

Rechenanlage Zuse Z3

Der erste Computer der Welt

Originalartikel zur Z3

75 Jahre Z3

Horst Zuse

April 2016

Internet: www.zuse.de
E-Mail: horst.zuse@t-online.de

©Copyright 2016, Horst Zuse

Inhaltsverzeichnis

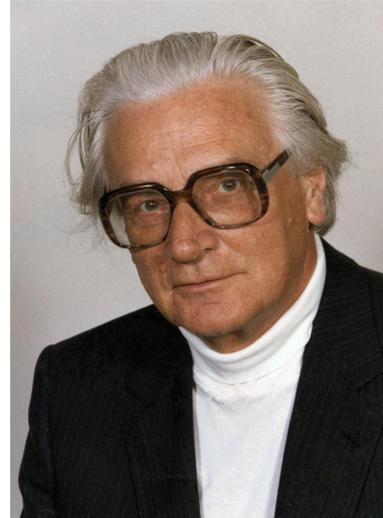
1 Vorwort	5
2 Einleitung - Zuse Z3	7
3 Zeichnung und Fotos zweier Nachbauten der Z3	9
4 Zuse Forum 2-1963-Zuse Z3	13
5 Die Zuse Z3 und ihre Bedeutung für die moderne Rechentechnik	15
6 Ausführliche Beschreibung der Rechenanlage Zuse Z3	19
7 Zusammenfassung	33
8 Kompakte Beschreibug des Computers Z3	35
9 Zuse Boschüren von Horst Zuse	37
10 Über den Autor	38

1 Vorwort

Im Jahr 2016 jährt sich zum 75sten Mal der Tag der Vorführung der Rechenmaschine Zuse Z3 in der Methfesselstr. 7 in Berlin Kreuzberg. Die Zuse Z3 gilt heute als der erste funktionsfähige Computer der Welt.

Aber es ist notwendig, die Eigenschaften der Z3 präziser zu formulieren. Es ist eine Maschine, die frei programmierbar ist, die mit binären Gleitkommazahlen arbeitet, die logischen Operationen (Aussagenkalkül) erfolgen binär, und zwar ausschließlich. Um dem Ingenieur die Arbeit mit einer solchen Maschine zu erleichtern, erfolgen die Eingabe und Ausgabe der Zahlen im Dezimalsystem. Dazu kommt eine Programmsteuerung. Alles erfolgt digital¹. Eine genauere Definition der Eigenschaften der Z3 wird in der Zusammenfassung gegeben.

Im Jahr 1961 entschied Konrad Zuse, die Z3 noch einmal neu erstehen zu lassen. Dies geschah einerseits wegen des Patentantrages für die Z3 von 1941, aber auch weil er zeigen wollte, wie die funktionierende Z3 von 1941 arbeitete, aber auch zu Werbungszwecken. Dazu gab es ab 1962 drei Veröffentlichungen in den Zuse-Foren der Zuse KG.



Im Zuse-Forum-3 von 1963 finden wir u.a.: *Während des IFIP-Kongresses 1962 in München wurden auf der gleichzeitig veranstalteten Fachausstellung Interdata die modernsten datenverarbeitenden Geräte vieler Herstellerfirmen gezeigt. Von diesen, in neuzeitliche Gewänder verpackten Geräten fiel den Besuchern eines auf, das mit seinem Äußeren einen wenig imponierenden Eindruck erweckte. Es hatte ein altmodisches Gesicht. Der Prototyp dieses Gerätes wurde vor 21 Jahren (Autor: heute 75 Jahre) fertiggestellt und war damit die Großmutter der ringsum ausgestellten modernen datenverarbeitenden Geräte,*



Das auf der Ausstellung gezeigte Gerät ist ein fast naturgetreuer Nachbau dieser ältesten programmgesteuerten Rechanlage der Welt der ZUSE Z 3.

*In der Zeit, als die Anlage Z3 entwickelt und gebaut wurde, waren automatische Rechanlagen noch kein Tagesgespräch. Die damaligen Zeitverhältnisse brachten es mit sich, dass keine Schlagzeilen in den Zeitungen und Zeitschriften erschienen, die diese Ereignis würdigten. Erst nach Kriegsende erfuhr der stauende europäische Durchschnittsbürger von sagenhaften Maschinen, die in Amerika gebaut worden waren und dort unter anderem dazu beitrugen, daß die Atombombe geschaffen werden konnte. Man erfuhr, daß diese riesigen Maschinen Rechenoperationen in Bruchteilen von Sekunden ausführen können und für schwierigste Rechenprobleme nicht mehr Lösungszeit benötigen als ein Schüler für eine einfache Addition oder Subtraktion. Es entstand damit überall in der Welt der Eindruck, daß allein in Amerika die theoretischen Erkenntnisse gewonnen, die technischen Grundlagen erarbeitet und die gesamte Entwicklung durchgeführt wurde. **Und doch ist es ein Deutscher, nämlich Konrad Zuse, der für sich das Recht beanspruchen kann, die erste programmgesteuerte Rechanlage der Welt gebaut zu haben.***

Diese Broschüre, herausgegeben vom ältesten Sohn von Konrad Zuse, soll dem Leser in mehreren Artikeln die Bedeutung dieser Maschine Z3 darstellen. Kapitel 2 ist eine allgemeine Einführung, Kapitel 3 zeigt u.a. Fotos der Z3. Die Kapitel 4-5 geben die Berichte der Zuse KG in den Zuse-Foren (1962-63) über die Z3 wieder, Kapitel 5 ist eine sehr präzise wissenschaftliche Beschreibung, um dem

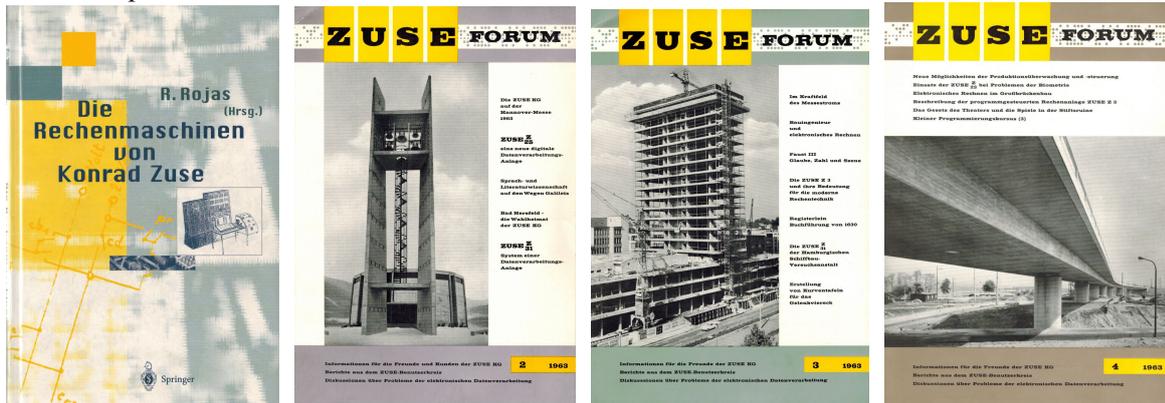
¹ Digital kommt aus lateinischen Digitus. Den Finger betreffend, spezielle Form eines Signals.

interessierten Leser die Logik und Funktionsweise der Z3 zu vermitteln. Eine Zusammenfassung stellt die Patentsituation zur Z3 dar.

2 Einleitung - Zuse Z3

In dieser Broschüre finden Sie Erläuterungen zu Konrad Zuses Z3, die am 12. Mai 1941 einer kleinen Gruppe von Wissenschaftlern in der Methfesselstr. 7 in Berlin vorgestellt wurde.

Die Zuse Z3 gilt heutzutage als der erste funktionsfähige Computer Welt, realisiert mit binärer Gleitkommaarithmetik, binärem Speicher, der Aussagenlogik in der gesamten Maschine sowie Steuerwerk und der Programmsteuerung via Lochstreifen. Die internen Abläufe in der Z3 werden durch hardwaremäßig fest verdrahtete Mikroprogramme gesteuert (Steuerwerk). Es ist ein digitaler Computer. Die arithmetische Einheit zusammen mit den Shiftern konnte addieren, subtrahieren, multiplizieren, dividieren und die Quadratwurzel ziehen. Eine Addition dauerte etwa 0,8 Sekunden, eine Multiplikation etwa 3 Sekunden.



Die vorliegende Broschüre basiert auf den oben gezeigten vier Publikationen. Die Zuse KG hat ab 1962 regelmäßig das Zuse Forum veröffentlicht. Das Patent Z26476 (später Z391 genannt) meldete Konrad Zuse am 16.7.1941 für die Z3 an. In dem Buch, Hrsg. Raul Rojas, *Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse* ist dieser Patentanspruch beschrieben. Auch sind alle wesentlichen Schaltungen der Z3 dargestellt. Es ist eine Kopie des Patentanspruches mit ergänzenden Erläuterungen zu der Patentanmeldung von 1941. Die Erteilung des Patentbeschlusses wurde 1967 durch das Bundespatentgericht abgelehnt.

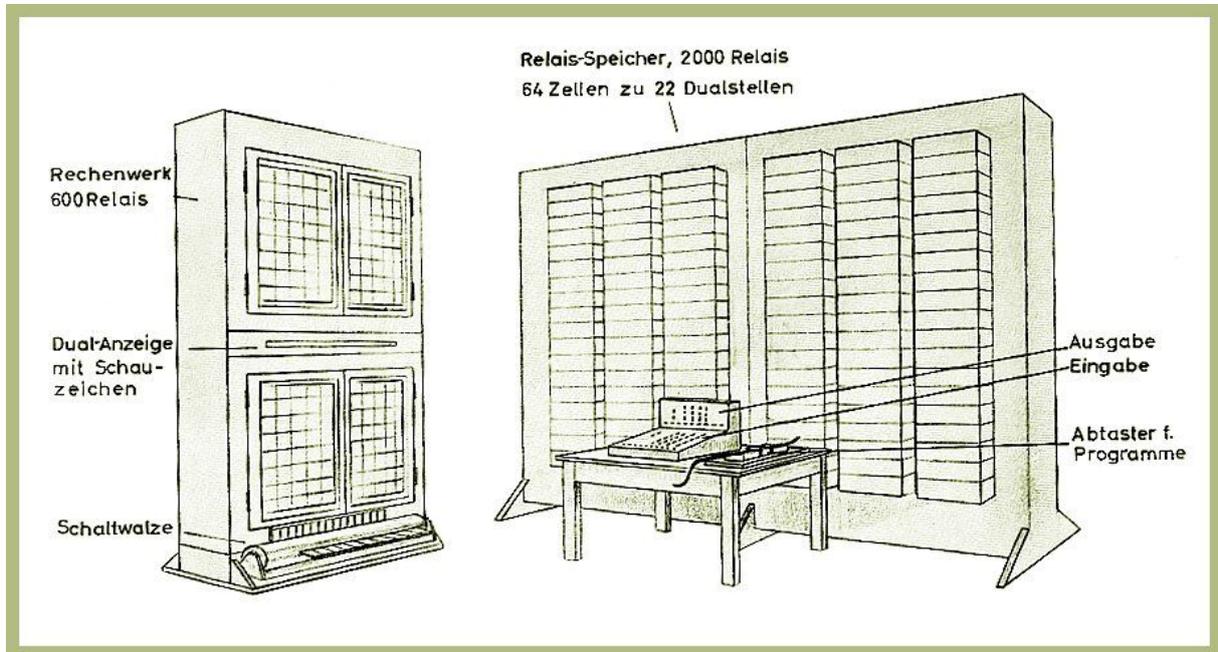
Professor F.L. Bauer, emeritierter Professor der TU-München, schreibt über Konrad Zuse 1998: *Schöpfer der ersten vollautomatischen, programmgesteuerten und frei programmierbaren, in binärer Gleitpunktrechnung arbeitenden Rechenanlage. Sie (die Rechenanlage Z3) war 1941 betriebsfähig. So oder so ähnlich wird man einmal schreiben müssen, wenn Konrad Zuses Büste in der Walhalla neben denen von Gregor Mendels und Wilhelm Conrad Roentgens um nur zwei zu nennen, denen zuletzt diese Ehre zuteil wurde aufgestellt wird.*



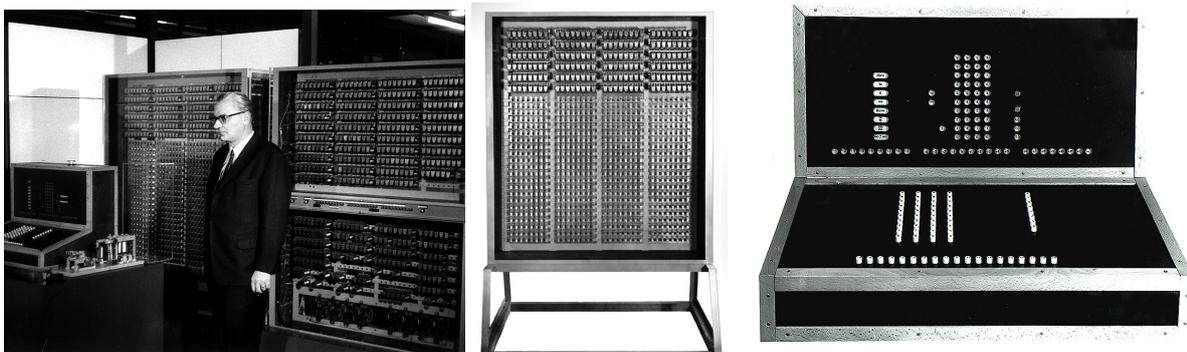
Unter www.zuse.de sind im Internet weitere Informationen zur Z3 und Publikationen zu finden, auch weist der Autor auf die Broschüren im Anhang hin.

3 Zeichnung und Fotos zweier Nachbauten der Z3

Wir präsentieren eine Zeichnung zur Z3 und einige Fotos (Nachbau von 1961). Originalfotos von der Z3 existieren nicht. Die Original Z3 wurde am 21. Dezember 1943 durch einen Bombenangriff auf die Methfesselstr. 7 in Berlin zerstört, damit auch sämtliche Fotos.

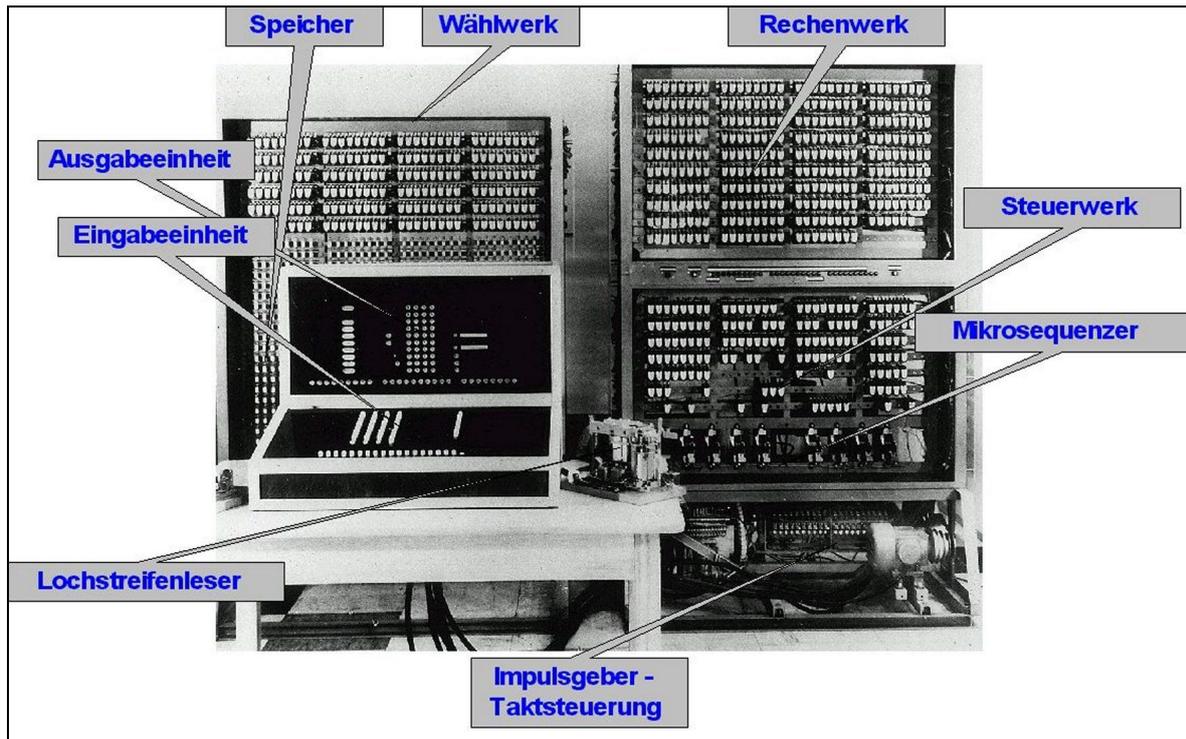


Eine Zeichnung der Original Z3, vermutlich aus dem Jahr 1961, als Konrad Zuse den ersten Nachbau plante. Links das Rechenwerk mit ca. 600 Relais, in der Mitte die Anzeige für die beiden Register R1 und R2 mit Glühbirnen. Es handelt sich um ein binäres Gleitkommarechenwerk mit Mantisse und Exponent. Rechts die beiden Speicherwerke mit je 32 Worten a 22 Bits ($32 \times 22 = 704$ Bits). Davor die Konsole zur dezimalen Ein- und Ausgabe und der Lochstreifenleser zur Programmsteuerung.

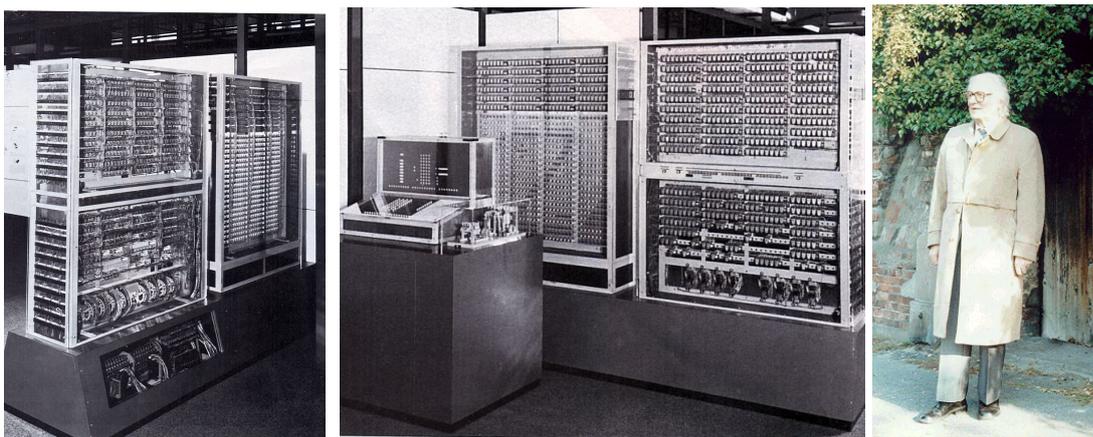


Konrad Zuse vor dem Nachbau Z3 im Deutschen Museum in München, ca. 1979. Ein Speicherblock der Z3 mit 32 Speicherstellen zu je 22 Bit². Die Ein- und Ausgabekonzole in dezimaler Gleitkommaarithmetik und oben links mit den arithmetischen Ausnahmebehandlungen, z.B. 0/0 ist nicht definiert, die Maschine stoppt dann die Ausführung.

² Der Begriff *Bit* ist eine Wortkreuzung aus *binary digit*, englisch für *Binärziffer*. Er wurde von dem Mathematiker John W. Tukey vermutlich 1946, nach anderen Quellen schon 1943, vorgeschlagen. Schriftlich wurde der Begriff zum ersten Mal 1948 auf Seite eins von Claude Shannons berühmter Arbeit *A Mathematical Theory of Communication* erwähnt.



Nachbau der Z3 von Konrad Zuse aus dem Jahr 1961, es ist eine kleinere Ausführung als die Original Z3, der zweite Speicherschrank wurde nicht realisiert. Das Bild gibt eine genauere Erklärung der Komponenten der Z3. Wie oben schon erwähnt ist es ein digital gesteuerter Computer, der mit einer Taktfrequenz von ca. fünf Hertz gesteuert wird. Die Z3 verfügte über einen zentralen Taktgeber/Impulsgeber durch eine Schaltwalze (rechter Schrank unten). Auf dieser gab es Metalllamellen, immer in fünf Reihen, Stufen genannt, diese dienten der Vorbereitung zur Ausführung des Taktes (Spiel). Diese Metalllamellen wurden durch Kohlebürsten abgegriffen. Konrad Zuse nannte den Computertakt ein Spiel. Fasziniert ist diese zentrale Taktsteuerung allemal, denn abhängig von der Umdrehungszahl der Walze konnte der zentrale Takt verändert werden. Damit ist ein PC mit drei Gigahertz Taktfrequenz etwa 600 Millionen mal schneller als die Z3. Das "Wischen" eines Bildes auf einem Smartphone würde etwa 15.000 Z3-Computer benötigen.



Verschiedene Ansichten des Nachbaus der Z3 (ca. 1961). Rechts Konrad Zuse ca. 1989 vor dem Eingang Methfesselstr. 7 in Berlin Kreuzberg. Die Z3 stand im Erdgeschoß zur Methfesselstr. 7, also hinter der Mauer. Eine Bombe am 21. Dezember 1943 genau in der Mitte der Methfesselstr. 7 zerstörte die Häuser Methfesselstr. 7 und 10. Das Grundstück ist heute noch ein Ruinengrundstück.



Der Nachbau der Z3r von 2010 durch Horst Zuse, welcher der Originalgröße entspricht.

Die umfangreichen Vorbereitungen für den neuen Nachbau der Maschine Z3 (genannt Z3r) durch den Autor begannen im Jahr 2007. Die Ideen waren folgende:

- Die Z3 soll in der Originalgröße gemäß der Zeichnung oben entstehen
- Zu Konrad Zuses 100. Geburtstag am 22. Juni 2010 soll eine neue Z3 präsentiert werden.
- Die Maschine Z3 eignet sich hervorragend, um zu erklären, was ein Computer ist. An einem PC ist es nahezu unmöglich zu demonstrieren, welches die Grundfunktionen eines Computers sind.
- Die wichtigen Komponenten der Z3 sollen separat demonstrierbar sein: der Takt des Rechners, das Mantissenrechenwerk, das Exponentenrechenwerk, die beiden Shifter zum Ausgleich der Mantissen und Exponenten bei der Addition und Subtraktion, die Normalisierung der Gleitkommazahlen, die Konvertierung von dezimalen Gleitkommazahlen³ in binäre und umgekehrt. Diese Funktionen können bei **keinem** der beiden oben erwähnten Nachbauten demonstriert werden.
- Die Realisierung soll mit modernen Industrierelais erfolgen.
- Die Konsole ist der Originalkonsole nachgebildet, enthält aber eine Klappe, auch Geheimfach genannt, unter der sich 60 Taster befinden. Damit können die einzelnen Komponenten der Maschine bis zum einzelnen Bit, gesteuert werden. Dies ist bei keinem der beiden anderen Nachbauten möglich.
- Die Maschine Z3 soll auf Ausstellungen, in Museen usw. präsentiert werden.
- Es soll damit auch die Frage beantwortet werden: **Was ist ein Computer?**

³ Gleitkommazahlen sind identisch zur Potenzrechnung, d.h. der Darstellung von Zahlen aus einer Mantisse und einem Exponenten zu einer Basis, oft 10 oder im binären Zahlensystem 2, z.B. $5,3 \cdot 10^2$. Diese Darstellung ermöglicht den Zahlenraum erheblich zu steigern, denn obige Darstellung entspricht der Zahl 530. Man nennt dies auch halblogarithmische Darstellung. Bei der einfach-logarithmischen Darstellung, auch halblogarithmische Darstellung genannt, wird eine der Koordinatenachsen (meist die \mathcal{X} -Achse) linear unterteilt $f(x) = x = X$, während die andere Koordinatenachse logarithmisch unterteilt ist: $f(y) = \lg(y) = Y$.

4 Zuse Forum 2-1963-Zuse Z3

Der erste Artikel stammt aus dem *Zuse Forum 2-1963* von Dipl.-Phys. Wend Goldbach.

Ein Blick zurück

ZUSE Z3

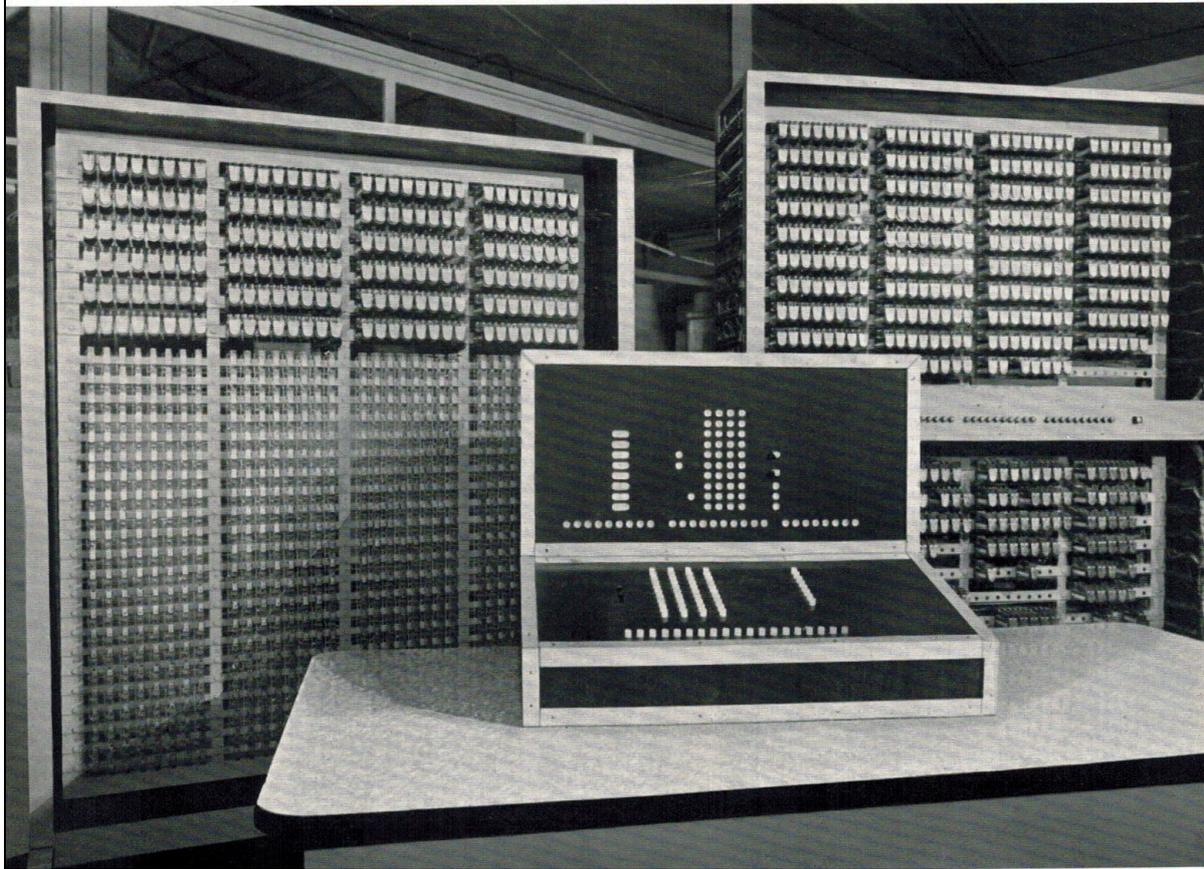
die erste programmgesteuerte Rechenanlage der Welt

Im Jahre 1939 begann der damalige Dipl.-Ing. Konrad Zuse mit dem Bau eines Rechengerätes in Relais-Bauweise, das in Fortsetzung seiner bisherigen Entwicklungen die Bezeichnung ZUSE Z 3 erhielt. Vorausgegangen waren die ZUSE Z 1 (1938), eine Rechenanlage auf der Grundlage mechanischer Schaltglieder, und die ZUSE Z 2 (1939), die das mechanische Speicherwerk der ZUSE Z 1 mit einem Relais-Rechenwerk von etwa 200 Relais kombinierte. Mit der ZUSE Z 3, die im Auftrag der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt vollendet wurde, konnte Konrad Zuse im Jahre 1941 die erste voll betriebs-

fähige programmgesteuerte Rechenanlage der Welt vorstellen. Leider wurde diese historisch so bedeutende Konstruktion im Jahre 1944 durch Kriegseinwirkung zerstört.

Die auf der Abbildung dargestellte Anlage ist eine Rekonstruktion des historischen Rechners nach Originalunterlagen, die auf der INTERDATA-Ausstellung 1962 in München vorgeführt wurde und demnächst Aufstellung im Deutschen Museum in München finden wird. Über die technischen Einzelheiten der ZUSE Z 3 wird in der nächsten Ausgabe des ZUSE-FORUMS ein aufschlußreicher Beitrag veröffentlicht werden.

Die nach Originalplänen rekonstruierte ZUSE Z 3



Der Autor: Das Foto ist ein Werkfoto der Zuse KG in Bad Hersfeld von 1961. Links ist der Speicherschrank und rechts das Rechenwerk mit der Konsole zu sehen. Die oberen sechs Reihen im Speicherschrank repräsentieren das Wählwerk zur Auswahl der Speicherworte. Die kleineren Relais darunter sind 32 Worte für den Speicher.

5 Die Zuse Z3 und ihre Bedeutung für die moderne Rechentechnik

Der zweite Artikel stammt von Dipl.-Phys. Wend Goldbach aus dem *Zuse Forum 3-1963*.

Dipl.-Phys. Wend Goldbach

Während des IFIP-Kongresses in München im vergangenen Jahre wurden auf der gleichzeitig veranstalteten Fachausstellung »Interdata« die modernsten datenverarbeitenden Geräte vieler Herstellerfirmen gezeigt. Von diesen, in neuzeitliche Gewänder verpackten Geräten fiel den Besuchern eines auf, das mit seinem Äußeren einen wenig imponierenden Eindruck erweckte. Es hatte ein altmodisches Gesicht. Der Prototyp dieses Gerätes wurde vor 22 Jahren fertiggestellt und war damit die Großmutter der ringsum ausgestellten modernen datenverarbeitenden Geräte. Das auf der Ausstellung gezeigte Gerät ist ein fast naturgetreuer Nachbau dieser ältesten programmgesteuerten Rechenanlage der Welt der ZUSE Z 3.

In der Zeit, als diese Anlage entwickelt und gebaut wurde, waren automatische Rechenanlagen noch kein Tagesgespräch. Die damaligen Zeitverhältnisse brachten es mit sich, dass keine Schlagzeilen in den Zeitungen und Zeitschriften erschienen, die diese Ereignis würdigten. Erst nach Kriegsende erfuhr der staunende europäische Durchschnittsbürger von sagenhaften Maschinen, die in Amerika gebaut worden waren und dort unter anderem dazu beitrugen, daß die Atombombe geschaffen werden konnte. Man erfuhr, daß diese riesigen Maschinen Rechenoperationen in Bruchteilen von Sekunden ausführen können und für schwierigste Rechenprobleme nicht mehr Lösungszeit benötigen als ein Schüler für eine einfache Addition oder Subtraktion. Es entstand damit überall in der Welt der Eindruck, daß allein in Amerika die theoretischen Erkenntnisse gewonnen, die technischen Grundlagen erarbeitet und die gesamte Entwicklung durchgeführt wurde. Und doch ist es ein Deutscher, der für sich das Recht beanspruchen kann, die erste programmgesteuerte Rechenanlage der Welt gebaut zu haben.

Dem Fachmann auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung fällt es schwer, sich in die Zeit vor 25-30 Jahren zurückzusetzen, in die die Anfänge für die

modernen datenverarbeitenden Geräte fallen, und es wird ihm besonders schwer fallen, rückblickend zu erkennen, welche Voraussetzungen technischer Art, welche theoretischen Erkenntnisse und welche erfinderischen Ideen erforderlich waren, um diese besondere Art von Rechengerten zu entwickeln. Diese weichen von den damals bekannten mechanischen Rechenmaschinen doch so erheblich ab und sind nicht etwa eine Weiterentwicklung jener von Hand einzustellenden und von Hand oder von einem Elektromotor angetriebenen Rechenmaschinen, sondern stellen tatsächlich eine ganz andere Art von Rechnern dar.

Ein Engländer namens Babbage hatte sich bereits im vorigen Jahrhundert mit dem Gedanken beschäftigt, eine Maschine zu entwerfen und zu bauen, die in der Lage ist, alle vorkommenden Rechenoperationen durchzuführen. So wertvoll die theoretische Arbeit von Babbage ist und so viel richtige Gedanken auch in ihr enthalten sind, so gelang es ihm doch nicht, diese gewaltige Aufgabe mit den damaligen technischen Mitteln zu lösen. Teile seiner Maschine wurden zwar gebaut und arbeiteten auch, aber die Technik war nicht so weit, daß alle die beim Bau dieser Maschine entstehenden Probleme gelöst werden konnten. Zu seiner Zeit gab es noch keine Elektrotechnik, d. h. keine Relais-technik, keine Elektronik, keine Transistoren-sondern es gab lediglich die schon damals nahezu restlos durchgearbeitete Mechanik. Es gab jedoch auch noch keine hochwertigen Spezialmaschinen und ebenso wenig geeignete Werkstoffe, die die Voraussetzung für mechanische Hochleistungsmaschinen sind, wie sie auch die Maschine von Babbage darstellt.

Inzwischen wurden die auch heute noch bekannten und üblichen Handrechenmaschinen für die vier Grundrechnungsarten entwickelt. Erst in den zwanziger Jahren begann dann die technische Weiterbildung dieser Handrechenmaschinen. Diese Weiterentwicklung ging dahin, die Rechenmaschinen weitgehend zu

automatisieren, d. h. einen elektromotorischen Antrieb vorzusehen und eine gewünschte Rechnung nach Knopfdruck für die jeweils gewünschte Rechnungsart automatisch ablaufen zu lassen. Es wurde auch erkannt, daß für die Grundrechnungsarten vorteilhaft unterschiedliche Rechenvorrichtungen vorgesehen werden, die durch Vorrichtungen zum Quadrieren oder auch zum Quadratwurzelziehen ergänzt werden können. Damit wurden aus den bekannten Handrechenmaschinen automatische Spezialrechner, wie sie zum Teil heute noch verwendet und gebaut werden.

Auch die in ihren Grundzügen bereits bestehenden Lochkartenmaschinen wurden in den zwanziger Jahren technisch vervollkommen und durch Hinzunahme von Spezialrechenmaschinen für eine oder mehrere der Grundrechnungsarten ergänzt bzw. erweitert. Die bis dahin verwendete mechanische Abtastung der Lochkarten wurde durch elektrische Abtastung ersetzt. Hier zeigte sich die Befruchtung durch die Relais-technik, die ebenfalls zu dieser Zeit einen besonderen Aufschwung nahm. Die Relais-technik, die zunächst hauptsächlich im Fernmeldewesen Eingang gefunden hatte, breitete sich allmählich auf weitere Gebiete der Technik aus, so auch auf die »automatischen« Rechenmaschinen jener Zeit. Diese gesamte Entwicklung wurde in den dreißiger Jahren fortgesetzt. Besonders die Logistik fand eine Anwendung in der Relais-technik.

Die Betrachtung der Patentliteratur gibt in groben Zügen folgenden Querschnitt aus jener Zeit (von etwa 1923-1935):

Als erster scheint der Franzose Valtat auf den Gedanken gekommen zu sein, das duale Zahlensystem für den Rechnungsgang in Rechenmaschinen zu verwenden. Zu diesem Zweck mußten die eingegebenen Werte vom dezimalen in das duale Zahlensystem übersetzt und nach Durchführung der Rechnung rückübersetzt werden. Der für diese doppelte Übersetzung erforderliche Aufwand wurde durch den einfachen Rechnungsablauf und die demgemäß einfache Mechanik zur Durchführung der Rechnungen wieder wett gemacht. Dieses Patent von Valtat hemmte für lange Zeit die Weiterentwicklung der Rechen- und Lochkartenmaschinen in dieser Richtung, so daß lediglich umständliche

Umgehungsversuche zum Zuge kamen, die zwar die Technik weiter befruchteten, aber dennoch zu keinem Ergebnis führten.

Der Norweger Hofgaard und der Tscheche Weiner ließen sich bei dem Entwurf von automatischen Rechenmaschinen von dem damaligen Stand der Lochkartenmaschinen anregen und schufen besondere, als Zusätze zu diesen benutzbare Rechenmaschinen.

Der Österreicher Tauschek baute eine Rechenmaschine, die sowohl mechanische Teile als auch Relais für die einzelnen Rechenvorrichtungen verwendete. Das Besondere an seiner Maschine war eine Zeitreglerschablone, die je nach der gewünschten Rechnungsart in die Maschine eingesetzt werden mußte und die den Rechnungsablauf steuerte. Für Multiplikationen, Additionen, Divisionen usw. war je eine gesonderte Schablone erforderlich. Auch Babbage hatte schon eine »Folgesteuerung« für seine »analytische« Rechenmaschine vorgeschlagen. Diese Idee, eine Schablone für die Steuerung eines Rechnungsablaufes zu verwenden, wurde in der Folge immer weiter ausgebaut und erreichte einen gewissen Höhepunkt in der in USA gebauten Mark I, von der später noch die Rede sein wird.

In diesem Zusammenhang soll noch erwähnt werden, daß von Tauschek schon zu Beginn der zwanziger Jahre ein elektromagnetischer Speicher in Trommelform vorgeschlagen wurde, der jedoch etwas anders arbeitete als die heute üblichen, umlaufenden Magnetspeichertrommeln, die in ihren Grundzügen von Dirks entwickelt wurden. Tauschek war mit diesem Gedanken seiner Zeit vorausgeeilt. Die vorstehende Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und soll lediglich den Gang der Entwicklung und den Stand der Technik aufzeichnen, den wir 1935 in der Rechenmaschinenteknik vorfinden. Die bis dahin gebauten Rechenmaschinen, die als »automatische Rechenmaschinen« bezeichnet wurden, werden heute unter dem Begriff elektrische Rechenmaschinen zusammengefaßt. Sie umfassen ein Rechenwerk oder mehrere spezielle Rechenwerke für jede Grundrechnungsart oder höhere Rechnungsart und arbeiten fast ausschließlich nach dem Dezimalsystem und mit mechanischen

Bediengliedern. Demgegenüber sind die damals in ihren Grundzügen entworfenen Relaisrechenmaschinen inzwischen fast völlig ausgestorben.

Mit dem Bau seiner Z 1 beschrift der damalige Diplom-Ingenieur Konrad Zuse im Jahre 1936 einen völlig neuen Weg. Der von ihm entwickelte Rechenmaschinentyp läßt sich als »logistische «Rechenmaschine bezeichnen, da sie ausschließlich das Prinzip der Logistik mit Ja-Nein-Werten verwendet, die auf das duale Zahlensystem zurückgehen. Während die beiden ersten Maschinen dieser Art noch rein mechanisch arbeiteten, wurde für die folgenden Maschinen die Relais-technik eingesetzt und später die Elektronik (Elektronenröhren, Halbleiter usw.).

In dieser Entwicklung tritt etwas völlig Neues auf, nämlich die technische Verwirklichung bzw. die technische Anwendung der aus der Logistik bekannt gewordenen Begriffe, wie z. B. Konjunktion, Disjunktion, Negation u. a., die als selbständige Elemente in der Maschine bestanden. Diese Grundelemente sind auch heute noch in den Elektronenrechnern wichtigster Bestandteil und ermöglichen es, daß diese Maschinen nicht nur Rechnungen durchzuführen, sondern auch Entscheidungen zu treffen vermögen.

Die damaligen elektrischen Rechenmaschinen besaßen entweder ein Universalrechenwerk oder mehrere Spezialrechenwerke. Die logistische Rechenmaschine hat praktisch nur ein Rechenwerk, das jedoch kein Rechenwerk in dem üblichen, bisher bekannten Sinne ist.

Nach reiflicher Überlegung ging Zuse von der mechanischen Bauweise ab und benutzte statt dessen den neuesten Entwicklungsstand der Relais-technik zum Bau einer neuen Rechenmaschine, nämlich der Z3. Diese Technik ermöglichte eine bessere Steuerung des Rechnungsablaufes als dies bei den mechanisch aufgebauten Maschinen der Fall war. Hinzu kam, daß Zuse den Gedanken hatte, den Rechnungsablauf nicht nur schablonenhaft, wie bereits bekannt, zu steuern, sondern für kompliziertere Rechnungen, bei denen mehrere unterschiedliche Rechenarten hintereinander ablaufen, eine Folgesteuerung vorzusehen, die sich den jeweiligen Erfordernissen anpassen läßt. Diese

Folgesteuerung setzt voraus, daß in der Maschine selbst bereits in Form logischer Verknüpfungen eine »Schablone« eingebaut ist, die den automatischen Ablauf jeweils einer Rechnung sicherstellt. Um weitere Zeit beim Rechnen einzusparen, schien es erforderlich, die Ausgangswerte und anfallenden Zwischenwerte oder später während des Rechnungsablaufes gebrauchte Werte in einem Speicher aufzubewahren, um sie jederzeit, d.h. nach den Erfordernissen des jeweiligen Rechnungsablaufes, in das Rechenwerk abrufen zu können. Solche Zahlenspeicher waren zu der damaligen Zeit ebenfalls schon bekannt, und zwar für Lochkartenmaschinen.

Die Z3 weicht schon mit all diesen Merkmalen erheblich von den sonst bekannten Rechenmaschinen der damaligen Zeit ab, und es stellte sich heraus, daß diese Merkmale tatsächlich einen völlig neuen Typ von Rechenmaschinen begründeten. Sie sind heute noch in jedem Elektronenrechner vorgesehen.

Besonderes Verdienst gebührt der obengenannten Idee, eine neue Konzeption für die Folgesteuerung des Rechnungsablaufes zu schaffen. Bei dieser Folgesteuerung waren sogenannte Rechen»befehle« vorgesehen, die angaben, welche Rechnungsart die Maschine durchzuführen hat und ferner festlegten, ob ein Zahlenwert aus dem Speicher in das Rechenwerk oder umgekehrt zu bringen sei und die auch das Ende der Rechnung und die Resultatanzeige auslösten. Diese Folgesteuerung umfaßte ferner zu jedem Rechenbefehl eine Angabe, in welcher Speicherzelle die in das Rechenwerk abzuholende Zahl aufzufinden war bzw. in welche Speicherzelle eine Zahl aus dem Rechenwerk zu bringen war.

Mit dieser Konzeption der Folgesteuerung war tatsächlich das geboren, was wir heute als Rechenprogramm bezeichnen. Diese Programme umfassen einen »Befehl« und eine »Adresse«. Der Befehl sagt etwas über die durchzuführende Operation aus, während die Adresse eine bestimmte Speicherzelle ansteuert. Noch heute arbeiten alle Elektronenrechner nach diesem Grundprinzip der Programmsteuerung.

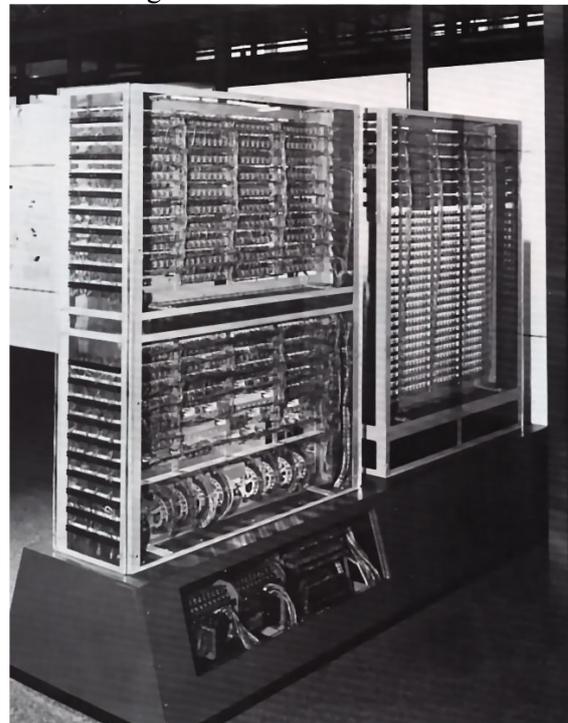
Dieses Programm für diesen Rechnungsablauf war in einer bestimmten Kodierung in einem Lochstreifen enthalten. Dieser Lochstreifen

wurde von einem Abtaster gelesen und die erhaltenen Ja-Nein-Informationen durch gesonderte Entschlüsselung für den Befehl und die Adresse geschickt. Für den technisch interessierten Leser folgt in der nächsten Ausgabe des ZUSE-Forums eine genauere Beschreibung des inneren Aufbaues der Z3.

Es sei nun hier nur noch kurz auf die etwas später einsetzende Entwicklung von Großrechenanlagen in den USA eingegangen. Die erste in USA entwickelte Maschine war die schon oben erwähnte und 1944 fertiggestellte Mark I. Diese von Alken entwickelte Maschine enthielt eine Vielzahl von einzelnen dezimal arbeitenden Rechenwerken für die Grundrechnungsarten und weitere Berechnungen. In ihrem Gesamtaufbau lehnt sie sich eng an die Vorstellungen von Babbage an. Der Rechnungsablauf wurde durch einen Lochstreifen gesteuert, der derart kodiert war, daß jedes der zur Steuerung vorgesehenen Relais durch die Lochkombination direkt angesteuert wurde. Die Programmerstellung war bei dieser Kodierung des Programmlochstreifens sehr mühsam und umständlich, da jeder einzelne Schritt der Rechnung durch eine Lochkombination festgelegt werden mußte. Diese Art der Programmierung, die schon von den Lochkartenmaschinen und von lochstreifengesteuerten Musikinstrumenten her bekannt war, konnte sich in der Folgezeit für die Verwendung zur Steuerung von Rechenmaschinen nicht durchsetzen und ist auch heute nirgendwo mehr anzutreffen. Hinzu kam, daß der Lochstreifen 24 Kanäle enthielt, was ebenfalls für die Programmierung und für die Entschlüsselung in der Maschine einen erheblichen Aufwand erforderlich machte. Andererseits war dieser Aufwand jedoch für die gewählte Art der Steuerung in der Maschine unerlässlich.

Die erste auf das Grundprinzip von Zuse zurückgreifende und in den USA gebaute Rechenmaschine war eine nach dem Kriege fertiggestellte Relaisrechenmaschine der Bell Telephone. Unabhängig von dem von Zuse verwendeten Steuerungsprinzip wurde auch für diese Relaisrechenmaschine eine Programmsteuerung entwickelt, die eine besondere Befehlsverschlüsselung in der von Zuse vorgeschlagenen Art verwendet.

Bei diesem Stand der Dinge wäre man in Deutschland der Entwicklung um einige Jahre voraus gewesen, wenn nicht das Kriegsende alle Hoffnungen auf eine Weiterentwicklung in größerem Stile vernichtet hätte. Zuse konnte mit seiner über das Kriegsende geretteten Maschine Z4 und einigen späteren Neubauten wieder eine eigene Fertigung und Weiterentwicklung aufziehen, die jedoch auf den Erkenntnissen von 1937-1940 aufbaute und wegen der Nachkriegsverhältnisse erst relativ spät Erfolge zeigte. In der Zwischenzeit waren vor allem amerikanische Firmen, denen sehr viel mehr Kapital zur Verfügung stand, in dieses neue Gebiet der Technik eingedrungen und hatten auch den deutschen Markt derart belegt, daß der Name Zuse lange Zeit nur in Fachkreisen bekannt war. Heute haben die deutschen Hersteller programmgesteuerter Rechenanlagen längst den Anschluß an die allgemeine Entwicklung wieder hergestellt, und die starke Nachfrage nach ZUSE-Anlagen läßt erkennen, daß Zuse in der technischen Verwirklichung der Logistik in modernen Rechenanlagen mit führend ist. Die ZUSE KG ist eine der ganz wenigen Firmen in der Welt, deren Herstellungs- und Vertriebsprogramm sich ausschließlich auf elektronische Rechenanlagen erstreckt.



Autor: Zuse Z3 im Deutschen Museum in München.

6 Ausführliche Beschreibung der Rechenanlage Zuse Z3

Der dritte Artikel ist von Wend Goldbach und Rolf Schneider, *Zuse Forum 4-63*.

Beschreibung der Rechenanlage ZUSE Z 3

Dipl.-Phys. Wend Goldbach und Ing. Rolf Schneider

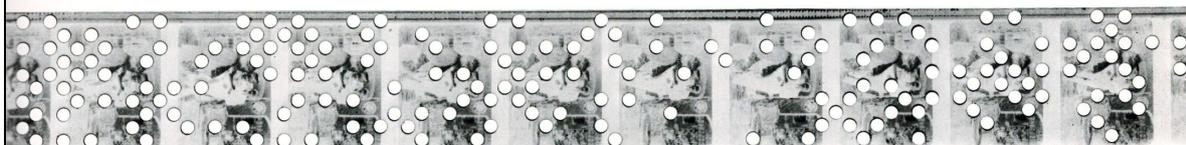


Abbildung 1:
Lochstreifen
der ZUSE Z 3.
Zuse verwendete
seinerzeit
abgespielte Kopien
von Spielfilmen

Bevor auf den konstruktiven Aufbau der Z 3 eingegangen wird, soll ein mathematisches Problem erläutert werden. Voraussetzung für jede Art der auszuführenden Rechnung ist die Aufstellung eines **Rechenplanes**, in welchem die aufeinanderfolgenden Rechenoperationen dem Charakter und der Reihe nach aufgezeichnet werden und die im Verlauf der Rechnung auftretenden Zahlen fortlaufend numeriert oder nach einem anderen Schema geordnet werden, ohne sie zunächst der Größe nach zu bestimmen. Man geht von bestimmten »Eingangswerten« aus, die den Variablen einer Formel entsprechen und leitet aus diesen durch bestimmte Operationen über eine Reihe von Zwischenwerten die Resultatwerte ab. Ist für eine bestimmte Aufgabe ein solcher Rechenplan einmal aufgestellt, so gilt er für sämtliche Variationen der Eingangswerte. Dieses Verfahren wird nachstehend an einem Beispiel für den Rechenplan einer dreistelligen Determinanten erörtert.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Es sind neun Eingangswerte vorhanden. Um nicht für die im Laufe der Rechnung auftretenden Zahlen dauernd neue Buchstabenbezeichnungen einführen zu müssen, werden die auftretenden Werte fortlaufend mit V_1, V_2, \dots (Variablen) bezeichnet:

$$\Delta = \begin{vmatrix} V_1 & V_2 & V_3 \\ V_4 & V_5 & V_6 \\ V_7 & V_8 & V_9 \end{vmatrix}$$

Die Durchführung der zahlenmäßigen Rechnung ist eine rein mechanische Tätigkeit. Sie läßt sich von Rechenmaschinen mit folgender Zusammenstellung von Vorrichtungen durchführen:

Man verbindet die Rechenvorrichtung über ein Wählwerk mit einem Speicherwerk, das

je Zelle eine Zahl aufnehmen kann. Das Wählwerk hat den Zweck, die erforderliche Speicherzelle mit der Rechenvorrichtung zu verbinden, sei es auf elektrischem oder mechanischem Wege, um entweder die gespeicherte Zahl zu einer Rechenoperation zu verwenden oder um in der Zelle eine Zahl zu speichern. Das Speicherwerk dient zur Aufnahme der Eingangswerte oder der im Verlauf der Rechnung auftretenden Zwischenwerte.

Man hält den Rechenplan in einer Form fest, die sich zur Steuerung der einzelnen Vorrichtungen eignet, beispielsweise auf einem Lochstreifen. Der Rechenplan wird nun abschnittsweise von der Maschine abgetastet und gibt für jede einzelne Rechenoperation folgende Angaben: die Nummern der die Operanden enthaltenden Speicherzellen; die

Rechenplan-(Entwurf)

Operation: 1.) $V_1 \cdot V_5 = V_{10}$
 2.) $V_{10} \cdot V_9 = V_{11}$
 3.) $V_2 \cdot V_6 = V_{12}$
 4.) $V_{12} \cdot V_7 = V_{13}$
 5.) $V_3 \cdot V_4 = V_{14}$
 6.) $V_{14} \cdot V_8 = V_{15}$
 7.) $V_1 \cdot V_6 = V_{16}$
 8.) $V_{16} \cdot V_8 = V_{17}$
 9.) $V_2 \cdot V_4 = V_{18}$
 10.) $V_{18} \cdot V_9 = V_{19}$
 11.) $V_3 \cdot V_5 = V_{20}$
 12.) $V_{20} \cdot V_7 = V_{21}$
 13.) $V_{11} + V_{13} = V_{22}$
 14.) $V_{22} + V_{15} = V_{23}$
 15.) $V_{23} - V_{17} = V_{24}$
 16.) $V_{24} - V_{19} = V_{25}$
 17.) $V_{25} - V_{21} = V_{26} = \text{Resultat}$

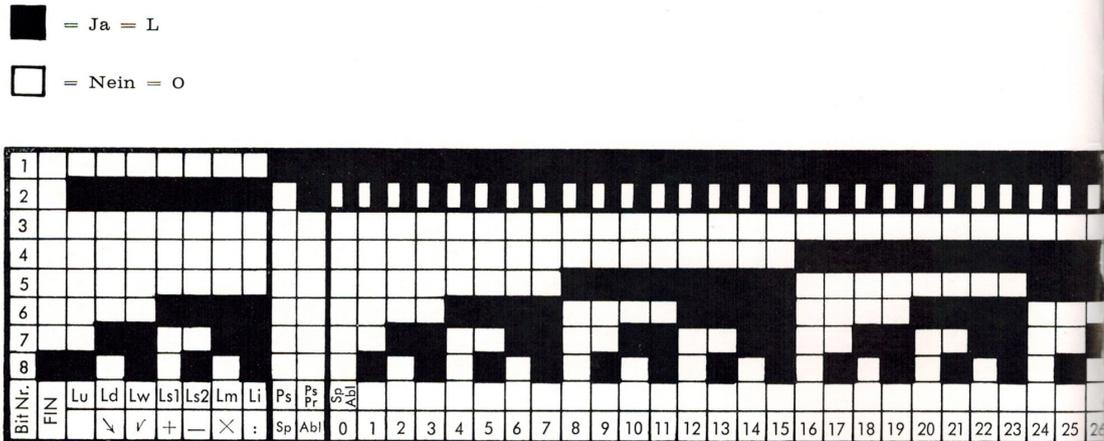


Abbildung 2: Befehlscode der ZUSE Z 3

Grundrechnungsart; die Nummer der das Resultat speichernden Zelle. Die Angaben des Rechenplanes lösen selbsttätig die erforderlichen Operationen aus.

Man braucht also folgende Vorrichtungen:

- 1.) Vollautomatisches Rechenwerk, z. B. eine 4-Spezies-Rechenmaschine
- 2.) Vorrichtungen zum Speichern von Zahlen
- 3.) Vorrichtungen zum Übertragen von Zahlen vom Rechenwerk auf das Speicherwerk und umgekehrt
- 4.) Eine Vorrichtung zum Verbinden einer bestimmten Speicherzelle mit dem Rechenwerk (Wählwerk)
- 5.) Vorrichtungen zum Steuern der Anlage durch Lochstreifen (Abtaster)

Abb. 3 zeigt dieses Aufbauschema der Z 3 mit weiteren Einzelheiten. Das Rechenwerk ist mit dem Speicherwerk C derart verbunden, daß sowohl die Resultate des Rechenwerkes auf jede beliebige Zelle des Speicherwerkes als auch die gespeicherten Zahlen auf die Einzelorgane des Rechenwerkes übertragen werden können. P ist das Planwerk mit dem Abtaster. Von hier aus werden die Operationstasten des Rechenwerkes und das Wählwerk Pb gesteuert, das die erforderlichen Speicherzellen mit dem Rechenwerk verbindet.

Bei dem Beispiel der dreistelligen Determinante treten im Verlauf der Rechnung 26 Zahlen auf. Hat das Speicherwerk genügend Zellen, so wäre es möglich, die Zahlen ihrer Nummer entsprechend auf 26 Zellen zu speichern. Man kommt aber mit weit weniger Zellen aus, da viele Zahlen nicht gespeichert zu werden brauchen, sondern gleich in der Rechenvorrichtung bleiben können, und viele Zellen im Verlauf der Rechnung frei werden, weil ihre Zahlen nicht weiter gebraucht werden. Es ist vorteilhaft, den Rechenplan auf Verwendung möglichst weniger Speicherzellen hin abzustellen. Um den Rechenplan dementsprechend aufbauen zu

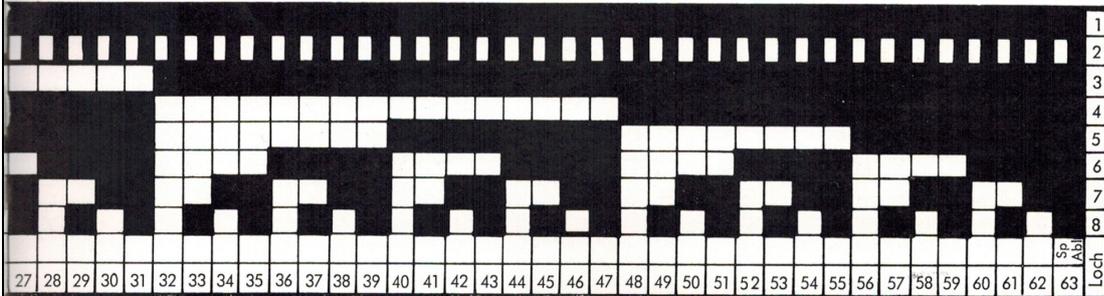
können, bleibt eine Zahl, die zur nächsten Operation benötigt wird, gleich in der Rechenvorrichtung. Als Beispiel hierfür diene die Aufeinanderfolge der Operationen 9 und 10, 11 und 12 usw. nach dem obigen Rechenplan-Entwurf. Der maschinenfertige Rechenplan enthält dann für jede Operation vier Angaben. Dem eigentlichen Rechenplan gehen die Befehle für die Speicherung der Eingangswerte voraus. Am Schluß muß der Befehl gegeben werden, das Resultat anzuzeigen. Bleibt eine Zahl gleich zur nächsten Operation in der Rechenvorrichtung, so können die Takte »Speichern des Resultats« und

Tafel 1.

Maschinenfertiger Rechenplan

Es bedeuten: Sp 1 Speichern auf Zelle 1
 Ab 1 Ablesen von Zelle 1
 x, +, —, Rechenoperationen
 Res. → Anzeigen des Resultats

Befehl		Inhalt
Nr.	Operat. Adresse	
1	Sp 1	V 1
2	Sp 2	V 2
3	Sp 3	V 3
4	Sp 4	V 4
5	Sp 5	V 5
6	Sp 6	V 6
7	Sp 7	V 6
8	Sp 8	V 7
9	Sp 9	V 8
10	Ab 1	V 9
11	Ab 5	V 1
12	x	V 5
13	Ab 9	V10
14	x	V 9
15	Sp 10	V11
16	Ab 2	V11
17	Ab 6	V 2



Nr.	Befehl		Inhalt
	Operat.	Adresse	
18	x		V 6
19	Ab	7	V12
20	x		V 7
21	Sp	11	V13
22	Ab	3	V13
23	Ab	4	V 3
24	x		V 4
25	Ab	8	V14
26	x		V 8
27	Sp	12	V15
28	Ab	1	V15
29	Ab	6	V 1
30	x		V 6
31	Ab	8	V16
32	x		V 8
33	Sp	13	V17
34	Ab	2	V17
35	Ab	4	V 2
36	x		V 4
37	Ab	9	V18
38	x		V 9
39	Sp	14	V19
40	Ab	3	V19
41	Ab	5	V 3
42	x		V 5
43	Ab	7	V20
44	x		V 7
45	Sp	15	V21
46	Ab	10	V21
47	Ab	11	V11
48	+		V13
49	Ab	12	V22
50	+		V15
51	Ab	13	V23
52	—		V17
53	Ab	14	V24
54	—		V19
55	Ab	15	V25
56	—		V21
57	Res.	→	V26

»Heranbringen des ersten Operanden zur nächsten Rechnung« ausfallen.

Der maschinenfertige Rechenplan, d. h. die mittlere Spalte der Tafel 1 wird als Lochstreifen in die Abtastvorrichtung eingesetzt und bewirkt nach Eintasten der Eingangswerte im Rechenwerk den selbsttätigen Ablauf der Gesamtrechnung. Die Rechenpläne, d. h. Programme moderner Elektronenrechner sehen im Prinzip noch genau so aus.

Als Beispiel eines fertigen Rechenplanes für die Z 3, dessen Inhalt nicht näher definiert ist, sei die Titelleiste zu diesem Aufsatz erwähnt, die eine Kopie eines Ausschnittes aus einem Programmlodstreifen der Z 3 zeigt. Den vollständigen Programmkode für einen solchen Lochstreifen zeigt Abb. 2.

Der Ablauf der Gesamtrechnung wird durch das Leitwerk gesteuert, das seinerseits in Steuerverbindung mit dem Planwerk steht.

Die nachstehende technische Beschreibung der Z 3 erfolgt anhand der nur schematischen Gesamtübersicht nach Abb. 3. Hier sind die wesentlichen Teilgruppen der Z 3 schematisch dargestellt. Jede dieser Teilgruppen umfaßt eine Vielzahl von Relais, von denen lediglich die wichtigsten — mit Buchstabenkombinationen bezeichnet — angedeutet sind. Die oberste Reihe von Teilgruppen, nämlich das Leitwerk, die Zifferneingabe und die Ziffernabgabe sind in dem Bedienungspult der Maschine untergebracht (s. Abb. 4).

Es ist hier zu erwähnen, daß alle Rechenoperationen in Einzeladditionen aufgelöst werden. Die Zeit einer Einzeladdition wird als »Spiel« bezeichnet. Jedes »Spiel« umfaßt mehrere »Schritte«. Ein »Schritt« ist die Ansprech- bzw. Abfallzeit eines normalen Relais. (Es sind auch abfallverzögerte Relais vorgesehen.) Die einzelnen, nacheinander ansprechenden Relaisgruppen erhalten schrittweise Spannung von einem Impulsgeber. Er besteht im wesentlichen aus einer von einem

Elektromotor angetriebenen Trommel, die Kontaktsätze trägt. Über diese Kontaktsätze erhalten die Relaisgruppen in einer Taktfrequenz von 300 Hz Strom. Dieses Prinzip der einheitlichen Taktgebung für alle Teilgruppen einer Rechenmaschine hat sich als besonders vorteilhaft erwiesen und wird noch heute in allen elektronischen Rechenmaschinen verwendet. Es ist hier außerdem zu erwähnen, daß bei der Z 3 durchweg alle Relais in stromlosem Zustand geschaltet werden. Der Impuls- bzw. Taktgeber ermöglicht die konsequente Durchführung dieses Prinzips.

Das **Leitwerk**, das den Ablauf der einzelnen Operationen steuert, besteht im wesentlichen aus Steuerschaltern und Relaisketten, die spielweise fortgeschaltet werden und die für die einzelnen Spiele nötigen Einstellungen am Rechenwerk bewirken.

Die Operationsrelais werden im Schritt I eingeschaltet, während die Steuerschalter fast durchweg erst bei Schritt II schalten. Während der nachfolgenden Schritte III, IV und V werden die Einstellungen für das nächste Maschinenspiel vorgenommen.

Die **Abtastvorrichtung** für den Rechenplan ist hier nur im wesentlichen beschrieben, da derartige Konstruktionen zur Genüge bekannt sind. Relais Pf schaltet den Abtaster-Transport-Magneten und bewirkt damit den Transport des Lochstreifens durch direkten Vorschub um einen Filmtransportloch-Abstand. Pf schaltet auch die Abtast-Magnete zur ablesbaren Einstellung der Kontakte p1 ... p8. Normalerweise ist Pf eingeschaltet, d. h. der Lochstreifen rückt mit jedem Spiel einen Schritt vor. Unter bestimmten Bedingungen für Pf muß der Lochstreifen stehenbleiben.

Es seien hier kurz als Beispiel die aufeinanderfolgenden Vorgänge für folgende charakteristische Befehlsfolge beschrieben:

- 1.) Ablesen von Zelle 3
- 2.) Wurzelziehen
- 3.) Speichern auf Zelle 5
- 4.) Ablesen von Zelle 4

Als Lochstreifen sieht der Rechenplan folgendermaßen aus: Der erste Befehl schaltet über das Wählwerk Cc3. Damit werden die Ca-Relais der Zelle 3 mit den Leitungen c1, c2, ..., c 22 verbunden. Zugleich ist das Relais Lz1 eingeschaltet, durch dessen Kontakt die Ef- und Ff-Relais geschaltet und sowohl die erste Speicherleitung (Vorzeichen) mit Vx verbunden, als auch die Zahl selbst über die Speicherleitungen auf die Relais Af, Bf übertragen wird.

Der nächste Befehl ist ein Rechen-Operationsbefehl und wird über die Kontakte der Pa-Relais an das Rechenwerk gegeben. Im Beispiel wird Lw (Wurzelziehen) eingeschaltet. Der zugehörige Steuerschalter läuft an und bewirkt die Einstellungen für das Quadratwurzelziehen. Wenn Lw im Schritt I geschaltet, Ln im Schritt III noch nicht geschaltet hat, läuft, durch Pf angestoßen, der Rechenplan weiter und bewirkt noch während der Durchführung des Wurzelziehens die durch Befehl 3 »Sp5« eingeleitete Einschaltung von Ps zum Speichern des Resultats am Schluß dieser Rechenoperation und durch weiteres Schalten von Pf die Übertragung des nächsten Lochstreifenbefehls auf Pa. Es wird also Ps und über das Wählwerk Cb5 eingeschaltet. Ps ist ein Selbsthalterelais und bewirkt ferner die Einschaltung der Selbsthaltekreise der Cb-Relais. Ps und Cb5 bleiben bis zum Schluß der Rechenoperation eingeschaltet. Im letzten Spiel der Rechenoperation wird die Einstellung von Cc5 (Ps und Cb5 sind angesprochen) bewirkt. Schon vorher war im Speicherwerk die alte Einstellung der Ca-Relais der Zelle 5 gelöscht worden. Jetzt sind die Ca-Relais der Speicher-Zelle 5 direkt mit den Kontakten des Rechenwerks verbunden. Die Zahl wird von Ae, Be auf die Speicherzelle 5 übertragen. Durch Pf angestoßen läuft der Rechenplan weiter. Für das darauffolgende Spiel »Ablesen« lag der Befehl des Rechenplans schon in Bereitschaft. Er bewirkt die gleichen Einstellungen wie oben beschrieben.

Das **Planwerk P** hat die Aufgabe, die Gesamtanlage entsprechend dem Rechenplan zu steuern. Der Rechenplan wird auf einem Lochstreifen aus Normalkinofilm von 35 mm entsprechend dem Kode nach Abb. 2 festgelegt. Zu jedem Befehl gehören 8 Felder. Die Relais des Befehlsregisters Pa1 ... Pa8 liegen über den Abfragekontakten der Abtastvorrichtung für den Lochstreifen. Die ersten beiden Felder des Lochstreifens pa1 und pa2 geben an, ob der Befehl einen Operationsbefehl an das Rechenwerk oder einen Speicher- bzw. Ablesebefehl an das Speicherwerk bedeutet, und zwar nach folgendem Schema:

pa2	pa1	Befehlsart
O	L	Rechenoperation
L	O	Speichern
L	L	Ablesen

Ist Pa1 eingeschaltet, so werden auch die Relais Pb3 bis Pb8 eingeschaltet. Diese stellen das eigentliche Wählwerk dar. Die Nummer des Wählwerks stellt ebenfalls eine Dualzahl dar. Jeder Speicher-Zelle ist eine andere Kombination der Stellungen der Relais Pb3 bis Pb8 zugeordnet. Über die Relais-Kontaktpyramide wird das der betreffenden Zelle zugeordnete Cb-Relais eingeschaltet.

Da das Speichern fast stets im Anschluß an eine Rechenoperation erfolgt, werden die zur Speicherung erforderlichen Einstellungen schon während dieser Rechenoperation getätigt und das Resultat der Rechenoperation direkt von dem Vorzeichen-Resultat-Relais, den Resultat-Relais Ae und Be auf die Ca-Relais übertragen. (Das Resultat wird also nicht wie beim Arbeiten ohne Rechenplan über Ef und Ff auf Af und Bf, oder über Ed, Fd auf Ab und Bb übertragen).

Die vom Leitwerk des Rechenwerks gegebenen Schluß-Befehle wirken auf die Cc-Relais. Beim Übertragen einer Zahl vom Speicherwerk auf das Rechenwerk werden dieselben Relais wie beim letzten Spiel irgend einer Rechenoperation geschaltet, sofern deren Resultat nicht gespeichert wird.

Zur Zeit der Entwicklung der Z 3 war es bereits bekannt, Rechenmaschinen im dualen Zahlensystem arbeiten zu lassen. Die Verwendung dieses Zahlensystems ermöglichte auch den Einsatz von Relais für den Aufbau eines vollständigen Rechenwerks und weiterer wesentlicher Teile durchaus bekannter Rechenmaschinen. Die Verwendung des dualen Zahlensystems bringt jedoch einen Nachteil gegenüber der Verwendung von Dezimalzahlen mit sich: Für die Darstellung einer vorgegebenen Zahl von Dezimalstellen ist eine wesentlich höhere Zahl von Dualstellen erforderlich. Hinzu kommt, daß gerade beim Rechnen mit physikalischen oder technischen Größen Zahlen unterschiedlichster Größenordnung in der gleichen Formel vorkommen können, z. B. die Wärmeausdehnungszahl $\alpha = 0,000012$ und Elastizitätsmodul $E = 210\,000 \text{ kg/cm}^2$. Es würde einen ganz ungeheuren Aufwand erfordern, wenn man den gesamten vorkommenden Stellenbereich für jede Zahl verwenden wollte, der sich ja bei Multiplikationen noch nahezu um das Doppelte vergrößert.

Diese Schwierigkeiten lassen sich durch die halblogarithmische Zahlendarstellung beheben. Die Zahl wird in der Form geschrieben: $y = B^a \cdot b$, wo B die Basis des benutzten Zahlensystems, a ganzzahlig, und $b \geq 1$ und

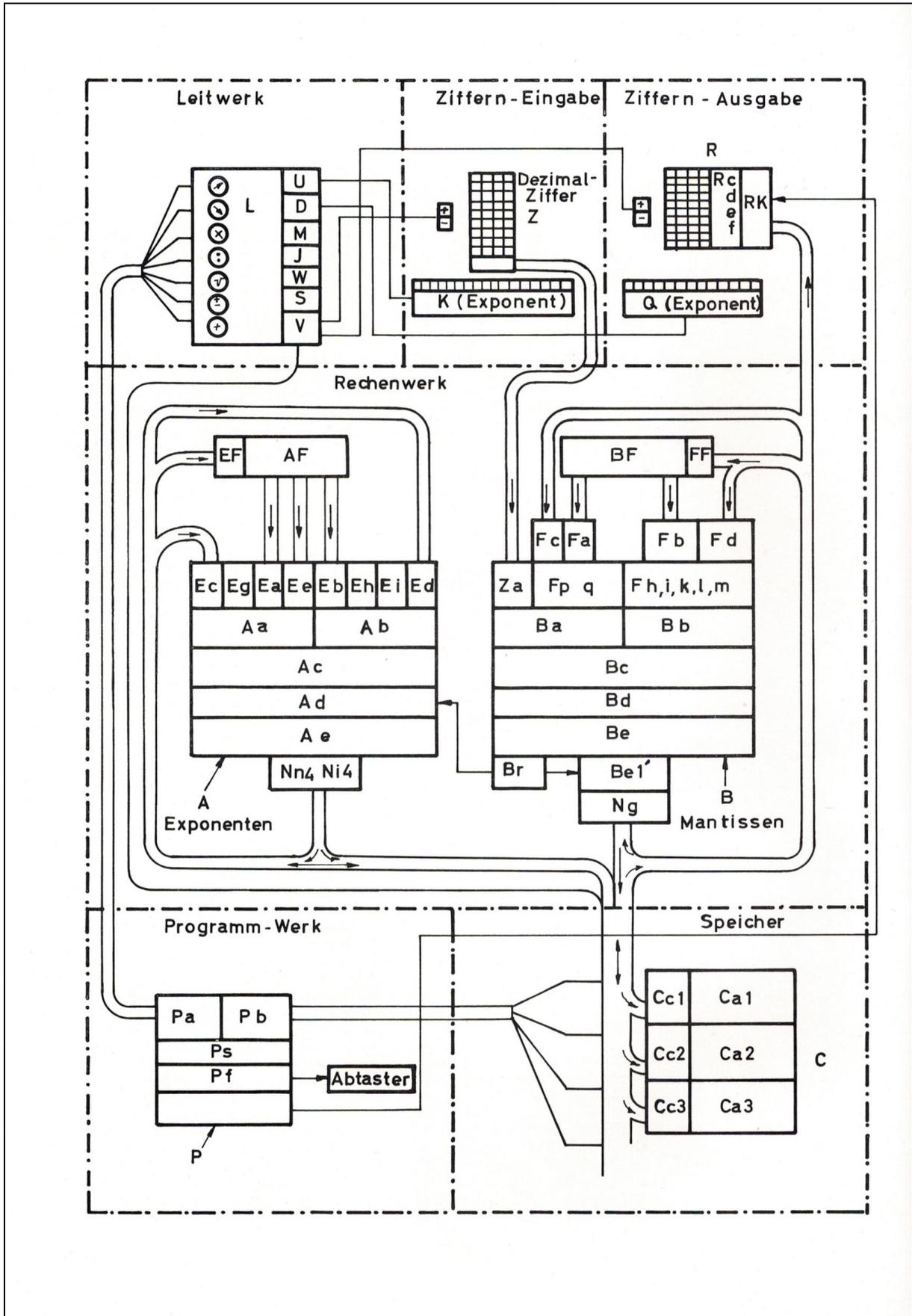
kleiner als B ist. Im Dualsystem und in halb-logarithmischer Schreibweise wird z. B. 12,75 wie folgt dargestellt:

$$\begin{aligned} 12,75 &= 8 + 4 + 0,5 + 0,25 \\ &= 2^3 + 2^2 + 2^{-1} + 2^{-2} = LL00,LL \\ &= LOLL \cdot L, L00LL = 2^a \cdot b, \text{ worin:} \\ &\quad a = LL \\ &\quad b = L,00LL \end{aligned}$$

Um Verwechslungen zu vermeiden, wird bei Dualzahlen die Ziffer »1« als »L« geschrieben. Bei der Z 3 wurde von den Vorteilen dieser Zahlendarstellung Gebrauch gemacht und der nur geringe zusätzliche Aufwand, der bei dieser Art der Zahlendarstellung für die Durchführung von Rechenoperationen und von Übersetzungen von dem einen in das andere Zahlensystem erforderlich ist, in Kauf genommen. Dafür kommt man bei Rechnungen mit einer verhältnismäßig geringen Zahl von Dualstellen aus. Um den Gesamtumfang des Rechenwerks und des Speicherwerks gering zu halten, sind für die Ziffernein- und -ausgabe nur vier Dezimalstellen vorgesehen. Die Zifferntasten von 0 bis 9 für jede Dezimalstelle befinden sich auf der linken Seite des Grundblattes des **Bedienungspultes**. (Abb. 4)

Die querverlaufende untere Tastenreihe auf dem Bedienungspult dient der Einstellung des Dezimalexponenten: In gleicher Weise ist die Ziffernanzeige, die mit Glühlämpchen arbeitet, aufgebaut. Sie enthält zusätzliche Einstell- und Anzeigemittel für die jeweiligen Operationen und die Vorzeichen der Dezimalzahlen. Von diesem Bedienungspult aus werden die Zahlenwerte, die zur Durchführung einer Rechnung benötigt werden, unter Steuerung durch das Planwerk in das Speicherwerk eingetastet.

Das **Rechenwerk** umfaßt für das Arbeiten im halblogarithmischen System, das oben erläutert wurde, zwei Teile: A und B. Teil A arbeitet nur mit ganzzahligen Werten. Im Teil B liegt das Komma hinter der Dualstelle mit dem Index 0. Die Speicherzellen umfassen für Teil A nur 7 und für Teil B nur 14 Stellen. Für die Werte b (Mantisse) gilt die Bedingungen $L \geq b < LO$, so daß die Ziffer der Stelle + 1 am Schluß der Rechenoperation stets = 0 und die Ziffer der Stelle 0 stets = L ist, die daher nicht gespeichert zu werden braucht. Die beiden letzten Stellen —15 und —16 dienen nur einer zusätzlichen Genauigkeit im Rechenwerk. Jeder Stelle ist ein Relais Ba, Bb, Bc, Bd, Be zugeordnet. Mittels eines besonderen Relais kann die Additions-



schaltung auf Subtraktion umgestellt werden. An der Relaisreihe Ba wird der erste und an der Relaisreihe Bb der zweite Summand eingestellt.

Das eigentliche Additionswerk B arbeitet folgendermaßen: Die Relais Ba, Bb werden auf Schritt V des vorhergehenden Spiels eingeschaltet. Im Schritt I, II, III werden die Relais Bc betätigt. Sie sprechen über Umschaltkontakte von Ba und Bb an, wenn die Dualziffern der betreffenden Stellen verschieden sind, d. h. wenn entweder Ba an Spannung liegt und Bb nicht oder umgekehrt (Antivalenz). Im Schritt II, III wird die Stellenübertragung gebildet. Es findet eine Übertragung auf die nächst höhere Stelle statt, wenn entweder beide Summanden-Ziffern = L sind oder nur eine der Summanden-Ziffern = L ist, (also Relais Bc angesprochen hat) und von der vorhergehenden Stelle eine Stellenübertragung stattfindet. Bd spricht an, wenn auf die betreffende Stelle eine Stellenübertragung stattfindet. Im Schritt III wird aus der Stellung der Relais Bc und Bd das Resultat gebildet. Die Ziffern des Resultats sind = L, wenn Bc ungleich Bd ist (Antivalenz).

Beispiel: 00LLOLL 27
+ LOLOLLO + 86
 LLL000L 113

Beispiel: 27 Ba 00LLOLL
+ 86 Bb LOLOLLO
 Bc LOOLLLO
 Bd OLLLLLO
 113 Be LLL000L

Die Subtraktion erfolgt durch Addition des Supplements. Das Supplement einer Dualzahl wird durch Umkehren der Ziffern gebildet, wobei in der letzten Stelle die »flüchtige Eins« addiert werden muß. Die Schaltung ist so aufgebaut, daß die Relais Bb bei Umschaltung auf Subtraktion umgekehrt wirken wie bei Additionen (Äquivalenz-Schaltung). Die Einführung der flüchtigen Eins erfolgt über das Relais Bd der untersten Stelle (-16).

Beispiel: 113 Ba OLLLL00L
- 86 Bb OLOLOLLO
 Bc LLOLLO00
 Bd L0000LL
 27 Be 000LLOLL

Die in den Relais Ae bzw. Be gebildeten Resultate können zur Erzielung von Zahlenkreisläufen über die Verteilerrelais Ec, Ed, Fc, Fd wieder auf die Summanden-Einstellrelais Aa, Ab, Ba, Bb zurückübertragen werden. Af und Bf sind Speicherrelais

(Selbthalterrelais). Es können Zahlen von Ae über Ef und von Be über Ff auf Bf übertragen werden.

Von Af und Bf können wiederum über Ea, Eb, Ee, Fa, Fb die dort gespeicherten Zahlen auf Aa, Ab, Ba, Bb übertragen werden. Die Relais Ea... Ef... und Fa... Ff haben so viele Arbeitskontakte, wie Leitungen über sie geführt werden. Werden sie betätigt, so ist die betreffende Verbindung hergestellt.

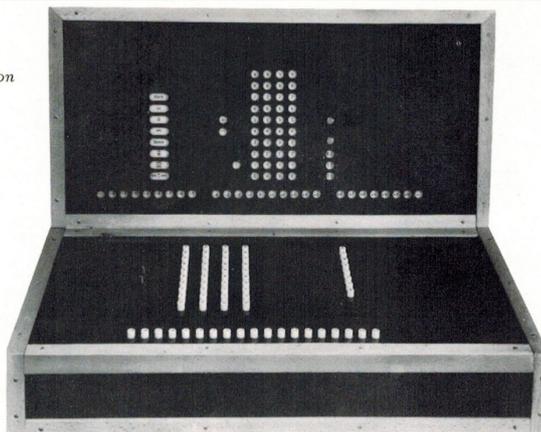
Im Teil B kann der Wert über Fp Fq mit Stellenverschiebung um +1, -1, -2 Stellen und über Fh, Fi, Fk, Fl mit Stellenverschiebungen um +15... -16 Stellen übertragen werden. An den Relais Fh bis Fm wird die erforderliche Stellenverschiebung als Dualzahl eingestellt; negativ zu verschiebende Stellenzahlen werden als Supplemente dargestellt. ($Fh = L$). Dementsprechend werden sämtliche Leitungen durch Fm um eine, durch Fl um 2, durch Fk um 4, durch Fi um 8 Stellen aufwärts und durch Fh um 16 Stellen abwärts geschaltet. Das Relais Fq schaltet um eine Stelle aufwärts und das Relais Fp um 2 Stellen abwärts.

Vor jeder Rechenoperation steht auf Af, Bf der erste und auf Ab, Bb der zweite Operand. Die Af-, Bf-, Ab-, Bb-Relais sind als Selbthalterrelais ausgeführt und haben je eine zweite Wicklung.

Während der Rechenoperationen kann das Resultat im Teil B $\geq L0$ (2) werden. In diesem Falle muß der Wert b eine Stelle abwärts verschoben werden und zum Ausgleich im Teil A eine »L« addiert werden. Dieser Vorgang wird durch die Relais Br und Be' 1 bewirkt. Die Schaltung ist so aufgebaut, daß bei Auftreten eines b-Wertes $\geq L0$ noch im gleichen Additionsspiel die Addition von L im Teil A stattfindet und im Anschluß an die Addition die be-Leistungen sofort durch be' 1 umgeschaltet werden. Sind die Ziffern auf Ba $O = L$ und Bb $O = L$, so findet eine Stellenübertragung auf die Stelle +1 statt. Die zum Relais Bd 1 führende Leitung hat dann Spannung. Von hier aus führt eine Leitung über einen Ruhekontakt und einen Arbeitskontakt zum untersten Stellenübertragungsrelais Ad 0 im Teil A, wodurch die Addition von L bewirkt wird. Bei Multiplikationen kann der Wert b bereits vor dem letzten Spiel größer ≥ 2 sein, d. h. Ba + 1 hat angesprochen. In diesem Falle wird über br und einen Umschaltkontakt das Potential $a60 = Ad0$ eingeschaltet. Wird Br betätigt, so spricht außer Be + 1 auch Be' 1 an, falls das Resultat ≥ 2 ist. Be' 1 schaltet über Wechselkontakte sämtliche von

Abbildung 3:
Aufbauschema
der ZUSE Z 3

Abbildung 4:
Bedienungs-pult der
ZUSE Z 3 (Rekonstruktion
nach dem Original)



be zu den Verteilerrelais laufenden Leitungen um je eine Stelle abwärts, wodurch die Halbierung des b-Wertes bewirkt wird.

Jeder Rechenoperation ist ein Selbsthalterelais Lu, Lm, Li, ... des Leitwerks zugeordnet, welches durch Tastendruck am Bedienungs-pult oder durch den Rechenplan über Pa eingeschaltet wird. Im gleichen Stromkreis mit den Wicklungen der L-Relais liegt Ln. Sobald Ln angesprochen hat, werden die Ansprechwicklungen der Operationsrelais abgeschaltet, wodurch verhindert wird, daß durch Drücken weiterer Tasten weitere Rechenoperationen-Relais ansprechen. Durch Lz 0, Lz 1 werden diese Relais gelöscht.

In dem elektromagnetischen **Speicherwerk** werden die Zahlen auf Selbsthalterelais gespeichert, und zwar in 2 Zellen zu je 22 Ja-Nein-Wert-Stellen einschl. Vorzeichen. Die nebeneinanderliegenden Ca-Relais sind einer Zelle zugeordnet. Die übereinanderliegenden gehören der gleichen Stelle an. Soll eine Zahl gespeichert werden, so wird vom Rechenwerk an diejenigen der Speicher-Leitungen, deren Ziffern = L sind, Spannung gelegt, und so Arbeitskontakte der betreffenden Zelle eingeschaltet. Die Ca-Relais, an deren zugehöriger Leitung Spannung liegt, sprechen an und halten sich über die Selbsthalteleitungen.

Soll eine Zahl abgelesen werden, so wird durch $pa1 \wedge pa2 \wedge Ln \wedge pb3 \dots 8$ ebenfalls das Cb- und das Cc-Relais der betreffenden Zelle eingeschaltet. Die Leitungen haben über die der Zelle zugeordneten Kontakte dann Spannung, wenn die der Stelle zugeordneten Ca-Relais eingeschaltet sind. Die gespeicherte Zahl kann nun an diesen Leitungen abgelesen werden.

Bei Addition und Subtraktion zweier in halblogarithmischer Form gegebener Zahlen muß die Differenz der a-Werte gebildet werden und der dem kleineren a zugeordnete b-Wert um $a_1 - a_2$ Stellen durch Fh... Fm abwärts verschoben auf Bb eingestellt werden. Aus den Vorzeichen der beiden Werte und der befohlenen Operation „+“ oder „-“ ergibt sich die auszuführende Operation. Diese ist gleich der befohlenen (Addition oder Subtraktion), wenn beide Vorzeichen gleich sind, und entgegengesetzt der befohlenen, wenn beide ungleich sind. Zu dem Ablauf dieser Grundrechnungsart in der Z 3 wird auf Abb. 5 verwiesen, die die „Logik“ der Z 3 für Addition bzw. Subtraktion aufzeigt. Im Spiel 1 wird die Differenz der a-Werte gebildet. Im Spiel 2 findet die eigentliche Addition bzw. Subtraktion im Teil B statt. Bei

Addition wird dann die Relaiskette sofort auf das Schlußspiel 5 geschaltet. Bei Subtraktion kann der b-Wert des Resultats negativ werden, das heißt: im Additionswerk b als Supplement erscheinen. Dann muß von ihm wiederum das Supplement gebildet werden. Das geschieht im Spiel 3. Bei Subtraktionen kann die erste von Null verschiedene Ziffer des b-Wertes des Resultats an beliebiger Stelle liegen. In diesem Falle muß der b-Wert „ausgerichtet“ werden, d. h. der b-Wert muß um soviel Stellen aufwärts verschoben werden, daß die Bedingung $1 \geq b \geq 2$ erfüllt ist. Dabei muß der a-Wert um den Betrag der erforderlichen Stellenverschiebungen vermindert werden. Dieses Ausrichten findet Fi, Fk, Fl, Fm im Spiel 4 statt.

Wird die Addition oder Subtraktion über Relais Ls eingeleitet, so wird über Ea der auf Ab stehende a-Wert auf Aa übertragen und das Werk A auf Subtraktion gestellt. Ist $a_1 \geq a_2$ so hat Relais Ae 7 nicht geschaltet. Dadurch schaltet ein Relais, welches auf das Resultatvorzeichenrelais einwirkt. Ist Ae 7 nicht eingeschaltet, so wird der auf Ab stehende a-Wert des 2. Operanden (a_2) gelöscht, und über Ea der auf Af stehende a-Wert auf Aa übertragen. Ist Ae 7 eingeschaltet, so bleibt der zweite a-Wert auf Ab stehen. Während des Additionsspieles 2 wird dann in jedem Fall der größere a-Wert auf die Ae-Relais übertragen. Er kreist während der folgenden Spiele über Ec, Aa, Ae. Entsprechend wird im Teil B, wenn Ae 7 nicht eingeschaltet ist, der erste b-Wert von Bf (b 1) über Fa auf Ba übertragen und der in zwischen von Bb auf Be übertragene zweite b-Wert (b 2) von Fd auf Bb zurückübertragen, sofern $a_1 - a_2 = 0 \dots 15$ war. Ist Ae 7 eingeschaltet, so wird der zweite b-Wert (b 2) über Fc auf Ba, und der erste b-Wert (b 1) über Fb auf Bb übertragen, sofern $a_1 - a_2 = -1 \dots -16$ war. Es steht also in jedem Falle der dem größeren a-Wert zugeordnete b-Wert auf den Ba-Relais. Der auf Bb einzustellende Wert muß also um die Differenz der a-Werte abwärts verschoben werden.

Dies erfolgt über die Relais Fh... Fm, und zwar nach folgendem Schema:

Aa — Ab	Stellenverschiebungszahlen					
= Ae	— 16	+ 8	+ 4	+ 2	+ 1	
a ₁ — a ₂	Fh	Fi	Fk	Fl	Fm	zus.
— 16	L					— 16
± 15	L				L	— 15
± 14	L			L		— 14
± 13	L			L	L	— 13
± 12	L		L			— 12
± 11	L		L		L	— 11
± 10	L		L	L		— 10
± 9	L		L	L	L	— 9
± 8	L	L				— 8
± 7	L	L			L	— 7
± 6	L	L		L		— 6
± 5	L	L		L	L	— 5
± 4	L	L	L			— 4
± 3	L	L	L		L	— 3
± 2	L	L	L	L		— 2
± 1	L	L	L	L	L	— 1
0						0

Links steht die Differenz der a-Werte, negative Zahlen als Supplemente dargestellt; rechts stehen die erforderlichen Einstellungen an dem Fh-Fm-Relais. Sie stellen ebenfalls die Stellenverschiebungen als duale Supplemente dar. Hat Ae7 geschaltet, d. h. bei negativer Differenz der a-Werte, so kann der auf den Ae-Relais eingestellte Wert direkt auf die Fh-Fm-Relais übertragen werden. Hat Ae7 nicht geschaltet, so gilt folgende Regel:

Ein beliebiges F-Relais muß ansprechen, entweder wenn das der gleichen Stelle zugeordnete Ae-Relais angesprochen hat, aber keins der Ae-Relais von niederem Stellenindex, oder wenn das der gleichen Stelle zugeordnete Ae-Relais nicht angesprochen hat, aber dafür mindestens eines der Ae-Relais von niederem Stellenindex.

Im Spiel 2 erfolgt die eigentliche Addition. Im Spiel 3 schaltet ein Relais, welches die Bedingung für das Resultatvorzeichen negiert; außerdem wird die Bildung des Supplements des vorigen Supplements bewirkt, um wieder eine positive Zahl im Teil B zu erhalten, d. h.: Über Fd wird das Resultat von Be auf Bb übertragen und der Teil B auf Subtraktion gestellt. Dadurch werden in den Bb-Relais die Ziffern umgekehrt und durch Addition der flüchtigen Eins das Supplement gebildet.

Im Spiel 4 erfolgt die Ausrichtung des nunmehr auf jeden Fall positiven Differenzb-Wertes; denn bei Subtraktion können die

ersten Ziffern Null sein, so daß das Resultat der Subtraktion aufwärts verschoben werden muß.

Teil A wird im Spiel 4 auf Subtraktion geschaltet und somit der auf Aa stehende a-Wert um die Zahl der Stellenverschiebung vermindert.

Im Spiel 5 erfolgt die Herausgabe des endgültigen Resultats über die Relais Ef, Ff auf die Relais Af, Bf. Die Summe der b-Werte kann bei der Addition im Spiel 2 größer als oder gleich zwei sein und muß in bezug auf das Komma in die Form L... ausgerichtet werden, indem über Br die Relais Be'1 und Ad0 geschaltet werden.

Die Vorzeichen der beiden Operanden werden auf Relais 4 gespeichert. Aus der Art der Operation und dem Größenverhältnis der beiden Operanden ergibt sich die jeweilige Schaltung der Relais. Beim Wurzelziehen wird stets das Vorzeichen auf „+“ geschaltet. Bei Addition und Subtraktion ergibt sich das Resultat-Vorzeichen aus den Vorzeichen der beiden Operanden, der befohlenen Operation („Addition“ oder „Subtraktion“) dem Vorzeichen der Differenz der a-Werte und dem Vorzeichen des b-Wertes des Resultats. Das Vorzeichen des Resultats wird auf die Vorzeichenstelle der gewählten Speicherzelle übertragen, nachdem die Vorzeichenrelais zuvor gelöscht wurden.

Bei Multiplikation muß im Teil A des Rechenwerkes die Summe der a-Werte gebildet und im Teil B die eigentliche Multiplikation durchgeführt werden. Zwecks Addition der a-Werte muß

1. der auf Ab gespeicherte Wert im Spiel 1 über Ac, Ae, Ec auf Aa übertragen und Ab gelöscht werden,
2. der auf Af stehende Wert im Spiel 1 über Eb auf Ab übertragen werden.

Durch den jeweils tätigen Steuerschalter wird daher im Spiel 1 Eb eingeschaltet. Alsdann wird der auf Ab gespeicherte Wert gelöscht (Spiel 2). Während der ganzen Multiplikation ist Ec eingeschaltet, so daß in den folgenden Spielen die Summe der a-Werte im Teil A über Aa, Ae, Ec umläuft. Im Teil B bleibt der zweite Faktor als Multiplikand auf dem Bb-Relais eingestellt. Das Produkt wird durch Umlaufenlassen des im Laufe der Rechnung aufzubauenden Resultats über Ba, Be, Fc, Fp, Fq gebildet, wobei Fp und Fq eingeschaltet sind, so daß der Wert nach jedem Umlauf um eine Stelle abwärts verschoben auf Ba eingestellt wird. Jeweils ein Arm eines der Steuerschalter tastet während

der einzelnen Spiele die Kontakte der Bf-Relais ab, auf denen der 1. Operand als Multiplikator gespeichert ist. Ist die betreffende Multiplikator-Ziffer = L, so wird der Multiplikand zum kreisenden Produkt hinzu addiert. (Das abwärtskreisende Produkt entspricht den Schlittenverschiebungen bei üblichen Rechenmaschinen; nur mit dem Unterschied, daß hier der Multiplikand stillsteht und das Resultat relativ zu ihm verschoben wird.) Im letzten Additionsspiel 15 wird Br eingeschaltet und somit das Resultat in bezug auf das Komma ausgerichtet. Im Spiel 16 wird, falls kein „Speichern“-Befehl vorliegt, das Resultat durch Ef, Ff auf die Af- und Bf-Relais übertragen.

Ist das Schlußzeichen gegeben, so fällt Bf, Bb ab und die Operation ist beendet.

Bei der Division wird im Teil A die Differenz der a-Werte gebildet und im Teil B die eigentliche Division durch Subtraktion des Divisors vom Dividenden durchgeführt. Die Differenz der a-Werte wird entsprechend der Multiplikation gebildet. Im Teil B bleibt der Divisor auf dem Bb-Relais eingestellt und der Rest macht einen Kreislauf über Ba, Be, Fc, Fp, Fq, wobei nur Fq eingeschaltet ist und somit der Rest um eine Stelle aufwärts verschoben auf die Ba-Relais eingestellt wird. Er wandert also aufwärts, der Divisor verschiebt sich relativ dazu abwärts. Die Schaltung ist so aufgebaut, daß bei negativer Differenz der Rest einen blinden Kreislauf ohne Subtraktion des Divisors ausführt. Ist die Differenz = 0 oder positiv, so ist die Übertragungsangabe ebenfalls positiv, d. h. sie liegt an Spannung, da die vor der ersten Stelle liegenden Ziffern des Divisorsupplements $-L$ sind. Soll das Resultat (der Differenzbildung) auf Be positiv oder = 0 werden, so müssen die vor der Stelle Be -1 liegenden Ziffern = 0 sein. Hierzu ist eine über sämtliche Stellen laufende Stellenübertragung nötig. Das Resultat wird ziffernweise, angefangen von der ersten Ziffer (1. Stelle vor dem Komma) auf Bf 0... -16 gegeben. Bei einem Rest ≥ 0 ist die betreffende Ziffer des Resultats = L.

Im Spiel I wird im Teil A das Relais Ea eingeschaltet. Über Fa wird der auf Bf gespeicherte Dividend auf die Ba-Relais übertragen.

Das Resultat der Division kann kleiner als 1 sein, muß aber $\geq 0, L$ sein; das heißt, die erste von 0 verschiedene Ziffer kann entweder auf Bf 0 oder auf Bf -1 stehen. Im Spiel 18 wird nun das auf Bf stehende Resul-

tat über Fa auf Ba übertragen. Ist Bf 0 = 0, so wird auf Ab in Teil A praktisch LLLLLLLL = -1 eingestellt, also die noch kreisende Differenz der a-Werte um 1 vermindert. Gleichzeitig wird Fq eingeschaltet, wodurch im Teil B der Wert b um eine Stelle aufwärts verschoben auf die Ba-Relais eingestellt wird. Im Spiel 19 wird dann über Ef, Ff das Resultat auf die Af-, Bf-Relais zurückübertragen. Im Teil A ist dauernd der Kreislauf über Ec eingeschaltet, ferner der Kreislauf des Restes im Teil B über Fc mit einer Aufwärtsverschiebung um eine Stelle durch Fq. Der Teil B ist auf Subtraktion gestellt. Im Spiel 19 werden diese Einstellungen abgeschaltet.

Das Quadratwurzelziehen hat große Ähnlichkeit mit der Division. An Stelle des Divisors wird das im Laufe der Rechnung aufzubauende Resultat vom Radikanten abgezogen. Die quadratische Ergänzung besteht durch einfache Addition von L. Im Teil A muß der auf Af stehende Wert halbiert werden, während im Teil B die eigentliche Wurzel gezogen wird. Ist a ungerade, so muß, damit beim Halbieren wieder eine ganze Zahl entsteht, dieser um Eins erniedrigt werden und dafür die Wurzel aus $2b$ gezogen werden. Die Erniedrigung von a um Eins geschieht selbsttätig durch Verlorengehen der letzten Stelle beim Halbieren (halbieren gleich eine Stelle abwärts verschieben).

Im Spiel 1 wird der b-Wert des Radikanden über Fa von Bf auf Ba übertragen; ist der a-Wert des Radikanden ungerade, so ist Af 0 gleich L. In diesem Falle wird im Spiel 1 außerdem Fq eingeschaltet und somit der b-Wert um eine Stelle aufwärts verschoben auf Ba eingestellt. Ferner ist die erste quadratische Ergänzung durch Bb 0 eingestellt. In dem folgenden Spiel wird die quadratische Ergänzung jeweils eine Stelle tiefer auf die Bb-Relais eingestellt und genau wie beim Dividieren das Resultat auf den Bf-Relais aufgebaut. Hierbei haben wir die Einstellung Fc, Fq (aufwärtslaufender Kreislauf des Restes) und Fb, Fm zur Einstellung des auf Bf stehenden Resultats um eine Stelle aufwärtsverschoben (Fm) auf die Bb-Relais. Im Spiel 19 wird der a-Wert über Ee um eine Stelle abwärts verschoben auf Aa übertragen und zugleich das Resultat von Bf über Fa auf Ba übertragen. Im Spiel 20 findet die Übertragung des endgültigen Resultats über Ef und Af und über Ff auf Bf statt. Zugleich wird das Schlußzeichen gegeben. Im Spiel 2 ist Bl der Löschbefehl für Bf. Die Einstellungen Fc, Fq, Fb, Fm werden über Lw ein-

geschaltet, sind aber während der Spiele 1 und 19 unterbrochen.

Beim Übersetzen der auf der Zahlentastatur des Bedienungspultes eingestellten Zahl vom Dezimalsystem ins Dualsystem wird zunächst, unabhängig von der Lage des Kommas, die vierstellige Dezimalzahl als ganze Zahl übersetzt. Dies geschieht im Teil B, indem die Dezimalziffern für sich ins Dualsystem übersetzt werden und also solche, angefangen von der höchsten Stelle, nacheinander auf das Additionswerk übertragen werden und zwischen jeder neu eingestellten Ziffer das bisher aufgebaute Resultat mit 10 (= L0L0) multipliziert wird.

Die Multiplikation mit 10 geschieht durch Einstellen des doppelten und achtfachen Wertes auf das Additionswerk, also dadurch, daß das Resultat einmal eine Stelle aufwärts nach Ba und einmal 3 Stellen aufwärts nach Bb verschoben wird.

Schließlich muß die so übersetzte ganze Zahl auf die Form $y = 2^a \cdot b$ gebracht werden. Da die Einer auf die Stelle -13 eingestellt werden, das duale Komma also zwischen -13 und -14 liegt, muß im Teil A zum Ausgleich $+13$ addiert werden (LLOL). Ferner muß die Zahl entsprechend der Lage der ersten von Null verschiedenen Ziffer ausgerichtet werden. Dies geschieht wie bei der Subtraktion über die Relais Be, Bm, Fi... Fm, nachdem die der Lage des Kommas entsprechende Taste des Bedienungspultes gedrückt wurde. Der den Tasten zugeordnete Index gibt an, mit welcher Potenz von 10 die auf den Dezimalzifferntasten eingestellte Zahl zu multiplizieren ist. Sollen die übersetzten Zahlen direkt ins Speicherwerk übertragen werden, so wird dies durch den Rechenplan gesteuert, und zwar über das Relais Ps.

Das Rückübersetzen vom Dualsystem ins Dezimalsystem erfolgt so:

Ist der a-Wert der rückzuübersetzenden Zahl < 0 oder > 3 ($2^a \cdot b < 1$ oder ≥ 16), so muß durch mindestens eine Korrektur-Multiplikation mit 10 oder mit 0,1 und „Ausrichten“ die Zahl zunächst auf eine Form gebracht werden, bei der der a-Wert = 0 und der b-Wert im Bereich $1 \dots < 16$ liegt. Es wird dann der vor dem Komma liegende ganzzahlige Teil $1 \dots 15$ des b-Wertes der Zahl in die entsprechende Dezimalziffer überführt und der hinter dem Komma liegende Rest mit 10 multipliziert; wiederum der vor dem Komma liegende Teil in die zweite Dezimalziffer überführt, der Rest mit 10 multipliziert usw. Für dieses Verfahren

werden im Teil B vier Stellen vor dem Komma gebraucht. Da das Additionswerk B nur zwei Stellen vor dem Komma hat, wird für das Rückübersetzen das Komma hinter die normale Stelle -2 verlegt, der b-Wert also um 2 Stellen abwärts verschoben. Dem entsprechend muß der zugehörige a-Wert um zwei erhöht werden, d. h. bei der fertig geformten Zahl müßte $a = L0$ sein.

Die Resultatanzeige auf dem Lampenfeld des Bedienungspultes wird nach Beendigung des Rückübersetzens über eine Steuerung durch das Leitwerk bewirkt.

Sonderwerte: „Null“, „Unendlich“ und „Unbestimmt“

In der halblogarithmischen Form ist die Darstellung der Zahl 0 exakt nicht durchführbar, da der Wert $a = -\infty$ wäre. Die Maschine ist so gebaut, daß die Zahl mit dem kleinsten darstellbaren a-Wert als „0“ definiert wird. Dieser ist $.LL000000 = -L000000 = -64$ als Supplement. Entsprechend gilt die Zahl mit dem größten a-Wert, nämlich $0LLLLLL = 63$ als „ ∞ “. Dies gilt unabhängig von der Größe des b-Wertes. Ein Sonderwerk löst die mit den Werten „Null“ und „Unendlich“ zusammenhängenden Aufgaben. Wird eine Zahl aus dem Speicherwerk in das Rechenwerk auf Af, Bf und Ab, Bb gegeben, so müssen die a-Werte auf Af und Ab untersucht werden. Trifft auf diese eines der Kriterien „Null“ oder „Unendlich“ zu, so muß das diesem Stellenwert zugeordnete Relais ansprechen. Hat mindestens eines dieser Relais geschaltet, so kann, außer bei $x \pm 0$ oder $0 \pm y$, im Zusammenhang mit der befohlenen Rechenoperation das Resultat ermittelt werden. Am Ausgang dieses Sonderwerkes werden Lampen mit den Transparenten:

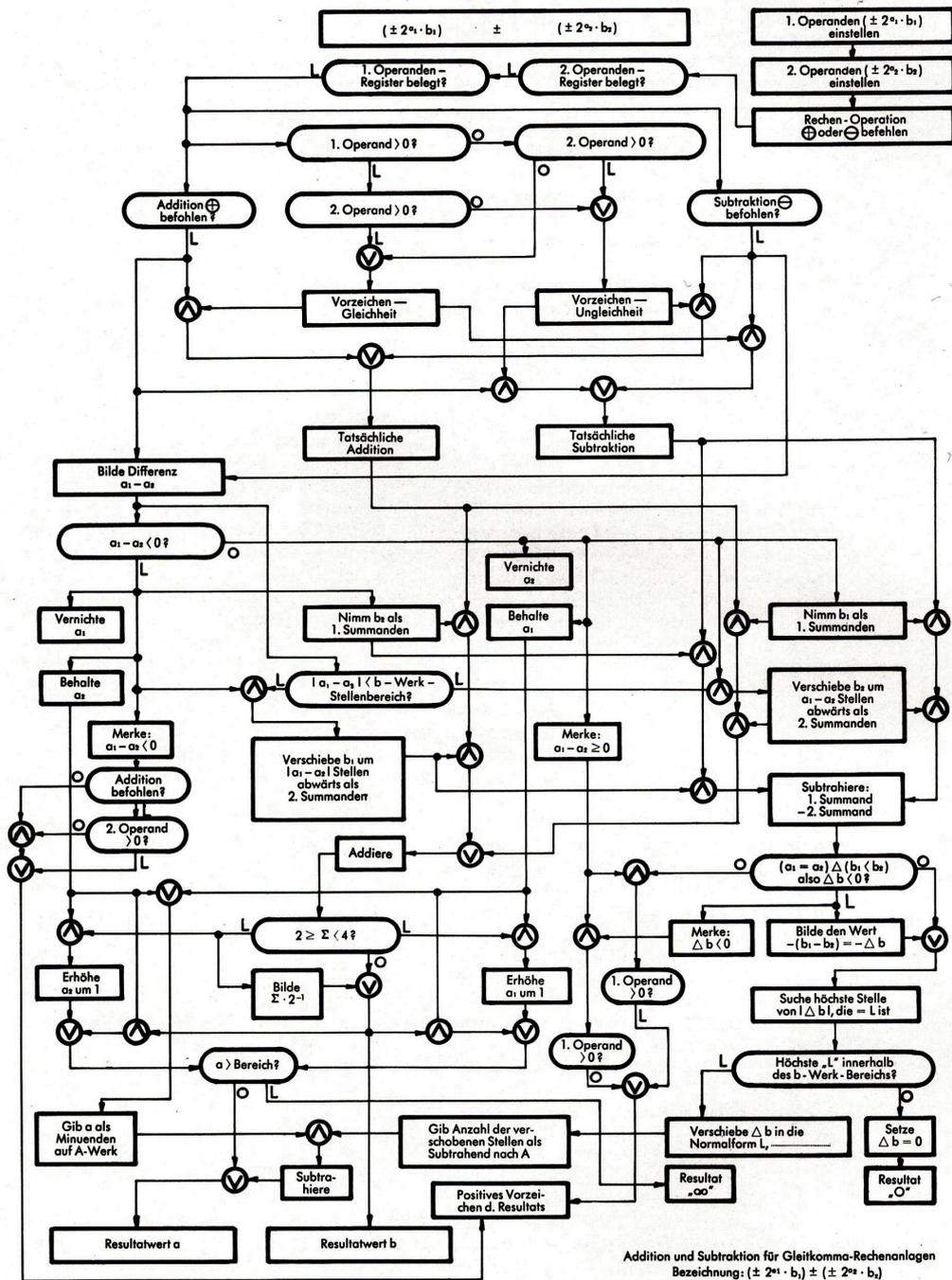
$$\infty \pm \infty, \frac{\infty}{\infty}, \frac{0}{0}, 0 \cdot \infty$$

geschaltet.

Ist das Resultat einer Rechnung ∞ oder 0, so muß der a-Wert auf die Form 00LLLLLL bzw. LL000000 gebracht werden. Dies erfolgt durch Relais, die im letzten Spiel der Rechenoperation betätigt werden.

Die vorstehende Beschreibung der Z 3 veranschaulicht, daß in der Z 3 nicht nur erstmalig die heute noch übliche Programmsteuerung durch aus Operationsteil und Adressenteil bestehenden Befehlen verwendet wurde, sondern daß diese Maschine auch erstmals Teile enthielt, die heute als Befehlsregister und Adressenregister bezeichnet werden. In den Programmlochstreifen wurde auch erstmals das heute wieder aufgegriffene Prinzip

Abbildung 5: Logistik für Addition und Subtraktion



verwendet, die Befehle nach Aufspaltung in mehreren (zwei) Lochzeilen darzustellen. Die Z 3 stellt darüber hinaus die erste technisch brauchbare und auch technisch verwirklichte Konzeption eines modernen Rechners dar. Obwohl durch die Arbeiten von Babbage der Gedanke der Programmsteuerung von Rechenmaschinen mittels Lochkarten, wie sie zur Steuerung von Webstühlen benutzt wurden, zwar grundsätzlich bekanntgeworden ist und von Couffignal Vorschläge für die Grundkonzeption einer selbsttätig arbeitenden Rechenmaschine angegeben worden sind, so fehlen doch in diesen Arbeiten genaue Hinweise auf die konstruktive Lösung des Problems der Steuerung dieser Rechenmaschinen. Wie der systematisch arbeitende Fachmann auf diesem Gebiet an die Lösung der offenen Probleme heranging und herangehen mußte, zeigt der Aufbau und die Steuerung der schon eingangs erwähnten Mark I. Die vorstehende Beschreibung macht vor allem deutlich, wie sehr doch die Z 3 von diesem Aufbau der amerikanischen Maschine abweicht; sie zeigt auch, daß sich heute, nach mehr als 20 Jah-

ren, nicht das in der Mark I verwirklichte Prinzip von Babbage durchgesetzt hat, sondern allein das von Zuse entworfene Prinzip. Es ist daraus ersichtlich, daß nicht nur systematische Arbeit, d. h. Zusammenfügen von bisher bekannten Dingen aus dem Stand der Technik, erforderlich ist, sondern daß ein aus dem Rahmen fallender genialer Gedanke dazugehört, aus dem Bekannten etwas Neues zu machen und einen echten Fortschritt auf dem jeweiligen Gebiet der Technik zu begründen.

1. Dr. K. Zuse »Entwicklungslinien einer Rechengeräte-Entwicklung von der Mechanik zur Elektronik« aus »Digitale Informationswandler«
2. Literatur zu 1)
3. Proceedings of a Symposium on Large Scale Digital Calculating Machinery/ Bd. 16 Annals of the Computation Laboratory of Harvard Univers. Cambridge, Mass. 1948
4. Thèses sur l'Analyse Mécanique, Couffignal, Paris 1938 (S. 1—10)
5. Patentliteratur 1920—1940

7 Zusammenfassung

Die oben gezeigten Kopien aus den Zuse-Foren zeigen die Funktionsweise der Z3 im Detail. Man sieht daran, wie kompliziert, aber doch elegant der Aufbau der Z3 ist. Schauen Sie auch in die Broschüre *Horst Zuse: Rechner Z3r, 2016*, dort werden wesentlich mehr Erklärungen zu der Z3 und der Realisierung der Z3r gegeben. Nun, ein Computer ist nun einmal ein kompliziertes Gerät, auch wenn wir es heutzutage so einfach nutzen.

Problematisch für Konrad Zuse war die Patentanmeldung für die Z3. Zwar führte die Anmeldung von 1936 zu einem Patent auf die in der Z1 und Z2 verwandte mechanische Schaltkreis- und Speichertechnik. Eine 1937 getätigte erste Anmeldung von Programmsteuerung und Rechenwerken wurde wegen mangelnder Offenbarung zurückgezogen. Der gleichzeitigen Anmeldung in den USA wurde Babbage entgegengehalten.

1941 meldete Zuse ein Patent mit 51 Ansprüchen auf alle wichtigen Einrichtungen des Relaisrechners Z3 an. Die Ansprüche bezogen sich insbesondere auf eine programmgesteuerte Maschine mit einem adressierbaren Speicher, einem Rechenwerk für Gleitpunktoperationen und einem Programmwerk zur Steuerung der Rechenabläufe - dies sind genau die Komponenten, die den von Neumann-Rechner ausmachen. Wegen der im Kriege bestehenden Geheimhaltungsvorschriften wurde die Anmeldung erst 1951 bekannt gemacht. Gegen die Patenterteilung wurde zunächst von der Firma Triumph und später von IBM Einspruch erhoben. Erst 1967, 26 Jahre nach der Anmeldung, entschied das Bundespatentgericht auf Ablehnung mit folgender Begründung: Die Neuheit und Fortschrittlichkeit des mit dem Hauptantrag beanspruchten Gegenstandes sind nicht zweifelhaft. Indessen kann auf ihn mangels Erfindungshöhe kein Patent erteilt werden. Eine Rechtsbeschwerde beim Bundesgerichtshof wurde nicht zugelassen. Die Absurdität dieses Urteils stellt den erwähnten Spruch des Honorable Judge Larson, der Eckert und Mauchly ihre ENIAC Patente aberkannte, bei weiten in den Schatten! Anders als anderen, glücklicheren Rechnerpionieren erwuchs Zuse kein Nutzen aus seiner epochalen Erfindung.

8 Kompakte Beschreibug des Computers Z3

Prägnant kann der Computer Z3 wie folgt beschrieben werden.

Jahrestag-Z3

Am 12. Mai 2016 jährt sich zum 75sten Mal der Tag der Vorführung der Rechenanlage Zuse Z3 in der Methfesselstr. 7 in Berlin Kreuzberg durch Konrad Zuse. Die Zuse Z3 gilt heute als der erste funktionsfähige Computer der Welt.

Zuse-Z3: kompakt erklärt

Die Maschine Z3 ist eine frei programmierbare Rechenmaschine. Das Rechenwerk führt die vier Grundrechenarten Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division, sowie die Quadratwurzelberechnung auf Gleitkommazahlen durch. Der Speicher umfasst 64 Worte zu je 22 Bit. Eine Steuereinheit kontrolliert gemäß einem Programm sämtliche Abläufe in der Z3. Die Befehle eines Programms können auch im Einzelschrittmodus eingegeben werden. Der Rechner ist in Digitaltechnik aufgebaut, d. h. die Schaltungen sind gemäß den Regeln der Schaltalgebra aufgebaut. Über die Ein-/Ausgabe-Konsole werden die Daten als dezimale Gleitkommazahlen ein- bzw. ausgegeben.

Erläuterung von Begriffen

Computer

Ein Computer besteht aus einem Leit-/Steuerwerk, einem Rechenwerk, einem Ein-/Ausgabewerk sowie der Verbindungsstruktur. Die wichtigste Eigenschaft eines Computers ist die Programmierbarkeit. Der Aufbau der Z3 entspricht dem eines modernen PCs.

Binär-Bit

Die Zahlen, die die Z3 verarbeitet, sind im Dualsystem kodiert, d. h. für die Darstellung von Zahlen stehen nur zwei Ziffern, 0 und 1 zur Verfügung (Zahlensystem zur Basis 2, binär). Die Zahl 12 im Dezimalsystem (Basis 10) lautet 1100 im Dualsystem. Einzelne Binärziffern (0/1) werden als Bit bezeichnet (abgeleitet von *binary digit*). Konrad Zuse sagte Ja-Nein Werte, denn das Wort Bit gab es noch nicht.

Gleitkommazahlensystem-Mantisse-Exponent

Die Darstellung von Zahlen im Gleitkommaformat entspricht einer halblogarithmischen Form, z.B. $5,7 \cdot 10^3$ im Dezimalsystem (Basis 10) für die Zahl 5700. Eine Zahl in Gleitkommaformat setzt sich aus Vorzeichen, Mantisse und Exponent zusammen. Bei dem genannten Beispiel ist das Vorzeichen +, die 5,7 ist die Mantisse, die 3 der Exponent und die 10 die Basis. Dies ist auch im Dualsystem möglich. Die Gleitkommadarstellung ermöglicht das Rechnen mit sehr großen und kleinen Zahlen. Diese Darstellung gibt der Z3 einen großen Zahlenraum: 10^{20} bis 10^{-20} . Die Genauigkeit betrug vier Dezimalstellen, später bei der Z4 schon sechs Stellen.

Arithmetische-Operationen-Rechenwerke

Die Z3 führt die arithmetischen Grundoperationen +, -, *, / und die Berechnung der Quadratwurzel auf Gleitkommazahlen in binärer Darstellung aus. Dazu hat die Z3 zwei Teilrechenwerke für ganze Zahlen (Mantisse und Exponent). Die beiden Rechenwerke korrespondieren.

Binärer-Speicher

Die Daten werden in binärer Form als Worte im Speicher abgelegt. Ein Wort bezeichnet die Zugriffseinheit.

Frei-Programmierbar

Die gesamte Maschine kann durch eine sinnvolle Folge von Befehlen auf einem Lochstreifen gesteuert werden, bei der Z3 sind dies die Befehle für vier Grundrechenarten, die Quadratwurzelberechnung, zwei Speicherbefehle (lesen und schreiben) und die Eingabe- und Ausgabebefehle.

Steuerwerk-Arithmetische-Ausnahmebehandlung

Das Steuerwerk kontrolliert alle Abläufe im Rechner Z3. Beispielsweise löst der Multiplikationsbefehl in der Z3 die wiederholte Ausführung einer Addition aus (ähnlich Rechnung mit Papier und Bleistift). Dazu gehört auch die arithmetische Ausnahmebehandlung, z.B. stoppt die Z3 bei der Division durch 0 oder wenn eine dargestellte Zahl zu groß wird.

Ein- und Ausgabe

Die Ein- und Ausgabe der Daten erfolgt über eine Konsole. Die Daten werden als Dezimalzahlen eingegeben und intern in ihre Binärform umgewandelt. Bei der Ausgabe werden wieder in die entsprechende Dezimalform umgewandelt und dann ausgegeben.

Digitalrechner

Der Rechner ist aus digitalen Schaltungen aufgebaut. Das Grundelement kann zwei Zustände annehmen (z.B. links/rechts wie bei einer Bahnweiche, Strom an/aus wie bei einem Relais oder Lichtschalter). Mit den Grundelementen werden logische Funktionen durch Verknüpfung mit den logischen Grundoperationen (UND, ODER, NEGATION) realisiert.

9 Zuse Boschüren von Horst Zuse

Neu sind die **fett** gedruckten Broschüren.

Horst Zuse: Konrad Zuse Multimedia Show 2007

Diese DVD ist von Horst Zuse nach dem Ableben von Konrad Zuse im Jahr 1995 konzipiert worden. Zugegeben, damals sicherlich mit W2000 und Windows XP zeitgemäß, aber heute schreiben wir 2016. Dennoch, unter W7 im XP-Modus funktioniert diese DVD, und die vielen Videos aus der Urzeit des Computers sind zeitlos interessant, auch die Historie ist korrekt dargestellt und dazu die vielen Simulationen von Zuse-Maschinen. So ist diese DVD selbst schon Historie. Siehe <http://www.horst-zuse.homepage.t-online.de/dvd-beschreibung.html> oder einfach www.zuse.de. Auch unter Windows 7.

Horst Zuse: Rechenanlage Zuse Z3r, 2016.

25 Seiten

Diese Broschüre gibt sehr viele Informationen zur neuen Z3r auch zur Z3, die anlässlich des 100. Geburtstages von Konrad Zuse im Jahr 2010 von Horst Zuse präsentiert wurde. Mit vielen Beispielen wird die Funktionsweise dieser Maschine erläutert. Diese neue Z3r steht im Deutschen Technik Museum Berlin.

Horst Zuse: Konrad Zuses Werk, 2007

124 Seiten.

Diese Broschüre enthält neben Informationen zu Konrad Zuse selbst die Beschreibung vieler Zuse-Maschinen anhand der Originalprospekte der Zuse KG. Eine solche Veröffentlichung existiert bisher nicht.

Horst Zuse: Die Rechenanlage Z3-Erster Computer der Welt, 2016.

35 Seiten

Diese Broschüre beschreibt die Z3 von 1941 anhand von Originalveröffentlichungen der Zuse KG in den Zuse-Foren von 1962 und 1963. Sie wird vom Autor zum 75-jährigen Jubiläum der Z3 am 12. Mai 2016 herausgegeben.

Horst Zuse: Die Zuse Computer -Zuse-Apparatebau Berlin, Zuse-Ingenieurbüro Hopferau, Zuse KG, 2016.

98 Seiten

Diese Broschüre beschreibt den Werdegang der Zuse-Apparatebau in Berlin (1941-45), des Zuse Ingenieurbüros Hopferau (1946-49), und der Zuse KG (1949-1971). Es werden fast alle während dieses Zeitraumes gebauten Zuse-Maschinen mit Fotos und erläuterten Texten dargestellt. Die Zuse KG hat im oben genannten Zeitraum ca. 800 Maschinen gefertigt. Außerdem enthält diese Veröffentlichung die Publikation: 25 Jahre Zuse KG von 1961.

Horst Zuse (Hrsg): Lorenz Hanewinkel: Konstruktion der Maschine Z22

30 Seiten.

Die Maschine Z22 ab 1957 war eine wichtige Rechenanlage für Hochschulen, Universitäten und wissenschaftliche Institute in Deutschland, aber auch für Industriefirmen, wie die optische Industrie.. Sie führte die Datenverarbeitung in die oben genannten Institutionen ein. Es war eine direkte Konkurrenz zur IBM 650, aber kostete weit weniger als die Hälfte bei fast gleicher Leistung.

Horst Zuse: Konrad Zuse's Computer Z3

17 Seiten

Der Zuse Computer Z3 beschrieben in englischer Sprache.

Zusammengefasst: Diese Broschüren enthalten Text- und Bildmaterial, welches aus dem Archiv von Horst Zuse sorgfältig ausgewählt wurde. Diese Broschüren können über das **Internet** unter www.zuse.de, dem Konrad-Zuse-Museum Hünfeld sowie dem Deutschen Technik Museum in Berlin bezogen werden (Museumshops).

Berlin, April 2016

10 Über den Autor



Horst Zuse wurde am 17.11.1945 geboren und studierte von 1967 bis 1973 Elektrotechnik an der Technischen Universität Berlin (TUB). Im Jahr 1985 promovierte er auf dem Gebiet der Softwarekomplexitätsmaße und es folgte 1987 ein einjähriger Forschungsaufenthalt am IBM Thomas J. Watson Research Center in Yorktown Heights / New York in den USA. 1991 publizierte er das Buch: *Horst Zuse: Software Complexity - Measures and Methods*, im *DeGruyter Verlag* und 1998 erschien das Buch: *Horst Zuse: A Framework of Software Measurement*, im *DeGruyter Verlag*. Im Jahr 1998 verlieh der Fachbereichsrat Informatik der TU-Berlin ihm im Rahmen des Habilitationsverfahrens die Lehrbefähigung und –befugnis (Privatdozent) auf dem Gebiet der Praktischen Informatik. Von 2003 bis 2006 war er Gastprofessor an der FH-Lausitz und wurde am 20. November 2006 zum Professor der Universität Cottbus ernannt.

Adresse des Autors

Professor Dr.-Ing. Horst Zuse
10719 Berlin
Tel.: +49 - 30-881 59 88
Fax: +49 - 30 -886 81 678

E-mail: horst.zuse@t-online.de
Internet: <http://www.zuse.de>