleitendem Komma ist auch die „echte“ Null darstellbar; erwähnenswert sind noch spezielle Befehle zur getrennten Verarbeitung der Exponenten. Die Vergleichsbefehle im Rechenwerk zum Vergleich zweier Zahlen oder ihrer Beträge ohne Veränderung des Akkumulators und des Speichers stellen das Vergleichsergebnis für bedingte Sprünge bereit.

Das Arbeiten mit logischen Entscheidungen wurde besonders ausgebaut. Neben den üblichen bedingten Sprungbefehlen in Abhängigkeit von den Vergleichsergebnissen gibt es bei-

spielsweise neun weitere Sprungbefehle in Abhängigkeit von der Lage von neun „Merk-Flipflops“. Sie lassen sich unbedingt setzen und löschen, aber auch in Abhängigkeit von vielerlei Bedingungen, und werden durch Abfragen nicht geändert. Das „Q-Zeichen“ zum Markieren von Zahlen und das Verzweigen in Abhängigkeit hiervon ist ein weiteres, sehr leistungsfähiges Hilfsmittel zur übersichtlichen Organisation stark vermaschter Programme.

Der gleichzeitige Ablauf mehrerer Operationen ist besonders für die Ein- und Ausgabe von Nutzen. Während des Programmablaufs können erst in späteren Programmteilen benötigte Daten noch einlaufen, und gleichzeitig können die ersten Ergebnisse bereits ausgedruckt werden. Vollen Nutzen kann man aus dieser Gleichzeitigkeit erst dann ziehen, wenn die Ein- und Ausgabeoperationen die Möglichkeit bieten, mit einem Befehl eine variable Anzahl von Wörtern zu übertragen. Andernfalls könnte es beispielsweise nötig werden, die in einem kurzen Programmabschnitt anfallenden Ergebnisse mit mehreren Befehlen auszugeben. Wenn man dabei ein Warten des Kommandowerks vermeiden will, muß man den weiteren Programmablauf zeitlich recht genau abschätzen, um die Ausgabebefehle in geeignetem Abstand einzustreuen. Das würde eine erhebliche Mehrarbeit und Belastung beim Programmieren bedeuten. Aus diesem Grund sind alle Ein- und Ausgabeoperationen auf das Verarbeiten variabler Blocklängen abgestellt. Außerdem wurde möglichst viel Organisationssteuerung zu den Ein- und Ausgabevorrichtungen verlegt, z. B. für die Anordnung des Druckprotokolls oder der Lochkartenfelder.

Bei den Lochstreifengeräten sind die Formateinrichtungen völlig abgetrennt in den Druckertisch verlegt. Um die (2 aus 5)-Codeprüfung bis zum Ein- und Ausgabemedium auszuweiten, sind die Rechner-Lochstreifen in diesem Code gelocht und werden während des Einlesens der Codeprüfung sowie während des Stanzens über Rückmeldekontakte von den Stanznadeln her voll geprüft. Die Formatangaben werden während des Druckvorgangs in der Fernschreibmaschine durch einen besonderen Formatstreifen zugesetzt, der das Schreiben von Ziffern, Vorzeichen, Buchstaben, Seiten- und Tabellenüberschriften, das Einfügen von Zahlenfugen, Kommata und Nullen sowie das Wegblenden unerwünschter Ziffern in sehr flexibler Form bewirkt. Das gleiche Gerät übernimmt das Herstellen der (2 aus 5)-Lochstreifen oder das Wandeln der an beliebigen Fernschreibmaschinen hergestellten Lochstreifen.

Bei den direkt an den Koordinatenschalter anschließbaren Schnelldruckern sind durch Steckfelder und durch direkte, mit der zu druckenden Information gelieferte Formatangaben beliebige, formulargerechte Niederschriften mit zwischengeschaltetem, fortlaufendem Text möglich. In ähnlicher Form werden bei Lochkarten die verschiedenen Kartenfeldeinteilungen an die einheitliche Wortgliederung des Rechners angepaßt, ohne daß man das Kartenfeld von vornherein oder mit Hilfe von Ein- und Ausgabe-Programmen nach dem Rechner einrichten müßte.

5. Aufbau und Schaltkreistechnik

Die ausschließliche Verwendung von Transistoren statt Röhren, insbesondere als verstärkende Bauelemente, bringt beträchtliche Vereinfachungen im technischen Aufbau eines Rechners. Das Gerät wird erheblich kleiner, die aufgenommene und im Aufstellungsraum in Wärme umgesetzte Leistung ist geringer. Transistoren haben eine ähnlich große Lebensdauer wie alle anderen elektrischen Bauelemente (Halb-

leiterdioden, Kondensatoren, Widerstände) und werden deshalb wie diese fest in die Schaltkreise eingelötet. Zum Beurteilen der Zuverlässigkeit einer Anlage nehmen die verstärkenden Elemente keine kennzeichnende Sonderstellung mehr ein; vielmehr ist die Betriebssicherheit aller Bauteile so weit gestiegen, daß auch die in viel größerer Zahl vorhandenen Lötverbindungen und die Steckkontakte berücksichtigt werden müssen. Damit wird es zweckmäßig, die in den seltenen Störungsfällen auszuwechselnden steckbaren Baueinheiten relativ groß zu machen.

Im Hinblick auf größtmögliche Betriebssicherheit und auf einfache, schnelle Wartung sind die Schaltkreise des ER 56 mit wenigen, unvermeidlichen Ausnahmen mit Gleichstromkoppung [5] ausgeführt. Jeder der aufeinanderfolgenden Schaltzustände ist also während einer gewissen technisch bedingten Mindestdauer quasistationär; er kann zu Prüfzwecken beliebig verlängert werden. Grundsätzlich geht jede logische oder arithmetische Informationsverarbeitung nach dem Schema BILD 2 vor sich. Ein Grundtaktgenerator GT liefert in ständigem Wechsel (Zweischrittspiel) Halbtaktssignale s und t , im allgemeinen von zusammen $10 \mu s$ Dauer. Im Halbtakt t werden mit von der Ablaufsteuerung AS_t betätigten

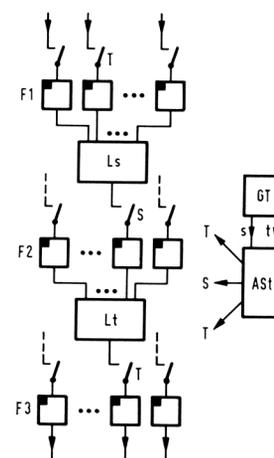


Bild 2 Informationsverarbeitung im Zweischrittspiel

- F1...F3 Speicherelemente
- Ls, Lt Logische Verknüpfungsnetze
- S, T Mit Halbkontakten s , t betätigte elektronische Schalter
- AS_t Ablaufsteuerung
- GT Grundtaktgenerator

elektronischen Schaltern T Informationen auf die binären Speicherelemente (Flipflops) F1 übertragen und im (meist relativ einfachen) logischen Schaltkreis Ls verknüpft. Im Halbtakt s werden die gewonnenen (01)-Werte mit den Schaltern S auf F2 übertragen und in dem umfangreicheren logischen Schaltkreis Lt verknüpft und so fort. Als Speicher F2, F3 können ganz oder teilweise auch die Speicher F1 dienen und umgekehrt, aber jedes Speicherelement darf in einem Halbtakt entweder nur senden oder nur empfangen. So sind F1 und F2 beim Schieberegister Elemente des gleichen Speichers, zwischen denen die Verkopplungskreise Ls im s -Halbtakt (Schiebetakt) die gespeicherte Information um eine Stelle nach rechts oder nach links schieben. Ähnlich geschieht das Fortschalten von Ringzählern meist im s -Halbtakt. Dagegen werden die wesentlichen arithmetischen und ähnlichen Verknüpfungen im Halbtakt t (Informationstakt) vorgenommen.

Solche in zweckmäßige Teilaufgaben abgegrenzten Schaltkreise zum logischen Verknüpfen, zum Speichern und auch zum Verstärken von Ziffern- oder Steuersignalen sind auf Steckeinheiten gleicher Größe aufgebaut. Vielfach vorkom-

mende Steckeinheiten wie Zähler, Schieberegister, Schalter, Schreib- und Leseverstärker bei Speichern sind einheitlich ausgeführt. Wo irgend möglich, sind die Schaltkreise aus vorgefertigten Baugruppen zusammengesetzt, z. B. solche für Und-Schaltkreise und Oder-Schaltkreise mit Germaniumdioden, für Flipflops, für Emitter- und für Kollektorverstärker. Diese Baugruppen sind in den Steckeinheiten räumlich nach

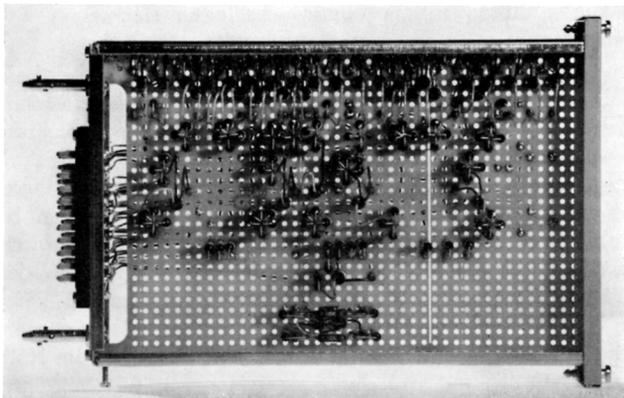


Bild 3 Steckeinheit zur logischen Verknüpfung mehrerer Signale

ihrem logischen Zusammenwirken angeordnet, so daß das Wartungspersonal jede Baugruppe durch Vergleich mit dem gleichartig gezeichneten Wirkschaltplan auf einen Blick finden kann. BILD 3 und BILD 4 zeigen diese gleichartige Anordnung für eine logische Verknüpfung, die einen Flipflop in der Multiplikatorregister-Steuerung schaltet.

Zum Speichern von Zifferninformationen dienen vielfach Schieberegister aus Flipflops, die sowohl serienmäßig als auch parallel eingespeist und ausgelesen werden können. Eine Steckeinheit enthält die Schiebestrecke für einen der fünf Binärkanäle und 7 bit Länge; zu einem Register für ein siebenstelliges Wort gehören also fünf Steckeinheiten.

Grundelemente aller Ablaufsteuerungen sind zehnstufige, ebenfalls aus Flipflops aufgebaute Ringzähler. Sie können durch Taktimpulse fortgeschaltet, aber auch auf jede der zehn Stellungen fremd gesetzt werden. Jeder der zehn Ausgänge, von denen jeweils einer markiert ist, sowie die zehn

komplementären Ausgänge, von denen jeweils neun markiert sind, stehen gleichzeitig für Steuerzwecke zur Verfügung. Durch systematisches Fremdsetzen kann die Ringlänge des Zählprozesses verringert werden, auch in wechselndem Rhythmus, so daß sehr flexible Steuerungen entstehen. Jede Kombination von Zählerstellungen kennzeichnet eindeutig einen Schritt bei den gesteuerten Funktionsabläufen (Mikroprogrammen). Die Kombination wird durch logische Verknüpfung der Zählerausgänge abgefühlt und zum Beeinflussen der Informationsverknüpfung und zum Betätigen der erforderlichen Schalter benutzt.

Jedes Werk enthält eine Ablaufsteuerung, deren Grundtakt von einem eigenen Grundtaktgenerator stammt oder bei Werken mit mechanischer Bewegung (z. B. Lochstreifenleser, Magnetspeichertrommel) auch vom bewegten Medium abgenommen wird.

Die Werke laufen also völlig asynchron zueinander, alle Übertragungen benutzen den Kernspeicher als Zwischenträger. Er erhält seinen Takt immer über den Koordinatenschalter hinweg von demjenigen Werk, mit dem er gerade verbunden ist. Dadurch können sehr verschiedenartige Geräte an den Rechner angeschlossen werden, wenn sie nur die einfachen Anschlußbedingungen für Information und Takt an dem Koordinatenschalter erfüllen. Nur Kommandowerk und Rechenwerk haben einen gemeinsamen Taktgenerator. Seine Taktfrequenz liegt gewöhnlich bei 100 kHz; sie kann durch Stufenschalter für Wartungszwecke um $\pm 20\%$ verändert werden. Ferner kann man auch Frequenzen bei 10 kHz, 50 Hz und 2 Hz einstellen oder den Takt beliebig langsam mit einer Handtaste weiterschalten. Dieses langsame, durch die Gleichstromkopplung mögliche Arbeiten kann man außer zur Störungssuche auch für anschauliche Demonstrationen technischer Einzelfunktionen und besonders interessanter Programmteile benutzen.

Im räumlichen Aufbau bleiben die mit Transistoren ausgeführten Steckeinheiten trotz vieler Baugruppen gedrängt und klein ($43 \times 170 \times 235$ mm). Neun Zeilen mit je zwölf solcher Steckeinheiten sind in einem Gestell untergebracht, zwei Gestelle bilden einen Schrank ($147 \times 223 \times 43$ cm), drei bis sechs Schränke, bei sehr großem Umfang auch mehr, gehören zu einem Rechner. Nur Geräte, die eine Handhabung erfor-

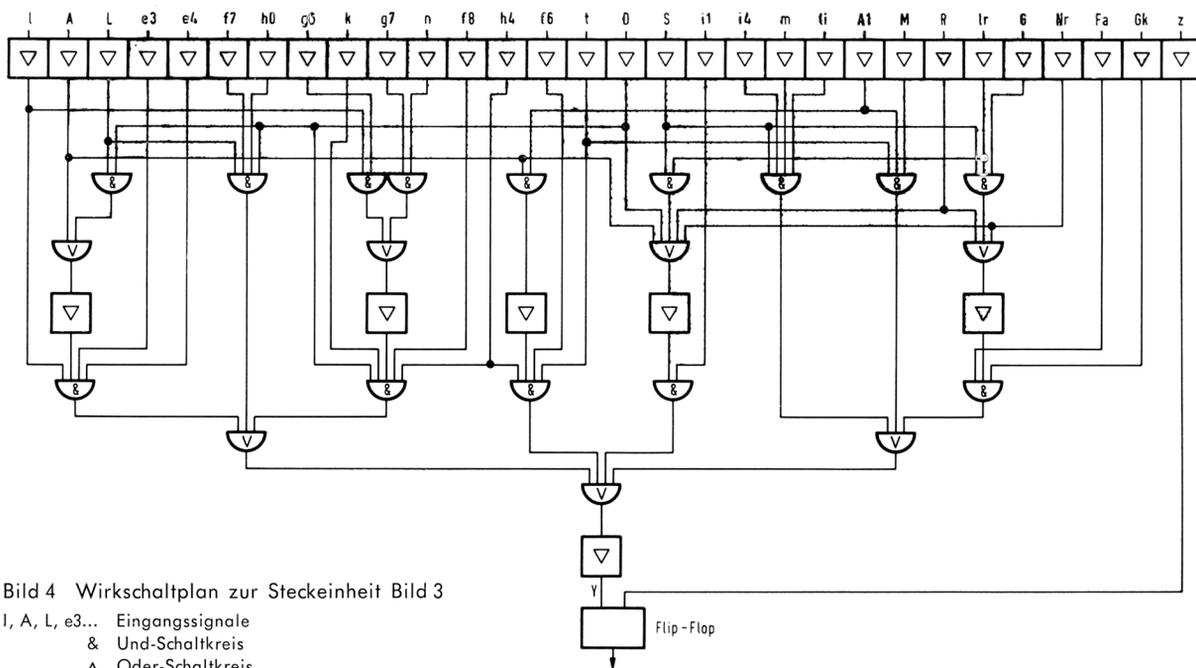
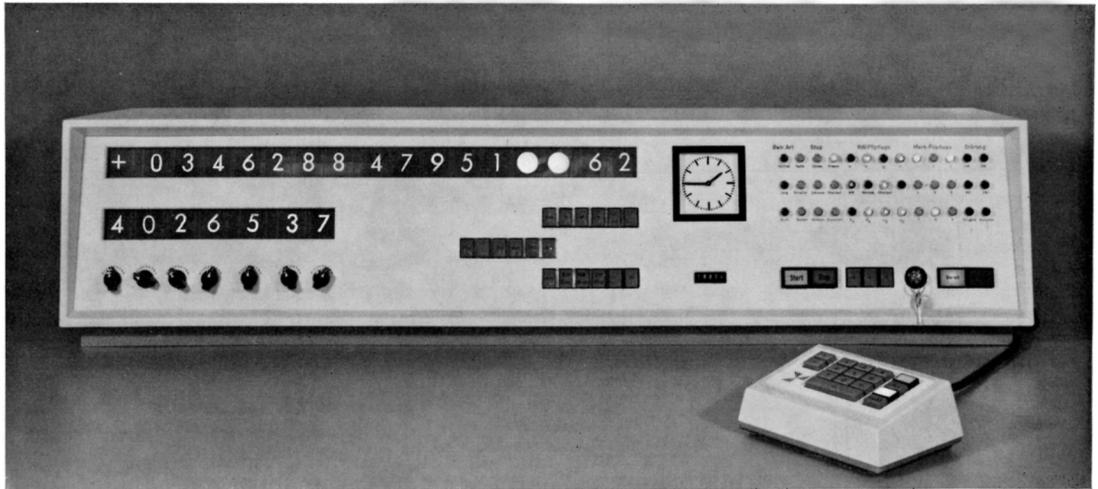


Bild 4 Wirkschaltplan zur Steckeinheit Bild 3

- l, A, L, e3... Eingangssignale
- & Und-Schaltkreis
- ^ Oder-Schaltkreis

Bild 5 Bedienungsfeld



den, wie Bedienungsfeld (BILD 5), Eingabe und Ausgabe, stehen auf getrennten, beweglichen Tischen, um sie nach den örtlichen Bedingungen anordnen zu können. Außer der Stromzuführung sind alle elektrischen Verbindungen zwischen den Gestellen und mit den selbständigen Geräten steckbar.

6. Befehlsaufruf im Kommandowerk

Um einen einfachen Befehl aus dem Teilspeicher abzurufen und in umgerechneter Form bereitzustellen, treten die in BILD 6 dargestellten Hauptteile des Kommandowerkes in Tätigkeit. Die zehn Indexregister sind zusammen als kleiner Ferritringkernspeicher ausgeführt, die übrigen Teile sind elektronische Schaltkreise der vorbesprochenen Art.

Die vom Grundtaktgenerator GT fortgeschaltete Ablaufsteuerung AST sorgt nacheinander für folgende Vorgänge:

1. (Takt 1): Auslesen des Befehlsfolgezählerstandes BFZ aus Indexregister 19 nach Hilfsregister HR und Adressenregister AR.
2. (Takt 2): Freiprüfen des durch BFZ angegebenen Teilspeichers. Solange die Freimeldung nicht erfolgt, bleibt die Ablaufsteuerung in diesem Takt stehen.
3. (Takte 2...5): Erhöhen von BFZ um 1 im Addierwerk und Zurückspeichern über HR nach I 9.
4. (Takte 3...14): Auslesen des nächsten Befehls aus der im BFZ angegebenen Teilspeicherzelle.
5. (Takte 9...12): Erhöhen der Adresse im Befehl um die im bezeichneten Indexregister enthaltene Zahl (bei Indexteil 0 um 0).
6. (Takt 13): Freiprüfen des vom Operationsteil bezeichneten Werkes und des vom umgerechneten Adressenteil bezeichneten Teilspeichers. Weiterschalten nur, wenn beide Freimeldungen vorhanden sind.
7. (Takt 15): Übertragen des Adressenteils zum Teilspeicher und des Operationsteils zum Werk, damit Anstoß der Ablaufsteuerung des Werkes.

Mit dem Anstoß des Werkes wird der zugehörige Teilspeichermerker markiert, der im Koordinatenschalter die Verbindung mit dem laut Befehl zuzuordnenden Teilspeicher durchschaltet. Die Ablaufsteuerung im Kommandowerk geht sofort nach Takt 1 der beschriebenen Folge weiter und stellt den nächsten Befehl bereit.

Außer den in BILD 6 angegebenen Informations- und Steuerkanälen sind weitere Verbindungsmöglichkeiten innerhalb des Kommandowerkes sowie zum Rechenwerk und zum Bedienungsfeld vorhanden. Die vielfältigen organisatorischen

Befehle für Adressenumrechnung und Programmsprünge beruhen auf den Möglichkeiten zum Umspeichern zwischen den Indexregistern untereinander und mit anderen Speichern. Dazu laufen vielfach zwei der beschriebenen Taktumläufe mit mehreren Umspeicherungen nacheinander ab. Auch für einige Anzeigevorgänge am Bedienungsfeld und für von dort aus eingeschobene Fremdbefehle werden unvollständige Befehlsabläufe gesteuert, wobei das Weiterrechnen der Befehlszählung natürlich unterbleibt.

7. Rechenwerk

BILD 7 zeigt die wichtigsten Teile des Rechenwerkes in stark vereinfachter Darstellung. Siebenstellige Zahlen laufen in üblicher Weise mit der niedrigsten Ziffer zuerst ein. Bei 14-stelligen, aus zwei Wörtern zusammengesetzten Zahlen kommt entsprechend steigender Zellennummer im Kernspeicher zuerst die höherwertige Zahlenhälfte mit dem Vorzeichen, dann die niedere Zahlenhälfte, die bei Gleitkommaarstellung den

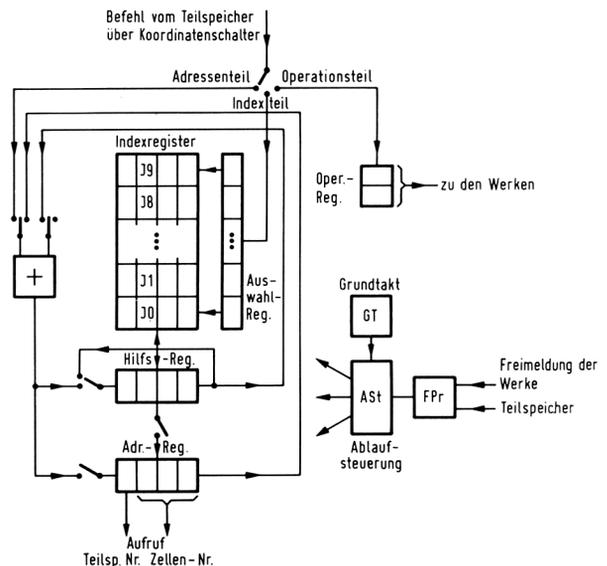


Bild 6 Vereinfachter Wirkschaltplan des Kommandowerkes

Exponenten mitführt. Vorzeichen, Ziffernwert, bei Gleitkomma Zahlenfaktor und Zehnerexponent werden von der Ablaufsteuerung in die entsprechenden Teile des Rechenwerkes geleitet und dort in Registern abgesetzt. Entsprechend werden beim Abspeichern die Zahlenteile des Rechenergebnisses aus den Registern zusammengefügt und zum Kernspeicher geleitet.

Im Hauptteil des Rechenwerkes für arithmetische Grundverarbeitung (Grundrechner) nimmt meist das 14stellige Operandenregister N die einlaufende Zahl (bei Gleitkomma den Zahlenfaktor) auf, z. B. den Multiplikanden oder den Divisor, und stellt sie durch zyklisches Schieben während des Rechen-

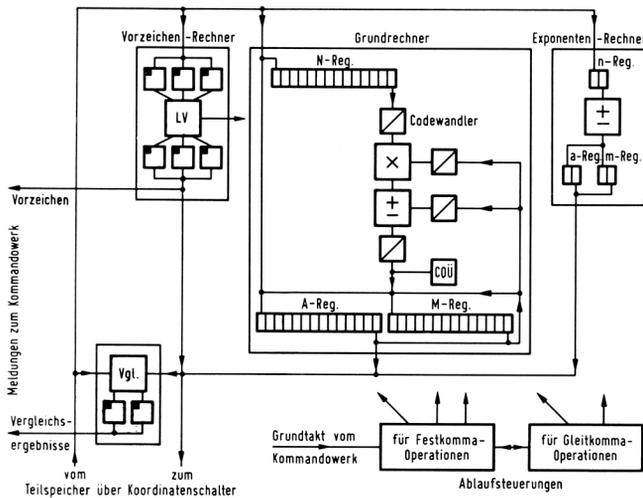


Bild 7 Hauptteile des Rechenwerks

ablaufes mehrmals bereit. Im 14stelligen Akkumulatorregister A steht schließlich das Rechenergebnis (Summe, Produkt, Quotient). Bei längeren Ergebnissen, z. B. beim 26stelligen Produkt zweier 13stelliger Faktoren, wird A durch das 14stellige M-Register verlängert, das zu Beginn der Multiplikation den Multiplikator enthält.

Für jede von 0 verschiedene Multiplikatorziffer wird der Multiplikand in N einmal im Ring geschoben, und das der Multiplikatorziffer entsprechende Vielfache wird zum bisherigen Akkumulatorinhalt addiert. Multiplikatorziffern 0 (außer an höchster und niedrigster Stelle) bewirken nur einen einstelligen Schiebevorgang (Nullensprung). Um die daraus zu gewinnende Zeitersparnis wirksamer zu machen, dient als Multiplikator die vom Kernspeicher geholtte Zahl, als Multiplikand der bisherige Akkumulatorinhalt.

Während alle Ziffernregister (A, M, N) für den (2 aus 5)-Code eingerichtet sind, erfolgt die arithmetische Verknüpfung wegen der besseren Übersichtlichkeit und Prüfbarkeit in (1 aus 10)-Darstellung. Beispielsweise werden der Addier-Steckeinheit 2×10 Leitungen für die beiden Addenden zugeführt, von denen je eine entsprechend der gerade zu verarbeitenden Ziffer 0...9 markiert ist.

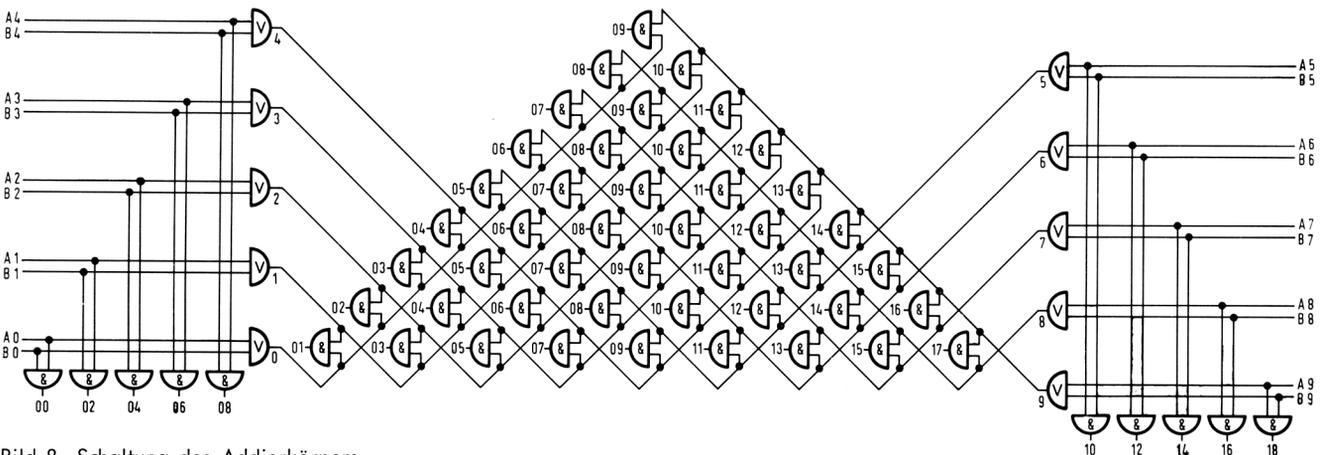


Bild 8 Schaltung des Addierkörpers

In einem verdrahteten Addier-„Körper“ (Bild 8) ist jede Leitung des einen Addenden mit jeder Leitung des anderen Addenden durch einen Und-Schaltkreis verbunden, von denen jeweils einer für ein bestimmtes Ziffernpar (z. B. $5 + 7$) markiert ist. Dieser Und-Schaltkreis markiert dann durch entsprechende Verdrahtung eine der 2 Zehnerausgangsleitungen (im Beispiel die 1) und eine der 10 Einerausgangsleitungen (z. B. 2). Die Und-Schaltkreise bilden eine Verknüpfung nach Art einer Dreiecksmatrix, die in der Steckeinheit (Bild 9) auch räumlich zu erkennen ist. Der Multiplizier-„Körper“ ist ganz entsprechend aufgebaut, nur sind die Und-Schaltkreise zu den dem Multiplikationsgesetz entsprechenden 9 Zehner- und 10 Einerausgängen verbunden (im Beispiel 5×7 mit Zehner 3 und Einer 5). Diese Anordnung vollständiger (1 aus 10)-Rechenkörper gestattet eine zuverlässige Prüfung des Ergebnisses jedes einzelnen Rechenschrittes bereits beim Entstehen: Sollte infolge einer Störung eine Eingangs- oder Ausgangsmarkierung fehlen oder mehrfach erscheinen, so wird die nachfolgende Codewandlung weniger oder mehr als 2 aus 5

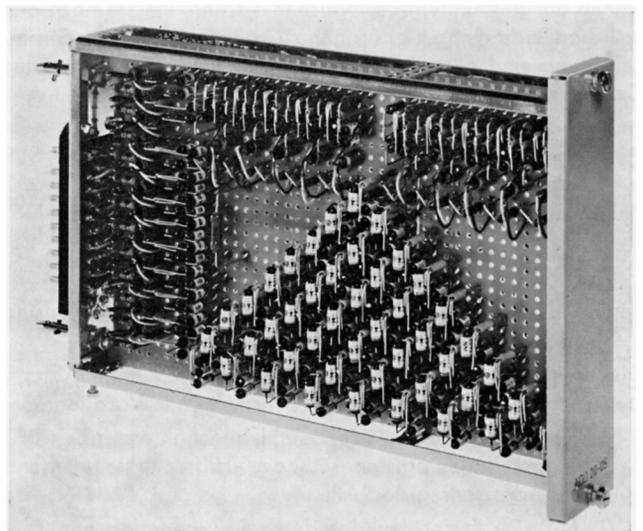


Bild 9 Aufbau eines Addierkörpers

Markierungen bringen. Die Codeüberwachung COU (Bild 7) wird diesen Rechenfehler sofort melden und den Rechenprozeß noch im gleichen Schritt unterbrechen.

Der Vorzeichenrechner speichert die Vorzeichen der Registerinhalte und der einlaufenden Zahl in Flipflops und verknüpft sie unter Berücksichtigung des gerade ausgeführten Befehls (z. B. Subtraktion) zum Ergebnissvorzeichen. Überdies speichert und verarbeitet er die in der Vorzeichenstelle der Zahlen

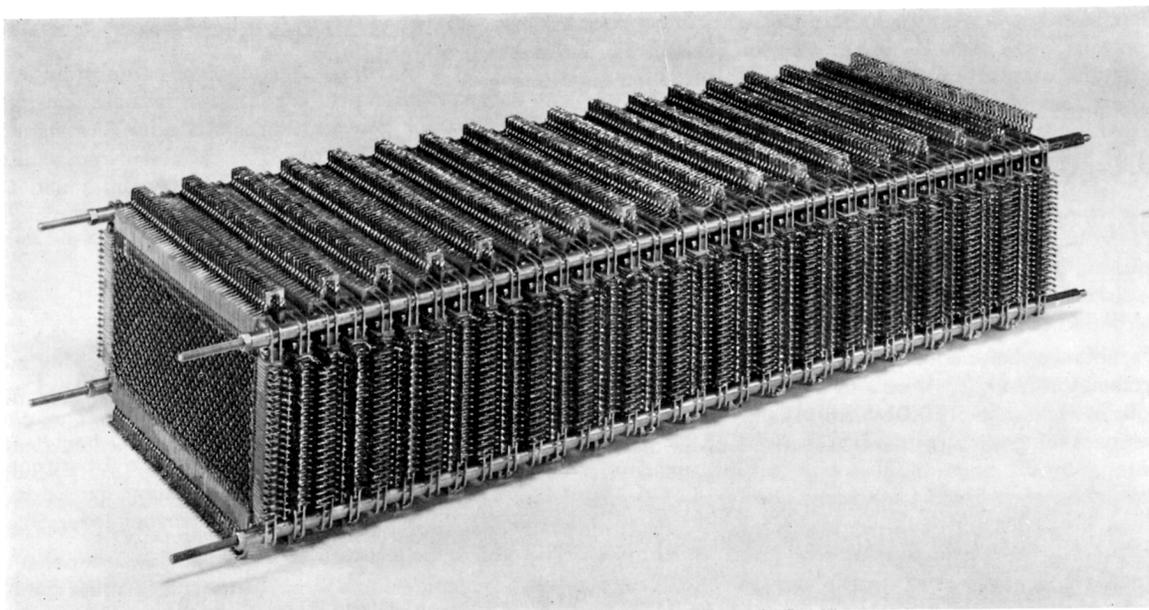


Bild 11 Speicherblock aus 35 Speicherebenen nach Bild 10 vor dem Einbau

enthaltenen Kennzeichen Q (Markierung einer Zahl), ω Ende eines Übertragungsblocks), α (paarweise Ziffernverarbeitung zum Darstellen von Buchstaben). Schließlich stellt er fest, ob ein im Akkumulator entstandenes Ergebnis Komplementform hat, und verursacht den dann erforderlichen Komplementierumlauf im A-Register, mit dem die einheitliche Darstellungsform der Zahlen mit Betrag und Vorzeichen wiederhergestellt wird. Das ist im Durchschnitt nur bei $\frac{1}{4}$ aller additiven Ope-

sich deshalb Exponenten- und Zahlenfaktorverarbeitung zeitlich mehrfach ineinander. Technisch ist das durch gegenseitiges Anstoßen mehrerer Steuerzähler erreicht.

Der Vergleich wird sowohl mit den Ergebnisregistern A und a (Bild 7) des Rechenwerkes als auch mit dem Kommandowerk zusammen gebraucht. Insbesondere dient er zum Vergleich des Akkumulatorinhaltes mit dem Inhalt von Kernspeicherzellen, ohne den Akkumulatorinhalt zu zerstören, also ohne Subtraktion. Die Zahlen werden von der niedrigsten Stelle beginnend ziffernweise verglichen, wobei das jeweilige Ergebnis das Ergebnis der vorlaufenden Ziffer korrigiert und ständig zwei Flipflops steuert, einen für die Angabe $=/\neq$, einen für $\geq/<$.

Die Vergleichsergebnisse dienen als Sprungbedingungen, sie werden am Bedienungsfeld angezeigt.

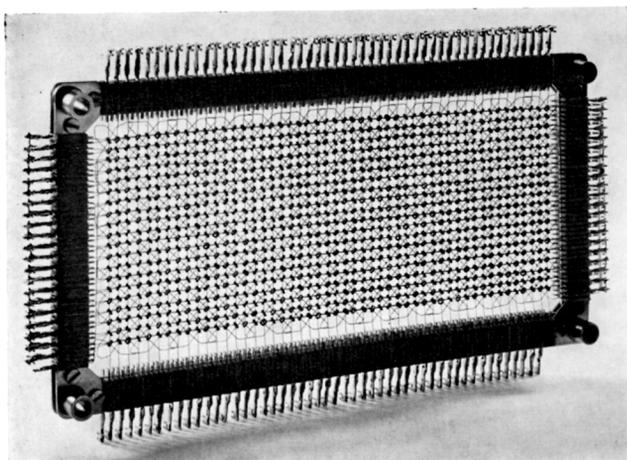


Bild 10 Speicherebene mit 1000 Ringkernen

rationen (einschließlich Subtraktion) nötig, weil der Akkumulatorinhalt bereits vom vorhergehenden Prozeß her Betragsform haben muß. Die angegebenen Rechenzeiten enthalten einen entsprechenden Zuschlag. Die Ergebnisvorzeichen werden auch als Sprungbedingungen zum Kommandowerk gemeldet.

Der Exponentenrechner für Gleitkommaverarbeitung übernimmt neben der rechnerischen Zusammenfassung der Exponenten in Charakteristikform auch das Beeinflussen der Zahlenfaktorverarbeitung im Grundrechner. Im besonderen muß bei additiven Operationen zuerst dafür gesorgt werden, beiden Summanden durch entsprechendes Schieben im A- oder N-Register gleiche Exponenten zu geben. Zum Normalisieren ist nachher nochmals ein Schiebeprozess und das zugehörige Angleichen des Ergebnisexponenten erforderlich. In der Ablaufsteuerung für Gleitkommarechnungen schachteln

8. Ferritkern-Arbeitspeicher

Alle Teilspeicher mit einer Kapazität von 200 oder 1000 Wörtern sind unabhängig voneinander und gleichzeitig benutzbar, weil jeder mit einer vollständigen elektronischen Steuerung ausgerüstet ist (Zellenauswahl, Schreib- und Lesesteuerung mit Verstärkern, Schieberegister für 1 Wort). Ein Grundzyklus umfaßt 10 einheitliche Takte:

1. Paralleles Lesen aus der gewählten Zelle in das Schieberegister.
- 2..8. Ringschieben der Information im Register, dabei entweder Ausliefern zum Koordinatenschalter oder Einlesen von dort und Überschreiben des Registerinhalts.
9. Paralleles Rückschreiben zur gewählten Zelle.
10. Fortschalten des Auswahlzählers zur nächsten Zelle (wichtig für Blockübertragungen aus aufeinanderfolgenden Zellen).

Auch die Kernspeicher-Stromkreise sind vollständig mit Transistoren ausgerüstet. Sie unterscheiden sich für die beiden Speichergrößen nur geringfügig. Die Kernebenen (Matrizen) sind je nach der Kapazität mit $20 \times 50 = 1000$ Kernen (BILD 10) oder mit $10 \times 20 = 200$ Kernen ausgeführt. 35 solche Ebenen sind zu einem Speicherblock (BILD 11) zusammengefügt, der zwischen den Steckeinheiten in das Gestell eingeschoben und

durch Steckverbindungen angeschlossen wird, um auch dieses zentrale Glied schnell auszuwechseln zu können. Ein Schrank faßt vier solcher Teilspeicher mit ihrem gesamten elektronischen Zubehör.

9. Ergänzungsspeicherwerke

Die Speicher mit größerer Kapazität sind an die Werkein- und -ausgänge des Koordinatenschalters angeschlossen. Die Informationen werden deshalb nur mit den Ferritkern-Teilspeichern ausgetauscht, und zwar in Blöcken von fester oder veränderlicher Länge.

Der bereits bei anderen Anwendungen bewährte Magnetrommelspeicher [6] wurde in seiner Kapazität erhöht und faßt beim Rechner 12 000 Wörter. Die geringe Größe und der ruhige Lauf gestatten, die Trommel mit allem elektronischen

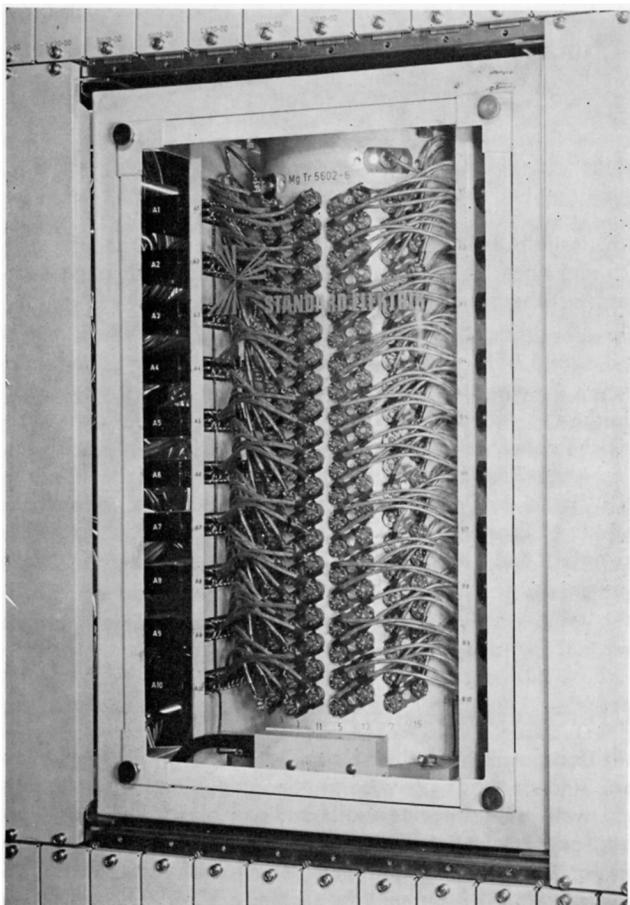


Bild 12 Magnetrommelspeicher, eingebaut zwischen den zugehörigen Steckeinheiten

Zubehör in einem halben Schrank unterzubringen. Sie ist im Störfall in wenigen Minuten auszuwechseln, da auch hier alle Verbindungen steckbar sind. Konstruktion und Einbau ist aus BILD 12 zu ersehen. Auch mehrere Trommelspeicherwerke können an einen Rechner angeschlossen werden.

Beim Magnetbandspeicher stehen, je nach der Anwendungsart, mehrere Ausführungsformen zur Wahl. Zum gedrängten Speichern großer Informationsmengen mit einigermaßen kontinuierlicher Verarbeitung sind Geräte mit Spulen geeignet. Wo es auf schnellen Zugriff in stark wechselnder Folge ankommt, wie bei kommerzieller Datenverarbeitung, ist es zweckmäßig, kürzere Bänder in mehreren Kassetten zu verwenden.

10. Ausbau des Rechners

BILD 13 gibt die Ansicht einer betriebsfähigen Anlage. Welche Ausstattung an Ergänzungsspeichern, Ein- und Ausgabegeräten für gewisse charakteristische Anwendungen zweckmäßig sind, muß getrennt beschrieben werden. Zur Unterrichtung über die Möglichkeiten des Ausbaus und über die Rechenzeiten sei auf die in Abschnitt 11 zusammengestellten Kenndaten verwiesen.

11. Kenndaten des ER 56

Informationsdarstellung

Wortlänge 7 Dezimalen (gilt für alle Darstellungsbereiche)

Verschlüsselung Speichern und Übertragen im (2 aus 5)-Code, Prüfung auf Code-Richtigkeit jeder Dezimalen bei jeder Übertragung

Zahlen entweder 13 Dezimalen plus Vorzeichen (Doppelwort; dabei automatischer Aufruf von Speicherzellenpaaren) oder 6 Dezimalen plus Vorzeichen (Einzelwort) bei Gleitkomma 11 Stellen Mantisse, Exponent ± 49 Befehle zum Programmieren größerer Zahlenlänge vorhanden

Rechenzeiten Die angegebenen Zeiten für arithmetische Operationen geben allein kein vollständiges Bild der Gesamtgeschwindigkeit des ER 56; der gleichzeitige Ablauf der verschiedenen anderen Operationen mit der eigentlichen Rechnung verkürzt die Gesamtbearbeitungszeit wesentlich

	bei Festkomma Betriebsart „normal“		bei Gleitkomma
	Einzelwort ms	Doppelwort ms	ms
Einschreiben	0,15	0,22	0,22
Abspeichern			
Addieren	0,20	0,30	0,96...1,10
Subtrahieren			
Multiplizieren*)	0,32...0,67	0,62...2,30	0,82...2,26
Dividieren	2,96	9,75	7,98
Vergleichen	0,18	0,34	0,34

*) Durch den eingebauten Nullensprung hängt die Multiplikationszeit von der Anzahl der Nullen im Multiplikator ab.

nichtnumerische
Daten

Soweit nichtnumerische Daten in den Rechner laufen, sind die Buchstaben, Ziffern und Zeichen durch Paare von Dezimalziffern und ein α -Kennzeichen in der Vorzeichenstelle dargestellt

Adressen-
rechenwerk

9 Indexregister von Adressenlänge, von denen eines zugleich Befehlsfolgezähler ist
Rücksprungregister
Rechenwerk für Addition und Subtraktion
Ablaufsteuerung für 20 Befehle zum Rechnen mit den Indexregistern

Befehle	Einadressenbefehle, 4 Stellen Adressenteil 1 Stelle Indexteil 2 Stellen Operationsteil
---------	---

Ferritkern-Arbeitsspeicher

Aufbau	aus Teilspeichern für 200 oder 1000 Wörter in beliebiger Zusammenstellung
Kapazität	maximal 10 000 Wörter
Wartezeit	keine (gesamte Zugriffszeit unterhalb der Taktzeit der Werte des ER 56)
Teilspeicher	Die Teilspeicher können unabhängig voneinander aufgerufen werden und gleichzeitig Informationen aufnehmen bzw. abgeben

Mechanischer Aufbau

Jeder Teilspeicher besteht aus 35 Ferritkernmatrizen (entsprechend der Wortlänge von 7 Dezimalen zu je 5 bit = 35 bit); jede Matrix umfaßt (je nach der Kapazität des Teilspeichers) $10 \times 20 = 200$ bzw. $20 \times 50 = 1000$ Ferritkerne von etwa 2 mm Außen- und 1,3 mm Innendurchmesser

Ergänzungsspeicher

Magnettrommel-Speicherwerk

Kapazität	12 000 Wörter auf 60 Kanälen für je 200 Wörter, auch Halbausbau lieferbar
Umlaufzeit	20 ms
Wartezeit	im Mittel 10 ms
Magnetische Beschriftung	Impulsteilung 0,23 mm Spurteilung 1,19 mm

Mechanischer Aufbau

Trommelzylinder vollständig gekapselt, senkrechte Achse, Durchmesser 150 mm, Länge 424 mm, Al-Cu-Mg-Legierung; Außenläufermotor 180 W, im Innern des Trommelzylinders angeordnet, läuft mit etwa 3000 U/min

Magnetbandgeräte

Typ	FR-300	SEL-S	SEL-K 10
Bandbehälter	Spule	Spule	10 Kurzband-Kassetten
Bandlänge	1000	1000	je bis 100 m
Bandbreite	1	1	1 Zoll
Kapazität etwa	2 000 000	1 500 000	je 150 000 Wörter
Start- u. Stopzeit	1,5	4	4 ms
Schreib- u. Lesegeschwindigkeit	9000	4000	4000 Wörter/s

Ein- und Ausgabegeräte

Druckgeräte

Typ	Zeilen-Schnelldrucker SP 40...190	Mosaik-Schnelldrucker CR 1000
Druckgeschwindigkeit	bis 15 Zeilen/s	100 Zeichen/s
	Druckwerksbreite 40...190 Stellen	Zeilenbreite 150 Stellen
Drucktypen	64 Typen, davon 29 Buchstaben 10 Ziffern 25 Interpunktions- und sonstige Zeichen	58 Typen, davon 25 Buchstaben 10 Ziffern 23 Interpunktions- und sonstige Zeichen
Druckbild	2,54 mm Teilung 4,24 mm Zeilenabstand	2,54 mm Teilung 4,24 mm Zeilenabstand
Durchschläge	bis 6 Stück	bis 3 Stück

Lochstreifengeräte

Lochstreifen-Ein-gabewerk	mit fotoelektrischem Leser für 400 Zeichen/s
Lochstreifen-Aus-gabewerk 614	mit Stanzer für 50 Zeichen/s



Bild 13
Ansicht eines
elektronischen
Rechenautomaten
ER 56

Lochstreifen-Ausgabewerk CR 3000 mit Schnellstanzer für 300 Zeichen/s

Zusatzgeräte (getrennt vom Rechner) Handlocher, Prüflocher und Fernschreibmaschine zum Erstellen von Fernschreibstreifen

Druckertisch zum Erstellen von Datenstreifen im (2 aus 5)-Code und zum Ausdrucken von Ergebnisstreifen in beliebiger Formatanordnung

Lochkartengeräte

Lochkarten-Ein-
gabewerk 400 mit fotoelektrischem Kartenleser für 400 Karten/min (80-spaltig) und Stecktafel für 6 Kartenarten

Lochkarten-Aus-
gabewerk 521 S 100 Karten/min (80-spaltig), Kartenarteinrichtung

Lochkarten-Ein-
Ausgabewerk 521 LS 100 Karten/min (80-spaltig), Kartenarteinrichtung

Schriftumsnachweis

- [1] H. H. und A. Goldstine: The electronic numerical integrator and computer (ENIAC). MTAC 2 (1946), S. 97...110.
- [2] A. W. Burks, H. H. Goldstine und J. v. Neumann: Preliminary discussion of the logical design of an electronic computing instrument. Washington, Juni 1946.
- [3] Theory and techniques for the design of electronic digital computers. Lectures given at the Moore School of Electrical Engineering. Philadelphia 1946.
- [4] M. V. Wilkes: The design of a practical high-speed computing machine. The EDSAC. Proc. Roy. Soc. London 195 A (1948), S. 274...279.
- [5] K. Goblau und K. Braun: Schaltkreise mit Transistoren in nachrichtenverarbeitenden Anlagen. Elektron. Rechenanl. 1 (1959), H. 1, S. 20...28.
- [6] K. Finkewirth und E. Klivar: Der Magnettrommelspeicher der Standard Elektrik AG. SEG-Nachr. 5 (1957), H. 4, S. 191...195.