

## Rechnerarchitektur

Timm Grams, Fulda, 23. März 2012 (aktualisiert: 26.02.2013)

### Vom Problem zur Computerarchitektur

Was an Zuses Denkweise und Werk wohl am meisten beeindruckt, ist die Zielorientiertheit. Anders als im Fall der Zuse-Rechner spielt bei den meisten anderen Entdeckungen und Erfindungen der Zufall die Hauptrolle und die Genialität des Erfinders liegt darin, dass er die Bedeutung seiner Entdeckung richtig einschätzt. So war es beispielsweise bei der Entdeckung des Penizillins durch Alexander Fleming und bei der Erfindung des Telefons durch Elisha Gray und Alexander Graham Bell.

Dagegen Konrad Zuse: Er hatte

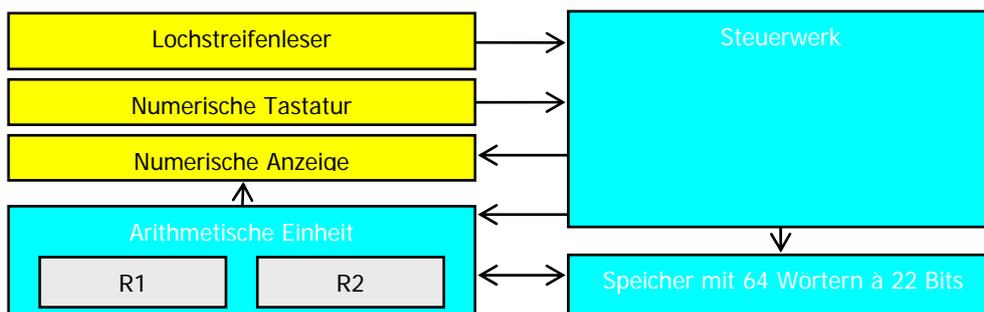
1. ein *Problem* erkannt,
2. sich ein *Ziel* zur Lösung dieses Problems gesteckt,
3. den Zielvorstellungen eine *Architektur* gegeben,
4. sich dann unbeirrt auf den Weg gemacht und
5. viele *originelle Lösungen* für Teilprobleme gefunden.

Das konstruktive Vorgehen und die Durchführung quasi im Alleingang sind das Besondere an diesem kreativen Prozess.

*Das Problem:* Zuses Entschluss, Computer zu bauen, wurde durch eintönige Arbeiten ausgelöst. Das Maschinenbaustudium gab er wegen der Pedanterie im Maschinenzeichnen bald auf; er wechselte zur Architektur und schließlich zum Bauingenieurwesen. Aber dort wie auch später im Beruf als Statiker bei den Henschel-Flugzeug-Werken nervten ihn die routinemäßigen Kalkulationen. Auf dem FAI-Kolloquium 1992 in Fulda sagte er uns: „Ich war jung und wusste weit Besseres mit meiner Zeit anzufangen, als sie mit öden Rechnungen zu verbringen. Also suchte ich nach einer Lösung.“

*Das Ziel:* In seiner Autobiographie „Der Computer – Mein Lebenswerk“ schreibt er: „Ich ... verstand ... weder etwas von Rechenmaschinen, noch hatte ich etwas von Babbage gehört ... Dies waren also die Anfangsbedingungen, als ich 1935 beschloss, Computererfinder zu werden.“

*Die Architektur:* In seiner Autobiographie beschreibt Zuse, wie er – ausgehend von Rechenformularen – Schritt für Schritt die Computerarchitektur entwickelt hat. Die wesentlichen Elemente dieser Architektur sind im folgenden Blockschaltbild wiedergegeben.



*Funktionsweise und Programmierung:* Über den Lochstreifenleser kann eine Folge von Befehlen von einem Lochstreifen ablesen. Welche Befehle das sind, zeigt die linke Tabelle. Rechts ist eine Folge solcher Befehle, ein Programm, zu sehen. Diese Befehle werden vom Steuerwerk interpretiert und ausgeführt. Die Rechenoperationen (Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division und Wurzelziehen) werden von der arithmetischen Einheit erledigt. Dort findet man auch die Register R1 und R2 in denen zu Beginn einer Rechenoperation die Operanden stehen und schließlich das Ergebnis. Bei Einlesebefehlen stoppt die Maschine und erwartet eine Eingabe über die numerische Tastatur. Ergebnisse werden über die numerische Anzeige ausgegeben. Für die Aufbewahrung von Zwischenergebnissen ist der Speicher da.

Ein Simulationsprogramm des Z3-Rechners ist im Internet unter folgender Adresse zu finden:  
[http://www.zib.de/zuse/Inhalt/Programme/Simulationen/Z3\\_Sim/index.html](http://www.zib.de/zuse/Inhalt/Programme/Simulationen/Z3_Sim/index.html)

### Programmierung

Befehl	Wirkung
lu	Lesen von Tastatur nach R1 (falls leer) oder R2
ld	R1 anzeigen
pr z	Lesen von Speicherzelle z: R1 ← (z) bzw. R2 ← (z)
ps z	Schreiben nach Speicherzelle z: (z) ← R1; R1 leer
lm	Multiplikation: R1 ← R1*R2; R2 leer
li	Division: R1 ← R1/R2; R2 leer
lw	Quadratwurzel: R1 ← sqrt(R1)
ls1	Addition: R1 ← R1+R2; R2 leer
ls2	Subtraktion: R1 ← R1-R2; R2 leer
fin	Ende des Programms

Befehl	Lochmuster	Wirkung
lu	- ● ● ● - - - -	R1 ← a <sub>0</sub>
ps 1	● - - - - - ●	(1) ← R1
lu	- ● ● ● - - - -	R1 ← a <sub>1</sub>
ps 2	● - - - - ● -	(2) ← R1
lu	- ● ● ● - - - -	R1 ← a <sub>2</sub>
ps 3	● - - - - ● ●	(3) ← R1
lu	- ● ● ● - - - -	R1 ← a <sub>3</sub>
ps 4	● - - - - ● - -	(4) ← R1
lu	- ● ● ● - - - -	R1 ← x
ps 5	● - - - - ● ●	(5) ← R1
pr 4	● ● - - - ● - -	R1 ← (4)
pr 5	● ● - - - ● - ●	R2 ← (5)
lm	- ● - - ● - - -	R1 ← R1*R2
pr 3	● ● - - - ● ●	R2 ← (3)
ls1	- ● ● - - - - -	R1 ← R1+R2
pr 5	● ● - - - ● ●	R2 ← (5)
lm	- ● - - ● - - -	R1 ← R1*R2
pr 2	● ● - - - - ● -	R2 ← (2)
ls1	- ● ● - - - - -	R1 ← R1+R2
pr 5	● ● - - - ● ●	R2 ← (5)
lm	- ● - - ● - - -	R1 ← R1*R2
pr 1	● ● - - - - ●	R2 ← (1)
ls1	- ● ● - - - - -	R1 ← R1+R2
ld	- ● ● ● ● - - -	R1 anzeigen

Die linke Tabelle enthält den Befehlssatz des Rechners Z3. In der rechten Tabelle ist das Lochmuster eines Lochstreifens abgebildet und kommentiert. Der Lochstreifen steuert die Auswertung eines Polynoms dritten Grades. Dem Algorithmus liegt das Horner-Schema zu Grunde:  $((a_3 \cdot x + a_2) \cdot x + a_1) \cdot x + a_0$ .

### Realisierungsvarianten

Zuse hat seine Computer in mechanischer, in elektromechanischer und in elektronischer Technik gebaut.

Wegen des zu erwartenden hohen Platzbedarfs eines Zahlenspeichers in Relais-technik entwickelte Zuse für seinen ersten Rechner eine mechanische Schaltgliedtechnik. Die Z1 baute er vollständig mechanisch auf. Der Speicher dieses Rechners funktionierte einwandfrei, aber bei der Verarbeitung gab es Probleme. Am Beispiel des Addierers und der Schwierigkeiten mit dem einschränkenden Übertrag lässt sich das sehr gut erkennen. Deshalb baute Zuse später die Z3 in Relais-technik auf. 1941 wurde das Funktionieren dieses Rechners unter Anwesenheit von Gutachtern festgestellt. Damit steht dieses Jahr als Geburtsjahr des Computers fest.

Wegen der Kompaktheit und Zuverlässigkeit des mechanischen Speichers realisierte Zuse die Z4 in gemischter Technik: Er kombinierte die Relaislogik mit dem mechanischen Speicher.

Weitere technologische Schritte waren die Einführung der Röhrenschaltungen und des Trommelspeichers (Z22) sowie der Übergang auf die Transistorlogik (Z23).

## Der Von-Neumann-Rechner

Die frühen Zuse-Computer besaßen im Prinzip bereits die meisten der Eigenschaften heutiger Computer, und mehr lässt sich auch über die etwas später in Amerika entstandenen frühen Computer nicht sagen.

Die frühen Zuse-Computer konnten zunächst nur lineare Listen von Befehlen Zeile für Zeile fortlaufend abarbeiten. Heutige Computer zeichnet aus, dass sie in einem solchen Programm auch hin- und herspringen können. Dadurch lassen sich Bearbeitungsschleifen und durch die Berechnungsergebnisse gesteuerte Programmabläufe verwirklichen.

Diese Freiheiten der Programmabarbeitung gewinnt man, wenn man das Programm nicht mehr allein einem nur fortlaufend lesbaren Eingabemedium anvertraut, sondern es in den Speicher des Rechners übernimmt.

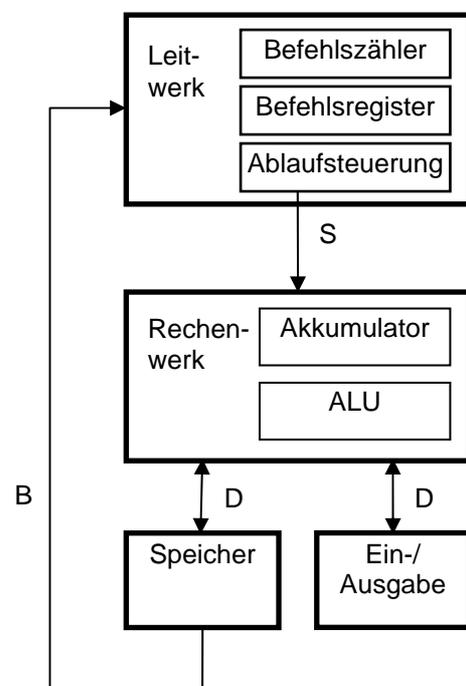
Eine Rechnerarchitektur, die heute nach John von Neumann benannt wird, beruht auf genau dieser Idee: Das Programm wird zu Beginn der Berechnungen in den Speicher geladen, der Zugriff auf die Befehle geschieht nun auch nicht anders als der Zugriff auf zwischengespeicherte Daten.

Die arithmetische Einheit der Zuse-Rechner wird zur ALU (Arithmetic Logic Unit). Sie ist der zentrale Bestandteil des *Rechenwerks* eines Von-Neumann-Rechners und kann neben den arithmetischen Rechenoperationen auch logische Verknüpfungen realisieren. Weitere Bestandteile dieser *Rechnerarchitektur* sind das *Leitwerk* (bei Zuse Steuerwerk genannt), der *Speicher* und die *Ein-/Ausgabeeinheit*.

Neben der ALU enthält das Rechenwerk mehrere *Register*. Sie dienen der kurzzeitigen Speicherung von Daten. Das zentrale Register im Rechenwerk ist der *Akkumulator*. Er sammelt (akkumuliert) Ergebnisse fortlaufender Operationen, zum Beispiel beim Addieren. Über ihn liefert das Rechenwerk das Berechnungsergebnis ab.

Das *Leitwerk* steuert den Ablauf des Programms, indem es *Maschinenbefehle* aus dem Speicher holt, im *Befehlsregister* zwischenspeichert und die einzelnen Befehlscodes mittels einer *Ablaufsteuerung* in Steueralgorithmus umsetzt. Holphase und Ausführungsphase bilden zusammen den *Befehlszyklus*. Er wird vom Leitwerk ständig wiederholt. Mit dem *Befehlszähler* wird der Speicher adressiert. Während der Holphase zeigt er auf den nächsten Maschinenbefehl. Nachdem der Befehl geholt ist, wird die Adresse fortgeschaltet. Das geschieht im Normalfall durch eine Erhöhung des Wertes um eins.

Das Leitwerk hat auch die Übertragung der Daten und Befehle zwischen den einzelnen Komponenten des Rechners mit Hilfe von *Datenbussen* zu bewerkstelligen. Ein Datenbus ist im wesentlichen ein Bündel von Adress-, Daten- und Steuerleitungen, die von mehreren Komponenten des Rechners gemeinsam genutzt werden. Datenbusse sind im Bild nicht eingezeichnet, sondern nur die wesentlichen der durch die Datenbusse hergestellten Verbindungen (Kommunikationsbeziehungen).



Architektur des Von-Neumann-Rechners

Zeichenerklärung:  
S: Steuerverbindungen  
D: Datenverbindungen  
B: Befehlsverbindungen

Im *Speicher* eines Von-Neumann-Rechners werden sowohl *Daten*, also die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Berechnungen, als auch die *Befehle* aufbewahrt.

Die *Ein-/Ausgabeeinheit* dient als Schnittstelle zur Peripherie des Rechners. Zur Peripherie gehören die Tastatur, die Maus, Monitore, Drucker usw.

Für die unmittelbare Programmierung solcher Rechner werden die Maschinenbefehle mit kurzen und leicht eingängigen Namen bezeichnet. Eine Folge solcher Befehle bilden ein *Assemblerprogramm*. Es wird durch einen *Assembler* in Maschinencode (Bitfolgen) übersetzt.

Die *Befehle* (Einadressbefehle) bestehen aus dem *Operationscode* und der *Adresse* (allgemeiner: *Parameter*). Letztere gibt an,

- woher die Daten zu holen bzw. wohin sie zu übertragen sind (bei Datenübertragungsbefehlen)
- welcher Speicherinhalt mit dem Akkumulator zu verknüpfen ist (bei Verknüpfungsbefehlen)
- mit welcher Adresse die Befehlsfolge fortzusetzen ist (bei Sprungbefehlen)

Bei den Sprungbefehlen wird der normale Ablauf insofern unterbrochen, als der Befehlszähler nicht einfach weiterzählt, sondern indem er explizit auf einen bestimmten Wert gesetzt wird.

### **Die Bedeutung der Z4**

Die Bedeutung der Zuse-Rechner für die Entwicklung der Mathematik wird nach meiner Wahrnehmung in den Lobreden zu Konrad Zuses Werk zu wenig gewürdigt. Von den frühen Zuse-Rechnern hat nur die Z4 die Kriegswirren überstanden. Sie ist ein Unikat und wurde seinerzeit unter abenteuerlichen Umständen aus dem umkämpften Berlin über Göttingen in den Allgäu gebracht. Dort kam es zu einer Begegnung Zuses mit dem jungen Professor Eduard Stiefel von der ETH Zürich. Er und seine Kollegen Heinz Rutishauser und Ambros Speiser gehören zu den Pionieren des automatischen Rechnens. Auf die Namen der beiden Erstgenannten bin ich bereits während meines Studiums gestoßen – in den 1960-er Jahren. Da hatte ich noch keine Kenntnisse über die Erfinder des Computers.

Die Z4 hatte großen Anteil an den Erfolgen dieser Wissenschaftler vom neugegründeten “Institut für angewandte Mathematik“; ich zitiere Herbert Bruderer (2012): „Die Nutzung der Z4 ist auch ein Meilenstein in der europäischen Informatikgeschichte, denn 1950 war die ETH Zürich dank der Z4 die einzige Universität auf dem europäischen Festland mit einem betriebsfähigen Computer.“ Und weiter schreibt er: „Vor Inbetriebnahme wurden an der Maschine erhebliche Erweiterungen (z.B. Gebrauch bedingter Sprungbefehle) durchgeführt... Eduard Stiefel und seine Mitarbeiter Heinz Rutishauser und Ambros Speiser haben dank der Z4 wesentliche Beiträge zur angewandten Mathematik und zur Entwicklung der Rechentechnik sowie der Informatik geleistet.“

Die Z4 war an der ETH Zürich von 1950 bis 1955 in Betrieb. Heute steht sie im Deutschen Museum in München.

### **Literaturhinweise zu den frühen Computern Z1 bis Z4**

- Alex, Jürgen; Flessner, Hermann; Mons, Wilhelm; Pauli, Kurt; Zuse, Horst: Konrad Zuse. Der Vater des Computers. Parzeller, Fulda 2000 (*Beiträge: „Konrad Zuse – Persönlichkeit und Werdegang“ von Wilhelm Mons und „Konrad Zuse – Seine Rechenmaschinen“ von Horst Zuse.*)
- Alex, Jürgen: Wege und Irrwege des Konrad Zuse. Spektrum der Wissenschaft (1997) 1, 78-90
- Beauchair, Wilfried de: Rechnen mit Maschinen. Eine Bildgeschichte der Rechentechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2005. (*Reprint der 1. Auflage von 1968, erschienen im Vieweg-Verlag*)
- Bruderer, Herbert: Konrad Zuse und die Schweiz. Oldenbourg Verlag, München 2012
- Karl, Wolfgang; Waldschmidt, Klaus; Zuse, Horst (Hrsg.): Konrad Zuse. Informatik Spektrum 34 (2011) 6. (*Beitrag „Konrad Zuse und die ETH Zürich“ von Herbert Bruderer.*)
- Liebig, H.; Menge, M.: Zuse und der nicht-einschrittige Übertrag. Informatik Spektrum (23. Dezember 2000), S. 398-402 (*Zeigt auf, wie sich die Zusesche Addiererschaltung in moderne Halbleitertechnik übertragen lässt und dass man dabei auf ähnliche Schwierigkeiten stößt wie bei der mechanischen Lösung.*)
- Naumann, Friedrich: Vom Abakus zum Internet. Die Geschichte der Informatik. Primus Verlag, Darmstadt, 2001
- Petzold, Hartmut: Moderne Rechenkünstler. Die Industrialisierung der Rechentechnik in Deutschland. C. H. Beck, München 1992 (*Kapitel „5. Ein eigensinniger Erfinder-Unternehmer: Konrad Zuse“*)
- Rojas, Raúl (Hrsg.): Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse. Springer, Berlin, Heidelberg 1998 (*Detaillierte Darstellung der Architektur und der Rechengänge in den Rechnern Z1 und Z3*)
- Rojas, Raúl; Thurm, Alexander: Die Patentanmeldung Z391 von Konrad Zuse.  
<http://www.zib.de/zuse/Inhalt/Texte/Chrono/40er/Pdf/0229.pdf>  
(*In diesem Dokument, das auch im Buch „Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse“ enthalten ist, findet man alles Wichtige über die Funktionsweise der frühen Computer.*)
- Schiffmann, Wolfram; Schmitz, Robert: Technische Informatik. Band 2: Grundlagen der Computertechnik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1992 (*Enthält eine gründliche Darstellung der Von-Neumann-Rechnerarchitektur.*)
- Zuse, Konrad: Der Computer - Mein Lebenswerk. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1990 (*Lebenserinnerungen mit vielen Hinweisen auf Beweggründe und Lernvorgänge. Entstehungsgeschichte der Addierschaltung mit einschrittigem Übertrag.*)