

Konrad Zuses „spinnerte“ Idee vom Rechnenden Raum

– Ein Nachtrag zum 100. Geburtstag –

Friedel Hoßfeld

f.hossfeld@fz-juelich.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c.
Nikolaus Joachim Lehmann



15. März 1921 - 27. Juni 1998

**Prof. Lehmann
wäre am 15. März 2011
90 Jahre alt geworden.**

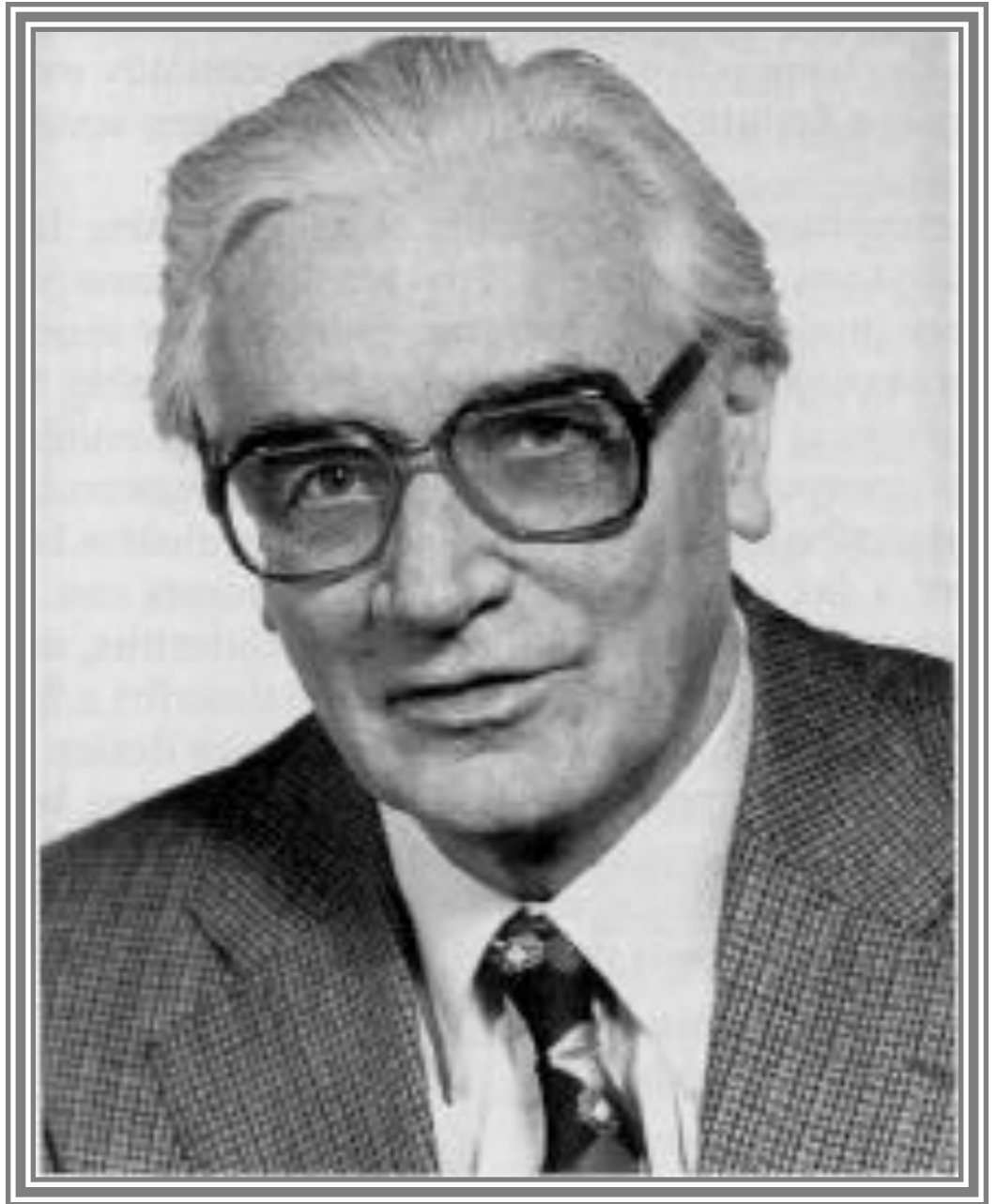
—
**Zu seinem 75. Geburtstag
hat der damalige GI-Präsident
Roland Vollmar
im Informatik-Spektrum
Band 19 (1996), 65-67
in einer Laudatio
Lehmans große Leistungen
gewürdigt.**

Und die TU Dresden tut es allemal!

**Lehmann und Zuse
lernten sich schon 1950 kennen
und wurden gute Freunde.**

Konrad Zuse

- * **22. Juni 1910**
in Berlin-Wilmersdorf
- † **18. Dezember 1995**
in Hünfeld/Hessen





friedrich christian
delius

rororo
die frau, für die
ich den computer erfand

roman

Ein fiktives Interview mit Konrad Zuse

im Juli 1994

auf der Terrasse des Gasthauses
„Burg Hauneck“
im hessischen Bergland

von 6 Uhr abends
bis 6 Uhr morgens

weil Zuse tagsüber das Licht
zum Malen brauchte.

*„ ... wenn wir Erfinder keine
spinnerten Ideen mehr haben
dürften, dann sähe es wirklich
traurig aus in der Welt.“*

(Seite 37)

friedrich christian
delius

die frau, für die
ich den computer erfand



(1815-1852)

Anmerkung:

Gemeint ist **Ada Lady Lovelace**,
Tochter von Lord Byron und
angebliche Assistentin von
Charles Babbage bei dessen
Versuch zum Bau der Analytical
Engine. Sie wird von den
Informatikern gerne als die erste
Programmiererin kolportiert.

Ein fiktives Interview mit **Konrad Zuse**

im Juli 1994

auf der Terrasse des Gasthauses
„Burg Hauneck“
im hessischen Bergland

von 6 Uhr abends
bis 6 Uhr morgens

weil Zuse tagsüber das Licht
zum Malen brauchte.

*„ ... wenn wir Erfinder keine
spinnerten Ideen mehr haben
dürften, dann sähe es wirklich
traurig aus in der Welt.“*

(Seite 37)



Hoyerswerda

Wohnhaus der Familie Zuse

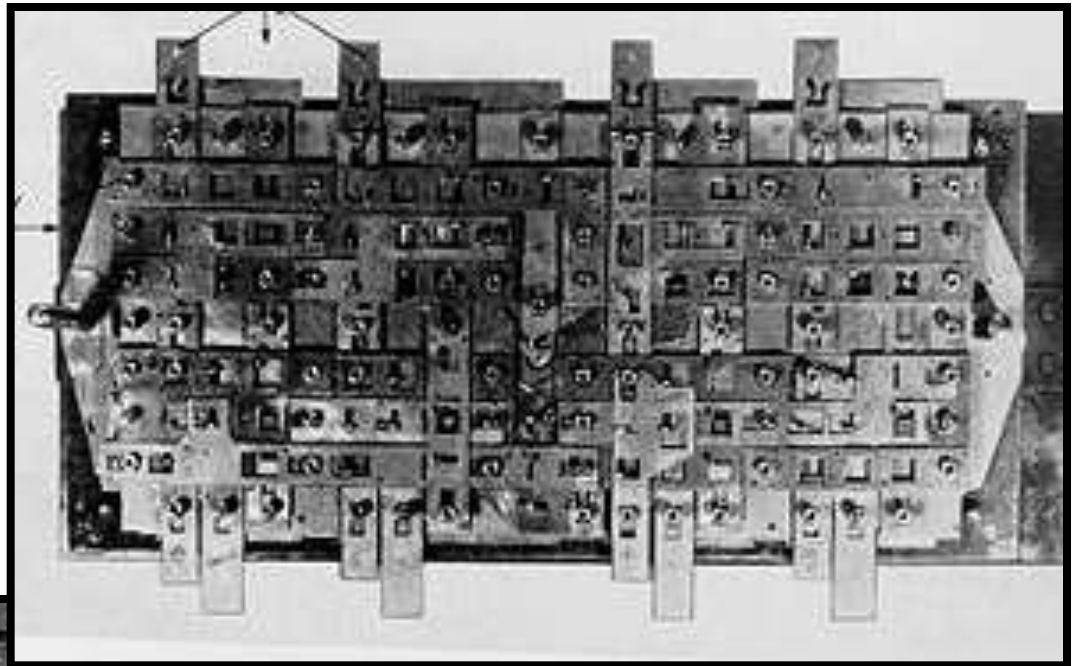
**Karikatur Zuses 1926:
Aufmarsch der Garde
in Hoyerswerda**



Konrad Zuses Lebenswerk: Der Digitalrechner

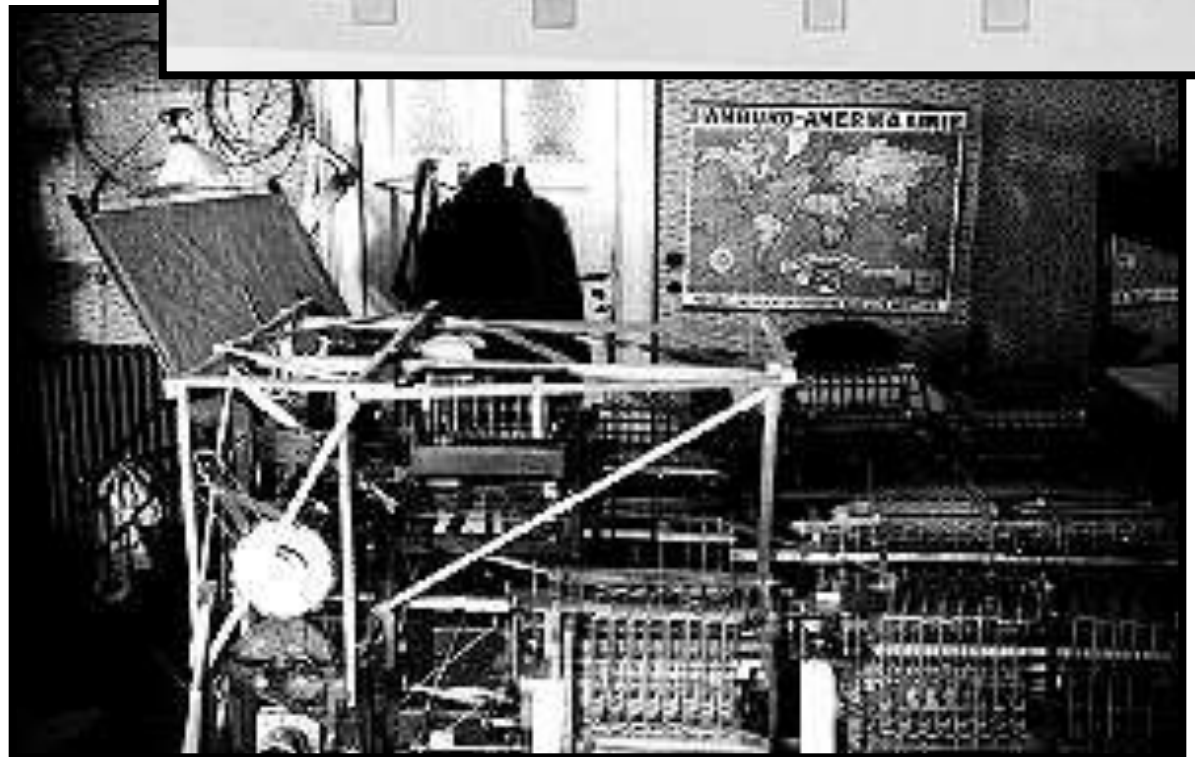
ZUSE Z 1

Die „Bauelemente“ der Z 1:
dünne Metallstreifen
(als „Relais-Vorläufer“)



Z1-Aufbau
im Wohnzimmer
der elterlichen Wohnung

1936



Der Neuentwurf und Nachbau der Z 1 ...



© Horst Zuse



... 1987-89 im Atelier
Konrad Zuses in Hünfeld

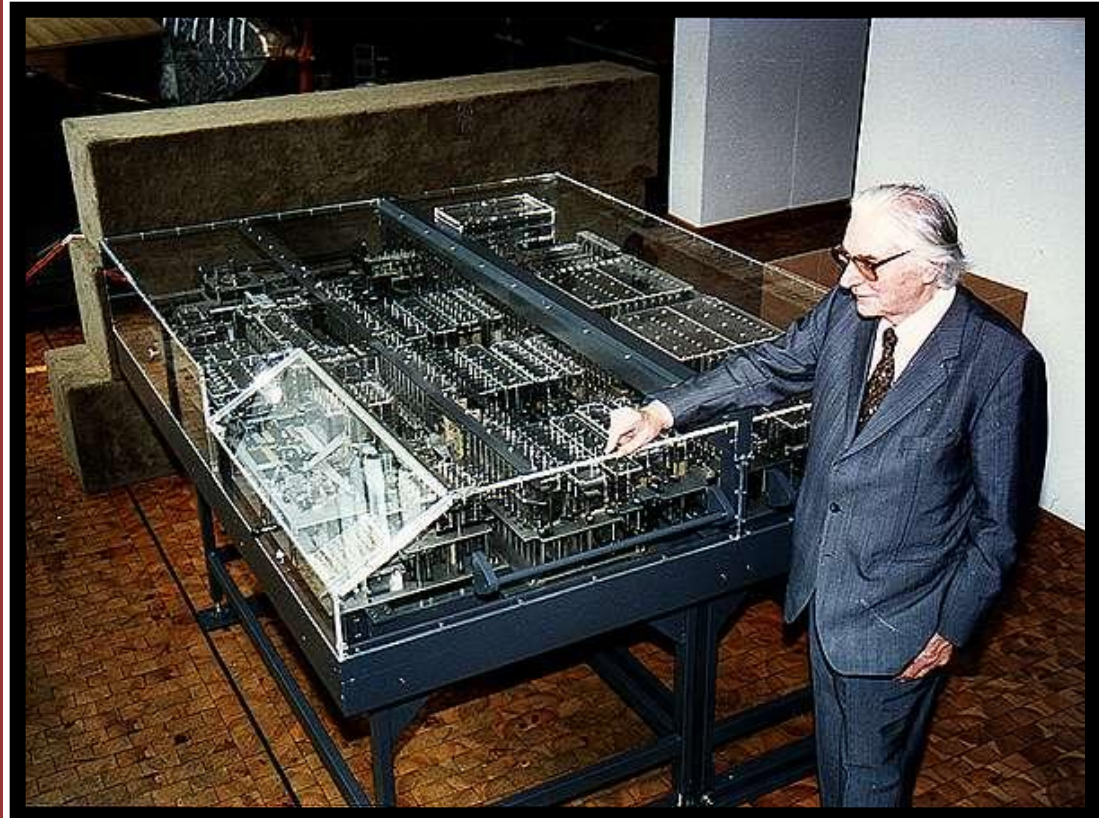
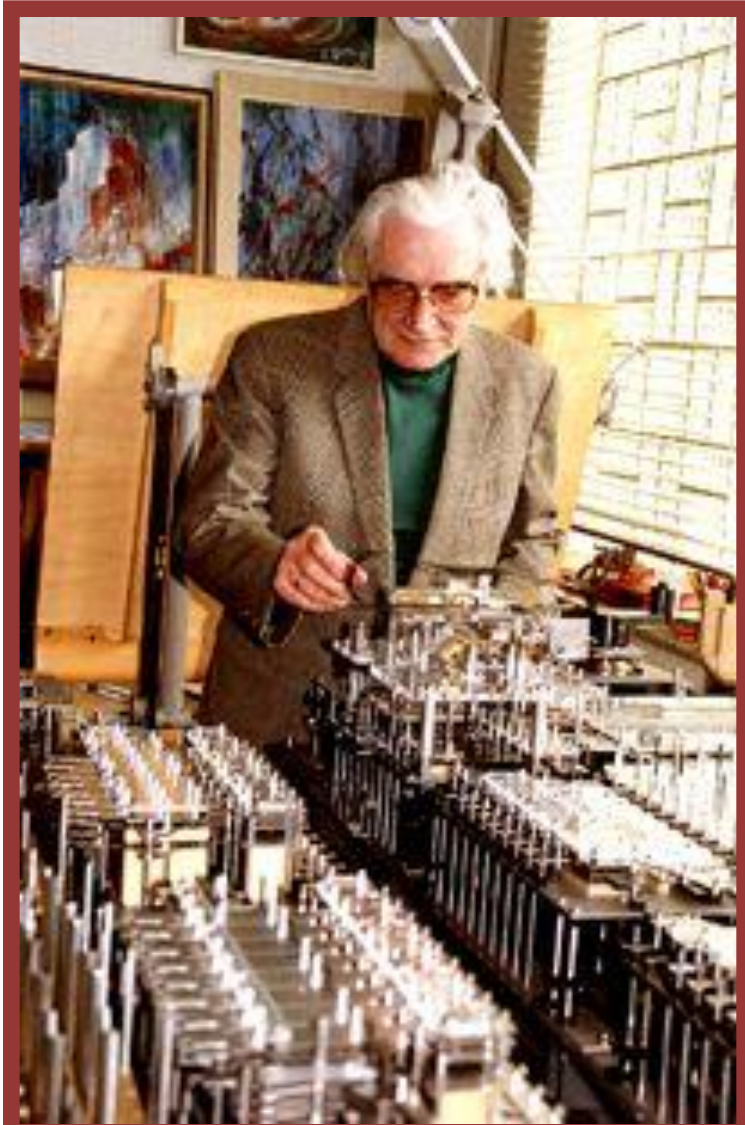
Konrad Zuse

am Nachbau seines Rechners Z 1

1989

in seinem Atelier in Hünfeld
und

im Deutschen Technik-Museum Berlin



Konrad Zuse:

Arbeit an der Z 4

1942

**Zuse konnte die Z 4 vor
den Bomben auf Berlin
ins Allgäu retten.**

© Horst Zuse



Konrad Zuse's späte Anerkennung

- Zurecht waren die Programme der Feiern zum Gedenken an Konrad Zuses 100. Geburtstag gefüllt mit Reden und Vorträgen über seine epochalen Leistungen zur Entwicklung des Digitalrechners.
- Zwar spät, aber doch noch zu Lebzeiten haben sie ihm die Anerkennung als großer Computer-Pionier gebracht, um die er gegen die US-amerikanische Übermacht kämpfen mußte.
- Dabei waren sich die amerikanischen Protagonisten ja selbst lange nicht einig, wer der Erste war.

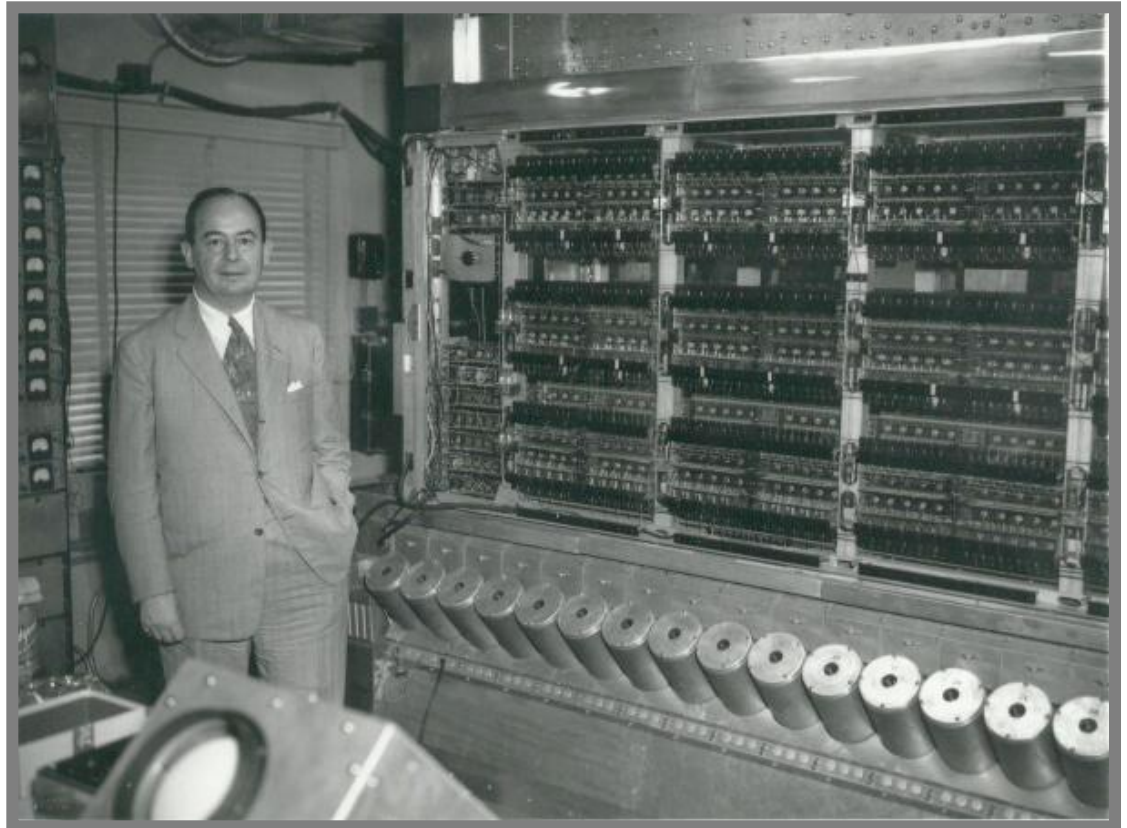
Raul Rojas berichtete:

- Er zeigte Konrad Zuse eines Tages die Folien seines Vortrages über die Väter des Computers.
- Darin hatte Rojas neben Konrad Zuse auch John von Neumann als vermeintlichen wichtigen Computer-Vater aufgeführt.
- Das erboste Konrad Zuse aufs Neue, und er brauste auf:
„Was hat der dabei zu suchen!“



John von Neumann
1903 - 1957

Sein erster Computer im Institute of Advanced Study in Princeton



Grundlegung der Stored-Program-Architektur des seriellen von-Neumann-Rechners

- **H.H. Goldstine and J. v. N. (1946):**
On the Principles of Large Scale Computing Machines
- **A.W. Burks, H.H. Goldstine and J. v. N. (1946):**
Preliminary Discussion of the Logical Design of an
Electronic Computing Instrument, Part I
- **H.H. Goldstine and J. v. N. (1947):**
Planning and Coding of Problems for an Electronic
Computing Instrument, Part II, Vol. 1
- **H.H. Goldstine and J. v. N. (1948):**
Planning and Coding of Problems for an Electronic
Computing Instrument, Part II, Vol. 2

Irrige Ideen ?

Drei andere innovative Ideen

Bei den hochverdienten Würdigungen wird zumeist vergessen, daß Konrad Zuse sich über die Computer-Technik und -Architektur und ihre Programmierung hinausreichend mit anderen grundsätzlichen Fragen befaßte:

1. **Systolische Arrays**, ein später (1980) von Kung und Foster im Zuge des Chip-Designs ohne Bezug auf Zuses Idee entwickeltes Konzept paralleler Hardware-Algorithmen;
2. **Zelluläre Automaten**, inspiriert in seiner „zweiten Begegnung“, diesmal mit dem „Mathematiker“ John von Neumann, von dessen „Theory of Self-Reproducing Automata“ (ed. & compl. by Arthur W. Burks, Univ. Illinois Press, 1966);
3. **„Der Rechnende Raum“**, die Idee des körnigen Universums gesteuert durch ein gigantisches Ensemble kommunizierender Automaten, inspiriert vom Konzept zellulärer Automaten:
„Der Kosmos als zellulärer Automat!“

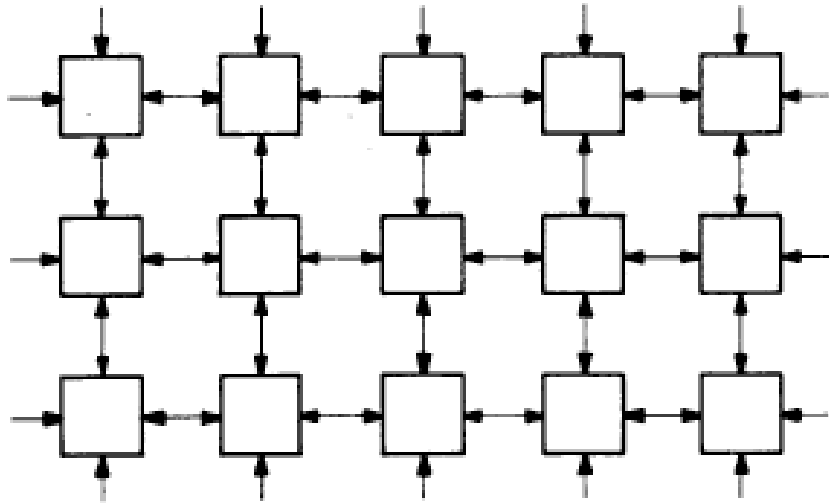


Abb. 73

**... zur Lösung
von Fragestellungen
aus der Physik**

Konrad Zuse:
Rechnender Raum, Vieweg, 1969,
S. 66 und 67, Abb. 73 und 74

**Zuses Prinzip
hochparalleler Arrays
aus Automaten ...**

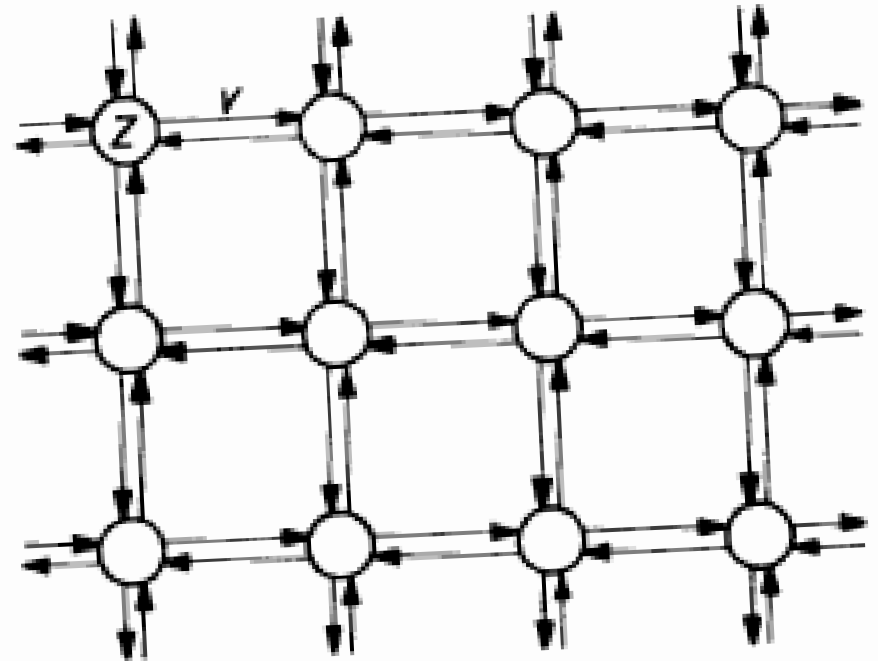
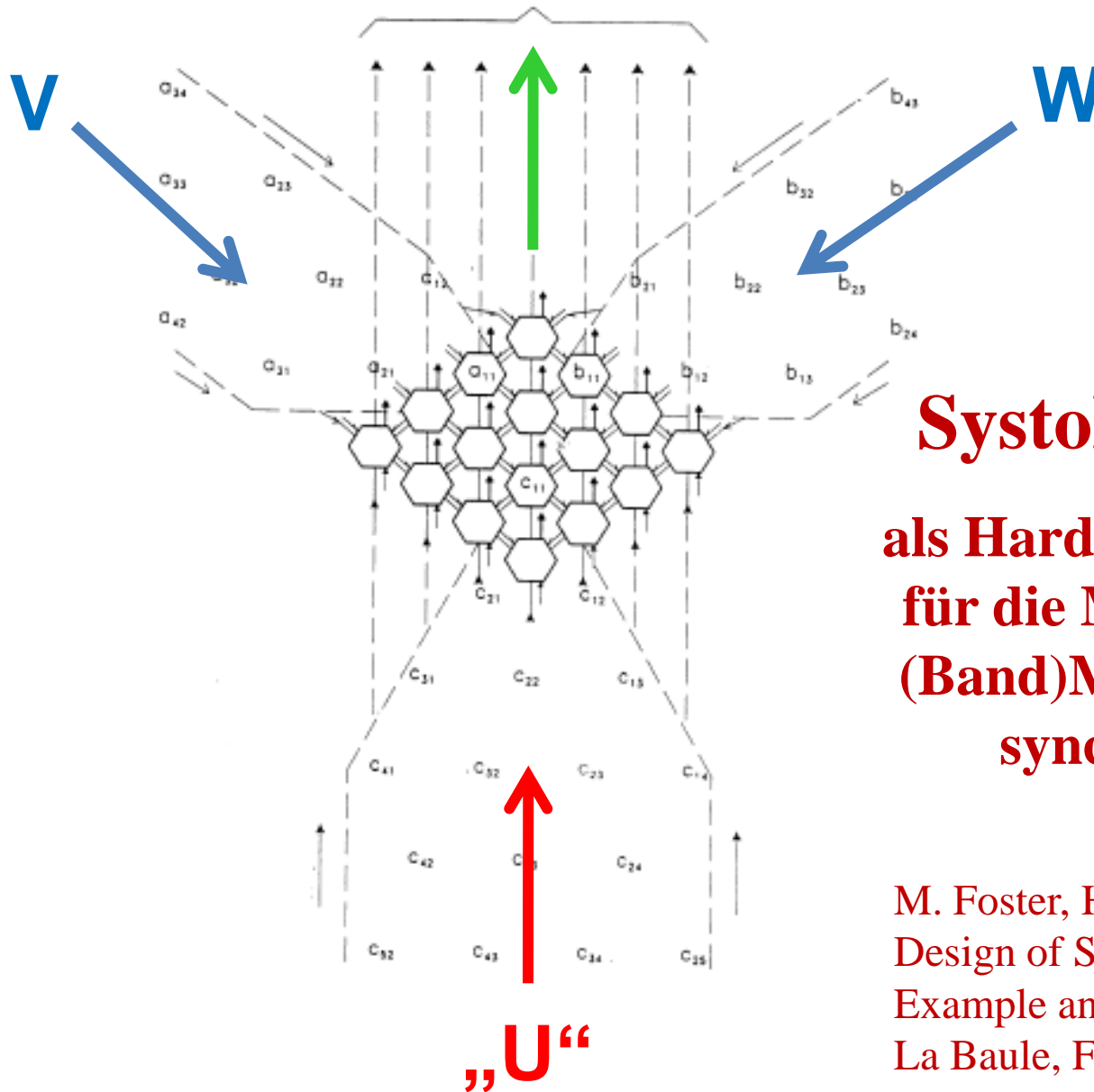


Abb. 74

$$U = V \cdot W$$



Systolisches Array

als Hardware- Algorithmus
für die Multiplikation der
(Band)Matrizen V und W ,
synchron getaktet

M. Foster, H. Kung:
Design of Special-Purpose VLSI Chips:
Example and Opinions. Proc. ISCA,
La Baule, France, 1980

Konrad Zuses „Digitalteilchen“

A und B wechselwirken: ein neues Teilchen C entsteht

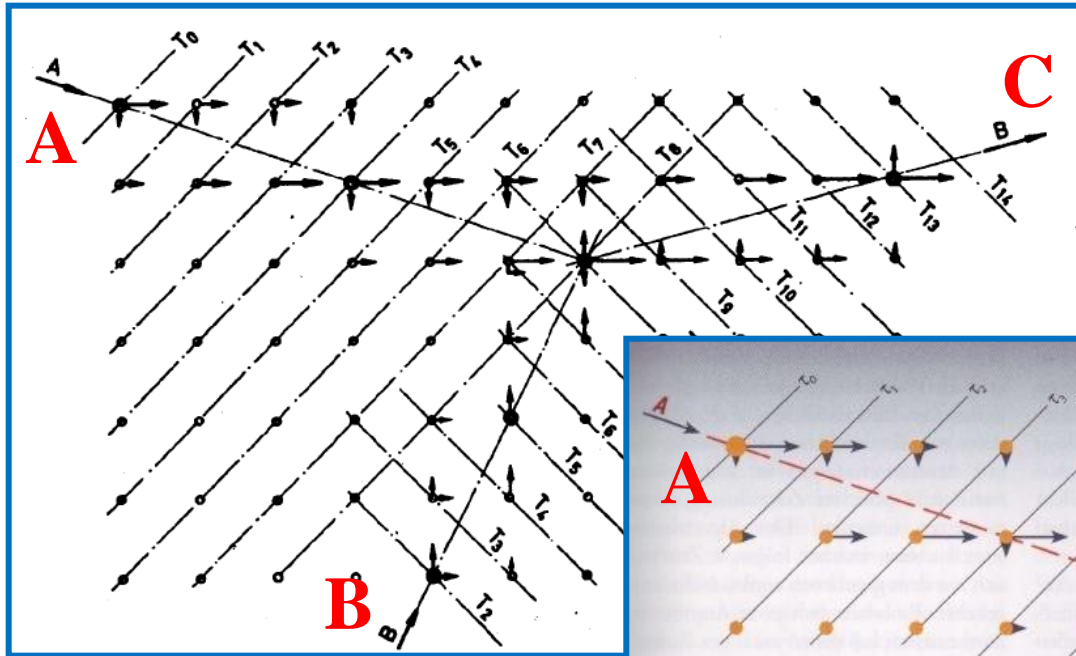


Bild 10
aus „Rechnender Raum“,
Elektronische Datenverarbeitung
Bd. 8, 1967, S. 341

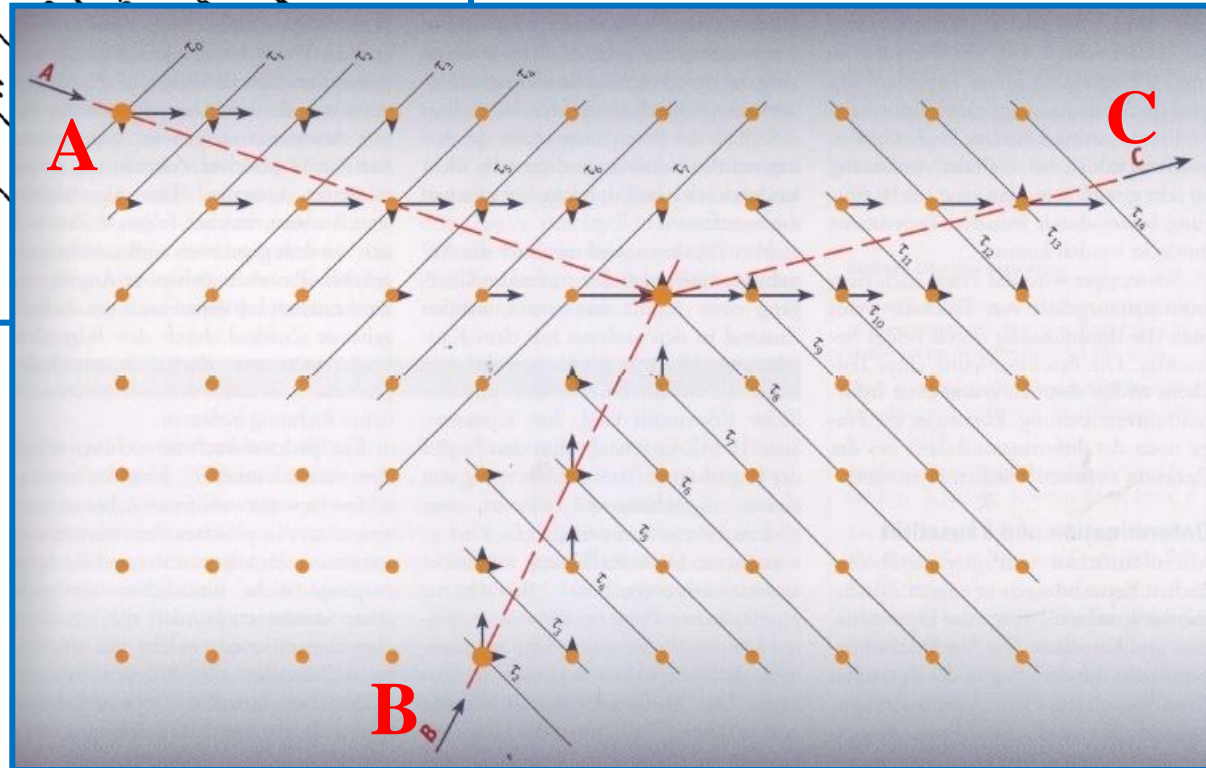


Abb. aus dem Neudruck
von „Rechnender Raum“ in
Spektrum der Wissenschaft –
Spezial 3/07, S. 13

„Zu Fuß“

- Es ist erstaunlich, wie weit Konrad Zuse das Konzept der zellulären Automaten und die Dynamik der Zustände auf dem Gitter, die er „Digitalteilchen“ nannte, schon 1966 treiben konnte.
- Er hatte ja zu seiner Zeit nur recht begrenzte technische Möglichkeiten zur Verfügung, um die komplexen Analysen durchführen und deren Ergebnisse visualisieren zu können.
- Konrad Zuse mußte diese Aufgaben quasi „zu Fuß“ durchführen, was man dem redigierten Neudruck der ersten Veröffentlichung im Spektrum der Wissenschaft 2007 nicht mehr ansieht.

Publikation der Ideen

Seine Ideen über zelluläre Automaten und die daraus abgeleiteten Überlegungen zur Diskretisierung der physikalischen Prozesse zu grundsätzlich digitalen Abläufen bis hin zu dem kühnen Schluß, daß die Entwicklung des Kosmos in diskreten Zeitschritten nach Maßgabe eines gigantischen (zellulären) Automaten geschehe, hat Konrad Zuse veröffentlicht:

1. 1967 in „Elektronische Datenverarbeitung“, Bd. 8, S. 336ff. (redigierter Neudruck in: „Ist das Universum ein Computer?“, Spektrum der Wissenschaft – Spezial 3/07, S. 6-15);
2. 1969 als Buch im Vieweg-Verlag, Band 1 der Schriften zur Datenverarbeitung.

Schwierigkeiten mit der Publikation

Welchen erkennbaren Schwierigkeiten Konrad Zuse auf dem Weg zur Veröffentlichung seiner Idee vom „Rechnenden Raum“ begegnete, läßt sich aus dem „Gedenken an Herrn Dr. Schuff“ erahnen, das er seinem Buch vorangestellt hat:

„Die folgende Arbeit steht etwas außerhalb heute üblicher Betrachtungsweisen, und es war daher nicht ganz leicht, einen Verlag zu finden, der zu einer Veröffentlichung bereit war. Ich fühle mich daher dem Vieweg-Verlag und insbesondere Herrn Dr. Schuff zu großem Dank verpflichtet. Herr Dr. Schuff machte den Vorschlag, eine Zusammenfassung in der Zeitschrift „Elektronische Datenverarbeitung“ zu bringen, welche im vorigen Jahr erschienen ist.

Der tragische Tod von Herrn Dr. Schuff hat alle seine Freunde tief erschüttert, und wir werden ihn stets in angenehmer Erinnerung behalten.“

Konrad Zuse auf dem Irrweg ?

- Der rudimentäre theoretische und technische Ansatz Zuses:
 - Raum und Zeit sind „körnig“,
 - das Universum ist ein gigantischer zellulärer Automat,
 - alle Prozesse laufen in Raum und Zeit in diskreten Sprüngen ab,mußte damals, 1967, als naive Spekulation abgetan werden.
- Seine Idee vom Kosmos als „Rechnendem Raum“ wurde dementsprechend hierzulande in der Welt der Wissenschaft – aus deren damaliger Sicht – nicht ernst genommen.
- **Friedrich L. Bauer** schrieb in seinem Nachruf 1996: „Es sind erstaunlich wenig Dinge, die Zuse verkannte; daß ihm, wie er selbst oft bemerkte, der mathematische Apparat fehlte, hat ihn nicht immer wirklich behindert. **Im Falle des Rechnenden Raumes ging er allerdings in die Irre.**“
- Zuses Schüler **Jürgen Alex** überschrieb seine erste Würdigung der Lebensleistungen Konrad Zuses 1997 mit dem Titel „**Wege und Irrwege des Konrad Zuse**“. – In seinem Buch „Zur Entstehung des Computers – Von Alfred Tarski zu Konrad Zuse“, 2008, richtet er den „Irrweg“ Zuses nun fast geradeaus; ja, Stephen Wolfram wird gar als Berufener auserkoren, Zuses Weg zum „Rechnenden Raum“ weiterzugehen (Spektrum der Wissenschaft 07/10).

Zelluläre Automaten

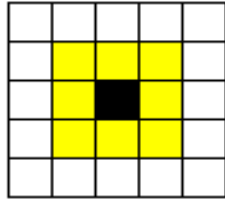
(Cellular Automata – CA)

Zelluläre Automaten

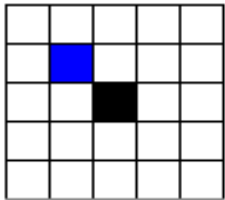
Die Wirkung der Überlegungen Konrad Zuses zu zellulären Automaten wurde jedoch abgeschattet

- einerseits durch die wohl schon seit den 1950er Jahren, gleichfalls stimuliert durch John von Neumanns Arbeiten, von **Edward Fredkin** unabhängig entwickelten Ideen über solche Automaten, die auch bei Fredkin zu einem Konzept eines digitalen Kosmos führten: „Digital (*Meta*)Physics“;
- andererseits durch das von **John H. Conway** in Cambridge/UK entworfene Spiel „Game of Life“, das vor allem durch die berühmten Artikel von Martin Gardner im „Scientific American“ 1970 außerordentlich populär wurde.

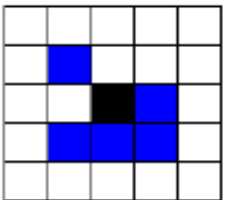
Regeln für den Cellular Automaton „Life“



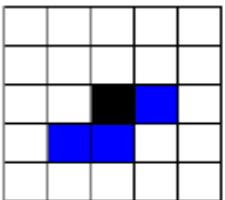
Jede Zelle hat 8 Nachbarn.



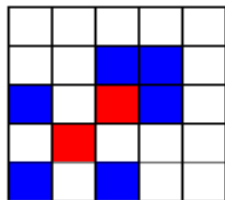
Wenn eine lebende Zelle 0 oder 1 Nachbar hat, so stirbt sie (*loneliness*).



Wenn eine lebende Zelle 4 bis 8 Nachbarn hat, so stirbt sie (*overcrowding*).

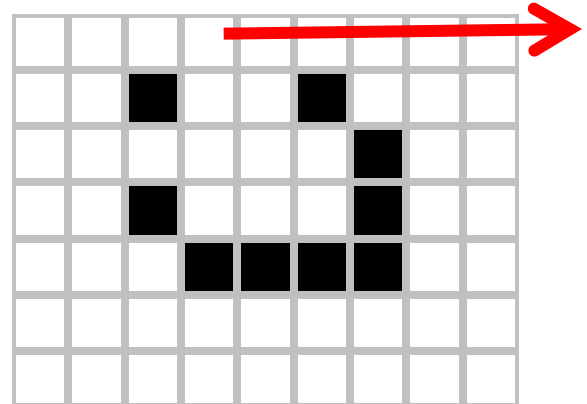
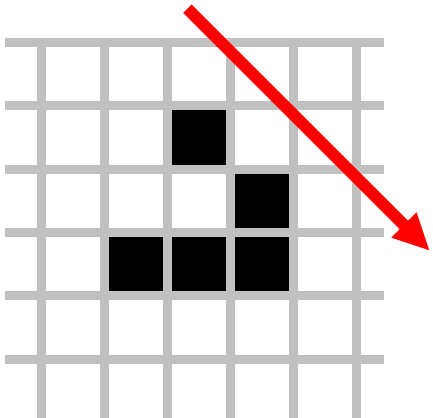


Wenn eine lebende Zelle 2 oder 3 Nachbarn hat, so überlebt sie (*survival*).

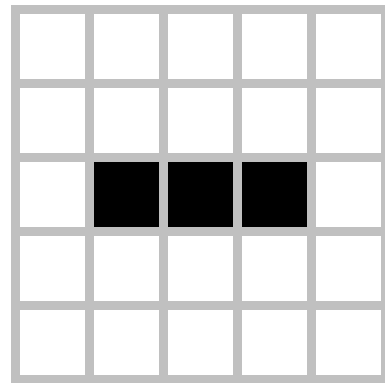


Wenn eine leere Zelle 3 lebende Nachbarn hat, so wird sie belebt (*birth*).

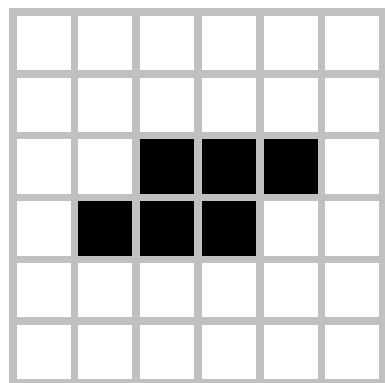
„Glider“



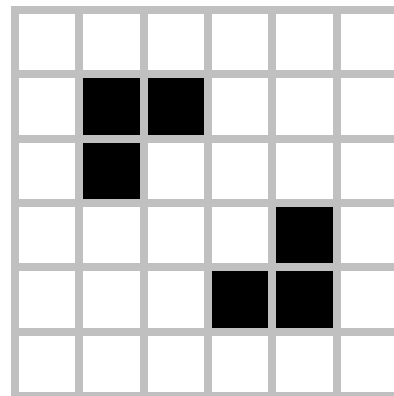
„Beacon“



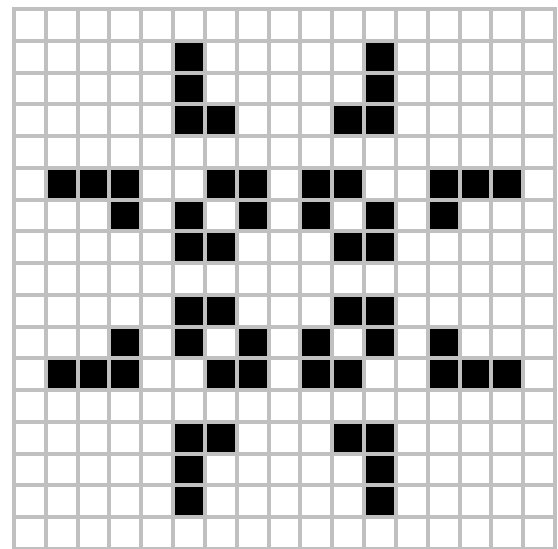
„Blinker“



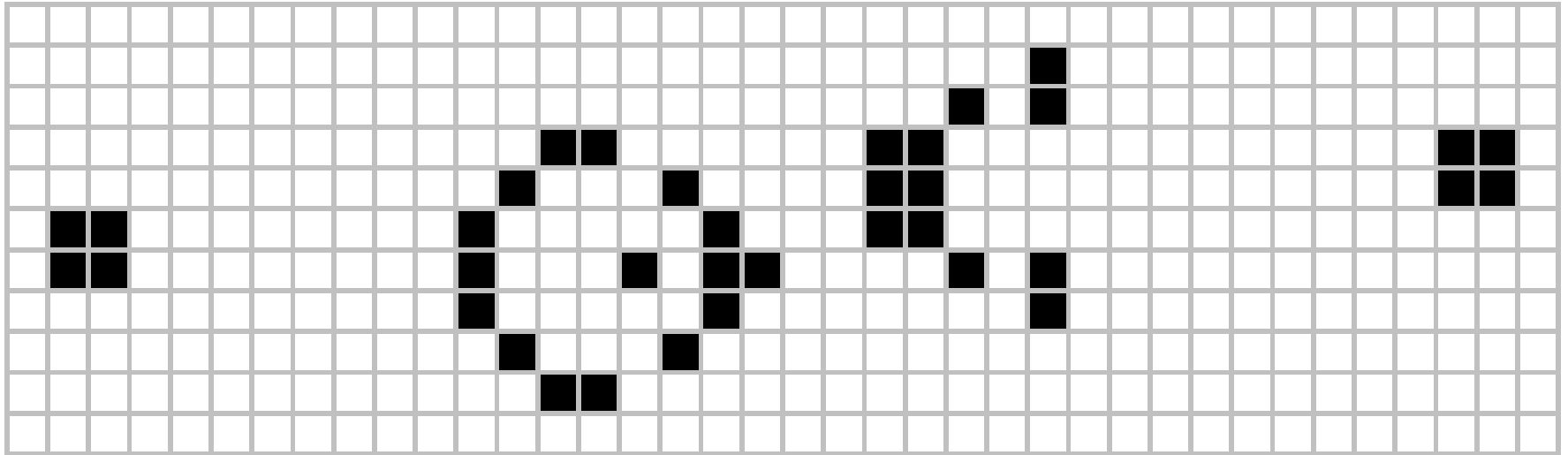
„Toad“ (Kröte)



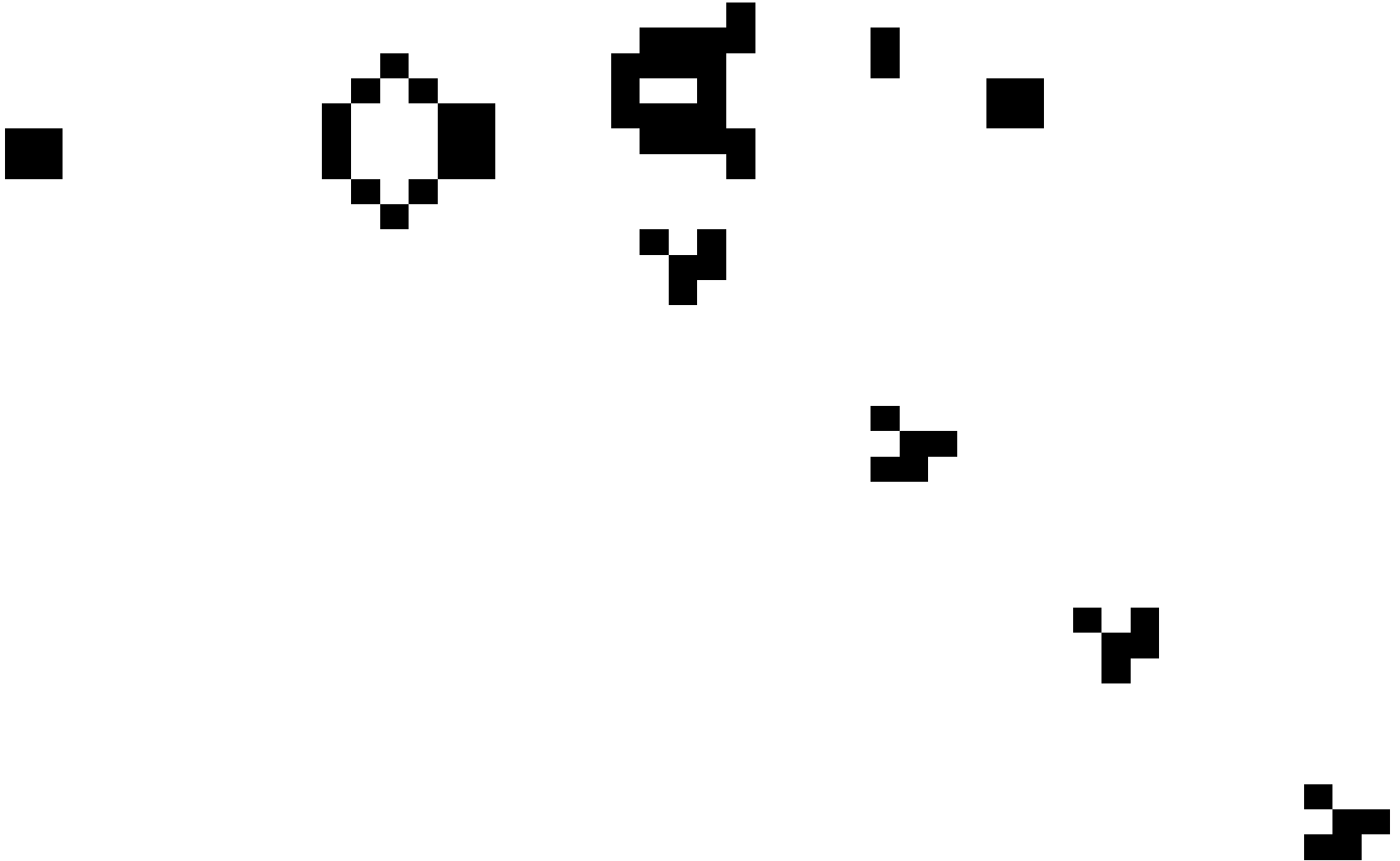
„Pulsar“



Gosper's „Glider Gun“ (Kanone)



Gosper's Glider Gun



Formale Definition des CA „Life“ von Conway: „Spiel des Lebens“ (1969/70)

reguläres Gitter:

2-dimensional, quadratisch, $n \times m$

$$L := \{(i, j) \mid i, j \in \mathbb{N}, 0 \leq i < n, 0 \leq j < m\}$$

Nachbarschaft:

Moore

$$N_{i,j} := \{(k, l) \in L \mid |k - i| \leq 1 \text{ und } |l - j| \leq 1\}$$

Zustandsmenge:

$$S := \{0, 1\}$$

Zustandsübergangsfunktion:

$$f_{i,j}(t+1) := \begin{cases} 1, & \text{wenn } \sum_{(k,l) \in N_{i,j}} f_{k,l}(t) = 3 \\ 1, & \text{wenn } \sum_{(k,l) \in N_{i,j}} f_{k,l}(t) = 4 \text{ und } f_{i,j}(t) = 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Definition zellulärer Automaten (CA)

reguläres Gitter (unendlicher Ausdehnung): L
die Elemente von L werden Zellen genannt

Nachbarschaftsrelationen: $N \subseteq L^n$
Menge der Nachbarschaften (n -Tupel)

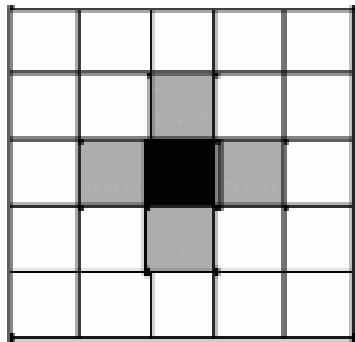
endliche Zustandsmenge: S
jede Zelle besitzt genau einen Zustand s aus S

Zustandsübergangsfunktion (Regeln): $f: S^n \rightarrow S$
jede Zelle entwickelt sich auf Grund der selben Funktion f

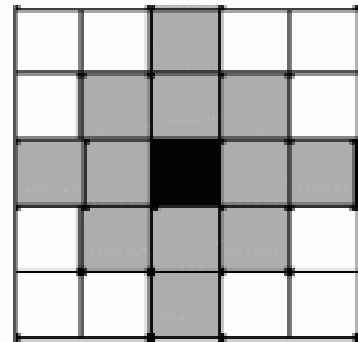
Zellularautomat: (L, N, S, f)

(Erweiterte) Nachbarschaften

von Neumann

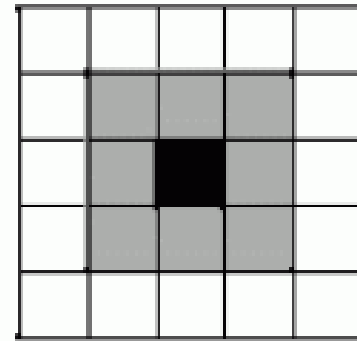


r=1

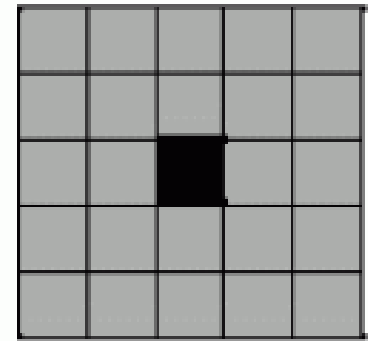


r=2

Moore



r=1



r=2

Gegeben: Zelle i, j

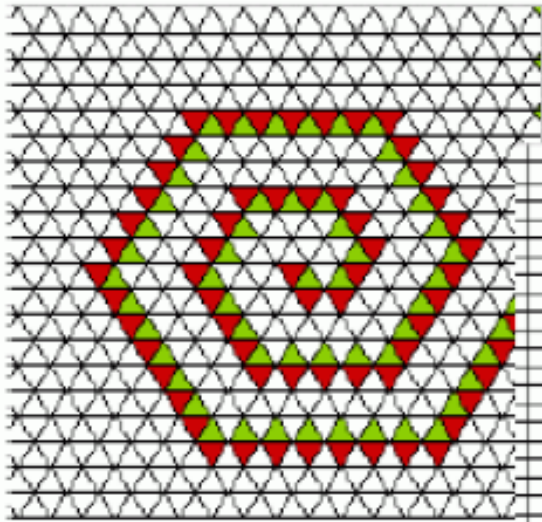
- Von Neumann-Nachbarschaft

$$N_{i,j} = \{(k,l) \in L : |k-i| + |l-j| \leq r\}$$

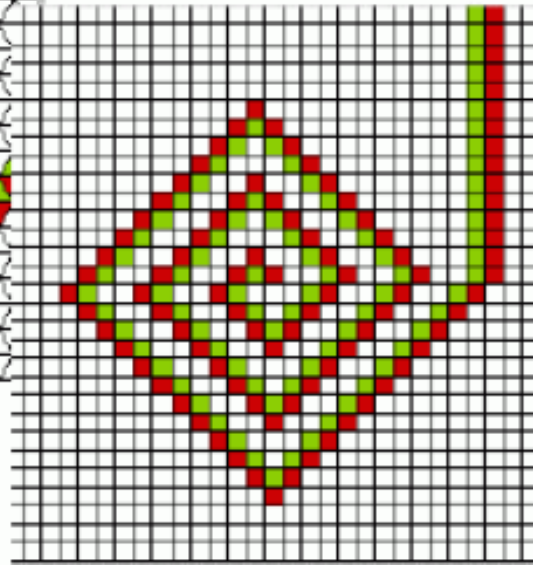
- Moore-Nachbarschaft

$$N_{i,j} = \{(k,l) \in L : |k-i| \leq r \wedge |l-j| \leq r\}$$

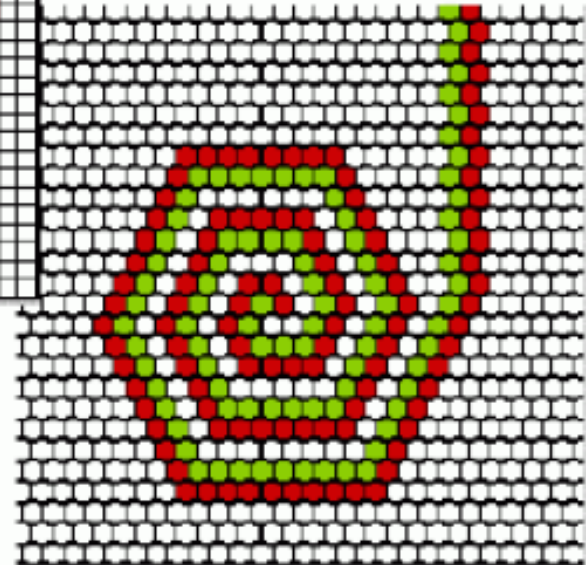
Gittertypen für zelluläre Automaten (Arrays)



Dreiecksgitter

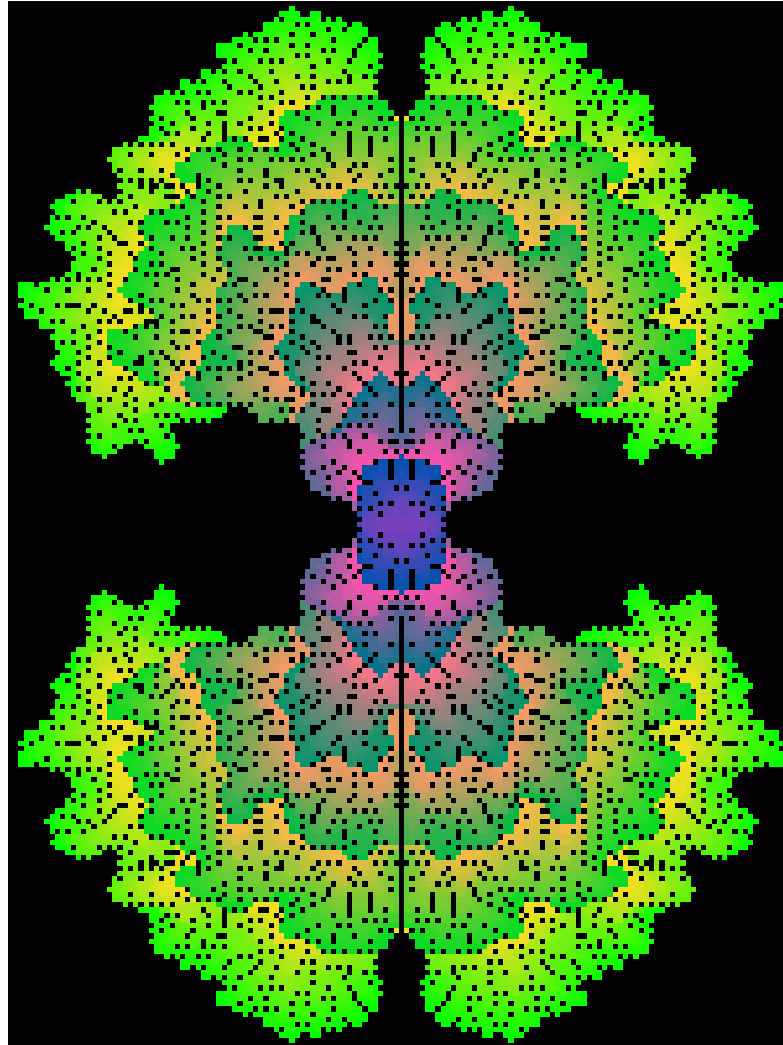


**Quadratisches
Gitter**



Hexagonales Gitter

Zustand nach Schritt 300 eines 2D-CA (nach Stephen Wolfram)



**Start-Situation:
11 besetzte Zellen**

(Code 174826)

Formale Definition der Cellular Automata für $d \geq 1$ Dimensionen und $k \geq 2$ Zustände

Definition 1.1. A d -dimensional cellular automaton (or d-CA) is a structure

$\mathcal{A} = (\mathbb{Z}^d, S, N, \delta)$ where:

(a) \mathbb{Z}^d is the (discrete) lattice of d -tuples of integer numbers.

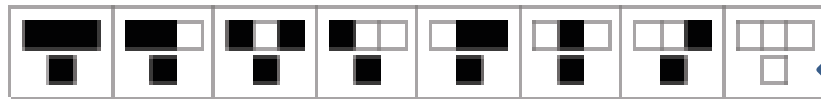
(b) S is a finite set of *states*.

(c) $N = \{(n_j = (x_{1j}, \dots, x_{dj}) / j \in \{1, \dots, n\})\}$ is a finite ordered subset of \mathbb{Z}^d called the *neighborhood* of \mathcal{A} .

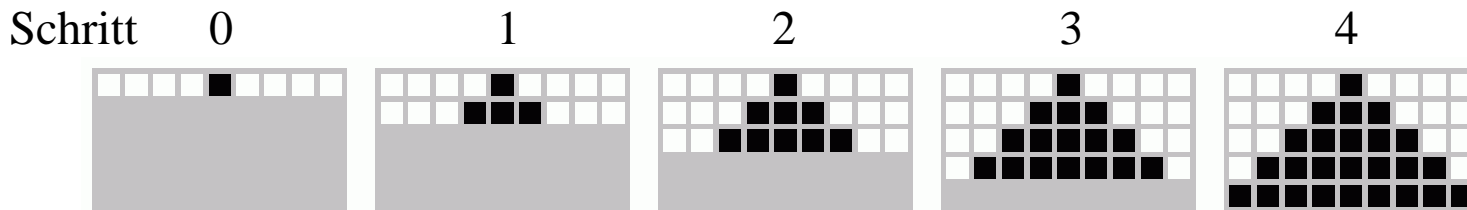
(d) $\delta : S^{n+1} \rightarrow S$ is the local *transition function* or *local rule* of \mathcal{A} .

1D-Zelluläre Automaten nach Regel-Code

1) 254



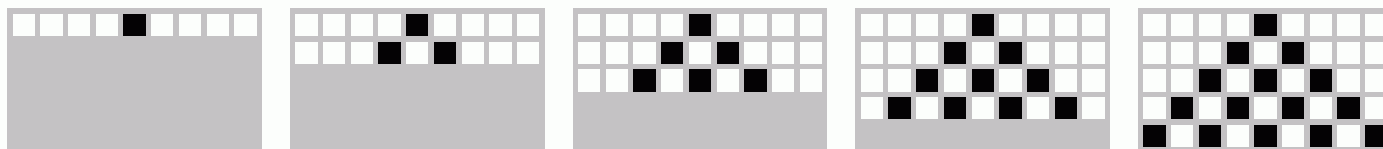
Binär-Code 254
 $((2^8 - 1) - 1)$



2) 250

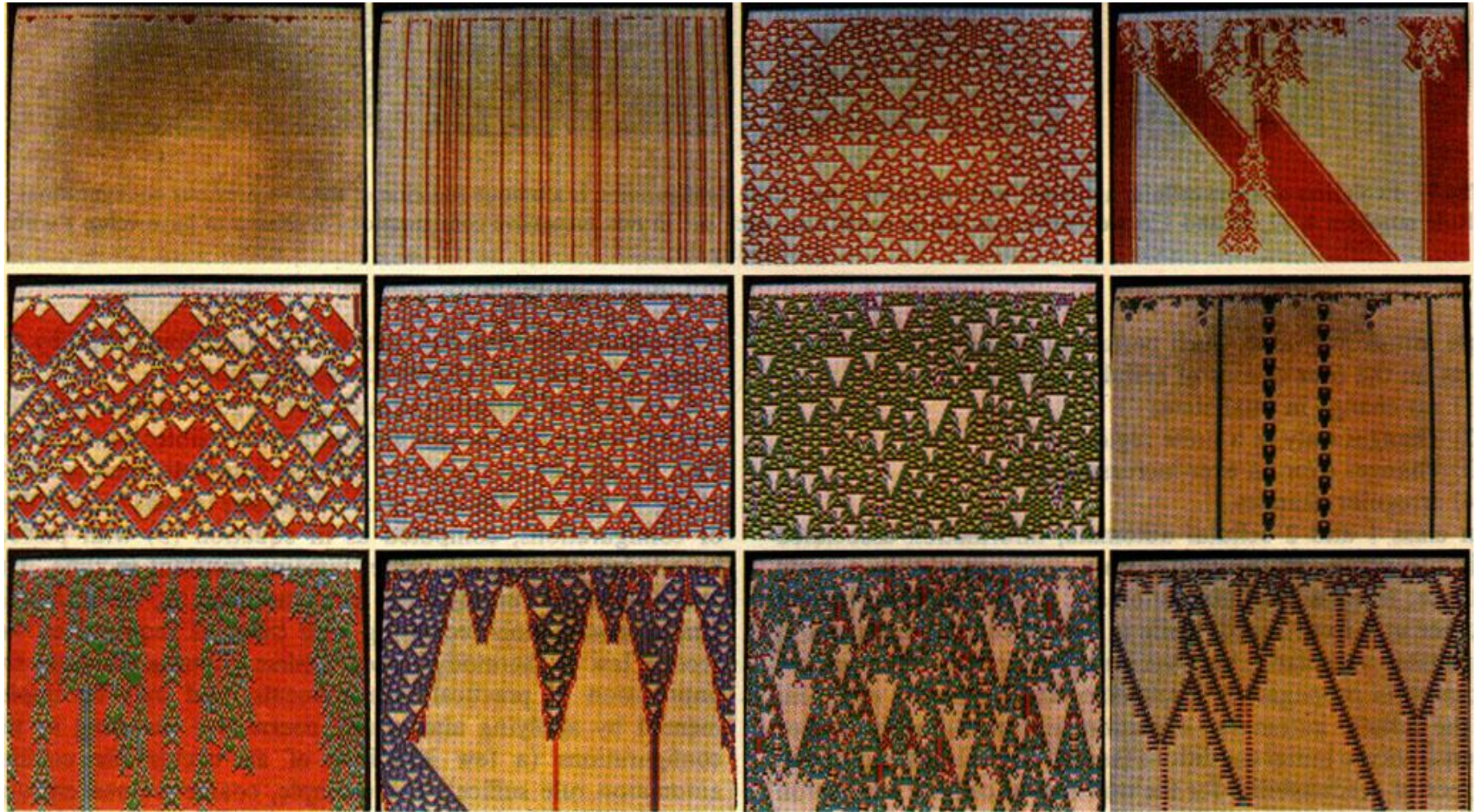


Binär-Code 250
 $((2^8 - 1) - 5)$



(aus Stephen Wolfram: „A New Kind of Science“)

Typische zeitliche Entwicklungen von 1D-CA's (nach Stephen Wolfram)



Musterbildung in der Natur

Beispiel: Schnecken
(conus textile = Kegelschnecken)



Jeweils

links: Photographie

rechts: CA-Simulation

aus: Kurth, GWDG, Referat

Erfolgsweg der zellulären Automaten

- Dieses Automaten-Konzept erfuhr kräftige, auch wirtschaftliche Förderung, so daß sich die zellulären Automaten (Cellular Automata, Cellular Arrays) zu einem breiten Forschungs-und Anwendungsfeld entwickelten, z. B. :
 - Lösung hydrodynamischer Probleme;
 - Verkehrssimulation; Evakuierungssituationen;
 - Modellierung oszillierender chemischer Prozesse;
 - Modellierung selbstorganisierender Systeme;
 - Modellierung evolutionärer Prozesse (Hyperzyklus);
 - Modellierung der Musterbildung in der Natur u. a. m.
- Im Jahre 2002 gipfelte diese (kommerzielle) Entwicklung in der 1200-Seiten-Monographie von Stephen Wolfram mit dem recht unbescheidenen Titel „A New Kind of Science“.

„A New Kind of Science“ — Ein Manifest?

- Das voluminöse Buch sieht Stephen Wolfram neben dem starken und weitverbreiteten System „Mathematica“ quasi als Gipfel seines durchaus bemerkenswerten Lebenswerkes als Physiker und Mathematiker.
- Sein totalitärer Alleinvertretungsanspruch – als solcher wurde das Buch weitgehend verstanden – rief massive Kritik hervor, die stark an die Zwistigkeiten in den Anfängen von Wolfram's kommerzieller Karriere mit Urheberrechtsprozessen etc. erinnerte.
- **Zitat:** „It is my considered, professional opinion that *A New Kind of Science* shows that Wolfram has become a crank in the classic mold, which is a shame, since he's a really bright man, and once upon a time did some good math, even if he has always been arrogant. ...

As the saying goes, there is much here that is new and true, but what is true is not new, and what is new is not true; and some of it is even old and false, or at least utterly unsupported. ...“

(Cosma Shalizi, PhD, Professor, Carnegie Mellon University, The Bactra Review, 2005)

CA's als universelle „Computer“

- John Conway hatte Ende der 1960er Jahre nachgewiesen, daß für Moore-Nachbarschaft im zweidimensionalen Gitter ein zellulärer Automat mit zwei Zuständen „computationally universal“ ist.
- Daraus entwickelte er sein „Game of Life“.
- Universalität hat schon Stephen Wolfram für 1D-CA's gezeigt.
- A.R. Smith hat bewiesen, daß eine solche Universalität mit eindimensionalen Automaten gegeben ist: J. ACM 18 (1971), 339-353

Theorem 3.1. Given a Turing machine with n internal states and m alphabetic symbols, there exists a 1D cellular automaton with six neighbors and $\max(n, m) + 1$ states which simulates it.

CA — ein verführerisches Konzept

- Diese „einfachen“ mathematischen Systeme von CA's verführten zuerst die Physiker zu schönen „Spielzeug-Modellen“ ihrer Welt.
- Die Informatiker nennen ein solches System ein paralleles, verteiltes Rechnermodell.
- Zu jeder Zeit ist jede Zelle eines diskreten Gitter-Raumes in einem von endlich vielen Zuständen, der sich nach festen Regeln in diskreten Zeit-Schritten verändert, abhängig von den Zuständen der Zellennachbarn und dem eigenen Zustand.
- **Die Zeit springt also im diskreten Raum in diskreten Schritten.**
- Nach den Grundlagenarbeiten JvN's in den 1950ern verführte das einfache CA-Modell Zuse, aber auch Fredkin zu der Idee: **„Der Kosmos ist ein zellulärer Automat“**

Zuses „Rechnender Raum“

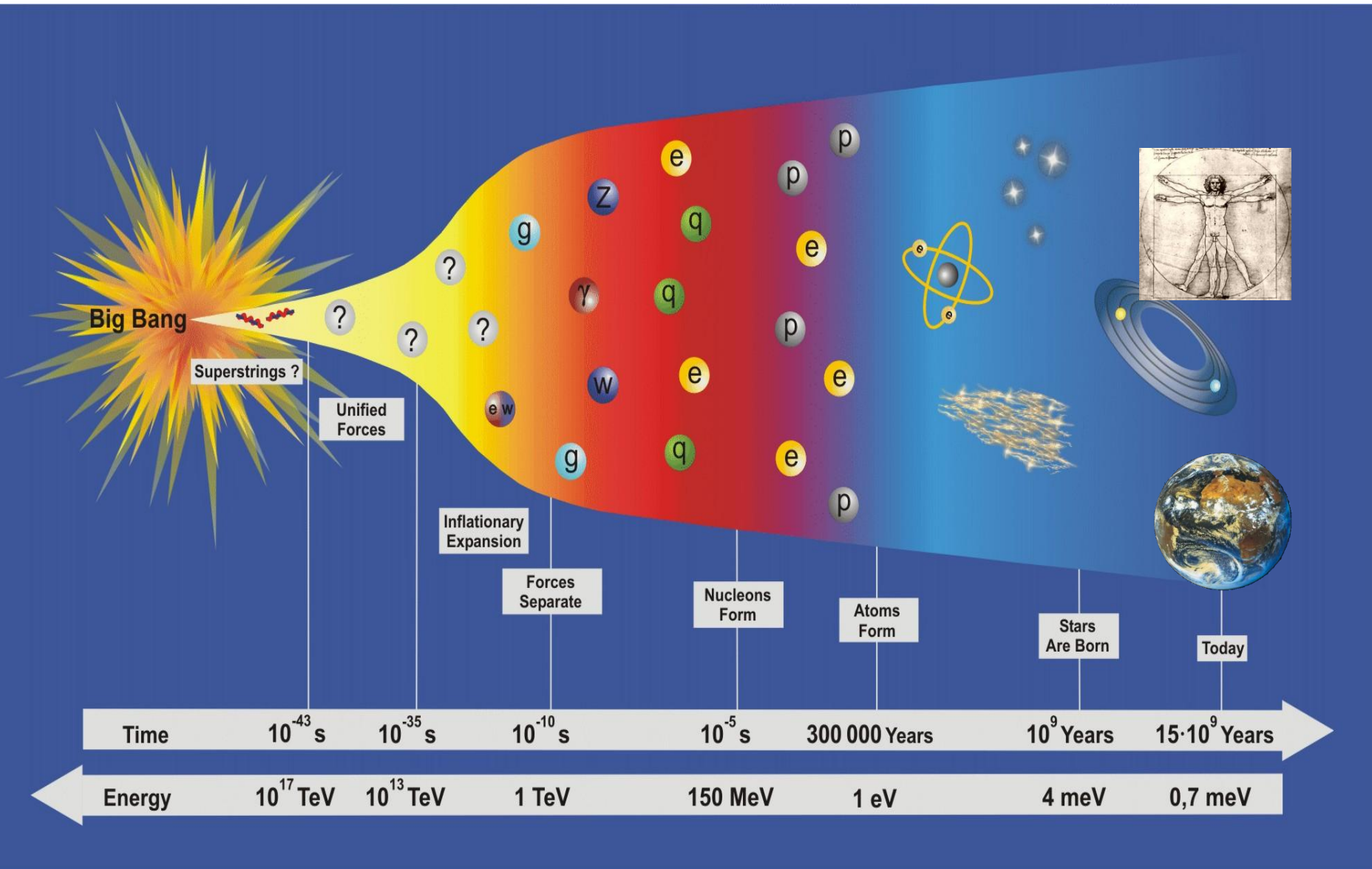
- Liest man heute, nach 40 Jahren, jene erste Veröffentlichung und das Buch „Rechnender Raum“ von Konrad Zuse, so ist man immer wieder irritiert von den sprunghaften Aussagen über die Lösungsmethoden für physikalische Probleme
- und die aus einem offensichtlich vagen Verständnis der Quantenmechanik und Relativitätstheorie heraus oft recht obskuren Schlußfolgerungen hinsichtlich der Modellierung physikalischer Prozesse – und schließlich der Dynamik des ganzen Universums – durch zelluläre Automaten.
- Weder bei Zuse noch bei Fredkin – noch neuerdings bei Stephen Wolfram – findet sich eine aus der Physik konkret abgeleitete Begründung für ihre gewagte Hypothese, den Kosmos als einen zellulären Automaten zu sehen.

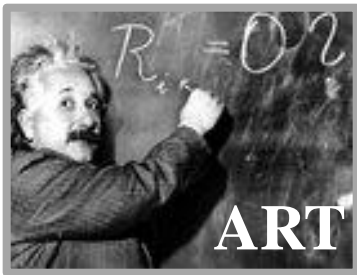


**Camille Flammarion (1842-1925): „Der Weltengucker“
Durchbruch des Menschen durch das Himmelsgewölbe und Erkenntnis neuer Sphären**

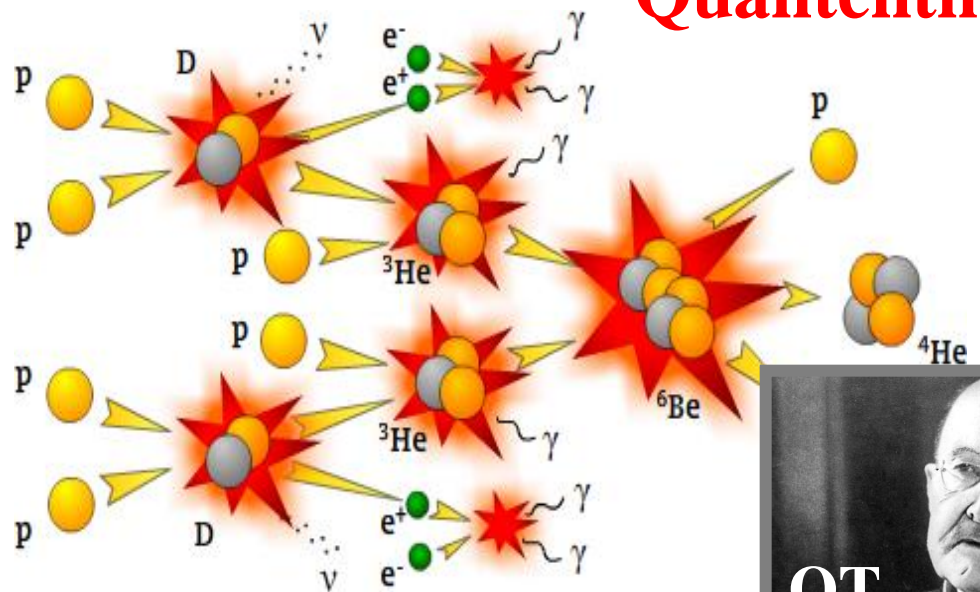
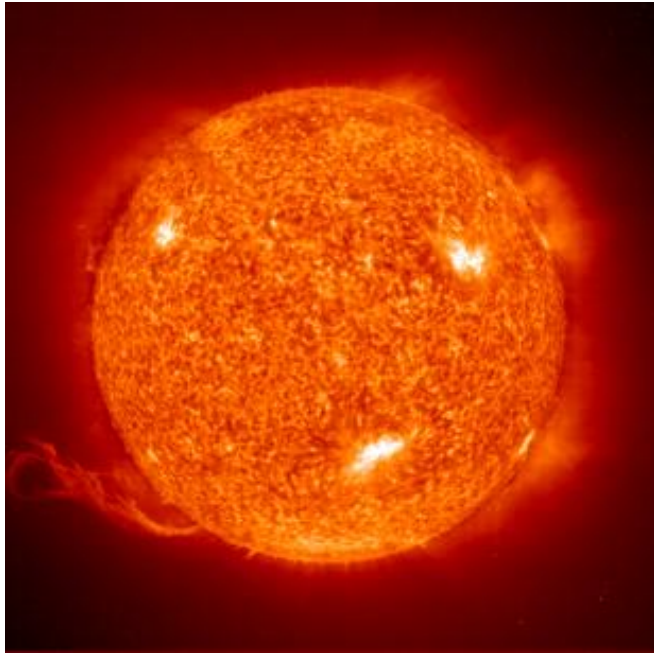
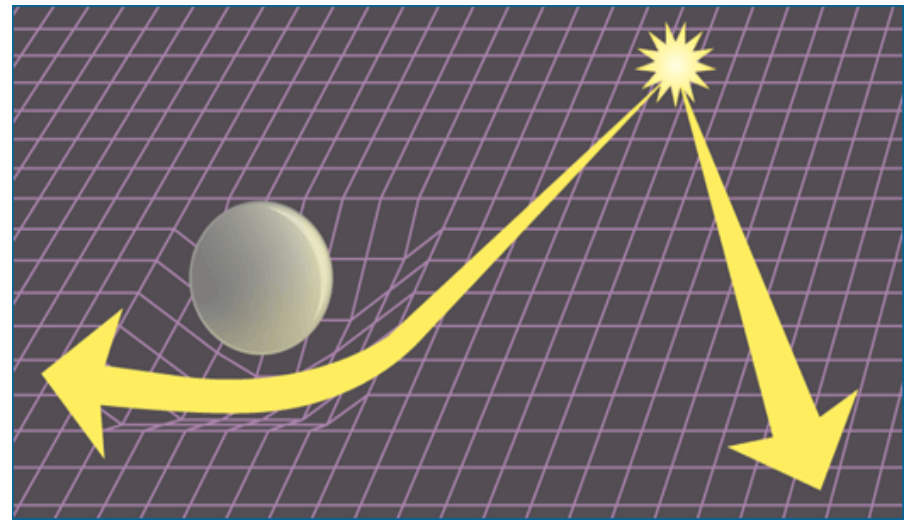
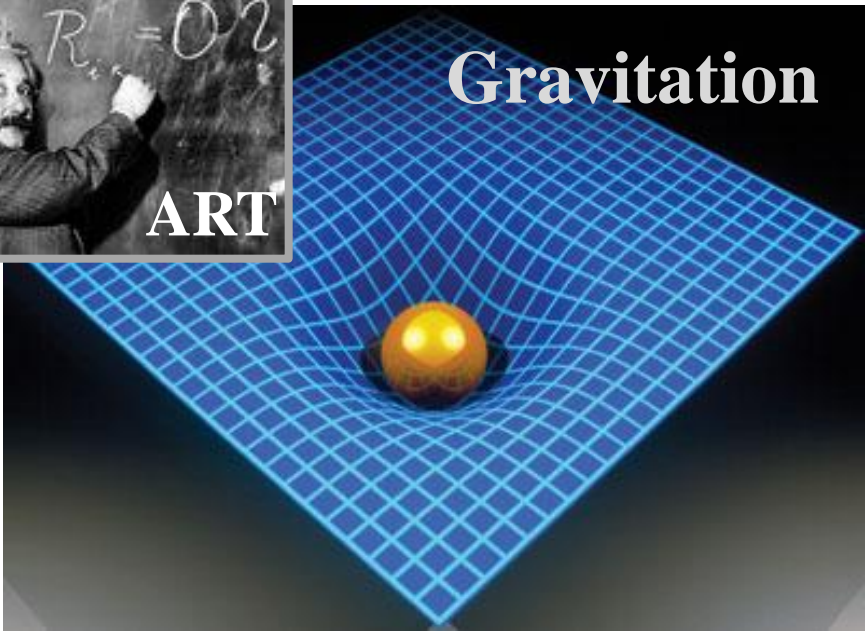
**Was meint die Physik
zu Zuses Idee
heute
?**

Entwicklung des Universums seit „Big Bang“



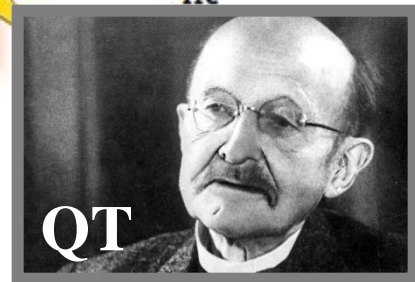


Gravitation



Kernfusion

Quantentheorie



Die Physik landet bei Grundlagenproblemen

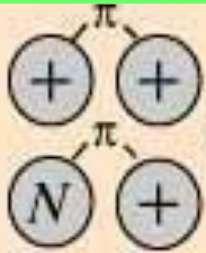
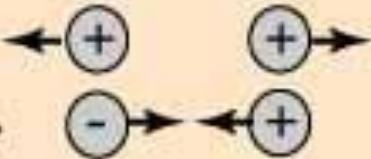
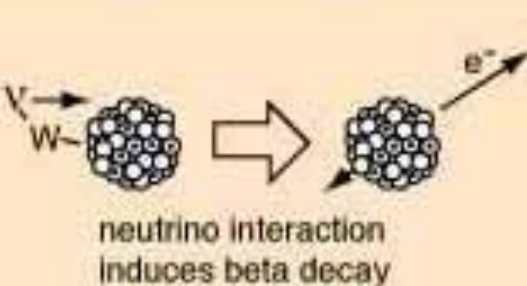
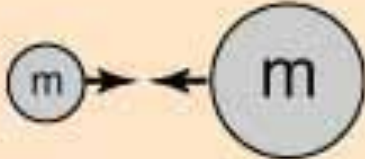
Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

- Geometrische Deutung der Gravitation im Makrokosmos
- Gravitation ist danach keine Kraft, sondern Eigenschaft der Raumzeit
- Materie verkrümmt den Raum, so daß auch Licht ($E = m \cdot c^2$) vom geraden Weg abgelenkt wird
- Einsteins Feldgleichungen: Krümmung \equiv Materiedichte

Plancks und Heisenbergs Quantentheorie

- Quantentheorie beschreibt den Mikrokosmos
- Alle beobachtbaren Größen unterliegen Fluktuationen
- Prinzipiell: Heisenbergsche Unschärferelation
- Daraus abgeleitetes Modell („Standardmodell“) kann drei der vier fundamentalen Kräfte beschreiben – mit Ausnahme der Gravitation

Fundamental Forces

<i>Strong</i>	 <p>Force which holds nucleus together</p>	<p>Strength</p> <p>1</p>	<p>Range (m)</p> <p>10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)</p>	<p>Particle</p> <p>gluons, π(nucleons)</p>
<i>Electro-magnetic</i>		<p>Strength</p> <p>$\frac{1}{137}$</p>	<p>Range (m)</p> <p>Infinite</p>	<p>Particle</p> <p>photon mass = 0 spin = 1</p>
<i>Weak</i>	 <p>neutrino interaction induces beta decay</p>	<p>Strength</p> <p>10^{-6}</p>	<p>Range (m)</p> <p>10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)</p>	<p>Particle</p> <p>Intermediate vector bosons W^+, W^-, Z_0, mass > 80 GeV spin = 1</p>
<i>Gravity</i>		<p>Strength</p> <p>6×10^{-39}</p>	<p>Range (m)</p> <p>Infinite</p>	<p>Particle</p> <p>graviton ? mass = 0 spin = 2</p>

Unvereinbarkeiten zwischen ART und QT

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

- Beim Urknall vor rund 14 Milliarden Jahren war alle Materie und Energie in einem Punkt vereint
- In diesem singulären Zustand wird Raumzeit- Krümmung unendlich groß
- Einstein-Gleichungen: keine physikalisch sinnvolle Lösung
- Ereignishorizont eines zentralen Körpers wächst mit der Masse: **Schwarzschild-Radius**

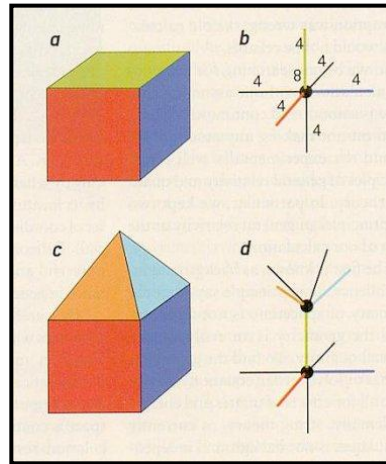
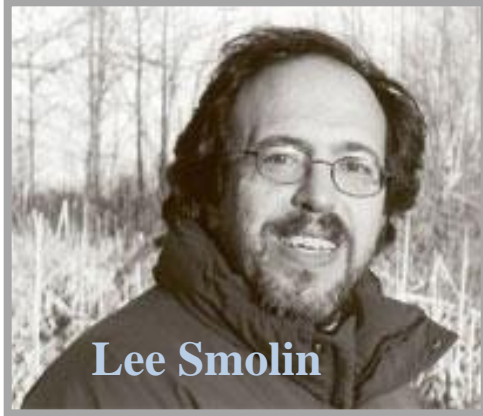
Plancks und Heisenbergs Quantentheorie

- Das Vakuum ist nicht leer.
- Durch Vakuumfluktuationen werden ständig Teilchen erzeugt und vernichtet
- Die Quantentheorie gibt aber keine obere Grenze für die Energie dieser Teilchen an
- Laut Quantentheorie nimmt die räumliche Ausdehnung eines Teilchens mit wachsender Energie ab: **Compton-Radius**

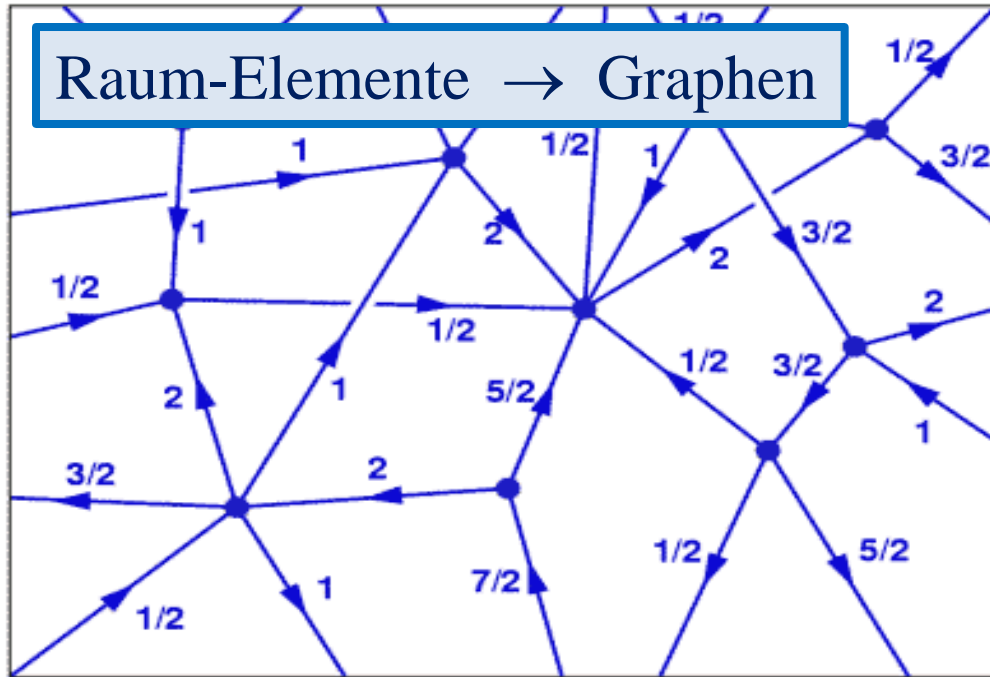
Planck-Länge und Planck-Zeit

- Wenn Compton-Radius kleiner als der Schwarzschild-Radius wird, kollabiert das Teilchen (zu einem „Schwarzen Loch“)
- Dieser Grenzradius ist die sogenannte **Planck-Länge: 10^{-33} cm**
- Die Zeit, die das Licht für die Strecke einer Planck-Länge braucht, ist die sogenannte **Planck-Zeit: 10^{-45} sec**
- Offenbar lassen sich Raum und Zeit nicht beliebig fein auflösen, wie es klassisch das raum-zeitliche Kontinuum angibt, sondern nur bis zur Planck-Länge und Planck-Zeit
- Das heißt aber, daß nur eine Quantentheorie der Gravitation die Probleme der Unvereinbarkeit lösen kann
- Seit 75 Jahren suchen die Physiker nach einer solchen Theorie: Quanten-Gravitations-Theorie (Quantum Gravity)
- Aussichtsreichster Kandidat: **Schleifen-Quanten-Gravitation** („Loop Quantum Gravity“): Raum-Zeit-Quantelung

Loop Quantum Gravity

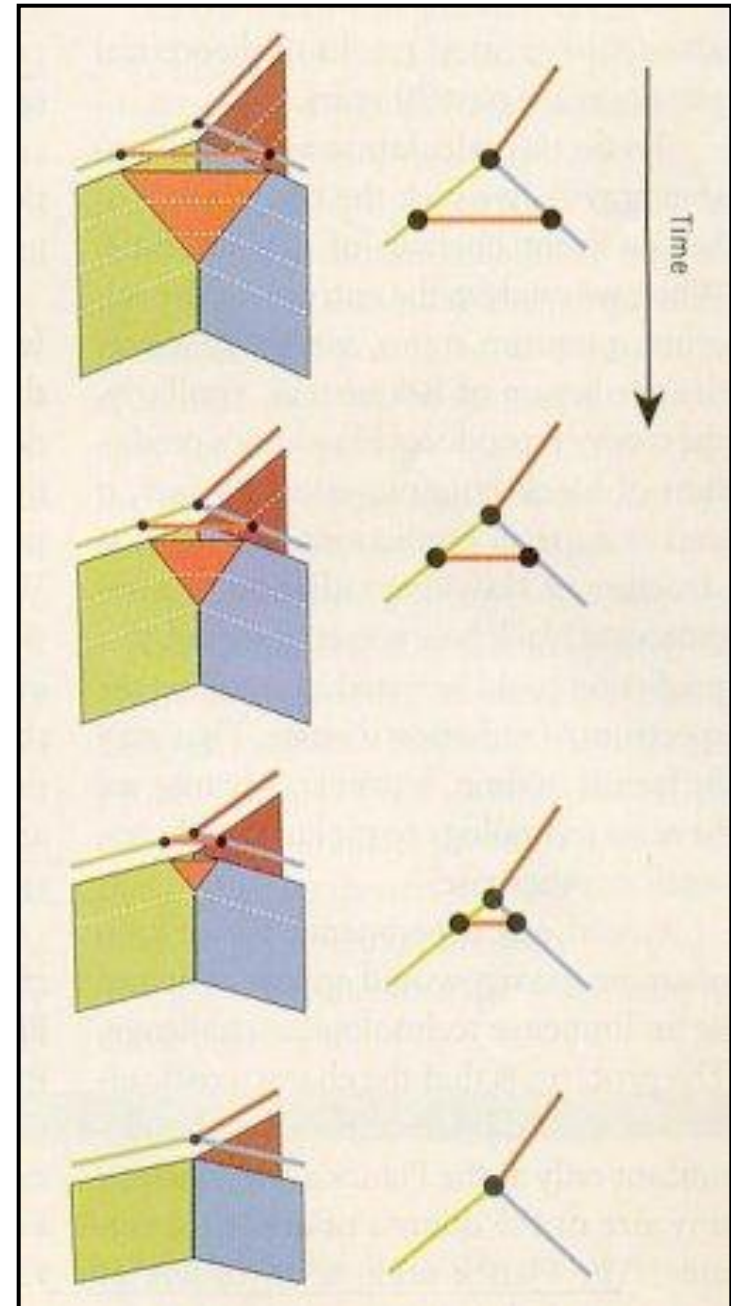


Planck-Länge: 10^{-33} cm
 Planck-Zeit: 10^{-45} sec

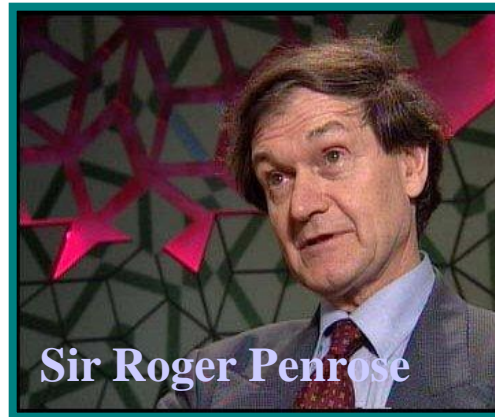
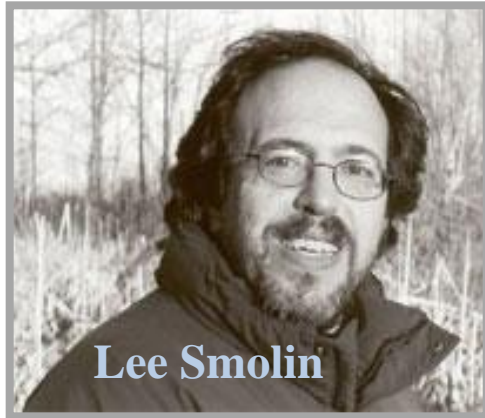


Raum-Elemente \rightarrow Graphen

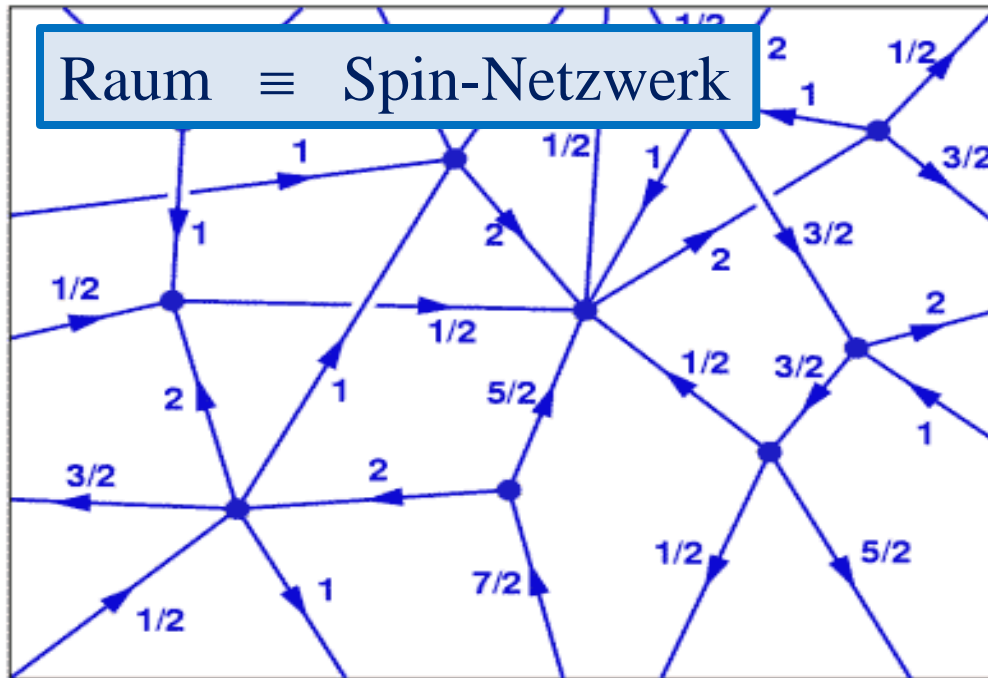
Nodes + Lines + Arrows + Labels = Spin network



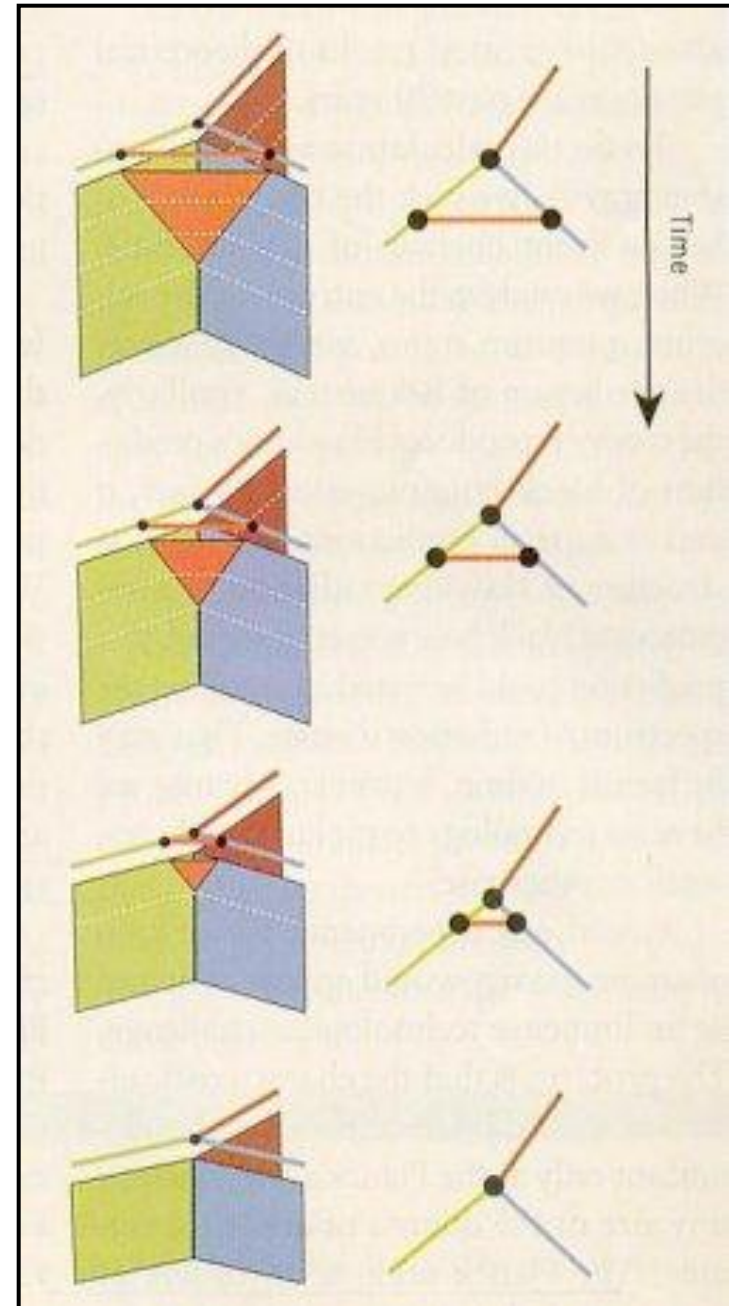
Spin Network



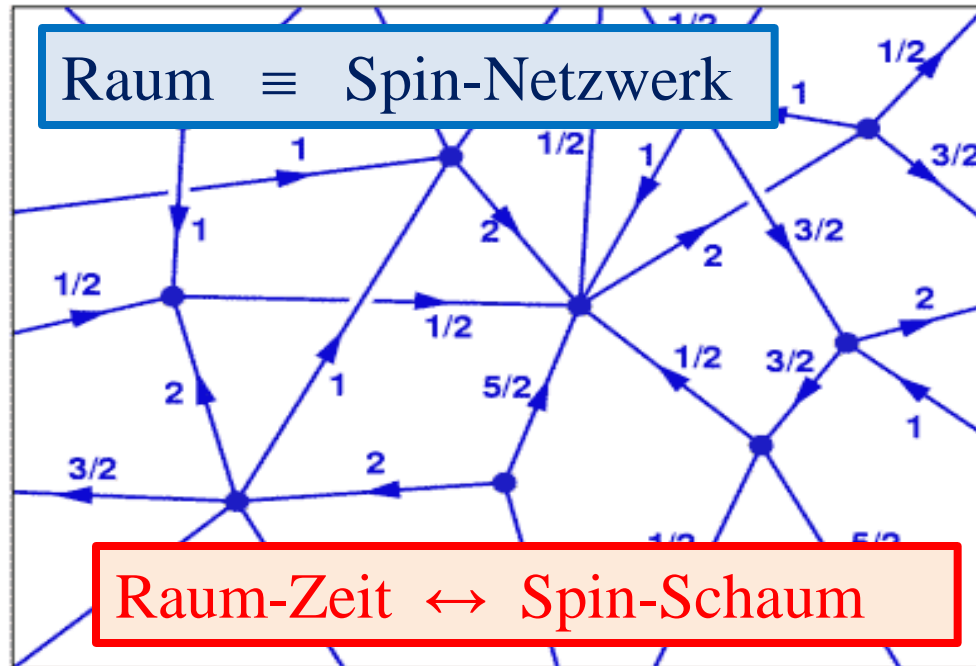
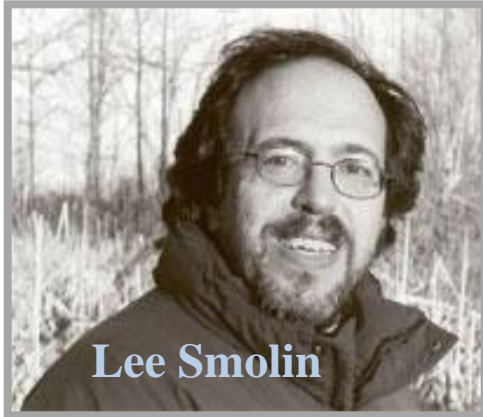
Planck-Länge: 10^{-33} cm
 Planck-Zeit: 10^{-45} sec



Nodes + Lines + Arrows + Labels = Spin network



Spin Foam



Nodes + Lines + Arrows + Labels = Spin network

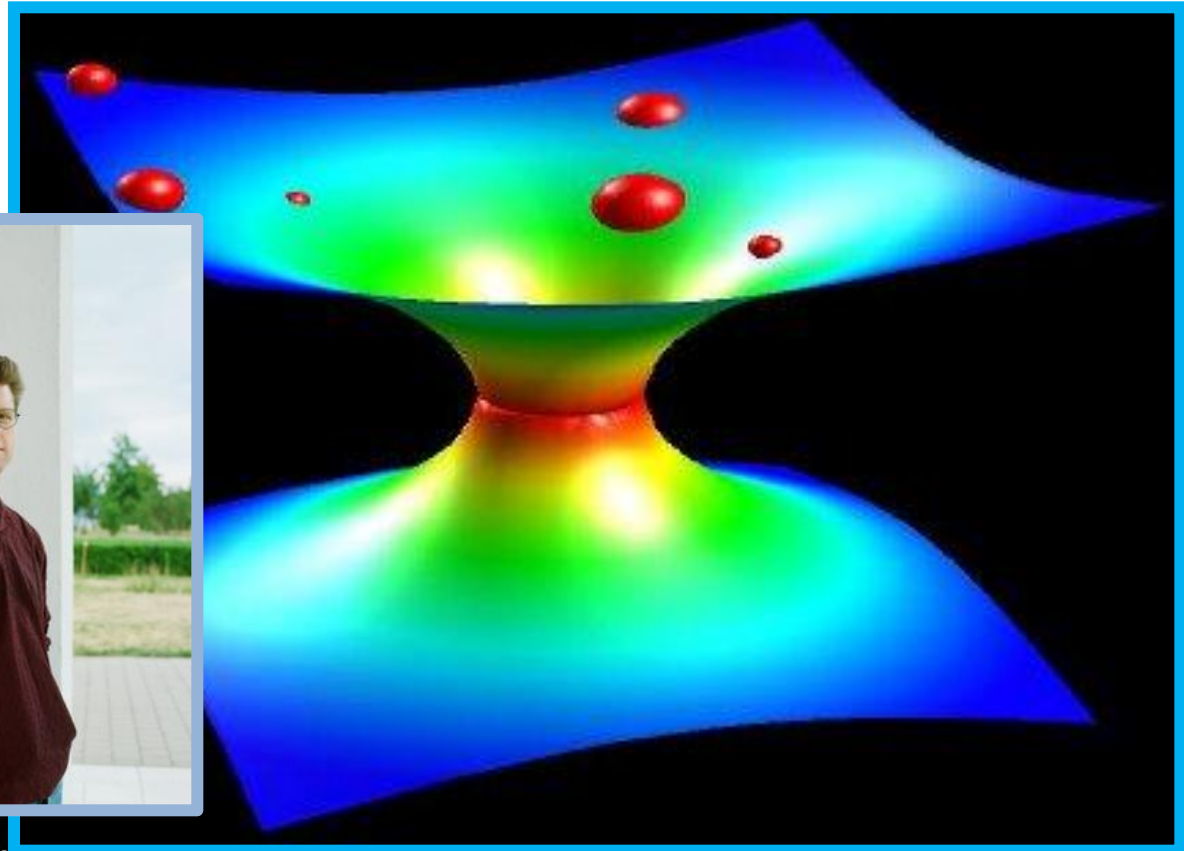
Spin-Schaum

Planck-Länge: 10^{-33} cm

Planck-Zeit: 10^{-45} sec



Was war vor dem „Big Bang“ ?



Martin Bojowald
– Pennsylvania State University –
studierte an der RWTH Aachen Physik
(Dr.-Vater: Prof. Hans Kastrup)

„Reise“ durch die Raum-Zeit des Spin Foam



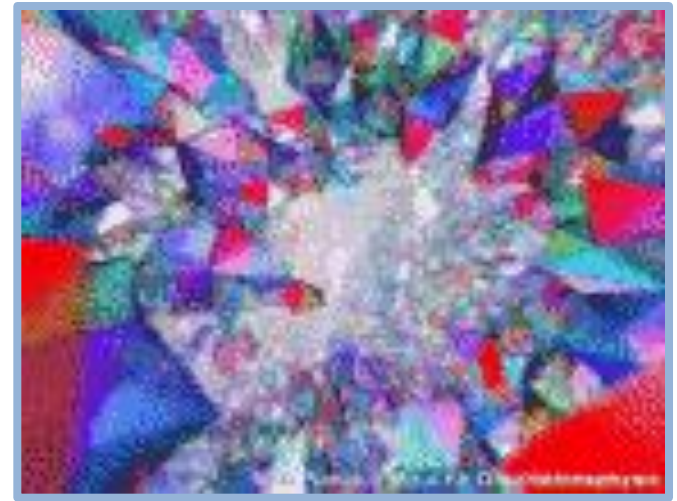
Schwierige Aufgabe:

Der experimentelle Nachweis der Gültigkeit von Aussagen der Schleifen-Quanten-Gravitation

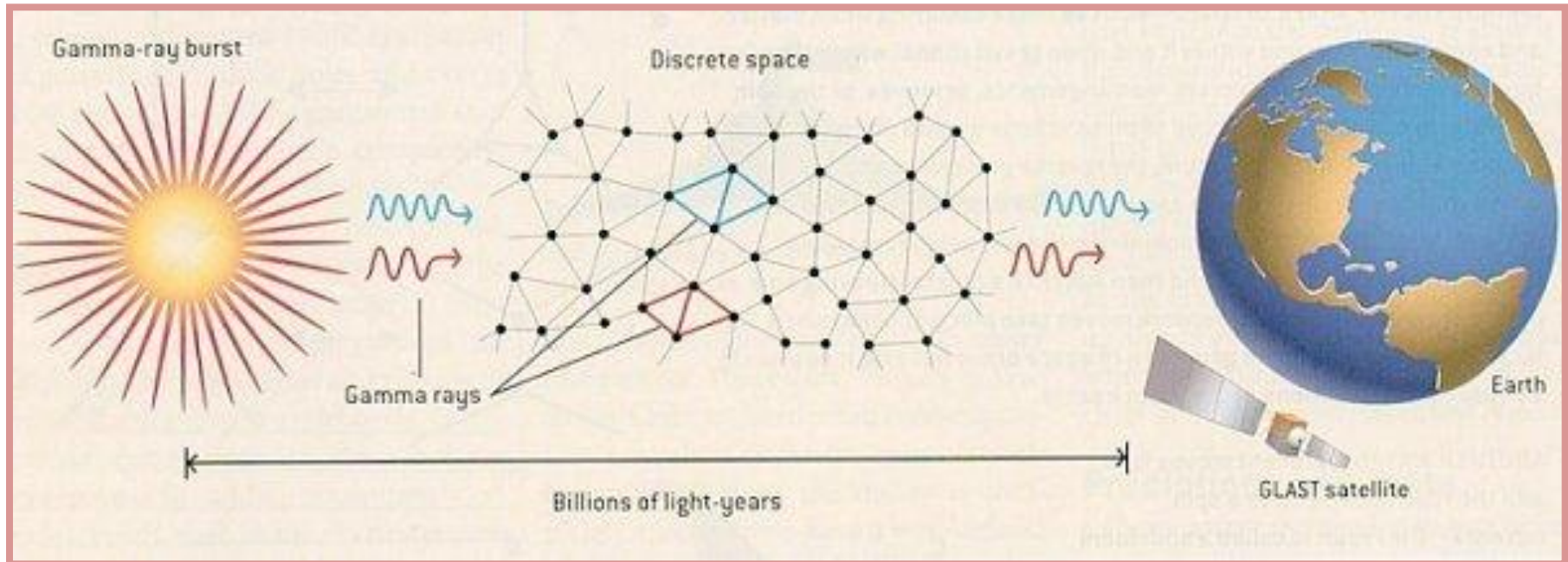
Eine technisch mögliche Option des Nachweises:

Die Wellenlängen-Abhängigkeit der Geschwindigkeit hochenergetischer Licht-Quanten führt zu messbaren Laufzeitunterschieden beim Milliarden Jahre langen Weg von Gamma-Strahlen durch die Schaum-Raum-Zeit.

„Reise“ durch die Raum-Zeit des Spin Foam



Potentieller experimenteller Nachweis





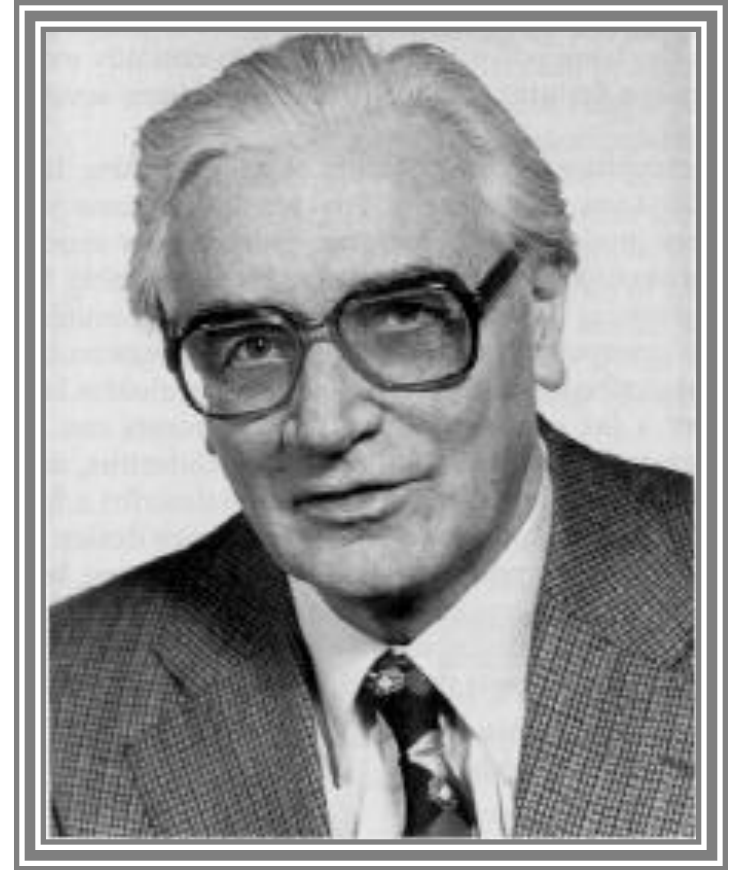
Spin-Schaum :

Ein gigantischer „Quanten-CA“ ?

Mark Twain (1835 – 1910)
(Samuel Langhorne Clemens)

**„The man with a new idea
is a crank —
until the idea succeeds.“**

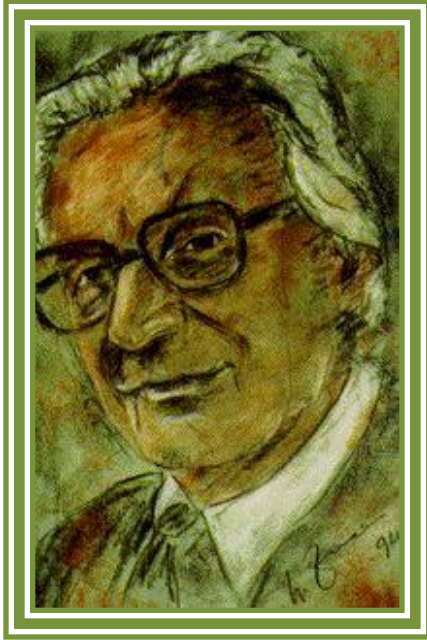
**Ein Erfinder ist ein Spinner,
bis er Erfolg hat.**



in: Following the Equator, Chapter XXXII

Anm.: Mark Twain wurde am 30. November 1835 wenige Tage nach
Erscheinen des Halley'schen Kometen geboren und starb auf den Tag
genau – wie erhofft – nach dessen Wiederkehr am 21. April 1910.

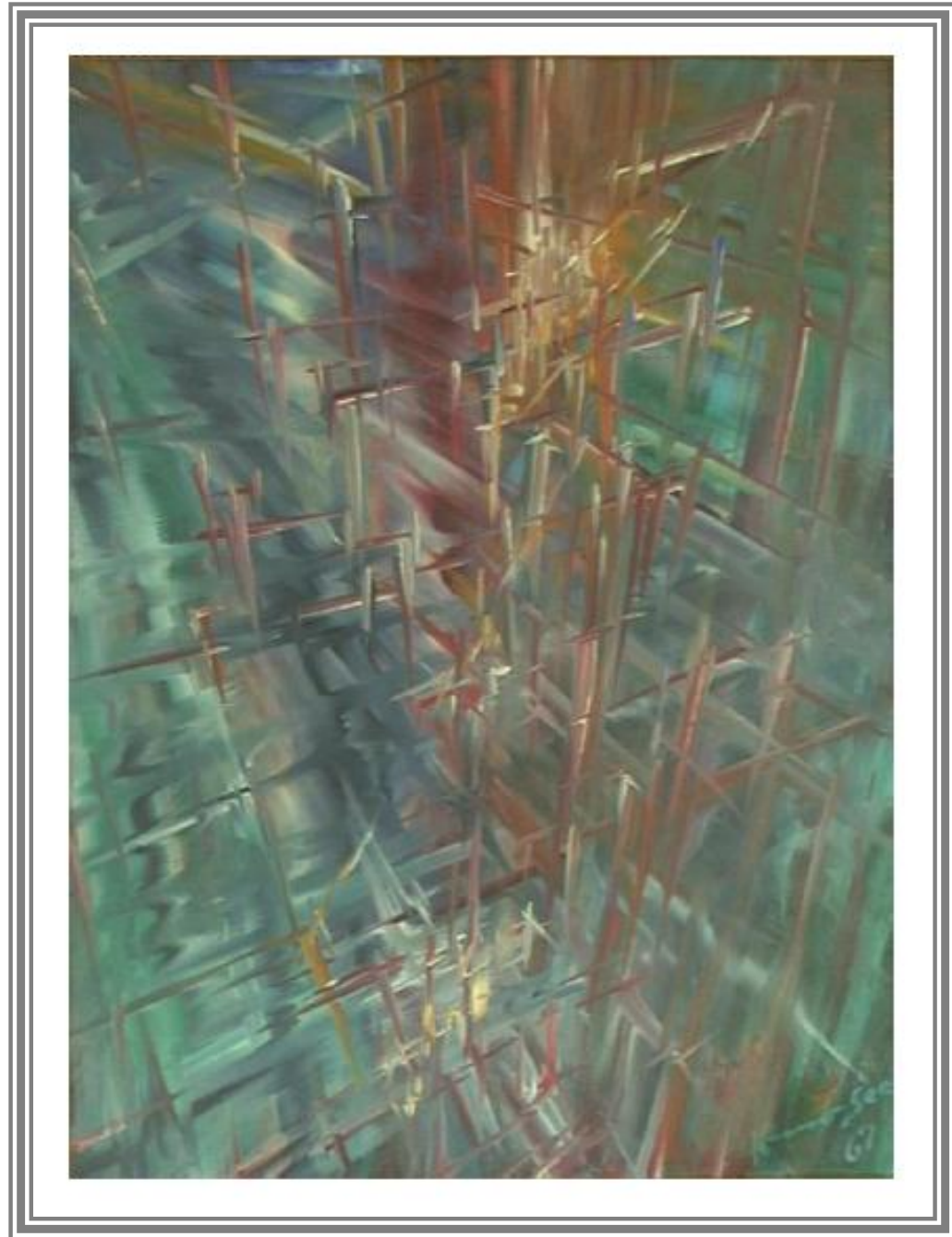
Selbstportrait



Konrad Zuses „Rechnender Raum“

Ölgemälde

© Horst Zuse



Literatur zu Cellular Automata & Quanten-Gravitation

- Konrad Zuse: Rechnender Raum, Elektronische Datenverarbeitung Bd. 8 (1967), S. 336 – Nachdruck: Spektrum der Wissenschaft - Spezial 3/07, S. 6-15; Rechnender Raum, Schriften zur Datenverarbeitung Bd. 1, Vieweg, 1969
- Martin Gerhardt; Heike Schuster: Das digitale Universum, Zelluläre Automaten als Modelle der Natur, Vieweg, 1995
- Stephen Wolfram: A New Kind of Science, Wolfram Media, 2002
- Thomas Leckelt: Verschlüsselung mit Zellulären Automaten, VDM Verlag, 2008
- Egon Zangerle: Zelluläre Automaten, VDM Verlag, 2010
- Lee Smolin: The Life of the Cosmos, Oxford Univ. Press, 1997
- Brian Greene: Das elegante Universum, Wissenschaftl. Buchgesellschaft, 2000
- Roger Penrose: The Road to Reality – A Complete Guide to the Laws of the Universe, Alfred A. Knopf, 2005
- Brian Greene: Der Stoff, aus dem der Kosmos ist, Pantheon, 2006
- Seth Lloyd: Programming the Universe, Vintage, 2007
- Lee Smolin: The Trouble with Physics, Houghton Mifflin, 2007
- Lisa Randell: Verborgene Universen, Fischer TB, 2008
- Alexander Unzicker: Vom Urknall zum Durchknall, Springer, 2010
- Rüdiger Vaas: Hawkings neues Universum, Piper, 2010
- Martin Bojowald: Zurück vor den Urknall, Fischer TB, 2010



f.hossfeld@fz-juelich.de