Rechnender Netzraum

Eine Weiterführung der Arbeit von
Konrad Zuse

Carl Adam Petri

Wenn man einen neu konstruierten Computer zum Laufen bringen will, so ergibt sich die technische Aufgabe, eine große Zahl von Einzelteilen zum präzise koordinierten Zusammenspiel zu bringen - nach dem Vorbild des strengen Wirkens der Naturgesetze. Das hat niemand intensiver erfahren als Konrad Zuse, der Erfinder und Erbauer des weltweit ersten programmgesteuerten Computers (auf den ihm ein Patent verweigert wurde - wegen "mangelnder Erfindungshöhe"!).

Es ergibt sich die schwierige Frage, ob man die physikalischen Naturgesetze nicht direkt für die dauerhafte Stabilität von Computern heranziehen könnte. Dazu wäre es freilich notwendig, diese Gesetze in die Sprache des Ingenieurs zu übersetzen. Ist das überhaupt möglich ? Wäre es nicht einfacher, die physikalische Natur direkt in der Sprache des Computer-Ingenieurs neu zu beschreiben ? Wenn das gelänge, erschiene die Welt als gigantischer Computer.

Seiner Zeit wieder einmal weit voraus, unternahm Zuse ernsthaft diesen Versuch, zum Kopfschütteln der meisten Zeitgenossen. Er begann mit dem damals bereits bekannten Entwurf des "zellulären Automaten": Hier wird der Raum in lauter gleichartige Zellen aufgeteilt, die wie kleine Maschinen nach einem vorgegebenen Verhaltensmuster ("Programm") mit ihren Nachbarzellen Information austauschen. Es gelang ihm, wenigstens auf dem Papier, die Phänomene "Fortpflanzung" und "Bewegung" von Zustands-Mustern zu beschreiben. Für eine Nachprüfung durch Computer-Simulation waren die damaligen Maschinen nicht leistungsfähig genug.

Besser ausgerüstet gelang später anderen, wie Stephen Wolfram, die Simulation einfacher zellulärer Automaten mit großem rechnerischen Aufwand. Er experimentierte mit vielen verschiedenen Zell-Programmen und stellte der Welt 2002 das Ergebnis seiner Versuche mit einem über 1000-seitigen Buch als "Eine Neue Art von Wissenschaft" vor - gewiss ein vollmundiger Titel.-

Eines Tages besuchte mich Konrad Zuse in meinem Arbeitszimmer. Ich war ihm empfohlen worden als erfinderischer Theoretiker mit langjähriger Erfahrung als Leiter eines großen Rechenzentrums. Er bat mich, ihn bei seiner Arbeit zum Rechnenden Raum zu beraten. Ich fühlte mich hoch geehrt und stimmte sofort zu. Es ergab sich eine für uns beide äußerst fruchtbare Zusammenarbeit, die sich wider Erwarten über mehr als drei

Jahre erstreckte. In ungezählten (Streit-)Gesprächen kamen wir uns wissenschaftlich und persönlich immer näher.

Konrad Zuse vertrat zunächst seinen Ansatz der zellulären Automaten und verteidigte ihn vehement gegen meine Bedenken. Diese bestanden im Wesentlichen in Folgendem:

Erstens ergibt sich aus der räumlichen Anordnung der Zellen eine Auszeichnung von drei bestimmten Richtungen im Raum, die sich nur durch Einführung zufälliger Prozesse aufheben lässt. (Zuse hielt die Annahme von Zufälligkeit nicht für zielführend).

Zweitens wandte ich ein, dass sich in diesem Modell die gesamte Physik in den Programmen jeder Zelle "verstecke", so zu sagen als nicht analysierbare DNA, und ohne direkten Bezug zu physikalischen Größen. Ich schlug ihm deshalb eine andere Modellierungstechnik vor, die Zuse so gut gefiel, dass er ein Buch darüber schrieb *("Anwendungen von Petri-Netzen", Vieweg 1982).*

Dies war die "Netztheorie verteilter Systeme", die bereits viele verschiedenartige erfolgreiche Anwendungen gefunden hatte, so im Bankwesen, Ökonomie, Telekommunikation, Workflow Management, Konfliktlösung, Prozess-Steuerung und Biochemie, nur leider noch nicht an ihrem Geburtsort, der Physik. Durch ihre äußerst einfachen Grundsätze (Axiome) und ihre graphische Ausdrucksweise macht sie komplizierte Zusammenhänge auch dem Nicht-Wissenschaftler zugänglich und bietet zugleich tiefgehende mathematische Analyse-Methoden an (für die Anwendung mittels Computer).

Ein Netz besteht aus "Stellen", auf denen durch Markierung ein möglicher Zustand als "vorliegend" angezeigt werden kann, und "Transitionen", die eine Veränderung des Zustands erlauben. Für die Zwecke des Rechnens sind folgende Grundnetze notwendig und ausreichend:

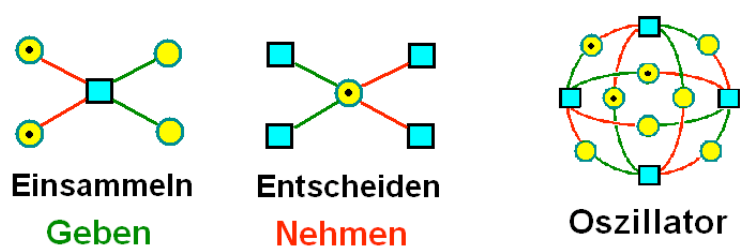

Bild 1

Wir stimmten überein, dass die wichtigsten Aussagen der neueren Physik angewandt werden müssten, zumindest die der Quantentheorie und der Speziellen Relativitätstheorie. Zuse fand es unerlässlich, dass die Aussagen "dem Ingenieur verständlich" sein müssten. Gewählt wurden daraufhin: Das Unschärfe-Prinzip, die Quantelung der Energie, sowie die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit - also dieselben Aussagen, die schon 1962 zur Begründung der Netztheorie gedient hatten.

Es blieb das Problem, wie ein physikalisches Weltbild entworfen werden könne, ohne den gesamten mathematischen Apparat der Quantenmechanik nutzen zu müssen (den nach Aussage von Richard Feynman "niemand versteht"). Es vergingen daher viele Jahre, bis endlich 2002 ein Ansatz des Nobelpreisträgers Gerardus 't Hooft ("*Determinism beneath Quantum Mechanics",2002*) eine Ausarbeitung und geschlossene Darstellung der mit Zuse angedachten Entwürfe ermöglichte. Diese Weiterführung seiner Arbeit hat Konrad Zuse nicht mehr erlebt; aber zusammen hatten wir noch zwei wichtige Einsichten gewonnen, die noch längst nicht in der Wissenschaft angekommen sind. Es geht um die Natur der Mess- Unschärfe und um das Wesen des unendlichen Kontinuums.

Über die Mess-Unschärfe

Es geht darum, das kombinatorische Bild von Heisenbergs Unschärfe-Prinzip zu finden. Das Ergebnis wird das Gesetz der Zähl-Unschärfe sein: $\Delta n \geq 1$.
Dazu stellen wir die folgenden vier Thesen über das Messen voran:

#1 Jeder Messvorgang findet in einem Zeitfenster statt.

#2 Messen ist im wesentlichen gleichwertig zum Zählen: Beispiel Definition der Sekunde (nach Internationalem Standard ist 1 sec := 9 192 631 770 Perioden einer bestimmten Caesium-133-Frequenz).

#3 Stetige Veränderung (z.B. Bewegung) bleibt unbemerkt, wenn sie nicht durch deutlich wahrnehmbare Änderungen *artikuliert* wird. Wir teilen sogar Einsteins Vermutung, dass stetige Veränderung ohne Artikulation *eine Illusion* ist. Der große Physiker Stephen Hawking hat Einsteins Verdacht später glänzend bestätigt.

#4 Zählen führt zu einem eindeutigen Ergebnis nur dann, wenn die zu zählenden Objekte *und auch* das Zeitfenster unter vollständiger Kontrolle sind.

So kann es bei einer Verkehrszählung vorkommen,dass zwei sorgfältige Beobachter uneins sind, ob ein am Ende des Zeitfensters gerade eintretendes Fahrzeug mitzuzählen ist. Eine Differenz $\Delta n = 1$ zwischen den beiden gleichberechtigten Zählungen ist also unvermeidlich: Δn ist die "mögliche Fehlzählung". Bei der Auszählung großer Mengen von Partikeln kann sich dieses Phänomen häufen: $\Delta n \geq 1$

Wir vermeiden den Ausdruck "ungefähr gleich" und sprechen besser von "indifferent", definiert als "unter vorgegebenen Umständen nicht unterscheidbar". Eine Fotokopie gilt als gelungen, wenn sie nicht unterscheidbar vom Original ist. Die Erfahrung lehrt nun, dass "analoge" Kopien von Kopien von Kopien ... sich vom Original stark unterscheiden können, im kritischen Fall sogar schon die Kopie der ersten Kopie.

Wir beleuchten nun den mathematischen Hintergrund des Problems.

Norbert Wiener, der Vorkämpfer der Kybernetik, hat in seiner noch heute benutzten Arbeit zur *"Axiomatik des Messens" (1918)* zwar die Existenz einer Ähnlichkeits-Relation "indifferent" anerkannt, behandelt sie aber falsch. Er behauptet, aus der Halbordnung (X,<,indiff) könne man eine Vollordnung (X,<) herstellen nach dem Rezept:

" Wenn x < y und z indiff y dann x < z ". Plausibel, aber fehlerhaft!
Es muss heißen:
" Wenn x < y und z indiff y dann x < z oder x indiff z " .

Z.B. z = (x+y)/2 für kleinste Unterschiede |x-y|**,** denn man kann mit wiederholten indiff-Schritten von jedem x zu jedem y gelangen: "indiff" ist *zusammenhängend*, eine *wesentliche Eigenschaft des Kontinuums* bezüglich der Beobachtbarkeit.

Es entsteht also keine Vollordnung, sondern (X,<) bleibt eine Halbordnung. Die *feinste* Skala zum Messen ist also diese Halbordnung mit "indifferent = weder größer noch kleiner":

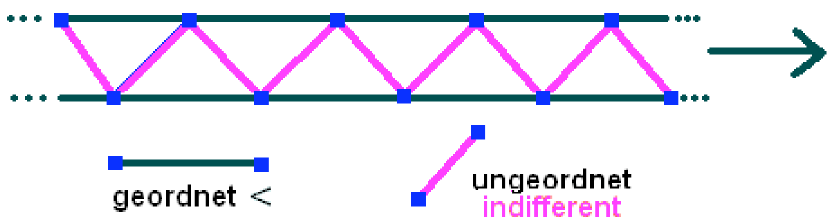

Bild 2

Nun stellten wir die entscheidende Frage: Gibt es in der Physik (in der Natur!) ein genaues Vorbild für diese Struktur ? Es müsste sehr einfach sein und mit den begrifflichen Grundlagen des Messens in Zusammenhang stehen. Als solches fanden wir das Verhaltens-Diagramm eines Oszillators:

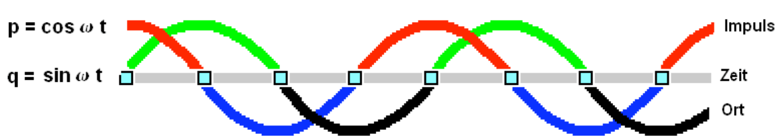

Bild 3

Aber wieso können die beiden gezeigten Bilder das selbe darstellen? Gibt es nicht im unteren Bild viel mehr Schnittpunkte, zum Beispiel zwischen roten und grünen Bögen?

Antwort: Die Schnittpunkte sind nur da, weil Ort und Impuls im gleichen Bild dargestellt wurden; in Wirklichkeit haben Ort und Impuls verschiedene Dimensionen. Außerdem benötigen wir von beiden nur das Vorzeichen, die minimale Information, die auch bei schwierigsten Beobachtungs-Verhältnissen zur Verfügung steht. Die Übereinstimmung kann in der Zusammenschau beider Bilder sichtbar gemacht werden:

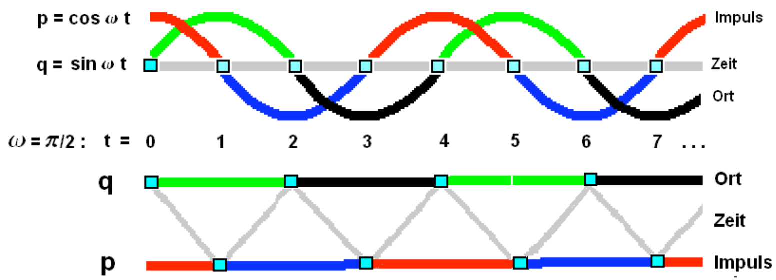

Bild 4

Teilen wir die Zeitachse in Abschnitte von 90 Grad ein (**ω** = **π**/2), so können wir verstehen, dass so kleine Abschnitte nicht wahrnehmbar sind, weil Ort und Impuls *nicht zugleich* (im gleichen Experiment) beobachtet werden können - eine grundlegende Erkenntnis der Quantenmechanik. Diese Abschnitte gehorchen also der Definition der Indifferenz zwischen Zeitpunkten, und bei ihrer Auszählung kann ein Fehler von einer Einheit nicht vermieden werden: **Δn ≥ 1 !**

Erfreulicherweise betrifft dies nicht die Definition der Sekunde, des verbindlichen Maßes für unsere Zeit, denn dabei werden nur volle Perioden zu je *vier* Einheiten gezählt, und diese Ergebnisse werden beim Zählen schlimmstenfalls zu drei oder zu fünf Einheiten "verfälscht", so dass volle Perioden noch deutlich erkennbar bleiben. Damit haben wir eine verlässliche Grundlage für das physikalische und das technische Messwesen gewonnen.-

Die Rolle des Unendlichen in Physik und Technik

Die Erfindung des Unendlichen in der Antike und seine Beherrschung ohne bekannte Widersprüche (die erst im 20. Jahrhundert erreicht wurde) ist wohl das großartigste Gebäude des Geistes, das Menschen errichtet haben. Die Quantenmechanik von heute, ebenfalls mit Spuren im Atomismus der Antike, konkurriert mit diesem Anspruch. Sie ist nicht denkbar ohne die Mathematik des Unendlichen, auf die sie sich ausgiebig stützt.

Konrad Zuse erkannte dies alles natürlich an, fühlte sich als Konstrukteur aber - mit guten Gründen - dabei unwohl. Er sagte mit Recht, dass man mit den Differentialgleichungen der Physik nur auf symbolischer Ebene - abstrakt - arbeiten kann, während die tatsächlichen Berechnungen des Ingenieurs immer klar auf endliche Zahlenbereiche beschränkt sind, zum Beispiel durch Gebrauch seiner Gleitkomma-Operationen. Das gilt genau so für alle Berechnungen der Quantenmechanik.

Er forderte mich auf, nachzuforschen, ob sich die unverzichtbare Kontinuität der Bewegung in Raum und Zeit im Endlichen ausdrücken lasse. Ein erster Schritt in diese Richtung war bereits durch die Entdeckung der Kontinuität der Wahrnehmung gelungen, wie oben geschildert. Nun wurde es aber nötig, die *mathematische* Definition der Kontinuität treu ins Endliche zu übertragen. Anfangs sah ich keine Möglichkeit, diesen Auftrag zu erfüllen. Aber Zuse war die Sache so wichtig, dass er jeden Aufwand für berechtigt hielt, und er ermutigte mich zum Durchhalten.

Schließlich fand ich doch eine Lösung des Problems, durch ein gründliches Studium der neueren Resultate der Raum-Zeit-Lehre ("Topologie"). Es war nur nötig, den Netzen eine einfache topologische Struktur zu geben. Diese besteht in der Definition der Begriffe "offen" und "abgeschlossen" für Netze. Ich nannte Stellen und von Stellen berandete Teilnetze "offen", und die von Transitionen berandeten Teilnetze sowie die Transitionen selbst "abgeschlossen" und wies nach, dass dies den Grundsätzen der Topologie genügte. Zudem ergab sich, dass *nur endliche Netze* kontinuierlich sind.
Wir haben damit ein Bild eines *endlichen grenzenlosen Universums* (das heißt, es hat keinen Rand, es ist offen *und* abgeschlossen)!

Zuse war hocherfreut, besonders über die Einfachheit des Prinzips:

Bild5

Danach einigten wir uns, dass der nächste praktische Schritt der weiteren Verkleinerung der Schaltelemente in den Bereich der Quanteneffekte führen musste, und überließen die Arbeit der Übertragung unserer Einsichten in den umfangreichen mathematischen Apparat der Quantenmechanik den Fachphysikern, die wohl geraume Zeit dazu brauchen werden, wenn sie einmal angefangen haben. Auf diesem Stand beendeten wir unsere gemeinsame Arbeit.

Ein endliches kontinuierliches Weltbild

Gerardus 't Hooft schreibt in dem Artikel "Determinism Beneath Quantum Mechanics" 2002:

"Entgegen allgemeiner Annahme ist es nicht schwer, deterministische Modelle zu konstruieren, bei denen das *stochastische* Verhalten korrekt durch die quantenmechanischen Amplituden beschrieben wird **..."**

Er kommt zu diesen Schlussfolgerungen:

"Unsere Sicht der quantenmechanischen Natur der Welt kann so zusammengefasst werden:

Die fundamentalen Naturgesetze sind definiert auf der Planck-Skala. Alles, was wir dort haben, sind Bits von Information.

Ein großer Teil dieser Information geht sehr schnell verloren, wird aber wieder aufgefüllt durch Bits von Information, die über den Rand *(eines Systems)* eintreten." *(Dadurch erhöht sich die Entropie)*

Ich werde diese Vorgaben genau erfüllen. Freilich kann man in der Planckschen Größenordnung nicht experimentieren, sondern nur beschreiben, was die Natur anbieten könnte. Aber die Netz-Darstellung erlaubt Computer-Programme, die das Geschehen im submikroskopischen Bereich getreu simulieren.

Wir beschreiben also, 't Hooft folgend, ein deterministisches Universum in der Sprache der Netztheorie der Verteilten Systeme auf dem Niveau der Planck'schen Größen, weitaus feiner als auf dem der Quantenmechanik; nämlich auf dem Niveau der Stringtheorien, oder in Zuses Worten des "Quantenschaums".

Hier sind die einfachsten zwei Konstruktionen

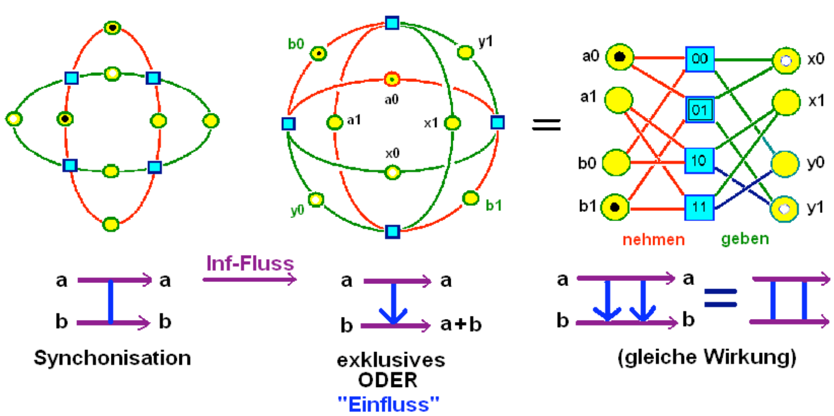

Bild 6

Unten sind die Abkürzungen der Netze in Form von "Informationsfluss-Graphen" angegeben, die bei dem praktischen Entwurf verwandt werden. Das Netzbild Mitte oben ist vom Oszillator abgeleitet, es hat dieselbe Topologie! Geschlossene Inf-Flusslinien könnten sehr wohl den Strings der Stringtheorie entsprechen (Arbeitshypothese).

Es braucht nur noch ein einziges weiteres Netz, um alle Möglichkeiten des Rechnens abzudecken. Seine Struktur ist im dreidimensionalen Raum am anschaulichsten:

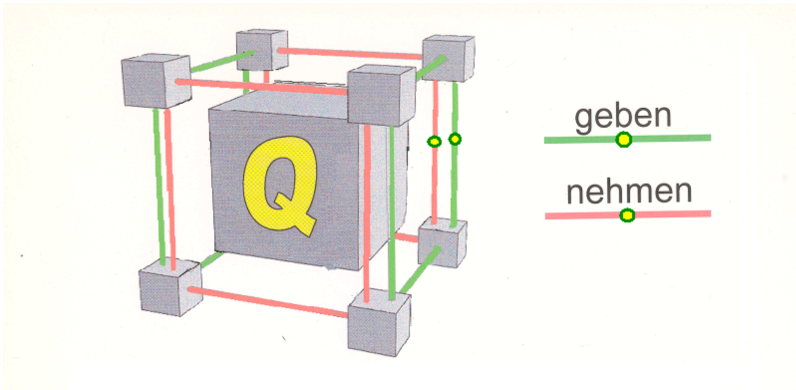

Bild 7

Das folgende Bild zeigt schließlich eine **Universelle Schaltung**, mit der offensichlich die beiden Grundfunktionen des Rechnens mit Bits zusammengefasst sind:

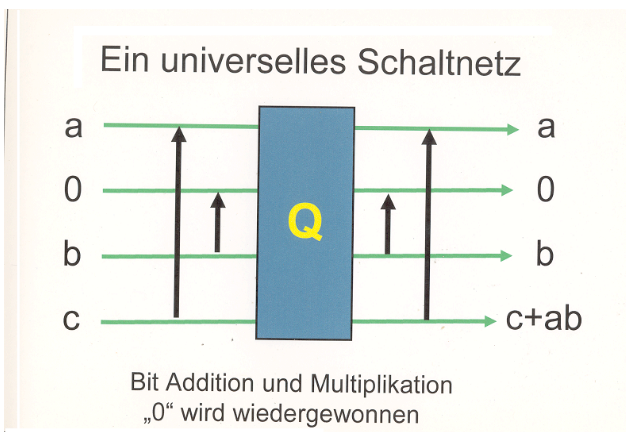

Bild 8

Damit ist gezeigt, dass geregelter Informationsfluss im Allerkleinsten möglich ist, und dass dort jede Funktion berechenbar wäre, die "ins Weltall passt". Darüber hinaus ist aber für die Physik nichts gewonnen: Es wurde kein Naturgesetz dargestellt, der Bezug zu physikalischen Größen (außer der Entropie) wurde nicht hergestellt. Das muss also warten, bis die Stringtheorie das selber explizit tut. Die dazu erforderlichen elf Dimensionen sind für die Netzdarstellung kein Problem: Eine Kette von zehn Netzen erledigt alles Nötige.

Der Physik wird also nur ein neues Werkzeug zur Verfügung gestellt, das mit dem Ansatz von Gerardus 't Hooft vereinbar ist. Wäre Konrad Zuse mit diesem bescheidenen Schritt vorwärts zufrieden? Ich glaube, es wäre ganz in seinem Sinne.

Bei der Abfassung des deutschen Textes hat mir mein Sohn Tobias sehr geholfen.

Original in English: "*Computing Net Universe*" *Final version Jan.2007*
500 slides in PowerPoint, on CD available from:

Deutsches Technik-Museum Berlin (DTMB)
Trebbiner Str. 9
D 10963 Berlin Kreuzberg