Zuses erste Computer

Viele originelle technische Details fügen sich zum großen Ganzen

Beitrag zum 24. Fuldaer Informatik-Kolloquium
am 11. Juni 2010 (rev.: 17.10.10)
Timm Grams, Hochschule Fulda, www.hs-fulda.de/~grams

Übersicht

Leitgedanken

Die Erinnerung an die Leistungen des Computerpioniers allein genügt nicht. Wir fragen, was wir heute daraus lernen können. Deshalb habe ich für den Vortrag ein paar Leitgedanken formuliert: Der Blick zurück soll erstens Relevantes für eine zeitgemäße *Didaktik* der Mathematik und der Informatik zutage fördern, zweitens das *Wesen des Problemlösungsprozesses* erhellen und drittens die Aufmerksamkeit auf *Bleibendes* lenken[1].

Ich beginne mit einer Vision anlässlich des „ZUSE 2.0“- Kongresses am 26. Mai in Wiesbaden. Ein Erstklässler lernt das Zählen. Verschiedenfarbige Steckwürfel bewegen sich wie von Geisterhand und fügen sich zu einer Art Brücke. Das bewirkt der Schüler mithilfe der Maus eines Computers und mit einem sehr eingeschränkten Bewegungsrepertoire. Die Würfel sind virtuell, sie offenbaren ihre Existenz nur auf dem Bildschirm. Sie haben kein Gewicht, ihre Oberflächen, Kanten und Ecken sind auf bloße optische Signale reduziert. Bei Ungeschicklichkeit fallen die Würfel nicht herunter, sondern sie lösen sich in nichts auf. Das Einschnappen der Stecknoppen bleibt ohne sinnlich wahrnehmbaren Effekt. So funktioniert kindliche Welterkundung im Computerzeitalter – zumindest nach den Vorstellungen der Bildungsbürokratie. Wer’s nicht glauben kann, möge im Internet nach „mauswiesel.bildung.hessen“ suchen.

Wir schauen heute, wenn es um den Computer in der Bildung geht, in die falsche Richtung, nämlich auf die Anwendungen: „eLearning“ und „Computerführerschein“ gehören zum etablierten Vokabular der Bildungsbürokratie. Aber der Computer durchdringt unsere Lebenswelt so oder so. Auch ohne Didaktik

[1] Die von mir benutzten Quellen, soweit nicht explizit zitiert: Alex (1997), Alex u. a. (2000), Beauclair (1986), Petzold (1992), Rojas (1998), Vorndran (1986), H. Zuse (2000), K. Zuse (1990), Ausstellungen im Deutschen Technik-Museum Berlin, im Deutschen Museum München, im Zuse-Museum Hünfeld, im Zuseum Bautzen und private Korrespondenz.

und Pädagogik.

Mehr bringt – zumindest vom pädagogischen Standpunkt – der Blick zurück: Wie haben die Computererfinder ihr Klassenziel erreicht? Was zeichnet ihre geistige Entwicklung aus, was hat sie gefördert? Ganz gewiss spielte der Computer dabei keine Rolle! Für die Computererfinder gab es keine virtuelle Realität. Ihnen blieb nur das *Lernen in der wirklichen Wirklichkeit*.

Beachten Sie Zuses Hände. Auf überaus vielen Photos von ihm sind sie aktiv, wie auf diesem vom Informatik-Kolloquium vor achtzehn Jahren. Zuse hat die Welt im wahrsten Sinne des Wortes *begriffen*.

Der Stabilbaukasten war sein „Ein und Alles". Auf der selbst gefertigten Karikatur des Sechzehnjährigen ist sein Greiferkran, abgebildet. Das *Handwerk* spielte in Zuses Leben eine große Rolle.

Vermutlich hat diese Art der konkreten Welterfassung Zuse zur gedanklichen Bewältigung großer Komplexität befähigt. Und diese Vermutung stimmt mit den Erkenntnissen der Hirnforschung und der Anthropologie überein: Hirnentwicklung und die Entwicklung der Feinmotorik, insbesondere die Entwicklung der Feinbeweglichkeit der Hände, sind nach heutiger Erkenntnis eng miteinander verzahnt (Neuweiler, 2005).

Und das können wir heute daraus lernen: Virtuelle Realität mag auch in der Schule von Nutzen sein – aber nicht zu viel davon und vor allem nicht zu früh.

Gründe für eine „Archäologie der Neuzeit" – Aus der Vor-Computer-Zeit

Sicherlich lässt sich aus der Geschichte nicht herleiten, was die Zukunft bringen wird. Da folge ich Karl R. Popper. Aber auch Helmut Kohl liegt nicht verkehrt, wenn er sagt: „Ein Volk, das seine Geschichte nicht kennt, versteht die Gegenwart nicht und kann die Zukunft nicht gestalten."

Wer sich mit der Entstehung des Computers befasst, will auch wissen, in welchem Umfeld sich die Sache abgespielt hat: Welche Ideen aus der Computer-Vorgeschichte, insbesondere aus der Geschichte des mechanischen Rechnens, haben die Sache vorbereitet? Aber solcherart Neugier ist nicht der einzige Grund, eine „Archäologie der Neuzeit" zu betreiben.

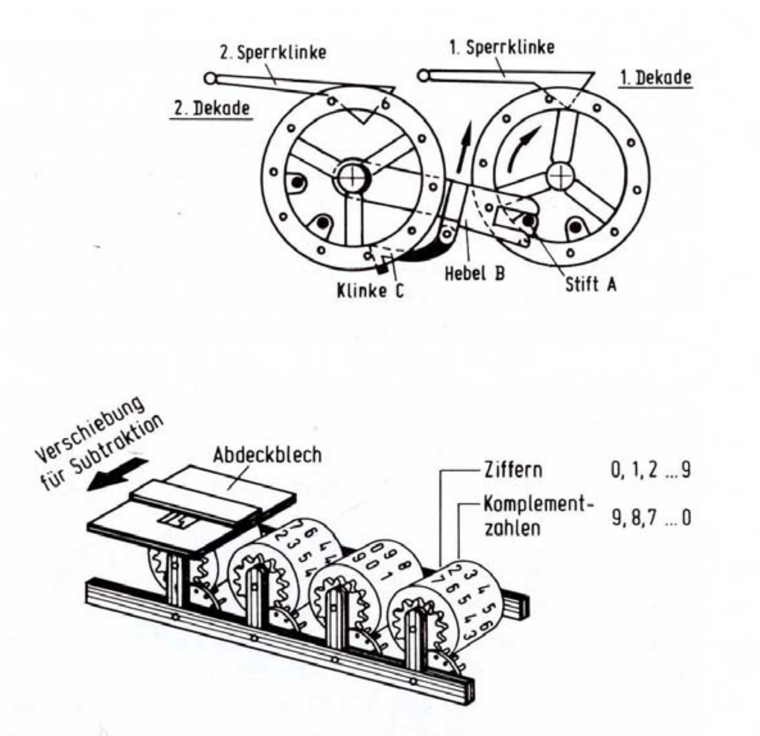
Wenn wir heute einen Computer-Mechanismus erklären, dann geschieht das meist in einem speziellen Zusammenhang, der durch die aktuelle Technik vorgegeben ist. Wird die Entstehungsgeschichte bewusst, so löst sich der Mechanismus aus diesem Spezialzusammenhang. Die Ausgrabung des Vorgängers oder gar des Originals führt zur Blickfelderweiterung.

Die *Komplementbildung* beispielsweise, mit dem unsere Computer die Subtraktion ganzer Zahlen in eine Addition wandeln, ist ein Trick, der scheinbar auf die Welt der Bits und Bytes beschränkt ist. Gehen wir zurück.

Im Jahr 1642 hat Blaise Pascal eine Rechenmaschine zur Addition und Subtraktion ganzer Zahlen im Dezimalsystem vorgestellt. Die Zählräder ließen sich nur in eine Richtung drehen. Das war dem Mechanismus für den Zehnerübertrag geschuldet. Deshalb konnte man mit der Maschine eigentlich nur addieren.

Pascal aber hatte auch für die Subtraktion zweier Zahlen eine Lösung: Auf den Einstellrädern waren zwei Ziffernreihen angebracht: eine in aufsteigender Folge und eine in absteigender.

Für die Einstellung des Subtrahenden genügte es, ein Abdeckblech so zu verschieben, dass anstelle der Ziffern deren Neunerkomplement sichtbar wurde.



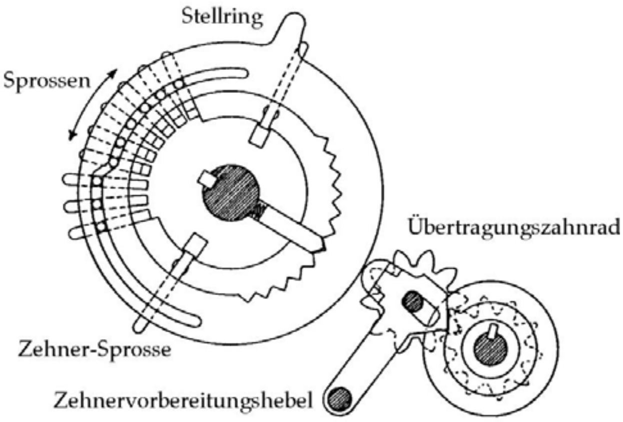
Ist beispielsweise die Zahl 1642 von der Zahl 2010 abzuziehen, ersetzt man zuerst diese Zahl durch ihr Neunerkomplement: 8357. Durch die Addition einer Eins gelangt man zu 8358. Nun ist diese Zahl zum Minuenden 2010 zu addieren. Bei Beschränkung auf die letzten vier Stellen ergibt sich so das korrekte Ergebnis der Subtraktion, nämlich 0368.

Dieser „archäologische“ Fund veranlasst uns zu einer kleinen Herleitung. Schnell haben wir den allgemeinen Zusammenhang gefunden; und nun verstehen wir auch die Komplementdarstellung in der Binärwelt des heutigen Computers besser.

Die Binärwelt selbst ist auch keine Erfindung des Computerzeitalters. Das Feld war spätestens durch Leibniz bereitet. Schon 1697 schrieb er über die *Vorzüge des Dualsystems:* „Das Addieren von Zahlen ist bei dieser Methode so leicht, dass diese nicht schneller diktiert als addiert werden können… Ich gehe nun zur Multiplikation über. Hier ist es wiederum klar, dass man sich nichts Leichteres vorstellen kann… Diese Art Kalkül könnte auch mit einer Maschine durchgeführt werden.“

In der Binärwelt hat das Kleine Einmaleins eben nicht mehr 45 verschiedene Produkte, sondern nur noch eins: 1×1=1. Und warum hat man dann nicht schon längst solche Maschinen gebaut? Der Mensch hat sich an das Dezimalsystem gewöhnt. Es ist schwer, ihm den Umgang mit einer Maschine, die nur Nullen und Einsen kennt, schmackhaft zu machen.

Dieses Problem hat Konrad Zuse gelöst. Eine der wesentlichen Leistungen Konrad Zuses besteht meines Erachtens in der konsequenten Befolgung der Regeln der Mensch-Maschine-Kommunikation. In der Maschine „sind die Zahlen unter sich“, wie Konrad Zuse sagte. Die interne Zahlendarstellung muss keinerlei Rücksicht auf den Menschen nehmen. Einen Nutzen hat eine solche Maschine aber nur, wenn sie sich vom Menschen mit seinen Gewohnheiten möglichst einfach bedienen lässt. Aus diesem Grund nimmt Konrad Zuse einen sehr hohen Aufwand zur Zahlenwandlung vom Dezimal- ins Dualsystem und umgekehrt in Kauf.



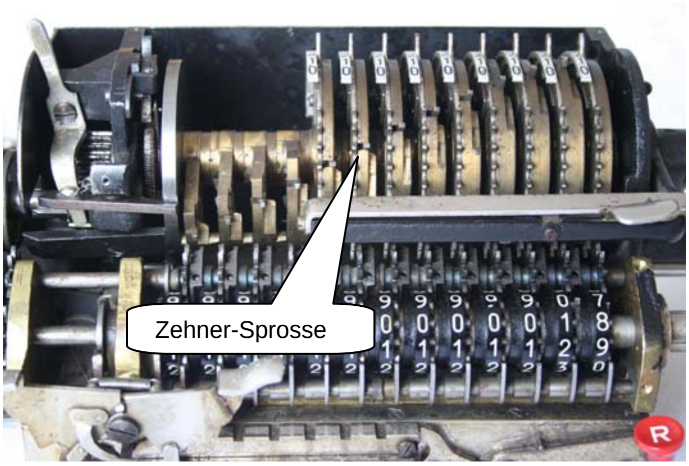
Ein weiteres Beispiel für „Blickfelderweiterung durch Ausgrabung“ ist der so genannte *einschrittige Übertrag*. Wenn wir zwei Zahlen addieren, wir nehmen 1642 und 368, dann addieren wir erst die Ziffern der letzten Stelle, schreiben das Ergebnis 0 darunter und nehmen den Übertrag vom

Wert eins auf die nächsthöhere Stelle mit. Dann addieren wir die Ziffern dieser Stelle und arbeiten uns so von rechts nach links – immer schön nacheinander – voran.

Nun kann man sich einen Mechanismus ausdenken, der diesen Prozess mit Zählrädern nachbildet. Bei der Addition neunstelliger Zahl kommt man dann auf neun nacheinander auszuführende Schritte, die jeweils eine Kurbelumdrehung erfordern. Das artet in eine ziemliche Kurbelei aus. So oder ähnlich funktionierten die frühen Rechenmaschinen.

Vorteilhafter wäre eine Maschine, deren Zählräder parallel arbeiten und so die Ergebnisziffern sämtlicher Stellen gleichzeitig abliefern können. Wäre da nicht der Übertrag! Er scheint das sequentielle Vorgehen von rechts nach links zu erzwingen.

Die Sprossenradmaschinen zeigen, dass es auch anders geht. Sie gehen auf eine Erfindung von Giovanni Poleni (1709) zurück und wurden von Willgodt Theophil Odhner und Franz Trinks gegen Ende des 19. Jahrhunderts für die Massenfertigung vervollkommnet. Noch bis in die siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts leisteten sie in vielen Büros gute Dienste.



Sprossenradmaschinen dieser Bauart erledigen die Addition zweier mehrstelliger Zahlen mit einer einzigen Kurbelumdrehung. Die Additionen passieren auf allen Stellen gleichzeitig. Dafür sind die Sprossen da, die jeweils etwa das erste Drittel eines jeden Sprossenrades einnehmen. Anschließend folgt je Rad eine Zehnersprosse für den Übertrag. Diese Zehnersprossen sind von Rad zu Rad leicht gegeneinander verschoben, so dass die Überträge allesamt kurz hintereinander erfolgen können. Dafür wird ein weiteres Drittel des Sprossenradumfangs gebraucht.

Die Zehnersprossen sind bei der hier abgebildeten Rechenmaschine Lipsia nicht versenkbar wie die Zählsprossen. Sie werden durch eine Feder in einer Lage gehalten derart, dass sie vom Zählrad nicht erfasst werden können. Erst wenn die vorhergehende Stelle einen Übertrag ergibt, sorgt der Zehnervorbereitungshebel dafür, dass die betreffende Zehnersprosse in die Spur des Zählrades gedrückt wird. Je Sprossenrad wird noch eine Zehnersprosse für die Subtraktion gebraucht – dafür ist Platz auf dem restlichen Drittel des Sprossenrads.

Solche Effizienzüberlegungen im Zusammenhang mit der Addition – eine zentrale, immer wiederkehrenden Operation – begegnen uns bei den Zuse-Rechnern wieder und sie spielen auch beim Bau heutiger Computer eine wichtige Rolle. Immer geht es um eine Lösung für den *einschrittigen Übertrag*.

Die Zeitrechnung der Informatik

Der Kasten zeigt einen Ausschnitt aus der Zeittafel der Informatik. Ins Zentrum stelle ich Charles Babbage. Sein Entwurf eines programmgesteuerten Rechenautomaten sah bereits getrennte Funktionseinheiten für Rechenwerk, Speicher und Steuereinheit sowie für die Ein- und Ausgabe vor (Swade, 1993). Konrad

Vor Babbage: Rechenmaschinen

- Wilhelm Schickard (Zahnräder mit Zehnerübertrag, 1623)
- Blaise Pascal (Komplementzahlen, 1642)
- Gottfried Wilhelm Leibniz (Staffelwalze, Dualzahlen, 1673)
- Giovanni Poleni (Sprossenrad, 1709)
- Franz Trinks (1892, Brunsviga, Odhner-Patente)

Nach Babbage: Computer

- Charles Babbage: Computerarchitektur (1838)
- Konrad Zuse: Z3 (1941)
- John Atanasoff: ABC (1942)
- John von Neumann: Speicherprogrammierung (1944)
- Howard Aiken: MARK I (1944)
- J. Presper Eckert und John W. Mauchly: ENIAC (1945)

Zuse selbst nannte Babbage, nachdem er von ihm und seinen Maschinen gehört hatte, „den Vater der programmgesteuerten Rechenmaschine“ (Alex u. a., 2000, S. 151).

Mit den damaligen fertigungstechnischen Möglichkeiten waren Babbages Vorstellungen allerdings nicht zu verwirklichen. Dazu kam es erst über einhundert Jahre später. Da ging es dem Computer nicht besser als seinem Vorgänger, der mechanischen Rechenmaschine.

Die Entwicklung der ersten Zuse-Rechner Z1 bis Z4 fällt in die fünfzehn Jahre von 1935, als Zuse beschloss, Computererfinder zu werden, bis 1950, als der erste seiner Computer produktiv wurde.

Im Jahr 1950 wurde die Z4 in der neu gegründeten Zuse KG, in diesem Haus in Neukirchen, etwa 25 km von hier, für die Auslieferung fertig gemacht mit dem Bestimmungsort Zürich. (Das Photo habe ich vor vierzehn Tagen gemacht. Das Haus hat die letzten sechzig Jahre nahezu unverändert überstanden.)

Die Z4 arbeitete am Institut für Angewandte Mathematik der Eidgenössischen Technischen Hochschule jahrelang sehr zuverlässig. Die daraus resultierende gute Reputation und die Mieteinnahmen für den Rechner machten den weiteren Aufbau der Zuse KG möglich.

Vom Problem zur Computerarchitektur

Was mich an Zuses Denkweise und Werk 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.

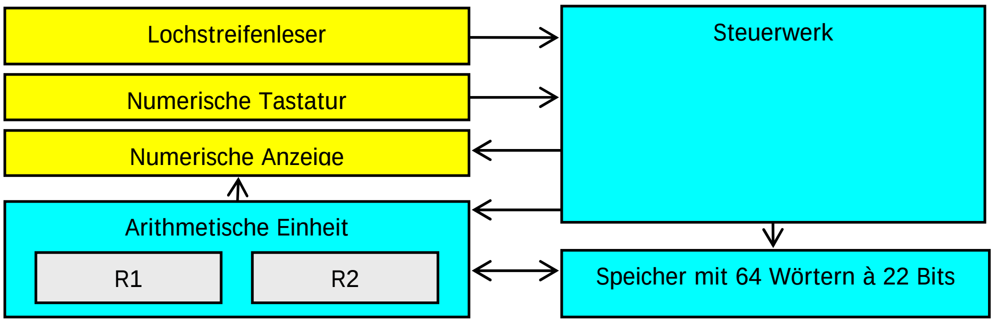
Dagegen Konrad Zuse: Er hatte
1. ein *Problem* erkannt,
2. sich ein *Ziel* zur Lösung dieses Problems gesteckt,
3. den Zielvorstellungen eine *Architektur* gegeben,
4. sich dann unbeirrt auf den Weg gemacht und
5. viele *originelle Lösungen* für Teilprobleme gefunden.

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. Die anschließenden Tabellen zeigen Details der 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

Die linke Tabelle enthält den Befehlssatz der Rechner Z1 und 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: $((a_3{\cdot}x+a_2){\cdot}x+a_1){\cdot}x+a_0$.

Befehl	Lochmuster	Wirkung
lu	- 0 - - - - - 0	R1← a_0
ps 1	0 - - - - - - 0	(1) ← R1
lu	- 0 - - - - - 0	R1← a_1
ps 2	0 - - - - - 0 -	(2) ← R1
lu	- 0 - - - - - 0	R1← a_2
ps 3	0 - - - - - 0 0	(3) ← R1
lu	- 0 - - - - - 0	R1← a_3
ps 4	0 - - - - 0 - -	(4) ← R1
lu	- 0 - - - - - 0	R1 ← x
ps 5	0 - - - - 0 - 0	(5) ← R1
pr 4	0 0 - - - 0 - -	R1 ← (4)
pr 5	0 0 - - - 0 - 0	R2 ← (5)
lm	- 0 - - - 0 0 -	R1 ← R1*R2
pr 3	0 0 - - - - 0 0	R2 ← (3)
ls1	- 0 - - - 0 - -	R1 ← R1+R2
pr 5	0 0 - - - 0 - 0	R2 ← (5)
lm	- 0 - - - 0 0 -	R1 ← R1*R2
pr 2	0 0 - - - - 0 -	R2 ← (2)
ls1	- 0 - - - 0 - -	R1 ← R1+R2
pr 5	0 0 - - - 0 - 0	R2 ← (5)
lm	- 0 - - - 0 0 -	R1 ← R1*R2
pr 1	0 0 - - - - - 0	R2 ← (1)
ls1	- 0 - - - 0 - -	R1 ← R1+R2
ld	- 0 - - - - 0 -	R1 anzeigen

Gleitpunktdarstellung und Zahlenwandlung

Donald Knuth betont im Band 2 seines Werkes "The Art of Computer Programming", dass Zuses Maschinen die Gleitpunkt-Darstellung nutzten und dass er bereits Regeln für das Rechnen mit speziellen Größen wie ∞ und „undefiniert" berücksichtigte[1].

Tatsächlich nimmt Zuses halblogarithmische Zahlendarstellung in allen wesentlichen Punkten die Festlegungen des Standards ANSI/IEEE 745-1985 für die moderne Gleitpunkt-Darstellung reeller Zahlen vorweg.

---

[1] "Floating point arithmetic was incorporated into the design of some of the earliest computers. It was independently proposed by Leonardo Torres y Quevedo in Madrid, 1914; by Konrad Zuse in Berlin, 1936, and by George Stibitz in New Jersey, 1939. Zuse´s machines used a floating binary representation that he called 'semi-logarithmic notation'; he also incorporated conventions for dealing with special quantities like '∞' and 'undefined'." (Donald Knuth, 1981, S.209)

Als junger Ingenieur habe ich mich darüber geärgert, dass in der Sprache Algol eine Division durch null nicht möglich war. Heute noch gibt es Compiler der Programmiersprache C, die damit nicht zurechtkommen. Hätte man die in der reellen Analysis schon seit Langem eingeführten Rechenregeln für ±∞ im Rechner realisiert, wären Widerstands- und Leitwertberechnungen sehr viel einfacher: Der Leitwert eines Widerstands vom Wert 0 (Ohm) ist nun einmal nicht nur sehr groß, sondern gleich ∞. Inzwischen scheint das Problem endlich gelöst zu sein. Die Programmiersprache Java jedenfalls hält sich an den Standard. Die Weitsicht Konrad Zuses ist wirklich beeindruckend.

Die folgenden Bemerkungen sind Anregungen für den Informatik-Unterricht. Wer an diesen technischen Details nicht interessiert ist, überspringt den Rest des Abschnitts am besten.

Im binären Zahlensystem ist die Gleitpunktdarstellung einer Zahl z mit dem Vorzeichen v, der Mantisse m und dem Exponenten e durch die Formel $z = v \times m \times 2^e$ definiert. Dabei ist die Mantisse durch die Bedingungen $1 \le m < 2$ festgelegt.

In den Rechnern Z1 und Z3 werden die Zahlen folgendermaßen gespeichert:

v	$e_6 e_5 \ldots e_1 e_0$	$m_{-1} m_{-2} \ldots m_{-13} m_{-14}$

Insgesamt sind es 22 Bits (+2 intern). Die Mantisse wird ohne die führende Eins (m_0) abgespeichert und benötigt 14 Bits (+2 intern). Dazu kommen sieben Bits für den Exponenten und ein Bit für das Vorzeichen. Für die negativen Zahlen des Exponenten wird die Komplementdarstellung genutzt. Es gibt spezielle Darstellungen für die Werte 0 und ∞. Die Werte +∞ und -∞ werden nach den in der reellen Analysis üblichen Regeln behandelt. Die Rechner sehen eine Ausnahmebehandlung für Überlauf und Unterlauf sowie für undefinierte Ausdrücke wie ∞-∞, 0×∞, 0/0 vor.

Im Internet ist eine Z3-Simulation von Georg-Alexander Thurm zu finden. Besonders die Ein- und Ausgabe von Zahlen eignen sich sehr gut für Demonstrationen im Informatik-Unterricht. Die nebenstehende Tabelle zeigt die Schritte der Zahlenwandlung vom externen Dezimalsystem ins interne Dualsystem am Beispiel der Zahl 299.8. Für die Tabellenzeilen gilt diese *Invariante:* (Intern+Extern)×Zehnerpotenz = 299.8. Die Invariante gilt natürlich nur im Rahmen der Genauigkeit der Zahlendarstellung.

Intern	**Extern**	**Zehnerpotenz**
	2998	10^{-1}
	2.998	10^{2}
$+1.00000000000000_2 0000001$	0.998	10^{2}
$+1.01000000000000_2 0000100$	9.98	10^{1}
$+1.11010000000000_2 0000100$	0.98	10^{1}
$+1.00100010000000_2 0001000$	9.8	10^{0}
$+1.00101011000000_2 0001000$	0.8	10^{0}
$+1.01110101110000_2 0001011$	8	10^{-1}
$+1.01110110110000_2 0001011$		10^{-1}
$+1.00101011110011_2 0001000$		10^{0}

Hier geht es mir um das Prinzip der Dateneingabe. Einige Realisierungsdetails habe ich dabei unterschlagen, beispielsweise die zusätzlichen internen Bits zur Erhöhung der Genauigkeit. Außerdem werden die Zahlen intern nicht durchweg in die normalisierte Darstellung überführt. Bei Eingabe der Dezimalziffern beispielsweise wird der Exponent auf den festen Wert 13 (binär: 0001101) gesetzt, so dass sich alle über das Tastenfeld einstellbaren Werte von 0 bis 9999 als ganze Zahlen repräsentieren lassen. Wer tiefer in die Realisierungsdetails der Zuse-Rechner eintauchen will, dem empfehle ich das Buch von Rojas (1998).

Für die Zahlenausgabe sieht die Wandlung im Prinzip so aus:

Intern	Extern	Zehnerpotenz
$+1.0010101111001 1_2 0001000$		10^0
$+1.1101111110101 1_2 0000100$		10^1
$+1.0111111110111 1_2 0000001$		10^2
$+1.1111111011110 0_2 1111111$	2	10^2
$+1.0011111101011 0_2 0000011$	20	10^1
$+1.1111010110000 0_2 1111111$	29	10^1
$+1.0011100101110 0_2 0000011$	290	10^0
$+1.1001011100000 0_2 1111111$	299	10^0
$+1.1111100110000 0_2 0000010$	2990	10^{-1}
	2998	10^{-1}

Schaltgliedtechnik – Abstraktion und Konkretisierung

Das Binärsystem macht vieles einfacher. Und das liegt daran, dass für die zweiwertige Logik ein paar sehr hilfreiche Regeln gelten. Solche Regeln hat sich Zuse selbst erarbeitet und das Resultat seiner Bemühungen als „Bedingungskombinatorik“ bezeichnet. Die folgenden Zitate sind aus dem dritten Kapitel der Lebenserinnerungen „Der Computer – mein Lebenswerk“ von Konrad Zuse.

„Man brauchte also nur die Grundschaltungen ... für die drei Grundoperationen Konjunktion, Disjunktion und Negation zu finden.“ (S. 36)

„[Ich] nannte ... meine Bedingungskombinatorik [in Anlehnung an Leibniz] allgemeine Dyadik. In einem Brief an meinen früheren Mathematiklehrer erwähnte ich stolz meine Gedanken. Die Antwort lautete, wie sie lauten mußte: dieser Formalismus sei längst unter dem Namen Aussagenkalkül bekannt.“ (S. 41)

Fasziniert war Zuse von der „Analogie zwischen dem Aussagenkalkül und den Relaisschaltungen“ und er fügt hinzu „... damals öffneten sich mir die Tore zu einer neuen Welt des Rechnens. Das mehr oder weniger unsystematische ‚Herumknobeln‘ konnte in klare Gesetze gefasst werden. Darüber hinaus bot der Aussagenkalkül Regeln, die ich noch nicht kannte, etwa das Dualitätsprinzip.“ (S. 43)

„Es war eine Erleuchtung, dieses Prinzip auf Schaltungen zu übertragen... Dieses Gesetz zeigte bei systematischer Anwendung überraschende Effekte, die besonders für die Konstruktion der Additionsschaltung Vorteile brachte.“ (S. 43)

Wilfried de Beauclair schreibt in seinem Buch „Rechnen mit Maschinen“ (1968, 2005): „Welchen Wert Zuse selbst auf die logischen Grundlagen seiner Rechenautomaten … legte, geht am besten aus seiner … Druckschrift hervor, die er im Jahre 1947 verfasste – einerseits als Ergebnis seiner langjährigen Entwicklungsarbeiten, andererseits als Hinweis auf die bis heute noch nicht voll realisierten Erkenntnisse.“

Auf dem Fuldaer Informatik-Kolloquium im Mai 1992 hat uns Konrad Zuse seine Haltung mit viel Witz klar gemacht. Seine Unterscheidung zwischen angewandten und „abgewandten“ Mathematikern ist haften geblieben.

In seinen Lebenserinnerungen schreibt er: „Rechts von der ‚reinen’ Mathematik siedelten die Vertreter der mathematischen Logik, eine Klasse für sich, noch ‚reiner’ als die ‚reinen’ Mathematiker, denn sie verfolgten noch abstraktere Ziele. Man könnte sie im Gegensatz zu den ‚angewandten’ Mathematikern auch die ‚abgewandten’ Mathematiker nennen, so ‚abgewandt’, daß wir in den Mathematik-Vorlesungen an der Technischen Hochschule kaum etwas von diesen Dingen erfahren haben...“

„... Nun aber geschah das Unerhörte: Vertreter des ganz linken Flügels (die Computerfachleute, noch links von den ‚angewandten’ Mathematikern angesiedelt) benutzten Theorien des ganz rechten, also der mathematischen Logik. Und sie taten das so gründlich, daß sie, was mathematische Strenge und Abstraktheit angeht, heute nahezu führend sind.“ (Zuse, 1990, S. 146 f.)

Bei Zuse führte der praktische Hintergrund also keinesfalls zur Blickverengung auf bestimmte Realisierungen. Zuse hat seine Vorstellungen auf die verschiedenen Realisierungsformen übertragen können. Und dabei spielte die parallele Entwicklung der theoretischen Kompetenz offenbar eine große Rolle.

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

Wegen des zu erwartenden hohen Platzbedarfs eines Zahlenspeichers in Relaistechnik 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. Deshalb baute Zuse später die Z3 in Relaistechnik 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).

Addition mit einschrittigem Übertrag

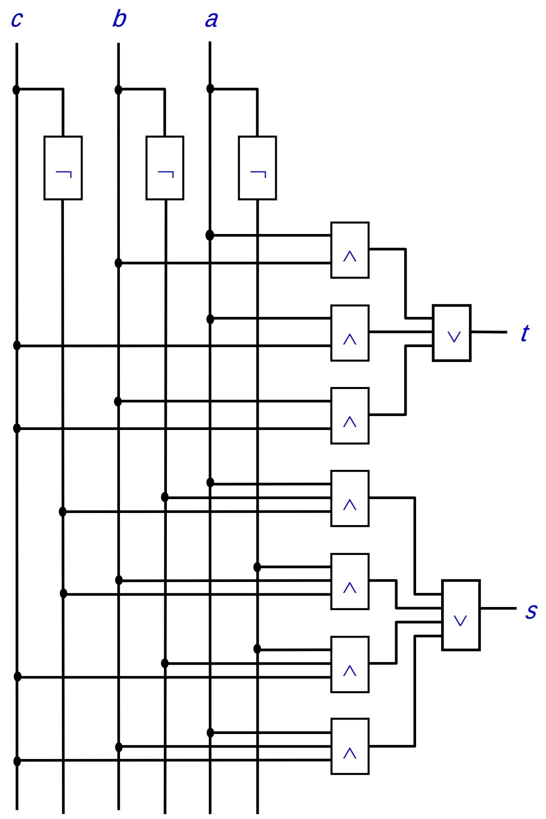
Der Computer soll seine Arbeit möglichst schnell erledigen. Der Addition von Zahlen fällt dabei, wie wir schon bei den mechanischen Rechnern gesehen haben, eine Schlüsselrolle zu.

Wir betrachten die Addition zweier Zahlen für jede Stelle separat: a ist das Binärzeichen, das bei der ersten Zahl an dieser Stelle steht und b ist das der zweiten Zahl. Das Übertragsbit von der niedriger wertigen Stelle ist c.

Mit den elementaren Verknüpfungsbausteinen für UND ($\wedge$), ODER ($\vee$) und NICHT ($\neg$) lassen sich die Schaltfunktionen für das Summenbit s und das Übertragsbit t folgendermaßen darstellen:

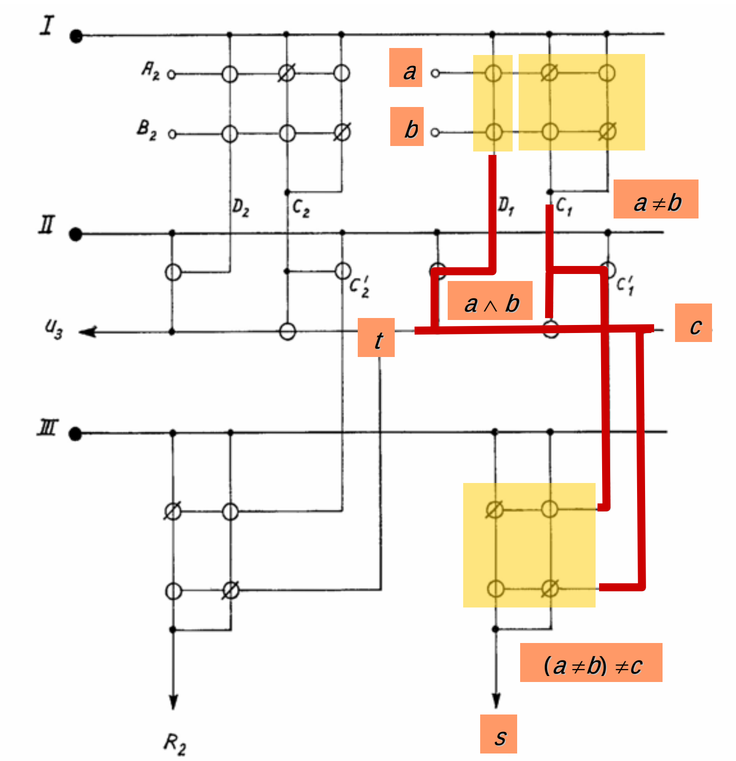
$s = (a\wedge\neg b\wedge\neg c)\vee(\neg a\wedge b\wedge\neg c)\vee(\neg a\wedge\neg b\wedge c)\vee(a\wedge b\wedge c)$

$t = (a \wedge b) \vee (a \wedge c) \vee (b \wedge c)$



Die Grafik zeigt das Blockschaltbild dieser Schaltfunktionen. Und auch der nicht in Digitaltechnik geschulte Betrachter kann leicht einsehen, welches Problem eine solche Realisierung bereitet: Jedes Signal muss wenigstens zwei Schaltglieder durchlaufen. Und das braucht immer etwas Zeit. Das Übertragsbit auf die nächste Stelle steht erst bereit, nachdem das vorhergehende Übertragsbit fest steht und danach noch zwei Schaltglieder durchlaufen hat. Diese Signallaufzeiten summieren sich über alle Stellen.

Zur Steigerung der Zeiteffizienz gibt es für die heute üblichen Halbleitertechnologien Lösungen und Lösungsversuche (Paralleladdierer in Normalformlösung, Ripple-Carry-Addierer, Carry-Look-Ahead-Addierer), die im Grunde alle nicht sehr zufrieden stellend sind.



Konrad Zuse hat für die Relaistechnik – und ansatzweise wohl auch für die mechanische Schaltungstechnik – das Effizienzproblem gelöst. Er nutzte die Umformungsregeln der Aussagenlogik und die Tatsache, dass sich Antivalenzglieder (≠) in Relaistechnik sehr einfach realisieren lassen. Seine Schaltfunktionen sehen schließlich so aus:

$s = ((a \neq b) \neq c)$

$t = ((a \neq b) \wedge c) \vee (a \wedge b)$

In der von ihm entwickelten *abstrakten Schaltgliedtechnik* entsteht ein Schaltbild, das sich durch Einfachheit und Eleganz auszeichnet und das dem darzustellenden Gegenstand vorzüglich angepasst ist (Zuse, 1990, Bild 19, S. 181). Damit hebt sich diese Darstellung vorteilhaft vom heutigen Trend ab, eine „einheitliche Darstellungsform für alles Mögliche" zu definieren.

Die Relais sind in diesem Schaltbild als Kreise dargestellt. Der Öffner (Ruhekontaktrelais) wird vom Schließer (Arbeitskontaktrelais) durch einen Schrägstrich unterschieden.

Zur Erläuterung habe ich in der Zeichnung die Schaltelemente einer Stelle farbig markiert und die hier verwendeten Bezeichnungen eingetragen.

Schauen wir uns den Ausdruck für den Übertrag *t* einmal etwas genauer an. Der Teilausdruck $a \wedge b$ ist vom letzten Übertrag *c* unabhängig und steht sofort zur Verfügung. Das gilt auch für den Teilausdruck $a \neq b$. Er macht das Übertragsbit der vorhergehenden Stelle wirksam. Diese Beobachtungen lassen sich in der Relaistechnik vorteilhaft nutzen.

Die Spannungen auf den Leitungen I, II und III werden zur Schonung der Relaiskontakte nacheinander zugeschaltet. Die Ermittlung der Überträge für sämtliche Stellen der Zahlendarstellung kann in nur einem einzigen Schritt und quasi gleichzeitig erfolgen – durch Zuschaltung der Spannung auf Leitung II. Zuse hat in der Relaistechnik also den *einschrittigen Übertrag* realisiert. Und das ist sicherlich eine seiner Glanzleistungen.

Auch wenn die Relaistechnik in heutigen Computern keine Rolle mehr spielt: die Denkweise, die Zuse zu dieser Lösung geführt hat, ist beispielhaft.

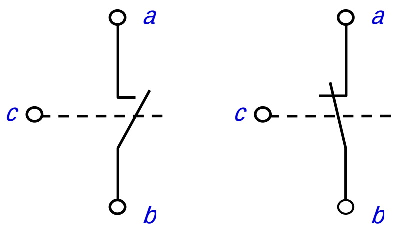
Informatik zum Anfassen: Mechanische Schaltglieder

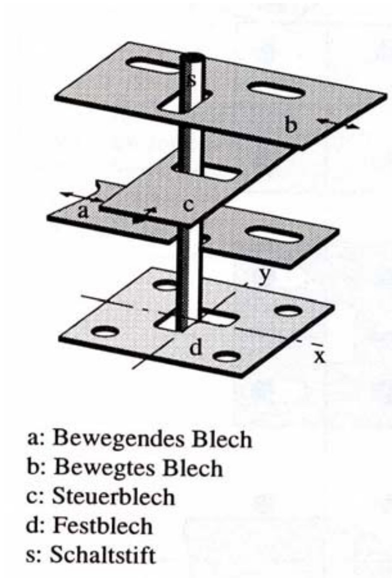
Die Z1 hat Zuse nicht in Relaistechnik aufgebaut. Relais waren ihm zu groß. Also überlegte er sich eine rein mechanische Lösung für die Schaltglieder und die Speicher. Hier kommen wieder sehr ungewöhnliche Wesenszüge der Kreativität Zuses zum Vorschein:

- Ideen suchen sich Realisierungsmöglichkeiten.
- Technologien sind eher sekundär,
- aber sie müssen „begriffen“ sein.

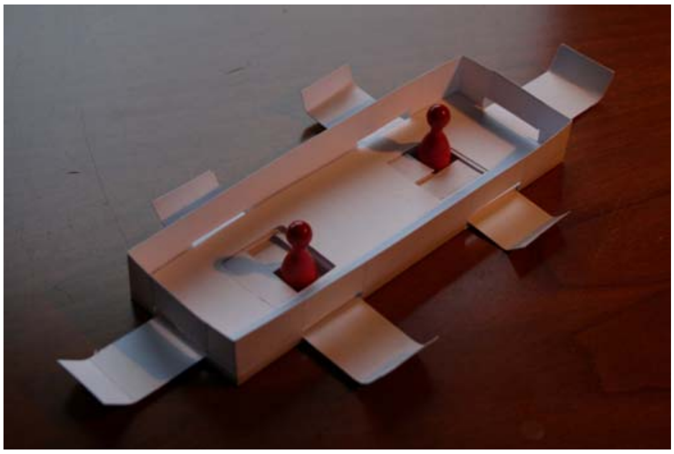
Das Bild zeigt, wie Zuse die wesentlichen Grundfunktionen der Relais in Mechanik umgesetzt hat. Eine einfachere Realisierung ist kaum vorstellbar: Sie kommt ohne anspruchsvolle mechanische Elemente aus. Beispielsweise gibt es keine Federn. (Auch Pascal hat – wie man im Bild weiter oben sehen kann – bei seiner Rechenmaschine offenbar darauf verzichtet und die Schwerkraft ausgenutzt.)

Mechanisches Schaltglied (patentiert: 9. Mai 1936) und die dazu äquivalenten Relaisschaltglieder





Heute ist Zuses mechanische Schaltgliedtechnik vor allem für die Didaktik interessant: Sie bietet Mathematik und Informatik zum Anfassen.



Ich habe einen Papierbastelbogen für mechanische Schaltglieder entwickelt, mit dem sich alle elementaren Operationen wie UND, ODER, NICHT, ANTIVALENT und ÄQUIVALENT nachbauen lassen. Wer sich für diese Technik zum „Begreifen“ interessiert, kann die Bastelanleitung per E-Mail bei mir anfordern.

Anerkennung

Nach anfänglichem Zögern erfährt Zuses Werk nicht nur in der deutschen Informatik-Welt hohe Wertschätzung, sondern in der ganzen Welt. Es gibt viele Worte der Anerkennung und des Lobes. Ich bringe hier ein Zitat, von dem ich hoffe, dass es noch wenig bekannt ist und dass zumindest seine Herkunft ein wenig überrascht.

Dem Lexikon bedeutender Mathematiker (Gottwald u. a., 1990) entnehme ich: „Als wesentliche Baugruppen seiner programmgesteuerten Rechenmaschine sah Zuse Rechenwerk, Speicher und Programmwerk vor. Er arbeitete mit Dualzahlen und entwickelte eine zweiwertige Schaltungslogik. Für die Zahlen sah er bereits eine halblogarithmische Darstellung vor.“

Quellen- und Literaturhinweise

Alex, J.; Flessner, H.; Mons, W.; Pauli, K.; Zuse, H.: Konrad Zuse. Der Vater des Computers. Parzeller, Fulda 2000

Alex, Jürgen: Wege und Irrwege des Konrad Zuse. Spektrum der Wissenschaft (1997) 1, 78-90

Beauclair, Wilfried de: Rechnen mit Maschinen. Eine Bildgeschichte der Rechentechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2005. (Reprint der 1. Auflage von 1968, erschienen im Vieweg-Verlag)

Gottwald, Siegfried; Ilgauds, Hans-Joachim; Schlote, Karl-Heinz (Hrsg.): Lexikon bedeutender Mathematiker. Bibliographisches Institut, Leipzig 1990

Knuth, D.: The Art of Computer Programming. Vol. 2: Seminumerical Algorithms. Addison-Wesley 1981

Neuweiler, Gerhard: Der Ursprung unseres Verstandes. Spektr. d. Wiss. (2005) 1, S. 24-31

Petzold, Hartmut: Moderne Rechenkünstler. Die Industrialisierung der Rechentechnik in Deutschland. C. H. Beck, München 1992

Rojas, Raúl (Hrsg.): Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse. Springer, Berlin, Heidelberg 1998

Swade, Doron D.: Der mechanische Computer des Charles Babbage. Spektr. d. Wiss. (1993) 4, 78-84

Vorndran, Edgar P.: Entwicklungsgeschichte des Computers. 2. Auflage. VDE-Verlag, Berlin, Offenbach 1986

Zuse, Horst: Konrad Zuse. Multimedia Show. Version 2000. E-Mail: horst.zuse@t-online.de

Zuse, Konrad: Der Computer - Mein Lebenswerk. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1990