

DIE ERGONOMISCHEN ERFINDUNGEN DER ZUSE-MASCHINEN IM INTERNATIONALEN KONTEXT

HORST ZUSE

1 Einleitung

Die Ergonomie ist die Wissenschaft von der Gesetzmäßigkeit menschlicher Arbeit, zentral ist dabei die Verbesserung der Schnittstelle zwischen Benutzer (= Mensch) und Objekt (= Maschine), also der Benutzerfreundlichkeit. Benutzerfreundlichkeit (auch »Benutzungsfreundlichkeit«) bezeichnet die vom Nutzer erlebte Nutzungsqualität bei der Interaktion mit einem System. Eine besonders einfache, zum Nutzer und seinen Aufgaben passende Bedienung wird dabei als benutzerfreundlich angesehen.

Es war ein enorm hoher technischer Aufwand, vollautomatische programmgesteuerte Rechenmaschinen, die wir heute als Computer bzw. Digitalrechner bezeichnen, Ende der 30er und Anfang der 40er Jahre zu konstruieren. Die Bedienungsfreundlichkeit der frühen Rechenmaschinen war sehr unterschiedlich ausgeprägt. Bei einigen Rechenmaschinen war die Programmierung bzw. Konfigurierung zeitlich sehr aufwendig, da sehr unterschiedliche Erstellungsprozeduren und Speichermedien für die Programme verwendet wurden. Die von Konrad Zuse konstruierten Rechenmaschinen Z1-Z4 (1936-1950) verfügten über speziell konstruierte ergonomische Schnittstellen, die eine direkte Interaktion zwischen dem Nutzer und der Rechenmaschine im Dialog ermöglichten. Diese ergonomischen Erfindungen Konrad Zuses im internationalen Kontext sind bisher nur wenig beachtet worden.

In diesem Beitrag werden zunächst die ergonomischen Erfindungen Konrad Zuses bei den Maschinen Z1-Z4, dem Planfertigungsteil der Maschine Z4 und dem geplanten Planfertigungsgerät beschrieben. Dann werden dann die ergonomischen Konzepte der frühen Rechenmaschinen aus den USA und England betrachtet und anschließend beide Richtungen miteinander verglichen.

2 Konrad Zuses Rechenmaschinen Z1-Z4 und seine ergonomischen Erfindungen

Die Architektur der Zuse-Maschinen (Z-Maschinen) ist schon in vielen Artikeln und Büchern beschrieben worden. Beispiele sind: Der Artikel von Alex (1997) im Spektrum der Wissenschaft, der Buchklassiker über die Entwicklung der Rechenmaschinen von de Beaclair (1968) und das Buch von Paul Ceruzzi (1983) mit einer sehr detaillierten Abhandlung der Zuse-Maschinen. Das Buch von Karl Steinbuch (1966), heute ebenfalls ein Klassiker, beschäftigt sich durchaus kritisch mit der Rolle der deutschen Computerindustrie um 1965. Das Buch von Raul Rojas (1998) analysiert und beschreibt die Rechenmaschinen von Konrad Zuse im Detail. Der Band von Hans Dieter Hellge (2004) enthält umfangreiche Abhandlungen über Konrad Zuses Rechenmaschinen. In Horst Zuse (2007a) ist eine detaillierte Beschreibung der Z3 zu finden und die CD des Autors (2007b) ist der Versuch, auf einem Multimedia-Medium das Werk Konrad Zuses, aber auch anderer Computerpioniere, darzustellen und mit umfangreichem Bild- und Filmmaterial sowie Simulationen von Z-Maschinen zu illustrieren.

Wenig beachtet wurden bisher die ergonomischen Erfindungen Konrad Zuses bei der Konstruktion seiner frühen Rechenmaschinen. In den dem Autor vorliegenden internen Berichten von Konrad Zuse aus den Jahren 1936 bis ca.1947 finden sich sehr viele Anmerkungen bezüglich der Handhabung der von ihm geplanten Rechenmaschinen. Die prägnanteste Formulierung ist aus unserer Sicht die Beschreibung der idealen Rechenmaschine für den Ingenieur. Am 30.1.1936 schreibt er:

»Die Anforderungen, die an die ideale Rechenmaschine des Ingenieurs gestellt werden müssen, gehen aus den folgenden Überlegungen hervor: Der Ingenieur hat viel mit festen Formeln zu arbeiten, die immer wiederkehren. Man hat gewisse Ausgangswerte, und die Arbeit besteht nun darin, durch bestimmte, für eine Formel immer gleiche Aufeinanderfolge von Grundrechenarten zwischen bestimmten Zahlen das Resultat zu berechnen.

Der Ingenieur braucht Rechenmaschinen, die diese Rechenoperationen automatisch ausführen, indem der Rechenplan auf einem Lochstreifen festgehalten wird, der die Befehle für die einzelnen Rechenoperationen selbsttätig und nacheinander an die Maschine gibt.

Die Maschine muß auf Befehl des Lochstreifens jede verlangte Grundrechnung vollautomatisch ausführen. Ferner muß die Maschine über ein Speicherwerk verfügen, in welchem die während der Rechnung auftretenden Zahlen der Nummer nach geordnet werden können, und aus denen durch ein mechani-

sches Wählwerk jede gewünschte Zahl abgelesen werden kann. Das Speichern und Ablesen der Zahlen wird ebenfalls durch den Befehlslochstreifen dirigiert.«

Durch die Spezifizierung der idealen Rechenmaschine für den Ingenieur leitet Konrad Zuse folgende Möglichkeiten seiner Maschine für den Ingenieur ab:

»Durch die Maschine wird dem Ingenieur die mechanische Rechenarbeit nicht nur abgenommen, sondern ihr Umfang kann enorm gesteigert werden. Man kann die Möglichkeiten der Maschine wie folgt abstufen:

Rationalisierung der Rechnungen ohne im wesentlichen von dem bisherigen Rechenverfahren abzuweichen.

Entwicklung neuer Methoden zur Lösung technischer Probleme.

Erschließung von Gebieten, die bisher der Rechnung nicht zugänglich waren« (Zuse 1936, S. 12 ff.).

Bemerkenswert sind die Anmerkungen von Konrad zum Zahlensystem, welches in der Maschine verwendet werden soll und der Bezug zum Ingenieur. Wir zitieren dazu aus, Zuse (1936):

»Es ist bisher für selbstverständlich gehalten worden, dass Rechenmaschinen nach dem Dezimalsystem arbeiten müssen. Das Dezimalsystem hat sich derart tief in unserm Denken festgesetzt, dass wir geneigt sind, es für ›das‹ Zahlensystem überhaupt zu halten. Hat man Maschinen, die lange technische Rechnungen automatisch ausführen, bei denen der Bedienende die einzelnen Zahlen der Zwischenrechnung gar nicht zu Gesicht bekommt, so ist die Art des benutzten Zahlensystems gleichgültig. Ist das Dezimalsystem unpraktisch, so kann man ein geeigneteres wählen, vorausgesetzt, dass es keine Schwierigkeiten macht, die Anfangs- und Endwerte der Rechnung ins Dezimalzahlensystem zu übersetzen.«

Wir fassen Konrad Zuses Ideen des einfachen Rechnens für den Ingenieur zusammen:

- Die Rechenmaschine soll ideal für den Ingenieur sein.
- Der Ingenieur soll von der bisher gewohnten Rechenart nicht abweichen müssen.
- Die Eingabe und Ausgabe der Zahlen soll im gewohnten Dezimalsystem erfolgen.
- Die Maschine soll frei programmierbar sein, d.h. mit wenigen sinnvollen Befehlen, die sich auf dem Speichermedium eines Lochstreifens befinden, zu bedienen sein.

Wir sehen hier die ersten wichtigen ergonomischen Konzepte von Konrad Zuse zur Konzeption seiner frühen Rechenmaschinen Z1-Z4. Da die Maschinen Z1 und Z3 sich von der Architektur her fast gleichen (Das Rechenwerk der Z3 verfügte zusätzlich über die Quadratwurzel und die arithmetische Ausnahmebehandlung, die Z2 war nur ein Versuchsmodell zum Testen der Telefonrelais mit dem mechanischen Speicher der Z1) betrachten wir nun die Realisierung der obigen Konzepte bei der vollautomatischen Rechenmaschine Z3.

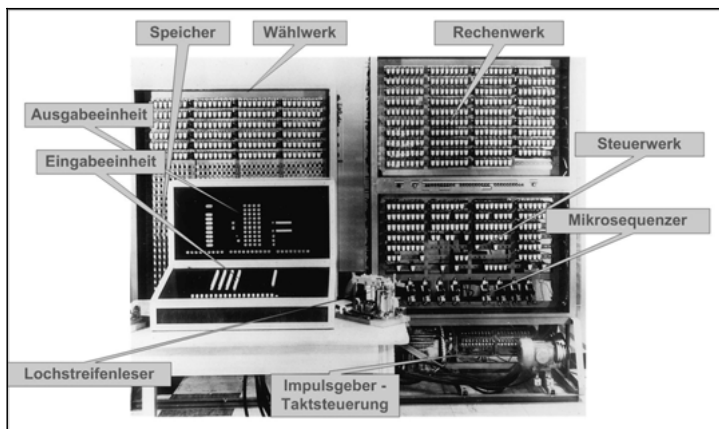
Die Rechenmaschine Z3

Die vollautomatische programmgesteuerte Rechenmaschine Z3, die am 12. Mai 1941 in Berlin-Kreuzberg in allen Komponenten Wissenschaftlern der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) funktionsfähig vorgestellt wurde, rechnet mit binären Gleitkommazahlen. Die Ein- und Ausgabe erfolgt aber mit dezimalen Gleitkommazahlen, um dem Ingenieur einen einfachen Umgang mit der Ein- und Ausgabe von Zahlen zu ermöglichen. Dazu ist eine Übersetzung von dezimalen Gleitkommazahlen in binäre Gleitkommazahlen notwendig, die auch schon von der Maschine Z1 durchgeführt wurde.

Abbildung 1 zeigt den Nachbau der Maschine Z3 von 1961 mit den wichtigsten Komponenten. Es ist verblüffend zu beobachten, dass die logische Grundarchitektur moderner Computer eine große Ähnlichkeit zu der Maschine Z3 aufweisen. Die Z3 wurde am 12. Mai 1941 fertig gestellt und gilt heute als der erste funktionsfähige, frei programmierbare, auf dem binären Gleitkommazahlensystem basierende Rechner der Welt. Verkürzt kann gesagt werden: Die Z3 ist der erste funktionsfähige Digitalrechner.

Die Maschine Z3 konnte in zwei Betriebsmodi betrieben werden, und zwar in dem Programmmodus und dem manuellen Modus. Konrad Zuse beschreibt diese Betriebsmodi selbst bei der Konstruktion der Z4 (siehe unten). Ist kein Rechenplan auf dem Lochstreifen vorhanden, dann arbeitet die Maschine immer im manuellen Modus, d.h. im Dialogbetrieb. Ein laufender Rechenplan kann durch den Befehl Lu (Eingabe einer Zahl) unterbrochen werden. Dieser Befehl bewirkt den Stop des Ablaufes des Rechenplanes und fordert die Eingabe eines Zahlenwertes über die Tastatur. Die Maschine Z3 befindet sich jetzt im manuellen Modus. Wird ein Rechenplan ausgeführt, dann befindet sich die Maschine im Programmmodus.

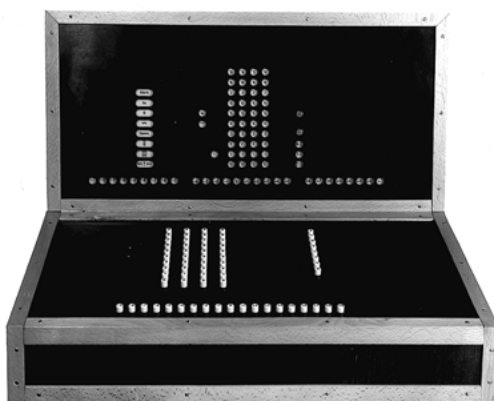
Abb. 1: Der Nachbau der Maschine Z3 von 1961 mit den Komponenten: Speicher, Wählwerk, Rechenwerk, Steuerwerk, Eingabe- und Ausgabeeinheit, Lochstreifenleser, Mikrosequenzer und dem Impulsgeber mit der Taktsteuerung. Die Original-Z3 Maschine enthielt noch einen zweiten Speicherblock, während der Nachbau nur einen Speicherblock mit 32 Worten mit je 22 Bits enthält (Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin).



Für Rechenoperationen, unabhängig davon, ob im Programmmodus oder im Manuellen Modus gearbeitet wird, stehen die beiden Register R1 und R2 als Kurzspeicher (22 Bits) für die Operanden der arithmetischen Operationen zur Verfügung. Gerechnet wird in der umgekehrten polnischen Notation, wie z.B. bei dem Taschenrechner HP 45 (1972) oder HP11 (1998). Über das Tastenfeld in der Mitte kann die Mantisse mit einer Genauigkeit von vier Dezimalziffern eingegeben werden, die vordere Tastenreihe erlaubt die Eingabe des Exponenten von -8 bis 8 . Mit den Tasten auf der rechten Seite können folgende Maschinenoperationen durchgeführt werden: Ld: Anzeige des Inhaltes von Register R1 auf der Ausgabeeinheit (oberer Teil der Ausgabeeinheit); R1R2: Speichern der eingegebenen Zahl in Register R1 oder R2; Ls1: Addition der Inhalte der Register R1 und R2: $R1 := R1 + R2$ (Zu lesen: die Inhalte der Register R1 und R2 werden addiert und das Ergebnis wird R1 zugewiesen); Lm: Multiplikation der Inhalte von Register R1 und R2: $R1 := R1 * R2$; Li: Division der Inhalte von Register R1 und R2: $R1 := R1 / R2$; Lw: Quadratwurzel des Inhaltes von Register R1: $R1 := \text{SQR}(R1)$; A: der Rechenplan (Programm), falls vorhanden, wird fortgesetzt. Die Umschaltmöglichkeit vom Programmmodus in den Dialogmodus ist für den Nutzer sehr hilfreich und ist ein bei vielen programmierbaren Taschenrechnern beibehaltenes Prinzip.

Die vertikale Lampenreihe oben links zeigt nicht erlaubte arithmetische Operationen an, wie z.B. die Division durch 0 (Nicht realisiert bei den Maschinen Z1 und Z2). Diese Anzeigen sind ein weiterer Aspekt der Benutzerfreundlichkeit, denn Konrad Zuse wollte vermeiden, dass seine Maschine inkorrekt rechnet und dies dem Nutzer verborgen bleibt. Wir beschreiben dieses Konzept genauer bei der Rechenmaschine Z4.

Abb. 2: Die Ein- und Ausgabeeinheiten der Z3, Nachbau von 1961, (Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin).



2.2 Ergonomische Konstruktionsideen bei der Rechenmaschine Z4

Mit der Konstruktion der Maschine Z4 begann Zuse im Jahr 1942 in Berlin-Kreuzberg. Der Auftrag zum Bau dieser Rechenmaschine erfolgte 1942 durch die Henschel-Flugzeugwerke in Berlin Adlershof. In dieser Zeit bezeichnete er seine Maschinen noch mit V1-V4 (Versuchsmodelle 1-4). Erst nach dem Zweiten Weltkrieg erfolgte die Umbenennung in Z1-Z4. Die Z4 sollte die Maschine sein, die in Serie produziert und an Ingenieurbüros ausgeliefert werden sollte. Während Zuse die Maschinen Z1-Z3 noch als Prototypen betrachtete, wurden bei der Konstruktion der Z4 weitere Ideen verwirklicht, die es dem Anwender bzw. Ingenieur erleichtern sollten, mit einer solch komplexen Maschine zu arbeiten.

In einem Brief vom 11. November 1945 an die Eltern in Berlin aus Hinterstein finden wir Ausführungen, die die Bedeutung der Maschine Z4 für ihn belegen. »Aus unserer ersten Göttinger Zeit haben wir ja noch Nachricht geben können. Kurz vor Ostern war ich mit der Aufstellung

des Gerätes fertig und konnte vor den Professoren der AVA (Autor: Aerodynamische Versuchsanstalt) die Maschine einwandfrei arbeitend vorführen. Es war dies der Moment, auf den ich etwa 10 Jahre gewartet hatte, wo meine Arbeit endlich den gewünschten Erfolg brachte« (Konrad Zuse, 1945).

Im Jahr 1943 fasste Zuse (1943b) die Ideen zum Bau der Maschine Z4 zusammen. Zuerst wird der Begriff des Rechnens neu gefasst:

»Mit Rechnen wird in diesem Bericht ganz allgemein das Rechnen mit Umständen und Bedingungen bezeichnet. Das Rechnen mit Zahlen ist nur eine spezielle Art dieses allgemeinen Rechnens, das durch folgenden Satz definiert wird: Rechnen ist die Ableitung von Resultatangaben aus irgendwelchen gegebenen Angaben nach einer Vorschrift«.¹

Wie schon die Z1, Z2 und Z3 wird auch die Z4 durch einen Rechenplan gesteuert. Konrad Zuse führt dazu aus:

»Längere oder sich häufende wiederholende Rechengänge werden durch Rechenpläne, das sind Lochstreifen, die von den Rechengeräten abgetastet werden, selbsttätig gesteuert. Ein Speicherwerk dient zur Aufnahme von Angaben, die errechnet und zu einem späteren Zeitpunkt wieder benötigt werden; die Abgabe der Werte an das Speicherwerk und ihre Entnahme aus demselben wird ebenfalls durch die Rechenpläne selbsttätig gesteuert. Die Geräte, die schon geliefert oder im Bau sind, arbeiten mit Rechenplänen, die vom Menschen aufgestellt werden. Die Wege, die zur Entwicklung von Rechengeräten führen, die für ein begrenztes Aufgabengebiet den Rechenplan, der für die Lösung einer Aufgabe benötigt wird, selbst aufstellen und herstellen, sind schon geklärt. Solche Rechengeräte werden nicht nur die Zahlenrechnungen durchführen, sondern auch selbst die Formeln ableiten, nach denen gerechnet werden muss. Damit eröffnet sich in noch viel weiterem Ausmass wie bei den algebraischen Rechengeräten die Möglichkeit, technische und wissenschaftliche Fachkräfte von schematischen Denk- und Rechenarbeiten zu befreien und dadurch deren Arbeitskraft zu vervielfachen.«

1 Konrad Zuse (1937) verwendete des öfteren den Begriff: *Angaben*. In einem Bericht von 1937 beschreibt er sehr detailliert, was er unter Angaben versteht: »Diese können sehr verschiedene Bedeutungen haben, z.B. Zahlen, Aussagen, Namen, Kennziffern, Dienstgrade, Daten, Befehle, Nachrichten, Schlussfolgerungen, usw. Er schreibt dann weiter: Gemeinsam ist allen die Variabilität ihrer Aussage, denn wenn jede Ausgangsangabe nur eine Möglichkeit zuließe, so wäre das Rechnen überflüssig, da ja dann nur noch ein Resultat in Frage käme. So ist z.B. das Vorzeichen einer Zahl zweifach variabel, eine Dezimalzahl 10-fach, ein Buchstabe 26-fach, die Angabe über die Batallionszugehörigkeit dreifach variabel.«

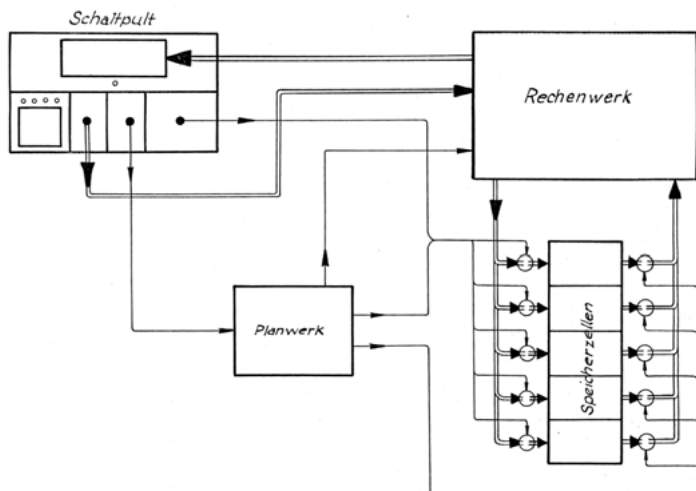
Zuse bezeichnet die Rechenmaschinen Z1-Z4 als algebraische Rechengерäte und führt dazu aus:

»Die algebraischen Geräte sind überall dort mit bester Wirkung einzusetzen, wo die gleichen Rechnungen mit verhältnismäßig großem Zahlenaufwand durchgeführt werden müssen. Die Leistungen der Geräte liegen etwa bei 30 bis 50 Rechenoperationen pro Minute. Es können also z.B. Gleichungssysteme mit einer großen Zahl von Unbekannten in sehr kurzer Zeit numerisch durchgerechnet werden. Aber auch in Fällen, in denen der Rechenplan oft wechselt, sind die Geräte mit Erfolg anwendbar. Die Aufstellung der Rechenpläne erfordert nur etwa die gleiche Zeit wie sonst, die erste Rechnung erfolgt also ebenfalls sehr schnell. Die Geräte sind dabei wesentlich universeller als die bekannten Spezialgeräte anderer Hersteller, etwa zum Lösen von Gleichungssystemen, Determinanten usw., welche zum Teil ausgeführt und zum Teil entworfen sind. Man kann z.B. mit den hier beschriebenen Geräten nicht nur die Gleichungen an sich lösen, sondern auch die gesamte vorbereitende Rechenarbeit, welche zur Bestimmung der Koeffizienten der Gleichung dient, damit bewältigen. Je nach Aufbau des Gleichungssystems können diese Rechnungen bekanntlich das Mehrfache des Rechenaufwandes erfordern, der zur Lösung der eigentlichen Gleichungen erforderlich ist. Ein weiterer Vorteil ist der, dass der einmal aufgestellte Rechenplan beliebig lange in Form von Lochstreifen aufbewahrt werden kann, ferner können zusammenhängende Rechnungen so aufgebaut werden, dass sie aneinander anschliessen und Zahlenübertragungen nicht nötig sind. Nur bei verwickelten Fällen, wie sie in der Praxis häufig vorkommen, ist eine weitgehende Mitarbeit des Menschen erforderlich.«

Er führt dann weiter aus, dass die Leistung des algebraischen Rechengерätes erweitert werden kann auf das Rechnen mit komplexen Größen, dabei rechnen die Rechengерäte selbsttätig komplex weiter, sobald komplexe Zahlen auftreten, ohne dass der Rechenplan geändert werden muss. Trigonometrische, Hyperbolische Funktionen und ähnlichen werden erweitert auf die Bestimmung der Wurzeln algebraischer Gleichungen 3. und höheren Grades. Größen, die durch rechnerisch nicht erfassbare Kurven gegeben sind, können bestimmt werden. Funktionswerte können gespeichert werden und Interpolationen der Zwischenwerte sind möglich. Numerische Integration von Differentialgleichungen sind ebenfalls vorgesehen.

Im Jahr 1943 beschreibt Zuse (1943b) die konstruktiven Einzelheiten der Rechenmaschine Z4. Wegen der Bedeutung der ergonomischen Konzepte der Maschine Z4 zitieren wir hier eine längere Passage:

Abb. 3: Schematische Darstellung der Rechenmaschine Z4
(Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin).



»Es handelt sich um eine algebraische Rechenmaschine, welche zur Aufgabe hat, längere schematische Rechenabläufe der Zahlenrechnung selbsttätig durchzuführen. Das Gerät besteht aus folgenden Teilen:

A) Tastatur und Anzeige-Vorrichtung zum Eintasten der Ausgangswerte, zum Ablesen der Resultatwerte und zum Herstellen der Rechenpläne. Das Eintasten der Werte erfolgt durch eine sogenannte Zehnertastatur mit 10 Tasten für die Ziffern 0 - 9, dazu kommen die Tasten »,«, »Vorzeichen« »imaginär«, »Irrtum«, »fertig«, »0«, »,« »∞«, $\times 10^6$, $\times 10^{-6}$. Die Zahl wird wie bei einer Schreibmaschine einschliesslich des Kommas getastet. Also z.B. - 0,00347 $\times 10^{-6}$. Es können jedoch nur Ziffernfolgen von 5 - von 0 verschiedenen Ziffern getastet werden. Also z.B. 35 431 000 aber nicht 05 431 026. Die Anzeige der Resultatwerte erfolgt entsprechend so, dass die Folge der von 0 verschiedenen Ziffern angezeigt wird und relativ dazu die Lage des Kommas. Eventuell wird noch ein Potenzfaktor angezeigt. Wir haben ferner die Anzeigen für »0«, »∞«, »unbestimmt«, »imaginär«, »Vorzeichen«. Die Anzeige der Zahlen erfolgt zunächst durch Aufleuchten von Lampen, später sind andere Mittel vorgesehen. Die Kommandotastatur zerfällt in die Kommandotasten für die einzelnen Operationen und in die Kommandotasten für die Speicherzellen. [...]

Mit Hilfe der Speicherwerkstasten können die einzelnen Speicherzellen geschaltet werden und zwar sowohl zum Ablesen als auch zum Speichern. Wir haben 16 Gruppen von Speicherzellen zu je 64 Zellen, also im Ganzen 1024 Speicherzellen.«

Es ist hier auffallend in welcher Größenordnung der Speicher für die Maschine V4 (Z4) geplant war. Tatsächlich war die Maschine Z4 bis zum 16. März 1945 (Tag der Flucht aus Berlin) in Berlin nicht funktionsfähig, und der Speicher umfasste nach einem mündlichen Bericht von ihm nur 12 Speicherworte zu je 32 Bits. Er führt dann weiter aus:

»B) Rechenwerk: Dem Rechenwerk fällt die Durchführung der eigentlichen Rechenoperationen zu. Zunächst werden die von der Tastatur kommenden Werte aus dem Dezimalsystem ins Sekundalsystem übersetzt. (Zahlensystem mit der Basis 2, auch Dualsystem oder Dyadik genannt). Dieses hat den Vorteil, dass die Relaischaltungen besonders einfach ausfallen. Die Übersetzung erfolgt vollautomatisch, ebenso die Rückübersetzung der Resultatwerte ins Dezimalsystem. Die bedienende Person merkt von diesem Vorgang überhaupt nichts. Die möglichen Rechenoperationen sind oben (Kommando-Tastatur) aufgeführt.

Das Rechenwerk hat 2 Bereitschaftsspeicher (Autor: Register mit 32 Bits), auf denen die beiden Operanden zunächst gespeichert werden. Das Resultat kann auf einem dieser Speicher abgesetzt werden, bzw. gleich ins Speicherwerk gegeben werden. Das Rechenwerk arbeitet mit einer Genauigkeit von etwa 7 - 8 Dezimalstellen.«

Die Genauigkeit von 7-8 Dezimalstellen ist aus unserer Sicht etwas zu hoch angesetzt. Die Wortlänge betrug 32 Bits, davon waren 1 Bit für das Vorzeichen der Mantisse und sieben Bits für den Exponenten reserviert. Es verbleiben also 24 Bits für die Mantisse. Für die Darstellung einer Dezimalziffer werden vier Bits benötigt, d.h. die Genauigkeit liegt bei sechs Dezimalziffern.

»Die Größenordnung der Zahlen kann sich jedoch zwischen 10^{+20} und 10^{-20} bewegen. Zu diesem Zweck werden die Zahlen in der Form $y = 2a \times b$ verschlüsselt, wobei a ganzzahlig ist und b zwischen 1 - 2 liegt. Die Größenordnung der Zahlen wird durch die Maschine selbsttätig bestimmt. Ebenso erfolgt die Bestimmung des Vorzeichens selbsttätig.

Die Verwendung der halblogarithmischen Form [Autor: heutzutage als Gleitkommazahlen bezeichnet] ist bei technischen Rechnungen angebracht, da hier innerhalb der gleichen Rechnung die Zahlen von sehr verschiedener Größenordnung sein können. Da die Genauigkeit aber nur beschränkt zu sein braucht, so wird selbsttätig nicht jedes Mal der ganze Stellenbereich der Zahlen durch die Rechnung hindurch geschleppt. Besonders vorteilhaft wirkt sich dies auf den Umfang der Speicherwerke aus. Treten Zahlen auf, die die angegebene Größenordnung ($10^{20} < x < 10^{-20}$) überschreiten, so gibt die Maschine den Bereich an, in dem das Resultat liegt, z.B. »Sehr gross« + »sehr gross« =

»sehr gross«; »sehr gross« - »sehr gross« = »unbestimmt«, 0/0 = unbestimmt. Wird dann z.B. das Zeichen »unbestimmt« mit weiteren Zahlen kombiniert ist das Resultat wieder unbestimmt. Auf diese Weise wird vermieden, dass die Maschine Fehlresultate errechnet, wenn sie längere Rechengänge ohne Aufsicht des Menschen macht.

C) Speicherwerk: Das Speicherwerk dient der Annahme der Ausgangs- und Zwischenwerke einer Rechnung. Es besteht aus mehreren Zellen (einige Hundert bis Tausend, je nach Ausbau) und kann je Zelle eine Zahl aufnehmen. (Einschließlich Vorzeichen und Angabe über die Lage des Kommas). Die einzelnen Speicherzellen können durch ein Wählwerk W angerufen werden und es können jederzeit vom Rechenwerk her Zahlen auf jede beliebige Speicherzelle übertragen werden und umgekehrt.

D) Planwerk: Dem Planwerk fällt die Aufgabe der Steuerung der Gesamtanlage durch den Rechenplan zu. Von hier aus werden einerseits die Befehle an das Wählwerk und das Speicherwerk gegeben, um die Operanden einer Operation auf das Rechenwerk zu übertragen bzw. das Resultat einer Operation zu speichern und andererseits Befehl an das Rechenwerk über die auszuführenden Rechenoperationen. Dazu kommen die Befehle, die das Übertragen von Zahlen von der Tastatur auf das Rechenwerk und zum Anzeigen der Resultate bewirken. Die Rechenpläne sind auf Lochstreifen festgehalten und werden durch Abtaster schrittweise abgetastet. Die Speicherzellennummern und Operationsbefehle sind verschlüsselt, so dass jedem einzelnen Befehl eine bestimmte Lochkombination zugeordnet ist.

Zum Planwerk gehört noch eine Vorrichtung zum Herstellen der Lochstreifen [Planfertigungsteil]. Diese besteht in der Hauptsache aus einem Locher, durch welchen die Papier- bzw. Filmstreifen mit den erforderlichen Lochkombinationen versehen werden. Die Steuerung erfolgt durch die Kommandotastatur [Siehe unten die ausführliche Beschreibung des Planfertigungsteils].

E) Arbeitsweise der Maschine: Beim Arbeiten der Maschine hat man folgende Möglichkeiten. Arbeiten ohne Rechenplan. In diesem Falle werden sämtliche Kommandos von Hand am Kommandopult eingetastet. Man tastet nacheinander die Ausgangswerte in die Maschine und gibt nach jeder Eintastung das Speicherkommando, welches angibt, auf welcher Zelle die Zahl gespeichert werden soll. Darauf gibt man die Kommandos für die einzelnen Operationen.

F) Herstellung des Rechenplanes: Soll nur der Rechenplan hergestellt werden, so werden die Kommandos entsprechend A) gegeben, jedoch ohne Eintastung der Ausgangswerte. Die Herstellung des Rechenplanes erfolgt in diesem Falle

also noch schneller als entsprechend E). Allerdings muss eine Kontrolle des Rechenplanes mit einem einfachen Zahlenbeispiel erfolgen.

G) Arbeiten mit Rechenplan: Beim Arbeiten mit Rechenplan braucht nur der Rechenplan in den Abtaster eingesetzt zu werden und die Ausgangswerte in der richtigen Reihenfolge eingetastet zu werden. Der weitere Ablauf ist dann voll automatisch. Zur Erleichterung des Eintastens haben wir ein Lampenfeld, auf welches das Zahlenprotokoll für die betreffende Durchrechnung des Rechenplanes aufgelegt wird. In den Rechenplan lassen sich nun Lampenfeldschaltbefehle einfügen, welche die Lampen so schalten, dass jeweils die zu tastende Zahl aufleuchtet. Die Lampenfeldschaltbefehle werden bei der Herstellung des Rechenplanes durch Tasten gegeben. Durch dieses Lampenfeld werden falsche Tastungen weitgehend vermieden, da Irrtümer über die zu tastende Zahl nicht möglich sind.

Resultatwerte der einen Rechnung als Ausgangswert, der nächste in einer Gruppe zusammengehöriger Rechnungen können die einzelnen Rechenpläne so aufgebaut werden, dass es lediglich zu Kontrollzwecken nötig ist, einzelne Zahlen herauszunehmen und anzuzeigen. Im übrigen können die Resultatwerte der einen Rechnung, welche als Ausgangswert der nächsten dienen, sofort im Speicherwerk verbleiben, ohne dass eine Übertragung durch den Menschen erforderlich ist. Auf diese Weise werden zahlreiche Fehler vermieden, welche durch das fehlerhafte Arbeiten des Menschen eintreten könnten.» (Zuse, Konrad, 1943b).

Für die Auslieferung der Z4 an die ETH-Zürich, die am 12. Juli 1950 erfolgte, wurde die Eingabe der Zahlen verändert, und zwar dahingehend, dass diese direkt auf dem Lochstreifen kodiert werden konnten. Das Planfertigungsteil, Konrad Zuses Konzept von 1942, erlaubte den Mathematikern an der ETH-Zürich die Handhabung der Z4 in ca. drei Stunden zu erlernen. Wir betrachten daher das Planfertigungsteil der Z4 im Detail.

2.3 Planfertigungsteil der Z4

Oben wurde bereits das Erstellen der Rechenpläne an der Maschine Z4 erläutert. Dieses Gerät zum Erstellen der Rechenpläne bezeichnete Zuse als Planfertigungsteil. Aus dem Planfertigungsteil entsteht im Jahr 1943 die Konzeption für das geplante Planfertigungsgerät, welches aber nie mehr realisiert wurde.

Die Maschine Z4 war bis 1945 in Berlin nicht betriebsbereit. Statt der acht geplanten Lochstreifenleser konnten bis 1945 nur zwei Exemplare eingebaut werden. Der mechanische Speicher hatte 1945 nur 12 Worte

Speicherkapazität zu je 32 Bit. Erstmals einwandfrei arbeitete die Z4 im April 1945 in Göttingen (Flucht aus Berlin am 16. März 1945 mit Ziel Göttingen).

Abb. 4: Abschiedsrede von Konrad Zuse im Jahr 1950 kurz vor der Auslieferung der Maschine an die ETH-Zürich (Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin).

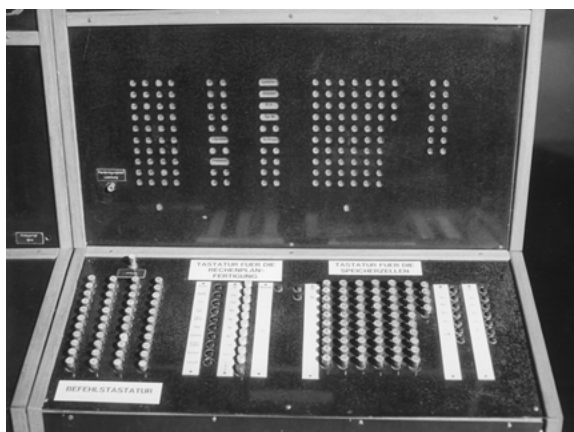


Im Juli 1950 wurde die Maschine Z4 an die ETH-Zürich für fünf Jahre vermietet, nachdem zuvor die Kapazität auf 64 Speicherstellen erhöht worden war. Vor Abschluss des Vertrages wurde sie im Jahr 1949 von Wissenschaftlern der ETH-Zürich in Hopferau einem ausführlichen Test unterzogen. Wir zitieren hier auszugsweise aus dem Abschlußbericht der Herren Böhm und Laett (1981):

»Im folgenden gebe ich einen Bericht über den Vergleich der Z4 mit dem amerikanischen Geräten im Jahr 1949 wieder. Unten ist von einem besonderen Gerät zur Erstellung des Befehlsstreifens [gemeint ist das Programmfertigungsteil] die Rede. Dieses Gerät ist geeignet, Programme sehr einfach und effizient zu erstellen: Vorteile: Ein hervorragender Vorteil der Z4 ist das besondere Gerät zur Erstellung der Befehlsstreifen. In Amerika werden solche ›coding-machines‹ erst geplant. Dies gestattet eine denkbar einfache Herstellung des Streifens (Programmstreifens), die nicht die Kenntnis eines besonderen Code erfordert. Demgegenüber brauchen die amerikanischen Rechen-Institute speziell ausgebildetes Chiffrierpersonal. Irrtümlich gegebene Befehle werden von der Z4 teilweise automatisch aufgedeckt, und der Befehlsstreifen kann dann leicht korrigiert werden. Die Möglichkeit, die Befehle von Hand zu geben, ohne Befehlsstreifen, ist sehr bequem für Rechnungen, die nur einmal ausgeführt werden müssen, und für die Durchführung von Prüfrechnungen. Die

oben angeführte Hilfseinrichtung zur Erstellung von Programmen ist sehr übersichtlich. Es können z.B. die Elemente einer Matrix in der richtigen quadratischen Anordnung eingegeben werden. Die Maschine Z4 arbeitet etwa 100 mal langsamer als eine betriebssichere amerikanische Maschine. Dieser Nachteil fällt aber nur ins Gewicht, wenn sehr viele Rechnungen mit demselben Streifen nacheinander ausgeführt werden. In allen anderen Fällen ist die Herstellung des Streifens sowieso die zeitraubende Arbeit.«

*Abb. 5: Planfertigungsteil der Maschine Z4
(Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin).*

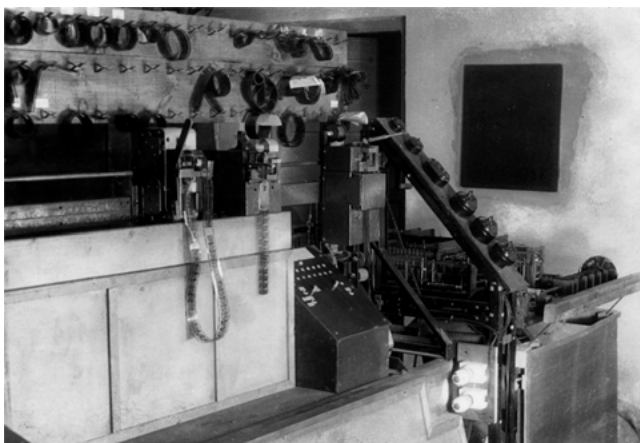


Wie schon ausgeführt wurde, konnten mit dem Planfertigungsteil auf einfache Weise Programme über symbolische Adressen und Symbole für arithmetische Operationen anfertigt werden. Mit Hilfe dieses Gerätes war es möglich, die Programmierung der Z4 (29 Rechenplanbefehle) in weniger als drei Stunden zu erlernen. Auch war es möglich, Programme zu korrigieren bzw. zu kopieren.

Die linke vertikale Reihe von Tasten dient der Ausführung von Rechenoperationen, die mittlere Reihe zur Rechenplanfertigung und die rechte Reihe zur Anwahl der Speicherstellen. Ambros Speiser (2003), der selbst an der Z4 arbeitete, schreibt über die Programmierbarkeit der Z4: »Die Programmierung erfolgte an einem Schaltpult, das überaus bedienungsfreundlich ausgestaltet war; es war klar, dass Zuse im Betrieb solcher Maschinen über große Erfahrung verfügte. Erst mit der MARK III (1948) von Howard Aiken wurde ein Gerät ähnlich dem Planfertigungsteil verwendet.« Ähnlich positiv bewertete der Mathematiker Eduard Stiefel (1954), der Leiter des Institutes, die Erfahrungen bei der Nutzung der Z4 an der ETH-Zürich:

»In der Schweiz hat das Institut für angewandte Mathematik der Eidgenössischen Technischen Hochschule seit 1950 seine wichtigste Aufgabe darin gesehen, das programmgesteuerte Rechnen für die schweizerische Industrie und Technik dienstbar zu machen. Sie [die Programmierung] ist natürlich nur dann durchzuführen wenn die Organisation des Automaten so klar und einfach ist, dass das Programmieren für den von außen kommenden Ingenieur nicht als eine komplizierte Meta-Mathematik erscheint, die er ablehnt und zwar mit Recht. Glücklicherweise erfüllte der von der Firma Zuse im Jahre 1950 gelieferte Relais-Automat [die Z4] diesen Wunsch im beträchtlichen Ausmaß, wie überhaupt Zuse seine Rechengерäte im Hinblick auf die Anwendung in der täglichen Praxis des Ingenieurs konzipiert hat, und sich nicht nur darauf beschränkt hat, eine Einrichtung zu bauen, die schnell addiert und multipliziert, aber sonst nicht viel mehr leistet. Die Rechenautomaten haben uns das numerische Rechnen abgenommen, uns aber dafür die noch langweiligere Arbeit des Programmierens gebracht. Meine Erfahrungen, die ich mit dem Zuse-Automaten gemacht habe, zeigen eindeutig, dass die Vereinfachung der letzteren Tätigkeit von großer Wichtigkeit ist, wenn die Automaten in Industrie und Technik Eingang finden sollen. Ein erster Schritt auf diesem Weg wäre, dass die verschiedenen Rechen-Institute über die Terminologie des Programmierens auf internationaler Basis entsprechende Vereinbarungen treffen.«

Abb. 6: Programme (Rechenpläne nach Konrad Zuse) für die Z4 waren an Nägeln in einem ehemaligen Mehllager in Hopferau (1949) aufgehängt. Es handelte sich um Testprogramme für die Z4, z.B. einen Speichertest, aber auch um die Berechnung von Determinanten und dem Runge-Kutta Verfahren (Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin).

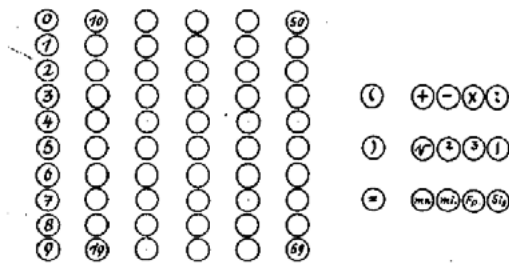


2.4 Planfertigungsgeräte

Konrad Zuse (1943a, 1943b) schrieb in einem Bericht über Planfertigungsgeräte. »Aufgabe dieser Geräte war es, die Herstellung der Rechenpläne für das algebraischen Rechengesetz Z4 wesentlich zu erleichtern. Der Ausbau der Geräte sollte in mehreren Stufen erfolgen: Eintastung einer Formel an einer Tastatur in der üblichen mathematischen Schreibweise, Ableitung von Rechenplänen spezieller Struktur aus Rechenplänen allgemeiner Struktur (Einschmelzen von Rechenplänen), und Zusammensetzen von Rechenplänen aus Teilplänen und Unterplänen (Montageverfahren)«.

Zuse hatte die Absicht, ein Planfertigungsgerät bauen, bei dem es lediglich nötig ist, die Formel so in die Maschine einzutasten, wie sie geschrieben wird. Die Tastatur dazu sollte wie folgt aussehen:

Abb. 7: Tastatur des Planfertigungsgerätes
(Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin)



»Links haben wir die Tasten für die Variablen. Rechts haben wir die sonstigen Zeichen einschließlich hoch 2 und hoch 9, Absolutstrich und die Hilfsoperationen wie Min und Max. Verschiedene Klammerzeichen sind nicht nötig, da die Kennzeichnung einer Formel mit nur einer Klammerart bereits eindeutig ist. Bruchstriche werden mit Hilfe der Klammerzeichen und das Divisionszeichen dargestellt

Die Maschine kontrolliert dann selbsttätig, ob eine sinnvolle Zeichenfolge getastet wird. Ausgelöst durch diese Befehlsfolge wird der Rechenplan selbsttätig entwickelt und auf ein Lochgerät übertragen. Zur Kontrolle des fertigen Rechenplans kann dann das Planfertigungsgerät mit einem Abtaster versehen werden und die vorliegende Befehlsfolge wieder rückwärts in eine Formel zurückgebildet werden. Zu diesem Zweck wird das Gerät mit einem Anzeigefeld versehen, an dem Lampen in derselben Anordnung angebracht sind wie die Tasten der Tastatur.« (Zuse 1943).

Konrad Zuses Vision lief darauf hinaus, ein Planfertigungsgerät mit einem Montagverfahren zu konstruieren, bei dem mehrere Rechenpläne aus einem Vorrat bereits vorhandener Rechenpläne zusammengesetzt werden. Im Jahr 1986 zog er Bilanz über sein Konzept der Planfertigungsgeräte:

»Die Idee der Planfertigungsgeräte ist typisch für den Stand der Technik um 1940. Die zur Verfügung stehende Speicherkapazität war gering (geplant waren mechanische Speicher mit 1000 Worten). Dagegen war die Schaltungsmathematik für Relaisschaltungen bereits völlig ausgebaut und die Idee des allgemeinen Rechnens mit Bedingungen usw. völlig entwickelt. Aus dieser Situation erschien die Idee eines gesonderten Planfertigungsgerätes damals eine günstige Lösung. Heute werden für diese Aufgaben keine besonderen Geräte benötigt. Jedoch war die heutige Architektur der Geräte erst sinnvoll, als Speicher mit mindestens 8000 Worten Kapazität zur Verfügung standen.« (Zuse 1986)

3 Die Bedienung anderer Pioniermaschinen

Im Folgenden soll nun ein Überblick über die wichtigsten frühen funktionsfähigen Rechenautomaten bis zum Jahr 1945 gegeben und deren Ergonomie bei Bedienung und Programmierung betrachtet werden.

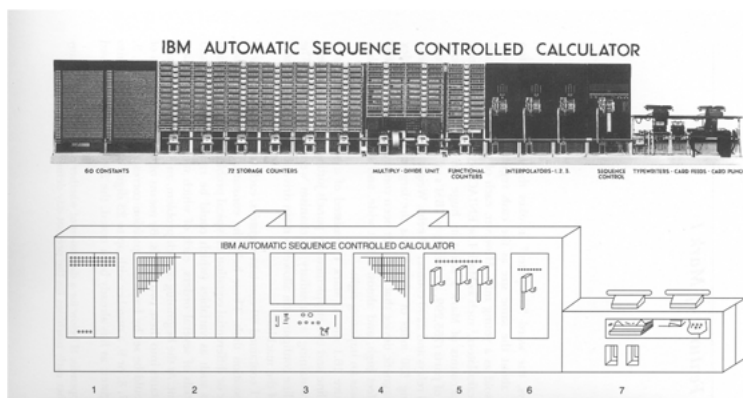
Im Jahr 1939 entwarf George Stibitz (1904-1994) bei den Bell-Laboratories (Bell-Labs) in New York den Drei-Excess-(Stibitz) Code und baute als erstes einen *Complex-Number-Calculator*, der nicht programmierbar war und daher als ein Spezialrechner zum Multiplizieren und Dividieren von komplexen Zahlen angesehen werden muss. Es folgten die Modelle II bis V, die von 1943-1947 für die Landesverteidigung der USA entwickelt wurden. BELL V arbeitete in der binären Gleitkomma-Darstellung. Stibitz ist damit - wie Konrad Zuse schon 1936 - ebenfalls ein Pionier der Gleitkommarechnung im Binärsystem. Das Besondere an ihm war, dass er der erste »Remote« betriebene Spezialrechner war: »One of the greatest claims to fame the Bell Complex Number Calculator is the fact that it was not only the first machine to service more than one terminal, but that it was also the first machine to be used from a remote location.« (Williams 1985, S. 228)

Der um 1942 von Vincent Atanasoff gebaute Rechner *ABC* (Atanasoff-Berry-Computer) war ein nicht programmierbarer Spezialrechner in Röhrentechnik. Er basierte auf dem Binärprinzip, arbeitete mit einer einfachen Integerrechnung und für die Gaußsche Elimination ausgelegt (Lösung von linearen Gleichungssystemen). Der ABC kann als Prototyp des Parallelrechners angesehen werden. Die Zahlen wurden zwar über

Lochkarten eingelesen, aber die gesamte Steuerung erfolgte über Tasten und Schalter.

Am 7. August 1944 vollendete die Firma IBM zusammen mit Howard Aiken die *MARK I* (Automatic Sequence Controlled Calculator), die ein dezimales Rechenwerk verwendete und die Trennung von Speicher, Steuereinheit und Rechenwerk nicht kannte. Die *MARK I* war wie die *Z*-Maschinen frei programmierbar².

*Abb. 8: Schematische Darstellung der MARK I.
(Entnommen aus Cohen, 1999).*



Die Maschine *MARK I* bestand aus 765299 Teilen, so berichten die offiziellen IBM Unterlagen. Es waren 3300 Telefonrelais installiert, dazu kamen 2200 Zahnräder. Die Maschine wog 9445 amerikanische Pfund und es waren 530 Meilen Kabel verlegt. Es war eine der größten und komplexesten Maschinen, die zu dieser Zeit jemals gebaut wurden. Wir beschreiben nun die Funktion der einzelnen Gestelle (»Panels«).

Gestell 1, bestehend aus zwei Teilen, enthielt sechzig Konstantenregister. Jede Reihe besteht aus 24 Drehschaltern mit je zehn Ziffernpositionen. Diese Schalter definierten die Konstanten, die in irgendeiner algebraischen oder Differentialgleichung verwendet wurden. Zu Beginn einer jeden Rechnung gab ein Operator per Hand die Konstantenwerte ein.

- 2 Unter freier Programmierbarkeit wird die Fähigkeit eines Rechners verstanden, eine beliebige (zulässige) Folge von Befehlen durch das Steuerwerk zu interpretieren und damit das Rechenwerk, den Speicher oder die Aus- und Eingabeeinheiten zu steuern. Die Befehle sollen dabei auf einem Speichermedium vorliegen, welches die Maschine lesen kann. Das Programm muss dazu nicht im Hauptspeicher der Maschine untergebracht sein.

Durch die Drehschalter konnten die Zahlen 0 bis 9 für jede Ziffer eingegeben werden. Jede Zahl enthielt 23 Ziffern und ein Vorzeichen. Jede Reihe einer Zahl von 23 Ziffern plus dem Vorzeichen war über den Lochstreifen adressierbar. Die Programmierer hatten ein »code book«, mit der jede Zahl adressiert werden konnte. Es konnten also 1440 Konstantenziffern eingegeben werden.

Bernhard Cohen (1999, S. 169) berichtet über die dabei auftretenden Probleme: »Grace Hopper told me that very often the 23 digits were more troublesome than helpful. For example, suppose a calculation were being made in which there were only seven significant figures. In performing such a calculation, MARK I would take all calculation out to 23 digits, 14 more than could possibly be useful – a tremendous waste of machine time.« Der Grund für 23 Ziffern für eine Zahl ist bis heute nicht geklärt. Cohen (S. 170) erhielt dazu von Howard Aiken die Erklärung, dass der damit Berechnungen in der Himmelsmechanik durchführen wollte. Aber die MARK I wurde niemals für solche Berechnungen eingesetzt, und es ist nicht klar, ob Aiken überhaupt Kenntnisse in Himmelsmechanik hatte.

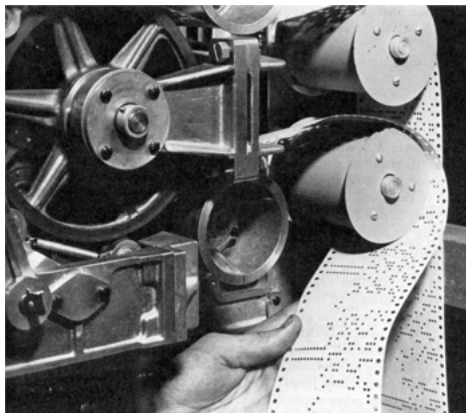
Gestell 2 enthielt 72 Register, die als Akkumulatoren (»Accumulators«) bezeichnet wurden. Jedes von ihnen hatte 24 elektromagnetische Zählräder (»counter wheels«), um eine Zahl mit 23 Ziffern und dem Vorzeichen behandeln zu können. Dieses Gestell mit den Akkumulatoren war der Speicher der MARK I (»store« oder »storage«). Eine Instruktion auf einem Lochstreifen konnte entweder einen Akkumulator oder ein Konstantenregister ansprechen. Wenn schon eine Zahl in dem Akkumulator vorhanden war, dann wurde die neue Zahl dazu addiert. Ein separates Gestell 3 war für die Multiplikation vorgesehen.

Gestell 4 enthielt die funktionalen Einheiten, d.h. die Konvertierung von Zahlen in den Logarithmus zur Basis 10, den Sinus, Cosinus usw. Diese Funktionen waren als eingebaute Funktionen (»built-in subroutines«) implementiert. Die ersten Programmierer der MARK I, Richard Bloch, Robert Campell und Grace Hopper, reduzierten jedes mathematische Problem in eine Sequenz von Befehlen. Grace Hopper berichtete später, dass Sie private Bibliotheken von Programmen hatte. Jahre später wurde solche Bibliotheken als Unterprogramm-bibliotheken (»libraries of subroutines«) bezeichnet.

Gestell 5 bestand aus drei Lochstreifenlesern, die die Daten für die Interpolation von Funktionen bereitstellten. In Gestell 6 waren die sequentiellen Lochstreifenleser, die das Programm für die MARK I enthielten, welches Schritt für Schritt ausgeführt wurde. Rechts, am Ende der MARK I waren zwei Lochkartenstanzer und Schreibmaschinen (Typewriter) installiert, die die Ergebnisse in einer tabellarischen Form ausgaben. Numerische Eingaben wurden über Drehschalter eingegeben. Die Maschine

MARK I arbeitete mit Dezimalzahlen und einem festen Komma, sie konnte noch keinen bedingten Sprung, dieser wurde erst später hinzugefügt.

Abb. 9: Lochstreifen der Mark I (aus de Beauclair 1968, S. 70).

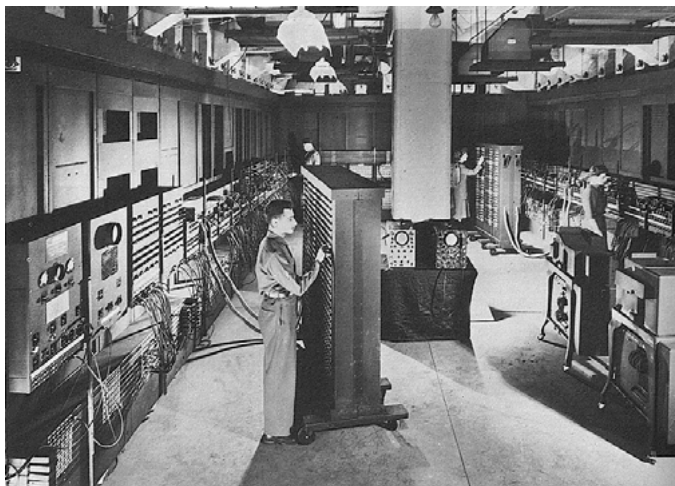


Der am 14. Februar 1946 der Öffentlichkeit vorgestellte *Electronic Numerical Integrator and Computer* (ENIAC) wurde von J.Presper Eckert und John W. Mauchly konzipiert. Die ENIAC mit ihren 17468 Elektronenröhren war nicht frei programmierbar. Es war eine hardwaremäßig konfigurierbare Maschine und arbeitete ebenfalls mit einem Dezimalrechenwerk. Die Steuerung der Maschine (Konfigurierung) wurde durch das Setzen von Hunderten von Drehschaltern und dem Stecken von Kabelverbindungen erreicht. Bis zur Abschaltung diente die Maschine der Berechnung ballistischer Tabellen.

Der ENIAC bestand aus 40 parallel arbeitenden Komponenten, von denen jede 60cm breit, 270cm hoch und 70cm tief war. Die komplette Anlage war in U-Form aufgebaut, beanspruchte eine Fläche von 10x17m und wog 27t. Der Stromverbrauch der 17.468 Elektronenröhren, 7.200 Dioden, 1.500 Relais, 70.000 Widerstände und 10.000 Kondensatoren lag bei 174kW. Der Bau des ENIAC kostete 468.000 \$, ein Betrag, der nur aufgrund des hohen Bedarfs an Rechenleistung seitens der US-Armee zur Verfügung stand.

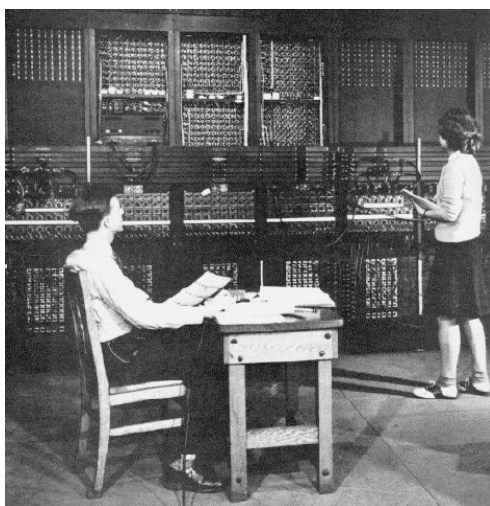
Der ENIAC konnte addieren, subtrahieren, multiplizieren, dividieren und Quadratwurzeln ziehen. Er wurde programmiert, indem man die einzelnen Komponenten mit Kabeln verband und die gewünschten Operationen auf Drehschaltern einstellte. Eine Addition/Subtraktion brauchte 0,2 Millisekunden, eine Multiplikation bis zu 2,8 ms, eine Division bis zu 24 ms und eine Quadratwurzel mehr als 300 ms.

Abb. 10: Der ENIAC (Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin).



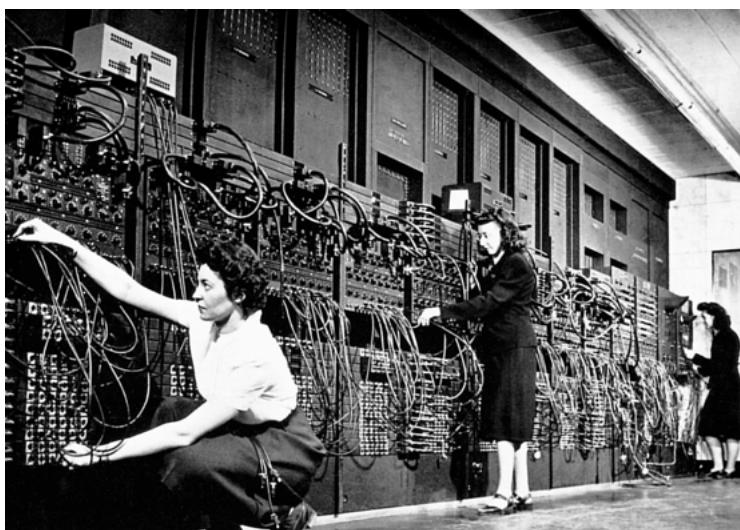
Der ENIAC wurde weitgehend von Frauen konfiguriert, den »Girls of the ENIAC«, die zuvor an der Heimatfront ballistische Berechnungen an mechanischen Tischrechnern durchgeführt hatten. In einem höchst komplizierten mehrstufigen Verfahren mussten für jede Rechenaufgabe die Komponenten des Rechners neu verschaltet werden.

*Abb. 11: Konfigurieren des ENIAC nach Anweisungen
(National Archives and Records Administration
Still Picture Branch, College Park, Maryland).*



Ein großes Problem bei der Entwicklung des ENIAC war auch die Fehleranfälligkeit der Elektronenröhren. Wenn nur eine der 17.468 Röhren ausfiel, rechnete die gesamte Maschine fehlerhaft. Um die Kosten dieser unvermeidlichen Ausfälle gering zu halten, wurden in den ENIAC eigens Diagnoseprogramme eingebaut, die das Auffinden einer auszutauschenden Röhre erleichterten. Eine Gegenmaßnahme bestand darin, stärkere Röhren einzubauen, als man eigentlich gebraucht hätte, und diese nur mit etwa 10% ihrer Nennleistung zu betreiben. Außerdem wurde bemerkt, dass mehr Röhren beim Ein- und Ausschalten kaputt gingen als während des laufenden Betriebes. Als Konsequenz ging man dazu über, den ENIAC einfach nicht mehr auszuschalten. Die Ausfallzeit konnte so auf nur wenige Stunden je Woche reduziert werden, ein den Umständen entsprechend hervorragendes Ergebnis.

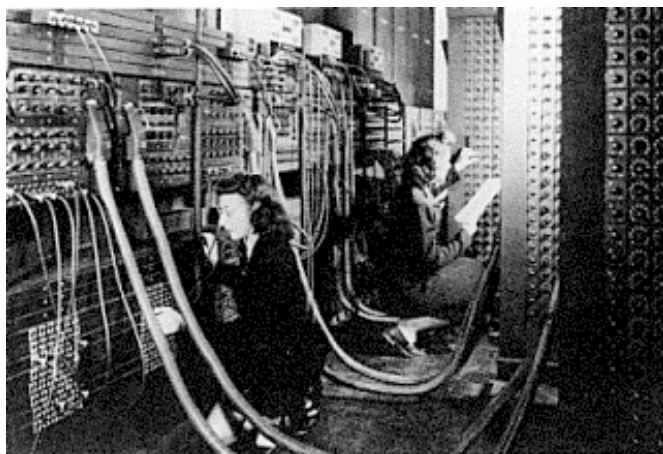
*Abb. 12: »ENIAC-Girls« beim Konfigurieren der Maschine
(Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin).*



Während Lochstreifen als Programme leicht wieder verwendet werden konnten, war dies mit den Kabeln der ENIAC nicht so einfach möglich. Es wurden ganze Tablettis mit den Kabeln gelagert, die dann bei Bedarf wieder eingesetzt werden konnten. Die ENIAC war eine sehr leistungsfähige Maschine, aber die Verkabelung muss als komplex bezeichnet werden. Eine unmittelbare visuelle Ausgabe war in die Akkumulatoren integriert: Im oberen Bereich der Komponente gab es 102 Neonbirnchen zur

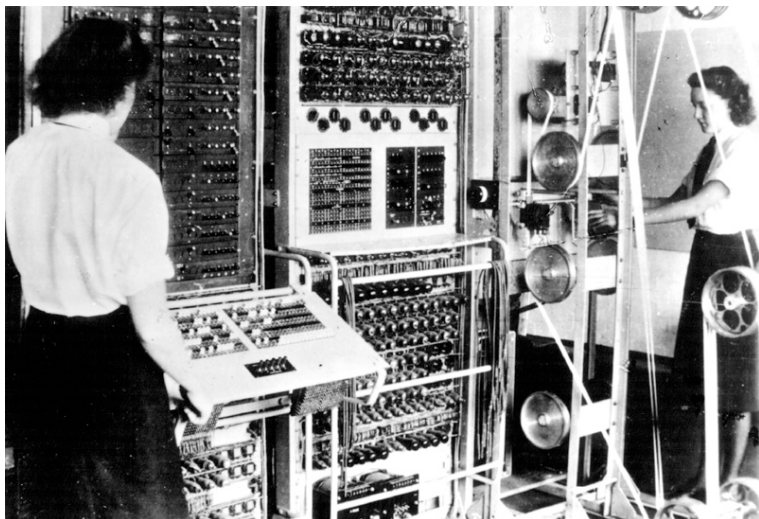
Anzeige der aktuell gespeicherten Zahl (je zehn für jede der zehn Ziffern, zwei für das Vorzeichen).

*Abb. 13: »ENIAC-Girls« beim Einstellen des Main Control Panel
(National Archives and Records Administration Still Picture Branch,
College Park, Maryland).*



Die in England von 1943-1945 gebauten zwölf *COLOSSUS*-Rechner waren wiederum Spezialrechner mit Röhren im Binärprinzip, sie waren nicht frei programmierbar und wurden aber erfolgreich zur Entschlüsselung von Funksprüchen der deutschen Wehrmacht (Chiffriermaschine SZ42) eingesetzt. Im Jahr 1946 wurden auf Befehl Churchills fast alle Maschinen und Unterlagen zerstört, aber es existiert heute im Bletchley Park, nördlich von London, ein Nachbau, der in 10-Jähriger Arbeit von Tony Sale bewerkstelligt wurde. Interessant ist hier, dass bis 1977 das *COLOSSUS*-Projekt Computerhistorikern vollkommen unbekannt war, da der Britische Geheimdienst erst 1977 die Unterlagen frei gab. Konfiguriert bzw. gesteuert wurden die *COLOSSUS*-Rechner durch die Hardware, d.h. es existierte eine feste Hardwareprogrammierung. Die nicht frei programmierbaren Colossus-Maschinen entsprachen somit dem 1942-1943 von Konrad Zuses gebauten Spezialrechner S1. Dieser war eine reduzierte Z3, deren einziges Programm durch Schrittschalter hardwaremäßig realisiert war.

*Abb. 14: Colossus-Rechner mit Einstellwerk
(nach www.computerhistory.org/timeline/?year=1944)*



4 Abschließende Bemerkungen

Die Konstruktion früher Rechenmaschinen war sehr aufwendig und kostenintensiv. Alleine der Complex-Number-Calculator von George Stibitz kostete 20.000 US-Dollar und die Firma Bell überlegte ernsthaft, keine weiteren Maschinen dieser Art zu bauen. Im Jahr 1942 bestellten die Henschel-Flugzeugwerke bei Konrad Zuse die Maschine Z4. Dazu wurde ein Etat von ca. 120.000 Reichsmark vorgesehen, aber die Z4 hat bis 1945 niemals für die Henschel-Flugzeugwerke gerechnet. Es ist daher nicht verwunderlich, dass bei den meisten Maschinen wegen des hohen finanziellen Aufwandes auf die Bedienungsfreundlichkeit wenig geachtet wurde.

Die Rechenmaschine MARK I war speziell konzipiert, um Funktionstabellen zu erstellen. Daher wurden spezielle Konstantenspeicher verwendet. Die Rechenoperationen wurden durch einen Lochstreifen gesteuert, aber die interne Rechnung wurde im Dezimalsystem durchgeführt, und zwar mit 23 Stellen mit einem festen Komma. Für die Berechnungen wurden immer alle 23 Ziffern einbezogen, was zu einer Verschwendung von Maschinenzeit führte, wenn z.B. nur ein Problem mit sechs Ziffern zu berechnen war.

Die ENIAC musste permanent neu konfiguriert werden. Dies war sehr aufwendig. Es zeigte sich schon damals, dass die Rechnungen nur

Sekunden dauerten, aber die Konfigurierung einer ballistischen Berechnung zwei Wochen in Anspruch nehmen konnte. Auch die ENIAC rechnete intern mit Dezimalzahlen, die binär repräsentiert waren, d.h. eine Röhre wurde für jede Dezimalziffer verwendet.

In Konrad Zuses Rechenmaschinen Z3 und Z4 finden sich erwähnenswerte ergonomische Konzepte, die einerseits die Handhabung der Maschinen Z3 und Z4 im Dialogbetrieb unterstützten und andererseits bei der Maschine Z4 die Erstellung von Rechenplänen so einfach wie möglich gestalten sollten. Das Planfertigungsteil der Z4 hat sich im Praxisbetrieb an der ETH-Zürich in den Jahren 1950-55 bei der Erstellung von Rechenplänen bestens bewährt, wie Eduard Stiefel ausführte. Zur Konstruktion des Planfertigungsgerätes von Konrad Zuse ist es wegen des 2. Weltkrieges nicht mehr gekommen.

Der Unterschied in der Zahlendarstellung von Konrad Zuses Maschinen, der MARK I und der ENIAC ist auffallend. Konrad Zuse verwendete in den Maschinen Z1, Z3 und Z4 ausschließlich binäre Gleitkommazahlen. Die Ein- und Ausgabe erfolgte mit dezimalen Gleitkommazahlen, um dem Ingenieur die übliche Arbeitsweise bei umfangreichen Rechnungen zu ermöglichen. Den beiden US-Maschinen MARK I und ENIAC fehlt die Eleganz der Gleitkommazahlen, die sich in heutigen modernen Computern zur Berechnung vielfältiger Probleme bewährt haben. Nur die Maschine Z2, es war eine Maschine zum Testen von Relais, verwendete ein Festkommarechenwerk mit 16 Bits. Konrad Zuses Konzepte zur einfachen und ergonomischen Handhabung seiner »Rechenmaschinen für den Ingenieur« wurden bereits von Zeitgenossen gewürdigt. Speiser und Stiefel führten die Bedienungsfreundlichkeit als Vorzug der Z4 auch noch ins Feld, als diese in Rechengeschwindigkeit und Funktionsumfang mit den amerikanischen Großrechnern bei weitem nicht mehr mithalten konnte.

Literatur

- Alex, J./Mons, W./Flessner, H./Pauli, K./Zuse, H. (2000): »Konrad Zuse - Der Vater des Computers«. Fulda.
- Beauclair, W. de (1968): »Rechnen mit Maschinen«. Braunschweig, 1968.
- Cohen, B. (1999): »Howard Aiken – Portrait of a computer pioneer«. Cambridge, MA.
- ETH-Zürich (1981): »Konrad Zuse und die Frühzeit des wissenschaftlichen Rechnens an der ETH« - Dokumentation, ETH-Zürich.
- Hellige, H. D. (Hrsg.) (2004): »Geschichten der Informatik. Visionen, Paradigmen, Leitmotive«. Berlin, Heidelberg, New York.

- Rojas, R. (Hrsg.) (1998): »Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse. Berlin, Heidelberg, New York.
- Speiser, A. (2003): »Ein Apparat, dicht bepackt mit Hebeln, Blechen, Federn, Stahlstiften. Wie Konrad Zuses Z4-Computer 1950 nach Zürich gelangte«. In: Neue Züricher Zeitung, 16.5.2003.
- Stiefel, E. (1984): »Rechenautomaten im Dienste der Technik. Erfahrungen mit dem Zuse-Rechenautomaten Z4.« In: Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen 4, 45, S. 29-65.
- Williams, M. (1985): »A History of Computing Technology«. Englewood Cliffs, N. J.
- Zuse, H. (2007a): »Die Rechenmaschine Z3«. In: »Konrad Zuse«. Ernst Freiberger Stiftung.
- Zuse, H. (2007b): »Konrad Zuse Multimedia Show 2007«. Erhältlich bei: www.zuse.de
- Zuse, K. (1936): »Die Rechenmaschine des Ingenieurs«. Interner Bericht 1936. (Konrad Zuse Archiv von Horst Zuse in Berlin-10719, Schaperstr. 21, und »Zuse-Internet-Archiv« 0234 (<http://www.zib.de/zuse/>), dort auch die folgenden ungedruckten Zuse-Manuskripte).
- Zuse, K. (1936a): »Verfahren zur selbsttätigen Durchführung von Rechnungen mit Hilfe von Rechenmaschinen«. Patentanmeldung Z 23 139, 1936. (»Zuse-Internet-Archiv« 0230)
- Zuse, K. (1936b): »Das Zahlensystem«. Interner Bericht, 1936.
- Zuse, K. (1937): »Aus mechanischen Schaltgliedern aufgebautes Speicherwerk«. Patentschrift Nr. 924 107, 3. Juli 1937. (»Zuse-Internet-Archiv« 0114)
- Zuse, K. (1937a): »Einführung in die allgemeine Dyadik«.
- Zuse, K. (1943): »Planfertigungsgeräte«. Bericht der Zuse Apparatebau Berlin (interner Bericht), 1943.
- Zuse, K. (1943a): »Angebot auf Entwicklung und Bau eines Planfertigungsgerätes. Notizen, Interner Bericht, ca. 1943.
- Zuse, K. (1943b): »Rechenplangesteuerte Rechengeräte für technische und wissenschaftliche Rechnungen, Anlage 1: Beschreibung des im Bau befindlichen algebraischen Rechengerätes (V4)« (»Zuse-Internet-Archiv« 0107).
- Zuse, K. (1945): Brief an die Eltern. 11. November 1945 (»Zuse-Internet-Archiv«)