

Z1-Addierermodelle

Vom nicht rückkoppelbaren Addieremodell zum Kreislaufmodell

Timm Grams, Fulda, 3. Juli 2015 (rev.: 15.07.2015)

Inhalt

Einführung	1
<i>Zweck</i>	1
<i>Problem</i>	1
<i>Ziel</i>	2
<i>Methode</i>	3
Prinzip der Addition mit einschrittigem Übertrag nach Konrad Zuse.....	3
Funktion des vorhandenen Modells	5
<i>Die Struktur</i>	5
<i>Die Schaltglieder AND und XOR</i>	6
<i>Die Übertragskette</i>	7
<i>Das einfache Schaltglied</i>	9
Z1-Addierermodell mit Rückübertragung: Kreislaufprinzip.....	9
<i>Modifikation der Schaltglieder</i>	10
<i>Schaltzyklus</i>	10
<i>Struktur des Kreislaufmodells</i>	11
<i>Schaltung und Taktung in getrennten Ebenen</i>	12

Einführung

Zweck

Beabsichtigt ist der Bau eines Addierermodells, das die grundlegende Arbeitsweise des rein mechanisch arbeitenden Zuse-Rechners Z1 sichtbar und erfahrbar macht. Geplant ist eine Weiterentwicklung des im Hünfelder Zuse-Museum bereits vorhandenen 2-Bit-Addierermodells. Hier wird der erste Schritt dorthin beschrieben: *Entwurf* und dessen Hintergründe. Auf dieser Basis wäre dann im zweiten Schritt ein *virtuelles Modell* zu erstellen, das eine Simulation und Demonstration der Funktionsweise gestattet. Als dritter Schritt stünde danach der Aufbau eines *mechanischen Modells* an, das sich für Lehrzwecke und Praktika im Rahmen des Museums eignet.

Neben dem Interesse an der historischen Maschine Z1 sollen vor allem didaktische Bedürfnisse befriedigt werden, denn der mechanische Rechner Z1 bietet Anschauungsmaterial zur Funktionsweise heutiger Rechner, Smartphones und Tabletcomputer. Beim ersten Kontakt mit Modellen dieser Art entfuhr einem Schüler: Es sei doch einfacher und interessanter als gedacht, was da im Rechner so abläuft! Genau darum geht es hier.

Problem

Wegen des zu erwartenden hohen Platzbedarfs eines Zahlenspeichers in Relais-technik entwickelte Zuse für seinen ersten Rechner eine mechanische Schaltgliedertechnik. Die Z1 baute er vollständig mechanisch auf.

Die Rechenvorgänge werden in dieser Technik durch das Verschieben schlichter Metallbleche realisiert, die auf trickreiche Weise über Schaltstifte miteinander verbunden sind. In den

Modellen des Zuse-Museums sind diese „Bleche“ aus Kunststoff – teilweise durchsichtig und verschiedenfarbig. Das erleichtert das Erklären der Funktionsweise.

Im Bericht „Das Z1-Addierermodell im Konrad-Zuse-Museum Hünfeld – Eine kleine Entdeckungsreise“ wurde erkundet, wie die Addition mit einschrittigem Übertrag in Zuses erstem Computer, der rein mechanisch arbeitenden Z1, realisiert worden ist¹. Auf dieser Grundlage wurde ein Modell für das Zuse-Museum Hünfeld entwickelt².

Das Modell erlaubt die Demonstration der reinen Additionsvorgänge in den von Konrad Zuse definierten drei Schritten:

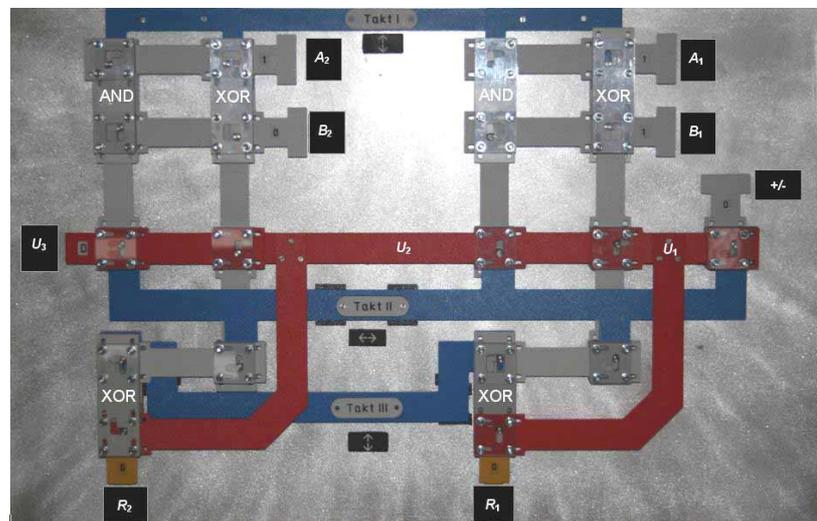
- I Stellenweise Addition ohne Übertrag und Setzen der Merker für Überträge
- II Erzeugung der Überträge durch Aktivierung der Übertragskette
- III Stellenweise Addition der Ergebnisse aus Schritt I und II

Jeder Schritt ist mit einer positiven Taktbewegung verbunden, also mit einer Bewegung des jeweiligen Taktbleches in Aktivierungsrichtung.

Die Eingangsdaten, also die zu addierenden Zahlen, müssen in einem Vorbereitungsschritt separat eingegeben werden: Setzen der Eingangsbleche in die 0-Position (rechts) oder in die 1-Position (links). Vor einer erneuten Eingabe müssen die Taktbleche in der umgekehrten Reihenfolge III, II, I in die Ausgangsposition zurückgesetzt werden. Dabei wird das Ergebnis gelöscht.

Eine Summe mit mehreren Summanden, beispielsweise $a + b + c$ lässt sich folglich nicht durch rein mechanische Übertragung des Zwischenergebnisses $a + b$ auf einen der Eingänge und Eingabe des c auf den anderen Eingang mit einer anschließenden weiteren Addition bewerkstelligen. Die Übertragung des Zwischenergebnisses auf den Eingang muss „von Hand“ erledigt werden.

Die Möglichkeit der Übertragung von Ergebnisgrößen auf den Eingang der Schaltung durch „im Kreislauf geschaltete Teilschaltungen“ (Konrad Zuse) ist aber ein weiteres wesentliches Merkmal des Zuseschen Addierers. Sie wird beispielsweise bei der Wandlung von Dezimalzahlen in die Binärdarstellung ausgiebig genutzt.



Ziel

Beabsichtigt ist die Erstellung einer rückkoppelbaren Version des 2-Bit-Addierermodells, mit dem die Summation mehrerer Summanden möglich ist derart, dass jeder Summand nur einmal eingegeben werden muss und dass die Zwischenergebnisse jeweils rein mechanisch auf einen Eingang der Schaltung rückübertragen werden.

¹ <http://www2.hs-fulda.de/~grams/mathehilft/Zuse/AnmerkungenAddierer.pdf>

Es geht nicht darum, den Z1-Addierer möglichst originalgetreu nachzubauen. Das wird wohl nicht gelingen, da die Originalmaschine in Berlin untergegangen ist. Auch der noch von Konrad Zuse angefertigte Z1-Nachbau, der in Deutschen Technikmuseum Berlin steht, hilft wohl nicht weiter: Seit Konrad Zuse der Maschine nicht mehr auf die Sprünge helfen kann, steht sie still. Horst Zuse, Konrads Sohn, formulierte die missliche Lage so³: „Die Funktionsweise der arithmetischen Einheit (Binäres Gleitkommarechenwerk) ist Konrad Zuses Geheimnis geblieben und er hat es 1995 mit ins Grab genommen. Die existierenden Aufzeichnungen entsprechen in vielen Teilen nicht der tatsächlichen Struktur bzw. Bauweise der Teile der Maschine Z1. Es ist eine Herausforderung an historisch interessierte Personen, die Funktion der gesamten Maschine Z1 zu verstehen und graphisch darzustellen.“

Folgende Grundsätze werden im Zuge der Modellierung befolgt.

1. Das Modell wird aus didaktischen Gründen flächig aufgebaut und nicht wie die Originalschaltungen Zuses dreidimensional. Das Modell soll den Museumsbesucher zum Experimentieren einladen und ihm zeigen⁴: „So arbeiten Zuses Computer und die heutigen auch“.
2. Es werden ausschließlich Zuses Ideen umgesetzt. Alle realisierten Arbeitsprinzipien stammen von ihm. Das Modell wird also, was Zuses Ideen angeht, authentisch sein; Hinsichtlich der konkreten Kombination der Arbeitsprinzipien wird dieser Anspruch nicht vertreten.

Methode

Ausgangspunkt ist der Bericht „Rechenvorrichtungen aus mechanischen Schaltgliedern“, den Konrad Zuse im Jahr 1952 verfertigt hat⁵. Auf dieser Grundlage werden Modifikationen des derzeit realisierten Z1-Addierermodells vorgenommen. Bei der Neuorganisation der Taktung greife ich auf die Dokumentation des Z1-Nachbaus von 1988 zurück⁶.

Prinzip der Addition mit einschrittigem Übertrag nach Konrad Zuse

Additionen laufen im Computer ständig ab. Es kommt also darauf an, sie möglichst schnell durchzuführen. Und Konrad Zuse hat genau diesen Aspekt gründlich bedacht. Denn eins ist klar: Die schriftliche Addition, wie wir sie in der Schule gelernt haben, ist für den Computer zu langsam. Bevor man die Addition für eine beliebige Stelle durchführen kann, muss man den Übertrag von der vorhergehenden (rechts davon stehenden) Stelle kennen. Die Rechnung läuft zwangsweise rein sequentiell ab, Stelle für Stelle, Schritt für Schritt, von rechts nach links. Und das ist für einen Automaten, der im Grunde ständig diese Additionen durchzuführen

² http://www2.hs-fulda.de/~grams/mathehilft/Zuse/Z1-Z4_2Z1Addierermodell.pdf

³ Horst Zuse: Konrad Zuse – Seine Rechenmaschinen. In: Konrad Zuse – Der Vater des Computers. Erschienen im Verlag Parzeller, Fulda, 2000. Herausgegeben von Jürgen Alex, Hermann Flessner, Wilhelm Mons, Kurt Pauli, Horst Zuse.

⁴ Kapitel „Rechnen“ der Seite www.mathehilft.de

⁵ Konrad Zuse, 1952: Rechenvorrichtung aus mechanischen Schaltgliedern. <http://www.zib.de/zuse/home.php/Papers/RechenmaschineZ1>

⁶ Ursula Schweier, Dietmar Saupe: Funktions- und Konstruktionsprinzipien der programmgesteuerten mechanischen Rechenmaschine „Z1“. Arbeitspapier der GMD 321, August 1988.

ren hat, zu zeitaufwendig. Am liebsten würde man den Rechner beauftragen, die Summe für alle Stellen gleichzeitig – also parallel – zu berechnen.

Konrad Zuse hat eine Lösung für den einschrittigen Übertrag gefunden. Dabei wird die Addition auch für große Zahlen in drei Schritten so durchgeführt, dass immer alle Stellen gleichzeitig behandelt werden können und dass der Übertrag in nur einem Schritt geschieht. Das kann man im Zehnersystem machen, aber auch im Binärsystem. Das Vorgehen wird am Beispiel der Addition der zwei Zahlen 39 und 42 erläutert, in binärer Darstellung: 100111 und 101010. Die Schritte:

I Wir addieren unabhängig voneinander für jede Stelle ohne Berücksichtigung der Überträge und erhalten die Zeile der *Summenbits*. Dabei merken wir uns zweierlei: Erstens, ob bei der stellenweisen Addition ein originärer Übertrag entsteht. Das ist immer dann der Fall, wenn die beiden zu addierenden Bits den Wert 1 haben. Und zweitens merken wir uns, wenn der Wert 1 herausgekommen ist. In diesem Fall ist nämlich ein möglicher Übertrag von der vorhergehenden Stelle zu berücksichtigen, der dann sozusagen durchgekoppelt werden muss. Den *originären Übertrag* markieren wir mit einem liegenden Kreuz ×, die *Übertragskopplung* mit einem Kreis o. Für unser Beispiel erhalten wir:

$$\begin{array}{r} 100111 \\ 101010 \\ \hline 001101 \text{ (Summenbits)} \\ \times \text{ } \circ \circ \times \circ \text{ (Übertragsmarkierungen)} \end{array}$$

II Im zweiten Schritt wird nur die Zeile der Übertragsmarkierungen behandelt: Der Durchkopplungskreis wird zusätzlich mit einem Kreuz markiert, wenn rechts davon ein Kreuz steht (mit oder ohne Kreis). Die Kreuze (mit oder ohne Kreis) entsprechen nun jeweils den Überträgen auf die nächsthöhere Stelle. Nach dieser Regel wird aus der Markierungszeile × o o × o die Zeile × ⊗ ⊗ × o. Die Berechnung der Überträge geschieht in einem Schritt, daher der Name *einschrittiger Übertrag*. Der einschrittige Übertrag lässt sich nicht in allen Rechner-techniken gleichermaßen gut verwirklichen: Mit Relais – der von Konrad Zuse ursprünglich ins Auge gefassten Technik – geht es am besten. In mechanischer Realisierung funktioniert der einschrittige Übertrag ebenfalls – zumindest prinzipiell. Aufgrund von Fertigungstoleranzen ergeben sich Schwierigkeiten, die in ähnlicher Weise auch beim Wechsel in andere Technologien auftreten. Das Modell dient in diesem Punkt der Demonstration prinzipieller Schwierigkeiten und wirft ein Licht auch auf die Grenzen heutiger Technologien.

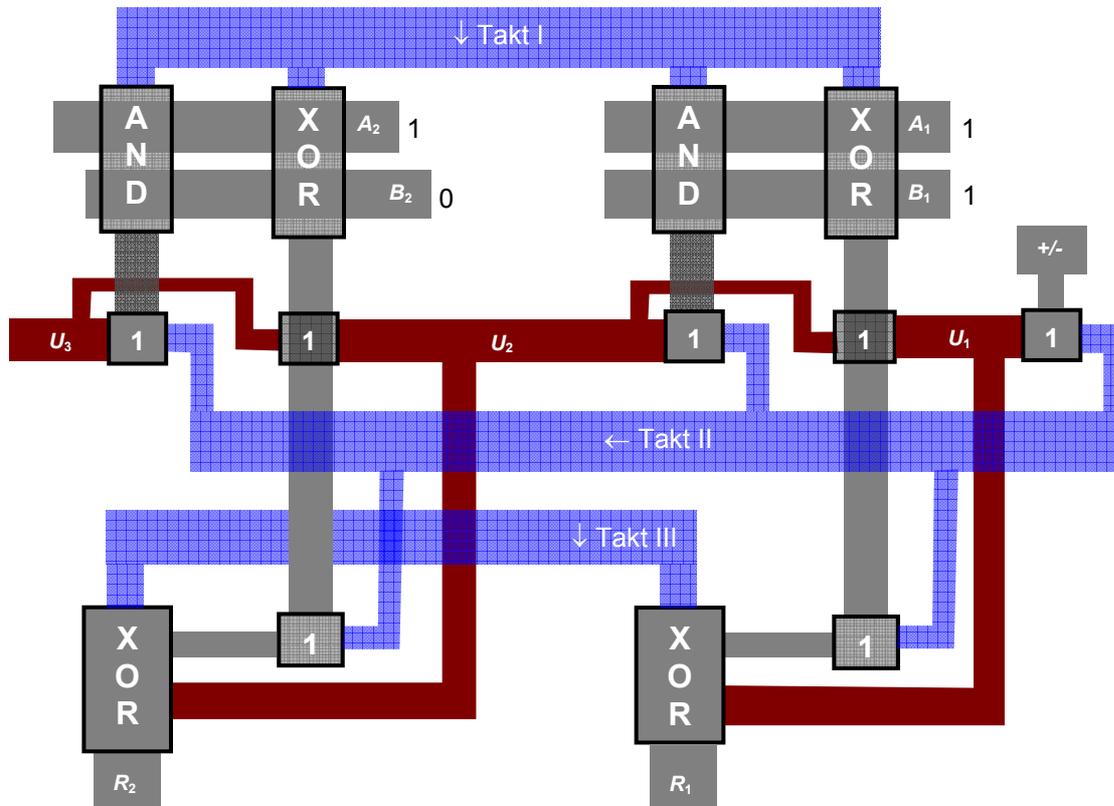
III Im dritten Schritt ergibt sich das Ergebnis aus der stellenweisen Summe und den Überträgen: Wir ersetzen die Kreuze der Markierungszeile jeweils durch 1 und die leeren Stellen und Kreise jeweils durch 0. Die Markierungszeile wird so zu 101110. Zur Vereinfachung der Addition verschieben wir die Überträge um eine Stelle nach links und fügen rechts eine 0 an. So stehen jetzt die Überträge in der Spalte, wo sie zu berücksichtigen sind und nicht mehr dort, wo sie entstanden sind. Jetzt können wir stellenweise addieren und erhalten das Resultat der Addition.

$$\begin{array}{r} 001101 \text{ (Summenbits)} \\ 1011100 \text{ (Überträge)} \\ \hline 1010001 \text{ (Resultat)} \end{array}$$

Auch im Schritt III sind keine Überträge zu berücksichtigen, denn das haben wir schon im Schritt II erledigt. Die Summe hängt nicht davon ab, in welcher Reihenfolge man die Spalten behandelt. Die stellenweise Addition kann also wieder parallel ablaufen. Das Ergebnis ist die Zahl 81 in Binärdarstellung, wie es zu erwarten war.

Funktion des vorhandenen Modells

Die Struktur



Gezeichnet sind die Schaltglieder (schwarz umrandet), die Taktbleche (blau), die Ein- und Ausgangsbleche (grau) sowie die Übertragsbleche (rotbraun). Die Verschiebung der Taktbleche in Pfeilrichtung entspricht einer positiven Taktflanke.

Ich benenne die Schaltgruppen nach dem sie bewegenden Takt: Die AND- und EXOR-Schaltglieder ganz oben gehören also zu Schaltgruppe I. Dort werden auch die Eingaben getätigt. Eingestellt sind die zu addierenden Werte $A = 3$ und $B = 1$, in binärer Notation: $A = 11$ und $B = 01$. Die Elemente der *Übertragungskette*, die Übertragsbleche (rotbraun gezeichnet) und die damit verbundenen einfachen Schaltglieder, gehören zur Schaltgruppe II. Die einfachen Schaltglieder tragen die Bezeichnung „1“. Die XOR-Elemente ganz unten bilden die Schaltgruppe III.

Die XOR-Elemente der Schaltgruppe I erledigen die Addition ohne Übertrag. Ausgangsseitig setzen sie gegebenenfalls einfache Schaltglieder als „Merker“ für die Übertragskopplung. Außerdem wird die abschließende Addition in Schritt III ebenfalls durch das Setzen einfacher Schaltglieder vorbereitet. Bei den einfachen Schaltgliedern bewirkt eine Bewegung des Eingangsbleches von 0 nach 1 (hier von oben nach unten) eine Verkopplung des eingangsseitigen Bleches (rechts) mit dem ausgangsseitigen Blech (links). Im Falle der Verkopplung folgt das Ausgangsblech einer Bewegung des Eingangsbleches von 0 nach 1 (von rechts nach links). Andernfalls ist keine Verkopplung vorhanden und das Ausgangsblech kann einer anderweitig erzwungenen Bewegung von 0 nach 1 folgen, ohne die Lage des Eingangsbleches zu verändern. Das passiert beispielsweise, wenn von rechts kein Übertrag kommt und gleichzeitig ein Übertrag auf dieser Stelle erzwungen wird.

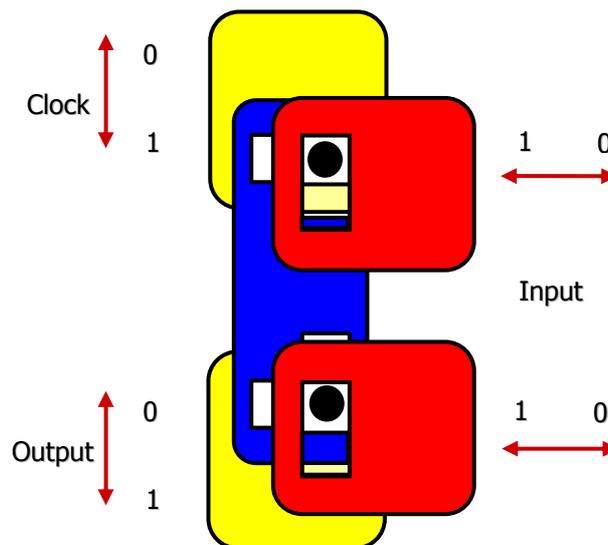
Für den erzwungenen Übertrag ist das AND-Schaltglied da: Über ein einfaches Schaltglied stellt es gegebenenfalls eine Kopplung zwischen dem Taktblech II und dem ausgangsseitigen Übertragsblech her.

Der entscheidende Taktschritt II macht die erzwungenen Überträge wirksam und sorgt gegebenenfalls für das Durchreichen der von rechts kommenden Überträge. Gleichzeitig werden die Summenbits und die Überträge auf die Eingänge der XOR-Glieder der Schaltgruppe III gelegt.

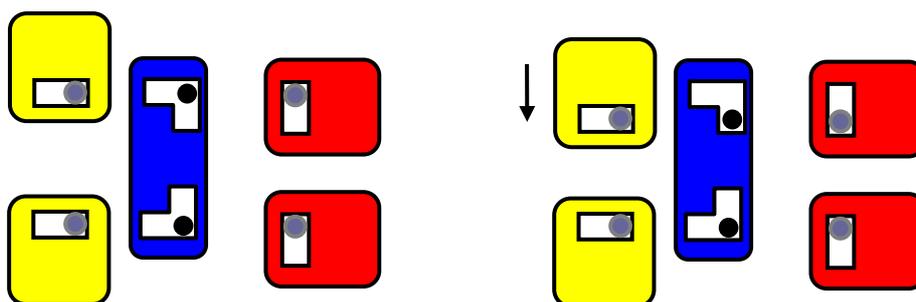
Schließlich sorgt Takt III für die abschließende Summation.

Die Schaltglieder AND und XOR

Die folgende Skizze zeigt den prinzipiellen Aufbau eines AND-Schaltglieds (logisches Und): Gelb sind das Taktblech und das Blech der Ausgangsgröße. Die beiden Bleche für die Eingangsgrößen sind rot und blau ist das Kopplungsblech. Die schwarzen Kreise repräsentieren die lose in den Ausschnitten stehenden zylindrischen Schaltstifte in Draufsicht⁷.

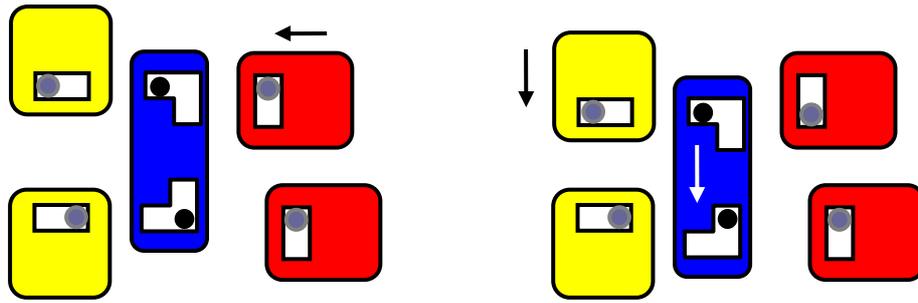


Die Ausfräsungen sind in den folgenden Explosionsbildern besser zu sehen. Im linken Bild sind Takt (Clock) und Eingangsgrößen (Input) jeweils in der Anfangsposition 0. Das rechte Bild zeigt das Ergebnis, wenn der Takt auf die 1-Position geschoben wird. Das Kopplungsblech und Ausgangsblech bewegen sich nicht.

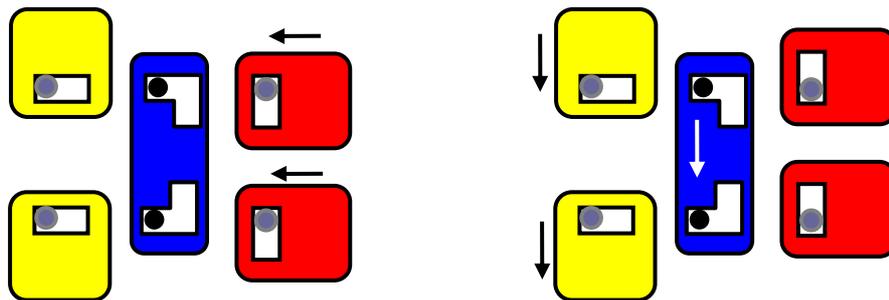


Jetzt werden alle Bleche wieder zurück in die Ausgangslage gebracht. dann wird das Blech des oberen Eingangs nach links in die 1-Position geschoben. Es entsteht das linke der folgenden Bilder. Nach Betätigen des Takts (rechtes Bild) hat sich zwar das Kopplungsblech, nicht aber das Ausgangsblech bewegt.

⁷ Zum ersten Kennenlernen der Arbeitsweise des mechanischen Computers Z1 empfehle ich den Bau eines Papiermodells des Schaltglieds: <http://www2.hs-fulda.de/~grams/mathehilft/Zuse/Schaltgliedmodell.pdf>

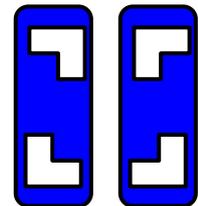


Erst wenn beide Eingänge auf die 1-Position gebracht werden, bewegt sich mit dem Takt auch das Ausgangsblech in die 1-Position. Das zeigen die folgenden Explosionsbilder.



Das AND-Schaltglied liefert also genau das gewünschte Ergebnis: Nur dann, wenn beide Eingänge gleich 1 sind, wird durch den Takt auch der Ausgang auf 1 gesetzt.

Für das XOR-Schaltglied (exklusives Oder) sind zwei Kopplungsbleche nötig. Alles andere kann bleiben wie beim AND-Schaltglied. Die Ausfräsungen der Kopplungsbleche sind im nebenstehenden Bild zu sehen.



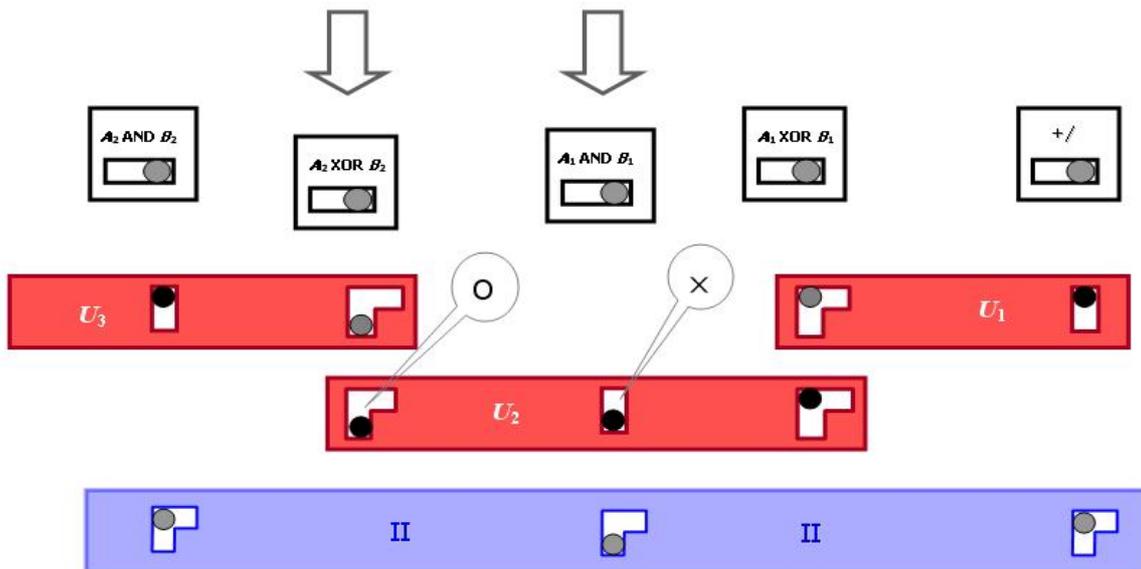
Die Übertragskette

Mit dem oben abgebildeten mechanischen Addierermodell soll die Summe der Zahlen 3 und 1 ermittelt werden. Zuerst werden die Eingaben gesetzt: $A_2=1$, $A_1=1$ für die Zahl 3 und $B_2=0$, $B_1=1$ für die Zahl 1. Bewegen des Taktbleches I nach unten bewirkt mittels der AND- und XOR-Schaltglieder die stellenweise Addition und stellt die Informationen für den originären Übertrag und die Übertragskopplung bereit.

Das eingangs abgebildete Modell ist genau in diesem jetzt erreichten Zustand: Die Schieber der Eingänge A_2 , A_1 und B_1 sind nach links geschoben, in Position 1. Entsprechend sind die diesen Eingängen zugeordneten Schaltstifte in den Verknüpfungsglieder in linker Position. Der Schieber des Eingangs B_2 ist herausgezogen und damit auf Position 0. Dementsprechend sind die zugeordneten Schaltstifte der Schaltglieder in rechter Position.

Das untenstehende grafisch vereinfachte Explosionsbild zeigt die Übertragskette in der Situation, dass der Takt I bereits aktiviert worden ist.

Der dadurch erreichte Zustand ist an den Positionen der Schaltstifte in den Verknüpfungsgliedern der Übertragsbleche U_1 , U_2 und U_3 abzulesen. Das Bild zeigt die dadurch hergestellten Kopplungsbeziehungen zwischen den Übertragsblechen und dem Taktblech II.



In Kommentarblasen eingetragen sind die Hinweise auf den „Merker“ für den originären Übertrag, das liegende Kreuz \times , und auf den „Merker“ für die Kopplung, der Kreis \circ .

Wegen $A_1 \text{ AND } B_1 = 1$ ist der entsprechende Schaltstift nach unten gewandert und hat das Taktblech II mit Übertragsblech U_2 gekoppelt. Das ist der originäre Übertrag: Eine Bewegung des Taktbleches II nach links bewirkt, dass sich auch das Übertragsblech U_2 nach links bewegt und damit in die 1-Position übergeht.

Die Verkopplung der Übertragsbleche U_2 und U_3 ist wegen $A_2 \text{ XOR } B_2 = 1$ gegeben. Dadurch wird mit Takt II auch das Übertragsblech U_3 nach links in die 1-Position bewegt. Damit ist der Übertrag auf die Stelle mit der Wertigkeit 4 gegeben (2^2).

Die Verschiebung des Taktblechs II bewirkt also eine gleichsinnige und gleichzeitige Verschiebung der Übertragsbleche U_2 und U_3 . So funktioniert der einschrittige Übertrag!

Durch den Takt II werden auch die Eingänge der unteren Verknüpfungsglieder gesetzt, wie man auf dem Foto des Modells und an der daraus abgeleiteten Struktur erkennen kann: Beim rechten XOR-Glied tut sich eingangsseitig nichts, da die stellenweise Addition den Wert 0 ergeben hat und der Übertrag von rechts (Übertragsblech U_1) ebenfalls gleich 0 ist.

Anders bei dem linken XOR-Glied: Sowohl die Addition als auch der Übertrag haben jeweils den Wert 1. Durch Takt II werden also die beiden Schaltstifte des XOR-Gliedes nach links verschoben.

Schließlich erhält man durch Bewegung der Taktbleche III nach unten die Ergebnisse. Da bei beiden Schaltgliedern die Eingänge äquivalent sind, bewirkt der Takt III keine Bewegung der Ausgangsbleche R_1 und R_2 ; sie verharren in der Position 0.

Damit haben wir das richtige Ergebnis: $U_3 R_2 R_1 = 100$ (dezimal: 4).

Das Modell ermöglicht auch die Subtraktion zweistelliger Zahlen: Der Subtrahend ist im Einerkomplement darzustellen und außerdem muss eine 1 addiert werden. Das geht mit einem Übertrag von rechts, der durch den mit dem Zeichen $+/-$ markierten Schieber erzeugt werden kann.

Das einfache Schaltglied

Eigentlich müsste das einfache Schaltglied am Anfang aller Erläuterungen stehen. Es ist die schlichteste Schaltkomponente und diese wird in Zuses Patentschrift „Mechanisches Schaltglied“ zuerst behandelt⁸. Hier sind uns einfache Schaltglieder in der Übertragskette begegnet, und zwar in zwei Versionen.

In beiden Versionen stellt das Steuerblech im 1-Zustand (untere Endlage) eine feste Kopplung zwischen Ein- und Ausgangsblech her. Ist das Steuerblech im 0-Zustand, hat eine Bewegung des Eingangsblechs keinen Einfluss auf das Ausgangsblech. Aber in der einen Schaltungsversion (markiert mit **o**) ist im Steuerungszustand 0 das Ausgangsblech entkoppelt und kann rückwirkungsfrei zwischen 0- und 1-Zustand bewegt werden. Im strikt gekoppelten Fall ist das nicht möglich (markiert mit **x**). Ein Versuch, das Ausgangsblech von 0 nach 1 zu bewegen, wirkt bei dieser Schaltung auf das Eingangsblech zurück und führt, falls möglich, dort zu einer entsprechenden Bewegung.

Für die Kopplung zwischen Taktblech II und den Übertragsblechen ist hier eine *strikte* Kopplung angegeben. Demgegenüber ist die Kopplung zwischen den Übertragsblechen im Steuerungszustand 0 *rückwirkungsfrei*.

Z1-Addierermodell mit Rückübertragung: Kreislaufprinzip

Die Aufgabe lautet, Ergebnisse R_2R_1 auf die Eingänge B_2B_1 zu übertragen. Vor der Einstellung der neuen Eingangsgrößen müssen die Takte III, II und I in genau dieser Reihenfolge zurückgesetzt werden. Dadurch gehen die Ergebnisse verloren. Eine „automatische“ fortlaufende Berechnung von mehrgliedrigen Summen ist also mit dieser Schaltung nicht möglich.

Um das Ziel zu erreichen, ist eine partielle Entkopplung der Ausgangsgrößen eines jeden Schaltelements vom Berechnungsvorgang erforderlich. Unter dieser Voraussetzung können die Takte impulsförmig sein: Das Rücksetzen des Taktes, die negative Taktflanke, folgt unmittelbar auf die positive Taktflanke. Diese impulsförmigen Takte der einzelnen Schaltgruppen folgen hintereinander. Es gibt keine zeitliche Überlappung.

Rücksetzen des Taktes darf dann aber nicht mehr unmittelbar zum Rücksetzen des Ergebniswertes führen. Diese Entkopplung gelingt dadurch, dass das bewegte Blech, das zurzeit sowohl Ausgangsblech als auch Eingangsblech der Folgeschaltung ist, aufgeteilt wird. Dadurch soll erreicht werden, dass das Eingangsblech dem Ausgangsblech beim Setzvorgang folgt, aber nicht mehr beim Rücksetzen.

Das Ausgangsblech verharrt in der beim Setzen erreichten Position so lange, bis die Eingabe in die Folgeschaltung abgeschlossen ist. Das ist mit Abschluss des darauffolgenden Taktes der Fall. Mit dem übernächsten Takt kann das Eingangsblech wieder zurückgesetzt werden.

⁸ Patentschrift 907948, Zuse K. G. Neukirchen (Kr. Hünfeld), „Mechanisches Schaltglied“. Patentiert im Gebiet der Bundesrepublik vom 9. Mai 1936 an. Ausgegeben am 1. April 1954. Abgedruckt in „Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse“, herausgegeben von Raúl Rojas. 1998

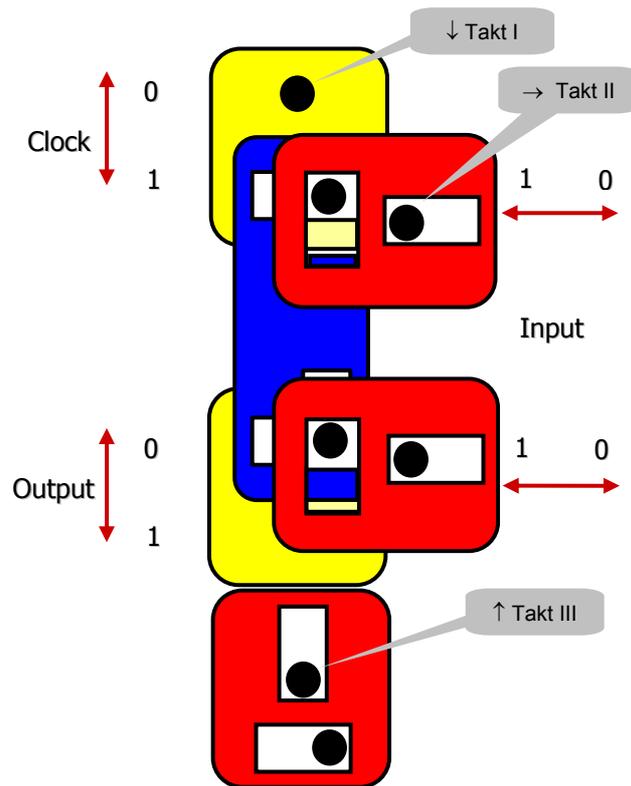
Modifikation der Schaltglieder

Im nebenstehenden Schaltbild des AND-Schaltglieds sind die Taktbleche und die Ausgangsbleche gelb ausgemalt. Die Eingangsbleche sind rot. Alle Bleche sind im zurückgesetzten Zustand (0-Zustand oder Ruhezustand) dargestellt. Der Takt wird durch einen Stift übertragen, der mit dem Taktblech fest verbunden ist. Das Taktblech folgt also direkt der positiven sowie der negativen Taktflanke.

Eine 0-1-Verschiebung des Ausgangsblechs nimmt das Eingangsblech der Folgeschaltung (ganz unten) mit. Beim Rücksetzen des Taktes I wird das Ausgangsblech in den Ruhezustand zurückgezogen. Das Eingangsblech der Folgeschaltung bleibt zunächst in der neuen Lage.

Mit Takt II werden die Eingangsbleche der Schaltung zurückgesetzt, so dass der Ruhezustand wieder hergestellt ist. (Achtung: Im aktuellen Modell ist die positive Taktbewegung, anders als hier vorausgesetzt, von rechts nach links orientiert. Aus diesem Grund werden in der neuen Schaltung die Eingänge der Schaltgruppe I genau anders herum definiert: 0 wird dann nach links und 1 nach rechts verlegt. Auf diese Weise können Takt I und Takt II ihre Richtung behalten.)

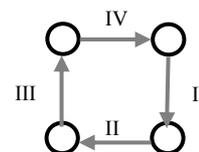
Mit Beendigung des Taktes II ist der untere Schaltstift wieder in seiner Ruhelage 0. Mit Takt III, von unten nach oben gerichtet, wird das Eingangsblech der Folgeschaltung zurückgesetzt. (Auch in diesem Punkt ist die neue Schaltung gegenüber der vorhandenen zu modifizieren: Takt III ist nicht mehr von oben nach unten, sondern von unten nach oben gerichtet.)



Schaltzyklus

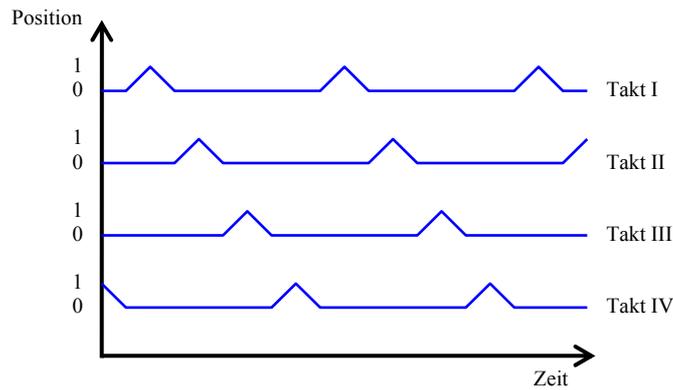
Für die Rückkopplung des Ausgangs R_2R_1 auf den Eingang B_2B_1 wird den beiden Eingängen jeweils ein AND-Schaltglied vorgeschaltet. Ein Eingang eines solchen AND-Schaltglieds aktiviert die Rückkopplung, der andere Eingang ist für den rückgekoppelten Wert. Da das Eingangsblech im entkoppelten Zustand frei beweglich ist, können Startwerte frei vorgegeben werden.

Für die Rückkopplung wird der Takt IV eingeführt. Mit ihm werden die Eingänge der Schaltgruppe I gesetzt. Orientierung und Reihenfolge der Taktungen gehen aus dem nebenstehende Zyklus hervor. Die Pfeile geben die Richtungen der positiven Taktbewegungen (Setzbewegung) an.



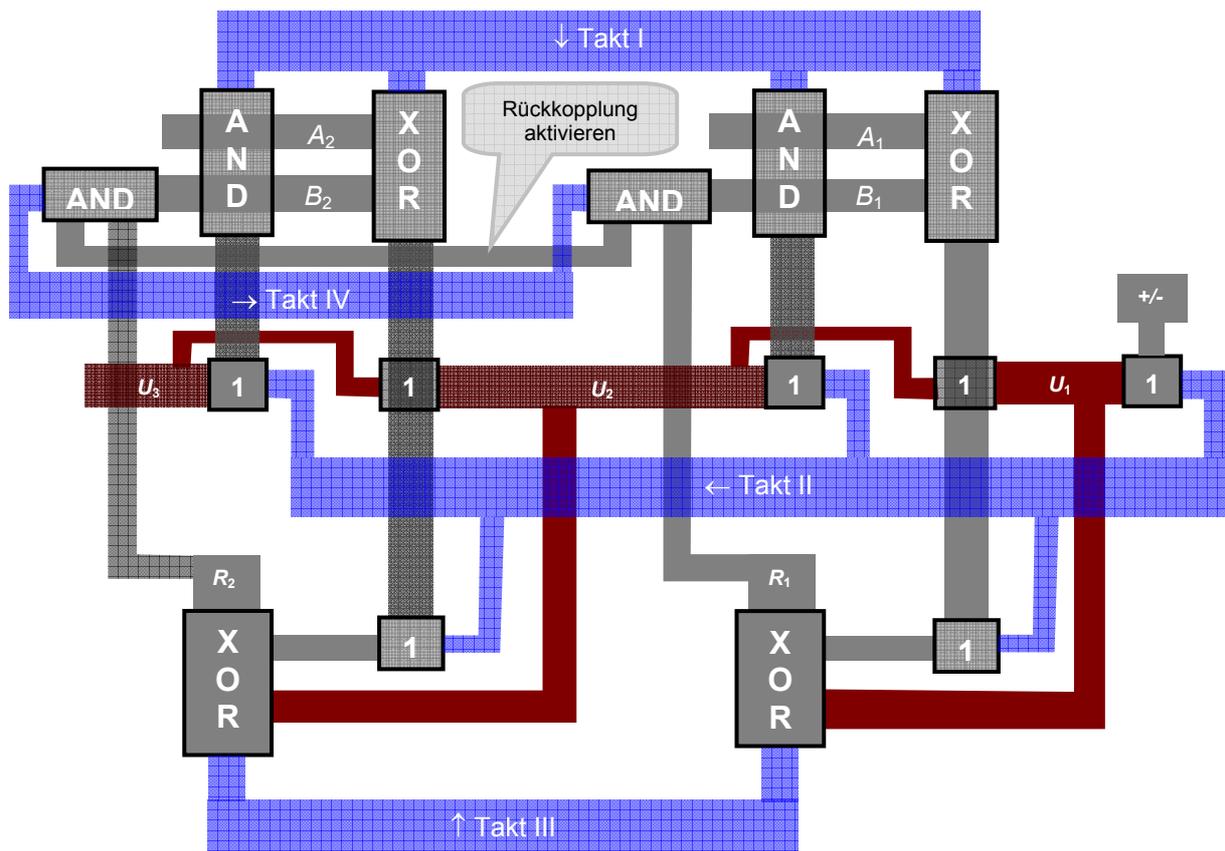
Und so sieht das Impulsdigramm aus, wenn die Takte engstmöglich aufeinanderfolgen⁹:

⁹ Diese Organisation der Taktung sowie die Aufteilung der bewegten Blech in Ausgangs- und Eingangsbleche gehen auf Konrad Zuse zurück. In seiner Arbeit aus dem Jahr 1952 schreibt er: „Eine solche Kreislaufschaltung erfordert also zunächst 4 Arbeitsimpulse[...] Jeder Impuls bewirkt eine einmalige Arbeitsbewegung mit sofortiger Rückbewegung. Innerhalb einer einschrittigen Teilschaltung müssen die bewegten Glieder mit den bewe-



Struktur des Kreislaufmodells

Gegenüber dem ursprünglichen Modell ergibt sich mit diesen Ergänzungen und den Taktorientierungen die folgende Modifikation des Schaltbildes. Die Verbindungen der Taktbleche mit den Eingangsblechen zum Zwecke des Rücksetzens sind nicht sichtbar. Takt I setzt die Eingangsbleche der Schaltgruppe IV (gesetzt durch Schaltgruppe III) zurück, Takt II die der Schaltgruppe I (gesetzt durch IV), Takt III die der Schaltgruppe II (gesetzt durch I) und Takt IV die der Schaltgruppe III (gesetzt durch II).



genden Gliedern sofort zurückgehen, damit die Steuerglieder neu geschaltet werden können. Die Steuerglieder der nächsten Teilschaltung, welche durch die bewegten Glieder der vorhergehenden Teilschaltung eingestellt werden, dürfen jedoch nicht sofort zurückgehen, da sie während der nächsten beiden Schritte ihre Stellung schalten müssen, damit die Arbeitsbewegung der nächsten Teilschaltung durchgeführt werden kann. Es ist somit eine getrennte Löschbewegung für die Steuerglieder nötig.“ Das hier gezeigte Impulsdiagramm entspricht nicht dem in Zuses Arbeit angegebenen, sondern demjenigen des Impulsgebers für den Speicher des Z1-Nachbaus (Schweier, Saupe, 1988, Bild 62).

Schaltung und Taktung in getrennten Ebenen

Der Schaltungsaufbau wird wie beim bisherigen Z1-Addierermodell realisiert. Die Schaltung kann fast unverändert übernommen und ergänzt werden. Bei Schaltgruppe I werden die Eingaben von rechts nach links verlegt. Bei Schaltgruppe III wird die Arbeitsrichtung umgedreht: Sie geht also nicht mehr von oben nach unten, sondern von unten nach oben. Hinzu kommt die Schaltgruppe IV für die Rückkopplung. Die Taktsteuerung wird beim aktuellen Modell direkt über miteinander verkoppelte bewegende Bleche erledigt. Das geht jetzt nicht mehr so einfach, weil jetzt auch die Eingangsbleche der jeweils gegenüberliegenden Schaltgruppen gleichzeitig zurückgesetzt werden müssen.

Ich schlage vor, die Taktung über Platten zu besorgen, die sich jeweils über die gesamte Schaltungsfläche erstrecken. Sie werden in einer zweiten Ebene unterhalb der Schaltungsebene untergebracht. Die Taktplatten werden in Schienen geführt, wie Kuchenbleche in einem Herd.

Auf die Taktplatten werden die Taktstifte starr montiert. Darüberliegende Platten müssen entsprechend Aussparungen besitzen, so dass beide Platten ausreichend Bewegungsspielraum haben. Die Taktplatten müssen bei der Montage korrekt übereinander liegen, bevor sie endgültig durch Zusammenschrauben des Rahmens und der darüberliegenden Grundplatte der Schaltung montiert werden können.

Über die Taktstifte werden die Taktbleche sowie die Eingangsbleche der Schaltungsebene in Übereinstimmung mit der jeweiligen Taktplatte bewegt.

