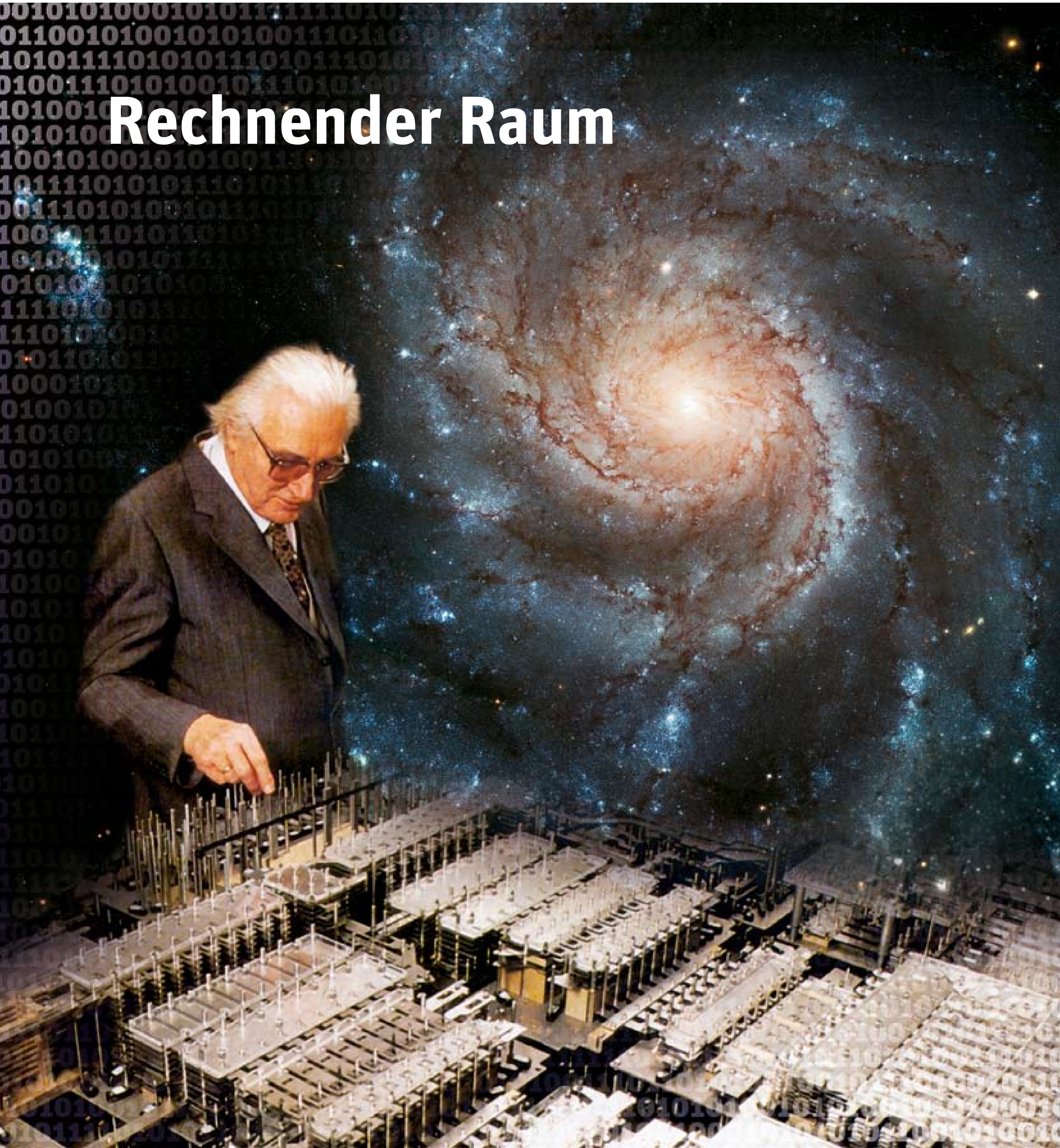
Rechnender Raum



Der mechanische Rechner Z1, den Konrad Zuse mit fast 80 Jahren aus dem Gedächtnis nachbaute, kann schwerlich als Modell für das rechnende Universum gelten. Aber Zuse gelang es, weit über die Fähigkeiten seines Geräts – und heutiger Supercomputer – hinauszudenken.

KOMPOSITION: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, CLAUS SCHÄFER; GALAXIE M 101: NASA / ESA, STSCI; ZUSE MIT Z1: MIT FRDL. GEN. DES DEUTSCHEN TECHNIKMUSEUMS BERLIN

Der Computerpionier Zuse unternahm schon vor 40 Jahren den Versuch, informations- und automatentheoretisches Denken auf physikalische Probleme anzuwenden. Er verfolgt hier den Gedanken einer Digitalisierung räumlicher Beziehungen, womit er die Idee der Quantisierung der physikalischen Größen weiter verallgemeinert.

Wegen seiner großen Bedeutung für das Thema des Hefts wird Zuses wegweisender Artikel von 1967 hier nachgedruckt. *Die Redaktion*

Von Konrad Zuse

Es ist uns heute selbstverständlich, daß numerische Rechenverfahren erfolgreich eingesetzt werden können, um physikalische Zusammenhänge zu durchleuchten. Insbesondere der Einsatz moderner Datenverarbeitungsanlagen hat die Anwendung numerischer Methoden enorm befruchtet. Bisher ist dabei stets davon ausgegangen worden, daß die Zielsetzung einer numerischen Lösung darin bestehen muß, das vom Physiker z. B. durch eine Differentialgleichung repräsentierte Modell durch ein numerisches Modell (nämlich der numerischen Lösung der Differentialgleichung) möglichst exakt anzunähern. Ein rückwirkender Einfluß der numerischen Lösungen auf die physikalische Theorie selbst besteht lediglich indirekt in der bevorzugten Anwendung solcher physikalischer Methoden, die der numerischen Lösung besonders leicht zugänglich sind.

Im folgenden seien jedoch einige Ideen entwickelt, die es berechtigt erscheinen lassen, die Frage nach einer direkten Einflußnahme neuer Ideen der Datenverarbeitung auf physikalische Probleme zu stellen. Die Schwierigkeit besteht selbstverständlich darin, daß verschiedene Wissensgebiete miteinander in Beziehung gebracht werden müssen. Bereits die heutige Physik selbst spaltet sich immer mehr in einzelne Spezialgebiete auf [1]. Allein die mathematischen Methoden der modernen Physik sind nicht einmal jedem Mathematiker geläufig und erfordern für ihr Verständnis ein jahrelanges Spezialstudium.

Aber auch die mit der Datenverarbeitung in Zusammenhang stehenden Theorien und Wissensgebiete spalten sich heute bereits in verschiedene Spezialzweige auf. Erwähnt seien die formale Logik, die Informationstheorie, die Automatentheorie und die Theorie der Formelsprachen. Der Gedanke, diese Gebiete, soweit sie betroffen sind, unter dem Namen »Kybernetik« zusammenzufassen, hat sich noch nicht durchsetzen können. Sehr fruchtbar ist jedoch unabhängig von den verschiedenen Definitionen des Begriffes im einzelnen die Auffassung der Kybernetik als Brücke zwischen den Wissenschaften [2].

Der Verfasser hat in diesem Sinne als Fachmann der Datenverarbeitung einige grundsätzliche Gedanken entwickelt, die er für wert hält, zur Diskussion gestellt zu werden. Einige dieser Gedanken mögen in der vorliegenden noch unreifen Form nicht ohne weiteres mit bewährten Vorstellungen der theoretischen Physik in Einklang zu bringen sein. Das Ziel ist erreicht, wenn überhaupt eine Diskussion zustande kommt und sich daraus Anregungen ergeben, die eines Tages zu Lösungen führen, die auch den Physikern akzeptabel erscheinen.

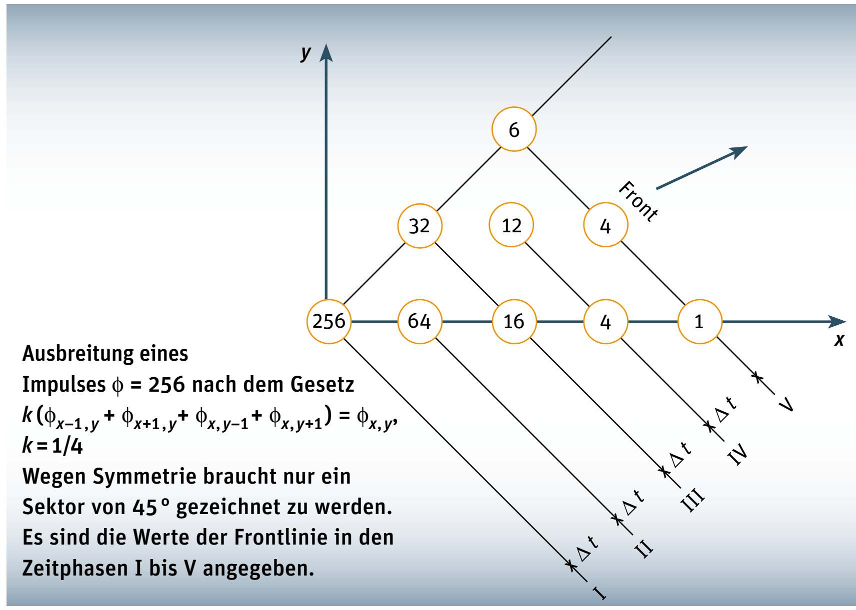
Im folgenden soll eine kurze Zusammenfassung dieser Gedanken gegeben werden, die in einer ausführlicheren Arbeit näher behandelt werden sollen.

Analoge, digitale und hybride Modelle

Vergleicht man die durch die mathematischen Ansätze repräsentierten Modelle der Physik und die zugehörigen numerischen Modelle miteinander, so ergibt sich ein charakteristischer Unterschied: Die physikalischen Modelle sind z. B. durch Differentialgleichungen in Dimensionen definiert, welche durch kontinuierliche Größen dargestellt werden, welche keinerlei Beschränkungen unterliegen. Hingegen arbeiten die numerischen Lösungen insbesondere bei ihrer Durchführung mit programmgesteuerten Rechenmaschinen mit Größen, die nur eine diskrete Zahl von Werten zulassen. Es gibt Grenzwerte in Form von Minimal- und Maximalwerten, und es liegt eine Stufung der Werte vor, die es nicht erlaubt, zwischen zwei gegebene Werte beliebig viele Zwischenwerte einzuschalten. Hinzu kommen weitere Beschränkungen dadurch, daß eine Differentialgleichung nur durch Differenzengleichungen angenähert werden kann, was sich z. B. in der endlichen Schrittweite bei Integrationen auswirkt. Wir können zwar durch Erhöhung der Stellenkapazität einer Rechenmaschine und durch Verkleinerung der Schrittweite derartige numerische Lösungen im Prinzip beliebig exakt an die gegebene Differentialgleichung annähern, jedoch ist dies praktischen Grenzen unterworfen. Die Automatentheorie lehrt dann auch, daß die praktisch benutzten programmgesteuerten Rechenmaschinen im allgemeinen unter die finiten Automaten fallen und somit nur eine endliche Zahl von Zuständen erlauben und also auch nur eine endliche Zahl von diskreten Lösungen für ein gegebenes Problem.

Diese diskreten Lösungen haben jedoch einen völlig anderen Charakter als diejenigen, die sich aus der Quantentheorie ergeben. Am bekanntesten ist die Beziehung zwischen Frequenz und Energie etwa eines Lichtquants, das der Formel $E = \hbar \cdot \omega$ unterliegt, wobei $\hbar$ eine universelle Naturkonstante ist. Man spricht hier zwar gern von der Quantisierung der Energie, jedoch können diese Quanten jeden beliebigen Wert annehmen, lediglich der Quotient E/ω ist durch einen diskreten Wert gekennzeichnet. Es ist dies etwas anderes, als wenn in einer digitalen Rechenmaschine die Energie aufgrund der begrenzten Stellenzahl nur eine diskrete Zahl von Werten annehmen kann.

Die Annahmen der Quantentheorie haben weitgehende Konsequenzen in bezug auf die Quantisierung verschiedener physikalischer Größen. Auch der Gedanke, daß die Feinstruktur des Raumes gewissen Beschränkungen unterliegt, ist eine Konsequenz der Quantentheorie. In diesem Sinne läßt sich auch die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation auffassen, welche die gleichzeitige Bestimmung von Impuls und Ort gewissen



Ausbreitung eines Impulses ϕ = 256 nach dem Gesetz $k(\phi_{x-1,y}+\phi_{x+1,y}+\phi_{x,y-1}+\phi_{x,y+1})=\phi_{x,y}$, $k=1/4$
Wegen Symmetrie braucht nur ein Sektor von 45° gezeichnet zu werden. Es sind die Werte der Frontlinie in den Zeitphasen I bis V angegeben.

Grenzen unterwirft. Neben leicht meßbaren elementaren Größen, wie dem kleinsten elektrischen Quantum (durch das Elektron repräsentiert), wird der Begriff der kleinsten Länge (ca. 10^{-13} cm) und der kleinsten Zeiteinheit bereits diskutiert. Die Vorstellung des klassischen Kontinuums wird zwar verlassen, jedoch nicht, indem anstelle des Kontinuums etwa ein Gitter diskreter Werte tritt, sondern indem man zu grundsätzlich anderen Ansätzen übergeht, wie etwa zum höherdimensionalen Konfigurationsraum, in dem Wahrscheinlichkeitsgrößen definiert sind. (Z. B. Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Partikels.) Auch bei dieser Vorstellung wird nicht von der Vorstellung des Kontinuums als solchem abgegangen, denn die Differentialgleichungen der Quantenmechanik sind in bezug auf die Feldgrößen selbst keinerlei Beschränkungen unterworfen.

In diesem Zusammenhang erscheint es nützlich, die bei Rechengeräten übliche Unterscheidung zwischen analogen, digitalen und hybriden Systemen zu betrachten. In einem analogen Gerät werden die Werte durch physikalische Größen wie Spannungen, Position von mechanischen Gliedern, Geschwindigkeiten usw. dargestellt, haben also im Prinzip einen kontinuierlichen Charakter. In bezug auf die digitalen Geräte wurde bereits festgestellt, daß diese nur diskrete, gestufte Werte zulassen. Die Beschränkung auf die Größenordnung (Minimal- und Maximalwerte) gilt zum Teil auch für analoge Geräte, zumindest für die Maximalwerte. Hybride Systeme stellen Kombinationen beider Systeme dar. Einmal können digitale und analoge Geräte miteinander kombiniert werden, wobei an den Schnittstellen Wandler für die verschiedenen Darstellungsarten erforderlich sind. Zum anderen können aber auch die Werte selbst in hybrider Form dargestellt werden, indem etwa die Dichte diskreter Impulse ein Maß für den zu repräsentierenden Wert ergibt.

Diese für technische Geräte sinvolle Unterscheidung läßt sich auch auf physikalische Modelle übertragen. Ist die Natur analog, digital oder hybrid? Beziehungsweise: Eignet sich zur Formulierung der physikalischen Gesetze besser ein analoges, ein digitales oder ein hybrides Modell?

Das Modell der klassischen Mechanik ist zweifellos analog. Die auftretenden Größen (Koordinaten, Massen, Kräfte) sind keinerlei Beschränkungen unterworfen. Auch die Relativitätstheorie arbeitet lediglich mit einer oberen Grenze der Geschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit), im übrigen aber mit kontinuierlichen Werten.

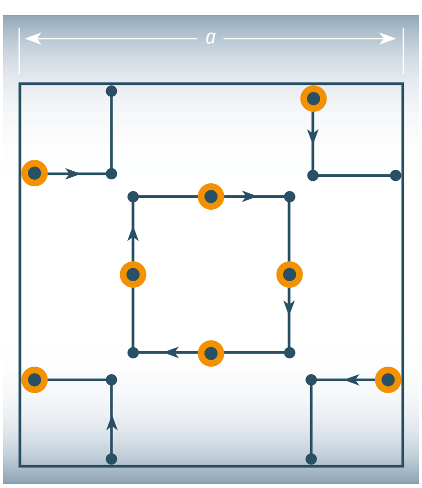
Durch die Einführung der Körnigkeit der Materie durch ihre Auflösung in Moleküle, Atome und Elementarteilchen erhalten einige Größen einen diskreten Charakter, wobei der analoge Charakter der gegenseitigen Beziehungen jedoch noch erhalten bleibt. Die Quantenmechanik unterwirft weitere Größen einer Quantelung, was darauf hinausläuft, daß gewisse Größen nur diskrete Werte annehmen können. Man könnte also mit einer gewissen Berechtigung von einem hybriden System sprechen.

Über voll digitale physikalische Modelle verfügen wir heute noch nicht. Bei völliger Unvoreingenommenheit erscheint die Frage berechtigt, ob beliebig unterteilbare, also echt kontinuierliche Größen in der Natur überhaupt denkbar sind. Was wären z. B. die Konsequenzen, wenn wir zur restlosen Quantelung der gesamten Naturgesetze übergehen würden und annehmen würden, daß grundsätzlich jede Größe irgendeiner Quantelung unterliegt?

Dieser Gedanke sei im folgenden etwas weiter verfolgt. Zunächst seien einige abstrakte Beispiele digitaler Modelle besprochen, die am Schreibtisch konstruiert sind. Sie haben nur sehr entfernte Ähnlichkeit mit physikalischen Vorgängen, sind jedoch geeignet, das Denken in digitalen Modellen anzuregen. Da es sich in diesem Artikel nur um eine kurze Zusammenfassung handelt, können zum Teil nur einige charakteristische Ergebnisse angeführt werden. In dem angekündigten Sonderheft soll dann ausführlich auf diese und andere Beispiele eingegangen werden.

Physikalische und rechnerische Entropie

Betrachten wir das klassische Modell der Thermodynamik, bei dem das Verhalten von Gasen durch im Raum frei bewegliche aufeinanderstoßende Gummibälle



ALLE GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: KONRAD ZUSE

Beispiel einer stabilen Ordnung von 8 in einem Quadrat mit zurückwerfenden Kanten frei beweglichen Bällen. Ein analoges Modell würde unendliche Genauigkeit erfordern. In einem digitalen Modell bleibt die Stabilität erhalten. Die Stabilität gilt jedoch nur für diskrete Seitenlängen des Quadrats.

dargestellt wird. Wegen der großen Teilchenzahl wird dieses Problem rechnerisch im allgemeinen statistisch behandelt. Stellt man sich jedoch die Aufgabe, das Modell direkt durch Nachrechnung der Flugbahnen der einzelnen Teilchen zu simulieren, so kommt man auf folgende Ergebnisse:

Bei beiden Modellen (dem physikalischen und dem rechnerischen) gehen im allgemeinen geordnete Zustände in ungeordenete über (Zunahme der Entropie). Allerdings lassen sich Ausnahmefälle konstruieren, bei denen bestimmte Ordnungen erhalten bleiben. Nehmen wir z. B. ein Gefäß mit genau parallelen Wänden an und eine Serie von Teilchen, deren Bahnen genau senkrecht auf einer dieser Ebenen stehen, wobei die Bahnen genügend weit auseinanderliegen, um gegenseitige Beeinflussung zu verhindern, so bleiben diese Bahnen im Sinne der klassischen Mechanik erhalten. Auch im Rechenmaschinenmodell ist dies der Fall, wenn das der Rechnung zugrundegelegte Koordinatensystem ebenfalls parallel bzw. orthogonal zu den Wänden gelegt wird. Sicher lassen sich auch noch interessante weitere Spezialfälle konstruieren, bei denen Stoßvorgänge zwischen den Teilchen stattfinden und trotzdem eine bestimmte Ordnung erhalten bleibt (Bild links unten).

Wir wissen nun, daß die moderne Physik dieses klassische Bild aufgelöst hat. Die Stoßvorgänge der einzelnen Teilchen werden im Sinne der modernen Physik nicht streng determiniert angenommen. Es gelten lediglich Wahrscheinlichkeitsgesetze, die im statistischen Durchschnitt den Gesetzen der klassischen Mechanik entsprechen. Durch diesen Effekt tritt eine Streuung ein, welche bewirkt, daß auch in theoretisch angenommenen Spezialfällen mit der Zeit eine Auflösung der Ordnung eintritt und die Entropie des Systems steigt.

Wie sieht in dieser Beziehung nun das rechnerische Modell aus? Solange wir diesen Streueffekt nicht besonders in unser Modell »einprogrammieren«, ist bei den oben erwähnten sorgfältig konstruierten Spezialfällen kein Streueffekt festzustellen. Sobald aber durch eine geringfügige Streuung das System in bezug auf die spezielle Ordnung außer Takt kommt, haben wir es mit ähnlichem Verhalten zu tun wie bei den Modellen der modernen Mechanik. Es ist im allgemeinen nicht erforderlich, einen Streueffekt besonders zu berücksichtigen; die mit der Rechnung verbundenen rechnerischen Ungenauigkeiten haben – von Sonderfällen abgesehen – dieselbe Wirkung. Das klassische Modell verlangt absolute Rechengenauigkeit, daher im rechnerischen Modell ein Rechnen mit unendlicher Stellenzahl. Da dies praktisch nicht durchführbar ist, treten bei den einzelnen Stoßvorgängen rechnerische Ungenauigkeiten auf, die bewirken, daß – ähnlich dem Modell der modernen Mechanik – Abweichungen der Bahnen von den Theorien der klassischen Mechanik auftreten. Man könnte auch diese Abweichungen durch ein statistisches Gesetz summarisch erfassen, jedoch besteht ein wesentlicher Unterschied: Im Modell der modernen Mechanik handelt es sich um echte Unbestimmtheit, bei dem rechnerischen Modell geht alles streng determiniert zu, nur nicht im Sinne der klassischen Mechanik, sondern im Sinne bestimmter rechnerischer Ansätze, die die klassische Mechanik nur annähern. Beides bewirkt die Zunahme der Entropie.

Fortpflanzung eines Impulses

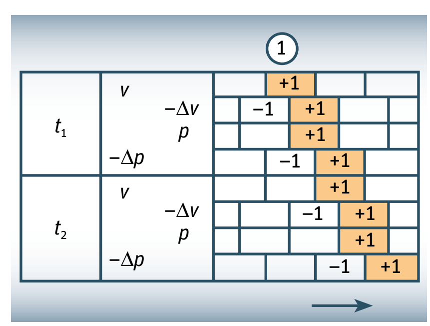
Als zweites Beispiel sei das Problem einer Quelle in einem zweidimensionalen Raum betrachtet. Das klassische Modell enthält keinerlei Beschränkungen in bezug auf die auftretenden Feldwerte und liefert somit eine rotationssymmetrische Ausbreitung mit stetig abnehmender Intensität. Ein digitales Modell muß notwendigerweise mit digitalen Koordinaten arbeiten. An sich bieten sich polare Koordinaten an, welche ebenfalls eine rotationssymmetrische Lösung ergeben. Jedoch erscheint die Wahl des Koordinationssystems mit der Quelle als Mittelpunkt zu sehr auf den speziellen Fall zugeschnitten.

Für die Untersuchung des Verhaltens mehrerer Quellen bietet sich ein kartesisches Koordinatensystem an. Dadurch sind neben der Stufung der Koordinaten zwei ausgesprochene Vorzugsrichtungen gegeben, die das Ausbreitungsbild beeinflussen.

Das Bild links oben zeigt ein einfaches Beispiel, bei dem in jedem Zeittakt der Wert eines jeden Gitterpunktes sich auf die 4 benachbarten verteilt. Wir haben eine nicht kreisförmige Ausbreitung des Impulses mit vorweglaufenden Spitzen in den Koordinatenachsen. Jedoch ist die Verteilung in der Frontlinie nicht gleichmäßig. Die vorweglaufenden Spitzen erreichen bald den unteren Grenzwert und sterben ab. Je größer das Verhältnis des Wertes im Quellpunkt zu diesem Gegenwert ist, desto später tritt dieser Effekt ein. Die Ausbreitung konvergiert dann gegen eine rotationssymmetrische Ausbreitung. Dies entspricht der an sich bekannten Tatsache, daß die physikalischen Modelle nur dann durch numerische Methoden gut angenähert werden können, wenn mit feiner Gitterstruktur und hoher Stellenzahl bzw. Genauigkeit gearbeitet wird.

Demgegenüber kann man die umgekehrte Frage stellen: Wie stark lassen sich die numerischen Ansätze vergröbern, so daß trotzdem noch etwas Sinnvolles herauskommt? Eine solche Untersuchung läßt sich im eindimensionalen Raum zunächst leichter behandeln.

Als Beispiel sei die Fortpflanzung eines Druckimpulses in einer Rohrleitung behandelt. Das Problem spielt z. B. eine große praktische Rolle bei der Untersuchung des Verhaltens von Erdölleitungen. Die verschiedenen physikalischen Modelle, die hier zugrundegelegt werden, laufen auf die Lösung von Differentialgleichungen hinaus. Zwecks numerischer Lösung dieser Differentialgleichungen kann man zu Differenzengleichungen übergehen. Schränkt man die möglichen Werte der auftretenden Variablen, z. B. Druck und Geschwindigkeit, noch durch grobe Digitalisierung ein, so kommt man schließlich zu einfachen



Fortpflanzung eines Impulses im eindimensionalen Raum. Wir haben die beiden Funktionswerte *v* und *p*, welche je die Werte +1, 0, −1 (Nullen werden der Einfachheit halber nicht geschrieben) annehmen können. Der lineare Raum ist dabei in einzelne Sektoren unterteilt. Es werden die Differenzwerte $-\Delta v$ und $-\Delta p$ gebildet. Aus diesen Werten werden in jedem Zeittakt neue Werte *v* und *p* errechnet nach der Formel:

$$v - \Delta p \rightarrow v$$
$$p - \Delta v \rightarrow p$$

Impulsen, welche im Extrem nur die Werte 0 und 1 annehmen können und sich mit konstanter Geschwindigkeit schrittweise fortpflanzen. Es entspricht dies der Fortpflanzung eines Impulses in einer Relaiskette. Das Bild auf S. 9 zeigt hierfür ein einfaches Beispiel.

Die Übertragung dieses Verfahrens der groben Digitalisierung auf mehrdimensionale Räume führt ebenfalls zu interessanten Ergebnissen. Jedoch ist es nicht so einfach, hier stabile Strukturen zu erhalten. Den einzelnen Impulsen in einer Rohrleitung entsprechen Wellenfronten im Raum. Bei grober Digitalisierung zeigt sich, daß bevorzugte Richtungen für die Fortpflanzung solcher Wellenfronten bestehen.

Interessant ist jedoch die Frage nach solchen Strukturen, die sich nicht im Raum als Wellenfront, sondern in Form von räumlich begrenzten Strukturen fortpflanzen, die in eine gewisse Analogie zu Elementarteilchen gesetzt werden können. Wir wollen solche Gebilde Digitalteilchen nennen.

Wir verfügen jedoch über kein einfaches physikalisches Modell, welches beispielsweise durch einen Satz von Differentialgleichungen die Fortpflanzung eines solchen stabilen Teilchens repräsentiert. Das Modell des Wellenpaketes führt zu instabilen Gebilden, welche zerfließen. Es sei daher zunächst davon abgesehen, solche Digitalteilchen in Anlehnung an physikalische Modelle zu entwickeln: sondern es sei eine reine Konstruktion auf dem Papier vorweggenommen.

Wir nehmen entsprechend dem Bild unten links ein orthogonales Gitternetz an und ordnen jedem Punkt Werte q_x, q_y zu. Der Einfachheit halber nehmen wir zunächst an, daß die q-Werte die Werte –, 0, + annehmen können. Wir können dann auch von q-Pfeilen oder kurz Pfeilen sprechen. Wir legen zunächst fest, daß ein isolierter Pfeil, d. h. ein solcher, der nicht zusammen mit einem senkrecht zu ihm verlaufenden Pfeil am gleichen Gitterpunkt auftritt, sich in seiner Richtung auf den nächsten Gitterpunkt überträgt. Sie können nur selbstverständlich nur orthogonal fortschalten.

Wir brauchen nun noch ein Gesetz für den Fall sich kreuzender Pfeile. Dies ist im Bild unten rechts demonstriert. Im Punkt A sind zur Zeitphase I zwei sich kreuzende Pfeile vorhanden. Nach unserem bisherigen Gesetz würden diese sich unabhängig in ihren Richtungen fortschalten. Wir legen nun fest, daß in diesem Fall die Pfeile zwar auch in ihren Richtungen nach den Punkten B und C fortgeschaltet werden, ihre Richtungen B und C aber vertauscht werden. Wir erhalten dann ein stabiles Teilchen mit der Periode $2\Delta t$, das sich diagonal fortschaltet.

Stoßprozesse für Digitalteilchen

Wir haben nun Teilchen, die sich in acht diskreten Richtungen in der Ebene fortschalten können. Es läßt sich eine Reihe interessanter Beispiele für die Begegnungen solcher Teilchen bilden. Wir bleiben dabei zunächst bei der Festlegung, daß Pfeile nur die Werte –, 0, + annehmen können. Am gleichen Gitterpunkt heben sich zwei entgegengesetzte Pfeile auf, und zwei gleichgerichtete wirken wie ein einzelner Pfeil. Das Bild ganz rechts oben zeigt ein Beispiel.

Es zeigt sich, daß der Verlauf der verschiedenen Begegnungen zeitphasen- und abstandsphasenabhängig ist. Die Teilchen können durch einander durchlaufen oder sich vernichten oder neue Teilchen bilden.

Bei der Begegnung kommt es sehr darauf an, ob der Schnittpunkt der Teilchenbahnen auf einem definierten diskreten Punkt des Koordinatensystems liegt. In diesem Fall findet eine Reaktion statt.

Wir können nun die Möglichkeiten dieses Systems erweitern, indem wir Pfeile verschiedener absoluter Länge zulassen. Für Pfeile gleicher Richtung setzen wir einfach das Additionsgesetz ein. Schwieriger wird es, das Gesetz vom Bild unten rechts auf sich kreuzende Pfeile verschiedener Länge auszudehnen. Wir treffen folgende Festlegung:

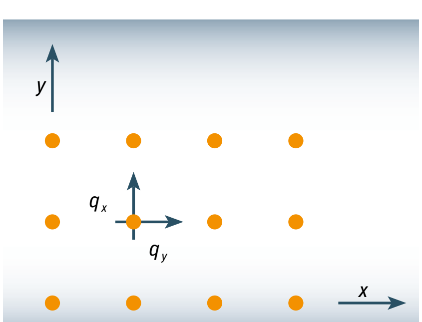
Bei orthogonal zueinander stehenden Pfeilen wird der längere in zwei Teile zerlegt, der Betrag des einen ist gleich dem Betrag des orthogonal dazu laufenden Pfeiles und wirkt mit diesem zusammen entsprechend dem Bild unten rechts. Der Rest wirkt wie ein isolierter Pfeil (Bild S. 12).

Wir können jetzt Teilchen verschiedener Fortpflanzungsrichtung konstruieren. Die Zahl der verschiedenen möglichen Richtungen hängt von der Zahl der möglichen Werte für die Beträge der Pfeile ab.

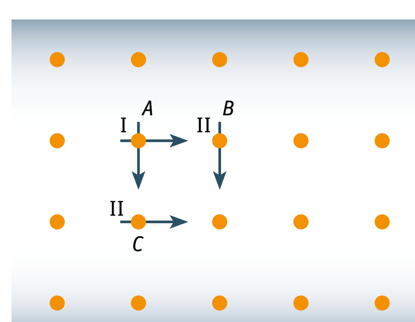
Das Bild auf S. 13 oben zeigt ein Beispiel mit dem Pfeilverhältnis 5 : 2. Die Bewegungsrichtung entspricht dem Pfeilverhältnis. Die Teilchen durchlaufen verschiedene Phasen. Das Teilchen dieses Bildes hat die Periode $7\Delta t$. Die Teilchen gehen pro Periode durch einen diskreten Koordinatenpunkt Q (Nullphasenpunkt). Zwischendurch »zerfließen« die Teilchen: Man kann Linien gleicher Phase (Phasenlinien τ_0 bis τ_6) konstruieren.

Das Bild auf S. 13 unten zeigt ein Beispiel für die Reaktion zweier Digitalteilchen A und B, welche sich zu einem Teilchen C vereinigen. Eine solche Reaktion findet jedoch nur bei bestimmten Phasenlagen statt. In dem gewählten Beispiel schneiden sich die idealisierten Teilchenbahnen zu gleicher Zeit in ihren Nullphasenpunkten. Man kann verschiedene Beispiele für solche Begegnungen konstruieren. Ohne Kenntnis der Feinstruktur des logischen Gesetzes, dem die Digitalteilchen gehorchen, sind nur Warhscheinlichkeitsaussagen über die Reaktion solcher Teilchen möglich.

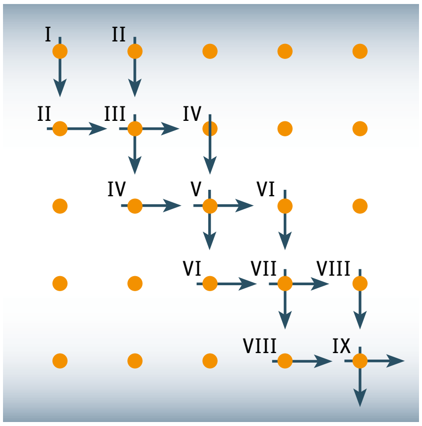
Die gezeigten Beispiele sind selbstverständlich noch weit davon entfernt, als

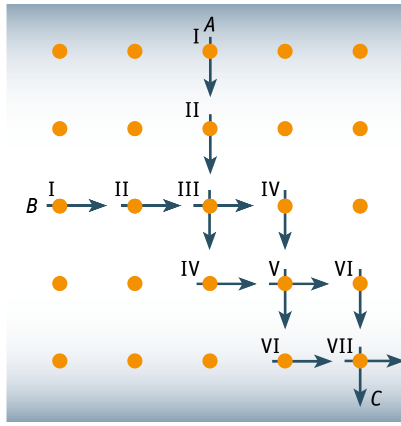


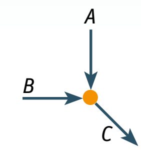
Links: Zweidimensionaler Digitalraum mit Werten q_x, q_y pro Punkt



Rechts: Schaltgesetz für zwei sich kreuzende Pfeile q_x, q_y entsprechend dem linken Bild. Punkt A Phase 1: kreuzende Pfeile; Punkte B, C Phase II: Die Richtungen der Pfeile werden vertauscht.







Zwei sich schneidende Teilchen *A*, *B* ergeben ein neues Teilchen *C*.

Diagonal laufendes Elementarteilchen entsprechend dem Gesetz vom rechten Bild auf S. 10.

Ausgangspunkt für die Formulierung physikalischer Gesetze zu dienen. Sie können jedoch ein rohes Bild von den Möglichkeiten geben, das Werkzeug der Automatentheorie auf physikalische Gesetze anzusetzen. An sich ist die Automatentheorie nicht auf digitale Gesetzesmäßigkeiten beschränkt; jedoch ist die Behandlung von Automaten mit nicht diskreten Zuständen recht schwierig, und die entsprechenden mathematischen Lösungen dürften sich nicht viel von den heute in der theoretischen Physik gebräuchlichen unterscheiden. Jedenfalls scheint die Automatentheorie das richtige Werkzeug zu sein, wenn man die Frage nach der restlosen Quantisierung aller physikalischer Größen stellt.

Die Digitalisierung bedeutet dabei, daß man mit Variablen arbeitet, die je nur eine begrenzte Zahl von Werten annehmen können. Diese können im Extremfall Ja-Nein-Werte (Bits) sein; jedoch sind auch mehrwertige Variable mit entprechender mehrwertiger Logik verwendbar. Eine besondere Rolle spielt vielleicht die dreiwertige Logik, da mit den Werten +1, 0, –1 besonders günstig gearbeitet werden kann. Eine sehr wesentliche Frage ist die, ob eine Digitalisierung zwangsläufig mit einer Gitterstruktur des Raumes verknüpft ist. Diese hat weitgehende Konsequenzen, die nicht ohne weiteres im Einklang mit den heutigen Vorstellungen der Physik stehen, z. B. der Isotropie des Raumes. Die Benutzung eines räumlichen und zeitlichen Gitters ist zunächst zweifelsohne die bequemste Lösung für eine Digitalisierung. Allerdings stehen außer dem durch kartesische Koordinaten gegebenen Gitter auch andere Möglichkeiten zur Verfügung, z. B. kann man die dichteste Kugelpackung wählen.

In allen diesen Fällen haben wir es mit Automatentypen zu tun, die unter dem Namen »zellulare Automaten« in der Literatur bereits behandelt worden sind [3]. Es handelt sich dabei um die Aufteilung eines im Prinzip unbegrenzten mehrdimensionalen Feldes in periodisch sich wiederholende Zellen. Jede Zelle kann für sich als isolierter Automat aufgefaßt werden. Er steht mit den Nachbarzellen durch Austausch von Information in Verbindung. Die Eingangsvariablen stellen die von den Nachbarzellen übertragenen Werte dar, während die Ergebniswerte gleich den an die Nachbarzellen abgegebenen Werten sind. Da der zellulare Automat nur einen begrenzten Umfang hat, hat er auch nur eine begrenzte Zahl von Zuständen.

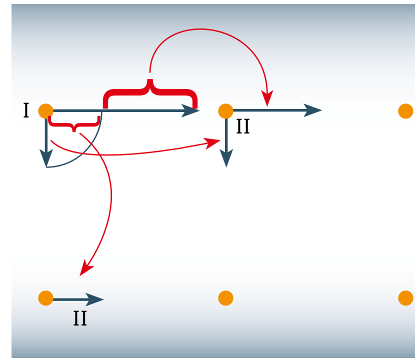
Zellulare Automaten

Die Größe einer solchen Zelle muß dabei so gewählt werden, daß das Verhalten des Gesamtsystems durch die Beschreibung des Verhaltens einer einzelnen Zelle vollständig erklärt ist. Bei den besprochenen Beispielen besteht die Zelle aus einem einzelnen Gitterpunkt, der in unmittelbaren Beziehungen zu den Nachbarpunkten steht. Für die Darstellung komplizierter Gesetze kann man sich in jedem Gitterpunkt ein kleines Rechengerät vorstellen. Es ist leicht einzusehen, daß die Fülle der Möglichkeiten hier außerordentlich groß ist.

Schwierig ist es, solche Zellen zu konstruieren, die einerseits ein Ausbreiten von Feldern, andererseits die Existenz beweglicher Schaltungsmuster (Digitalteilchen) zulassen. Dabei ist zu beachten, daß die Natur mit einer außerordentlichen Feinheit sowohl in der Raumstruktur als auch in der Größenordnung der Variablen arbeitet. Die Feinstruktur eines solchen Gitters wird sicher noch wesentlich feiner als die von den Physikern heute angenommene kleinste Länge von 10^{-13} cm gewählt werden müssen; denn die Größe 10^{-13} cm liegt ja in der Größenordnung der Ausdehnung der Atomkerne bzw. deren einzelner Partikel. Die elektrostatische Wechselwirkung steht zur Wechselwirkung infolge Gravitation im Verhältnis von etwa 10^{40} : 1. Damit ist es auch klar, daß einfache Modelle zellularer Automaten nicht ausreichen können, um zu brauchbaren Ergebnissen zu gelangen.

Digitalteilchen kann man auch als sich selbst reproduzierende Systeme auffassen. Man kann von einem »Normalzustand« des Gitters der zellularen Automaten ausgehen, der durch ein bestimmtes Muster gestartet wird. Dieses Muster ist wandlungsfähig und besteht zeitlich gesehen aus einer Folge von Zuständen, die sich periodisch wiederholen. Die Wiederholung ist dabei jedoch nicht örtlich gebunden, sondern das Muster kann wandern und sich so gewissermaßen in einem Nachbargebiet wieder selbst reproduzieren.

Dieses Fortschaltgesetz für Störungen des Normalzustandes genügt jedoch noch nicht. Bei Annahme von Feldwerten muß die Ausbreitung dieser Felder selbst und das Zusammenspiel der Digitalfelder mit den Digitalteilchen durch das Schaltungsgesetz zellularer Automaten gegeben sein. Dabei müssen die einzelnen Vektoren, z. B. diejenigen der Maxwellschen Gleichungen, durch Digitalwerte innerhalb der zellularen Automaten repräsentiert werden. Dies bedingt, daß diese nicht nur gestuft sind, sondern auch Minimal- und Maximalwerte aufweisen. Das bedeutet, daß Feldgrößen im digi-



Läßt man Pfeile verschiedener diskreter Längenwerte zu, muß ein neues Gesetz formuliert werden: Isolierte Pfeile schalten sich in ihrer Richtung fort bei gleichbleibender Länge. Gleiche oder entgegengesetzt gerichtete addieren bzw. subtrahieren sich. Bei orthogonalen Pfeilen wird der längere in zwei Teile zerlegt: Der eine ist gleich dem zugeordneten orthogonalen Pfeil und wirkt mit diesem zusammen entsprechend dem rechten Bild auf S. 10. Der Rest wirkt wie ein isolierter Pfeil.

talen Modell weder beliebig klein noch beliebig groß sein können.

Wie bereits erwähnt, stellt ein räumlich und zeitlich periodisches Gitter zunächst nur die mathematisch am einfachsten zu behandelnde Lösung dar. Abweichungen hiervon bedeuten Modulationen der Gesetze, die auf gewisse Inhomogenitäten hinauslaufen. Es gibt z. B. die Theorie der wachsenden Automaten. Ferner kann mit Wahrscheinlichkeitswerten gearbeitet werden. Dieses Problem dürfte einer gründlichen Untersuchung von berufener Stelle wert sein.

Ein nicht isotroper durch Gitterstruktur repräsentierter Raum hat selbstverständlich Vorzugsrichtungen in bezug auf die Ausbreitung von Strahlen. Dies widerspricht zunächst unseren Erfahrungen. Es ist bis jetzt kein Experiment bekannt, das auf eine solche Richtungsdifferenzierung schließen läßt. Allerdings ist auch noch nicht systematisch danach gesucht worden. Im Bereich der normalen Optik dürfte eine solche Suche wohl auch vergeblich sein. Selbst bei Röntgenstrahlen sind die Wellenlängen noch sehr lang gegenüber der elementaren Länge von 10^{-13} cm.

Wenn überhaupt, können solche Effekte wohl nur bei außerordentlich energiereichen Teilchen beobachtet werden. Nun beginnt unsere heutige Experimentalphysik aber gerade erst, dieses Gebiet zu erschließen. Nur ein Physiker kann eine Antwort auf die Frage geben, ob derartige Experimente erfolgversprechend sein könnten. Wenn z. B. die Richtungsdifferenzierung selbst bei energiereichen Teilchen noch feiner ist als die Auflösung beispielsweise von Nebelkammeraufnahmen, so kann sie nicht entdeckt werden. Außerdem wäre wegen der Erddrehung eine zeitliche Sortierung und Ordnung der Aufnahmen erforderlich.

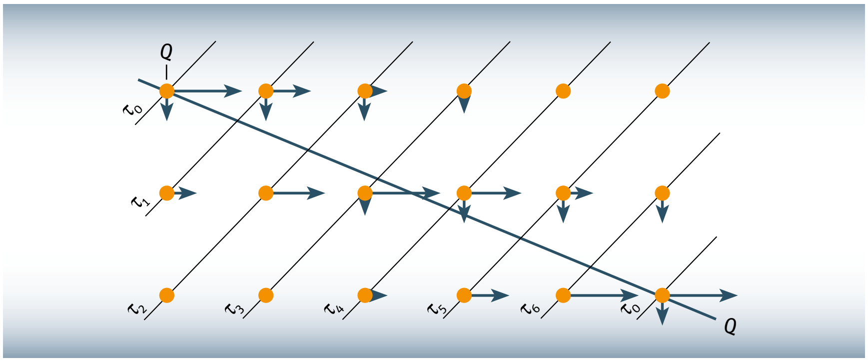
Kommunikation zwischen Zellen

Die Frage der Isotropie des Raumes erfordert selbstverständlich auch eine Auseinandersetzung mit der Relativitätstheorie. Die für die spezielle Relativitätstheorie wesentlichen Lorentztransformationen lassen sich selbstverständlich auch durch numerische Ansätze beliebig annähern. Allerdings wird es schwer sein, das Modell der Relativitätstheorie in der konsequenten Form digital zu simulieren. Unsere physikalische Erfahrung sagt zunächst, daß kein ausgezeichnetes Koordinatensystem nachweisbar ist und daß wir in unseren Berechnungen berechtigt sind, jedes Koordinatensystem als gleichberechtigt dem anderen gegenüber anzunehmen, wobei die Lorentztransformationen die Beziehungen zwischen diesen Inertialsystemen formulieren. Die strenge Auslegung der Relativitätstheorie zieht aber den Schluß, daß es auch tatsächlich kein ausgezeichnetes Koordinatensystem gibt und es zwecklos ist, durch Experimente danach zu suchen. Bei der Auffassung des Kosmos als zellularen Automaten kommt man jedoch an der Annahme von ausgezeichneten Bezugssystemen wohl kaum vorbei. Man kann allerdings die Strukturen von zellularen Automaten so konstruieren, daß es mehrere, aber endlich viele ausgezeichnete Koordinatensysteme gibt. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen wäre durch die digitale Simulierung der Lorentztransformationen und die damit zusammenhängenden Verkürzungen von Körpern darstellbar.

Allerdings muß sich in einem solchen Modell eine Beziehung zwischen der Lichtgeschwindigkeit und der Übertragungsgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Zellen des zellularen Automaten ergeben. Diese müssen nicht notwendigerweise identisch sein. Im Gegenteil ist anzunehmen, daß die Übertragungsgeschwindigkeit von Zelle zu Zelle höher sein muß als die erst durch diese Übertragung zustandekommenden Signalfortpflanzungen. Diese höhere Geschwindigkeit hat jedoch nur lokale Bedeutung. Sie ist aufgrund der Anisotropie des rechnenden Raumes auch verschieden in verschiedenen Richtungen. Allerdings ergibt das »digitale« Modell im Vergleich zum »analogen« Modell der Relativitätstheorie einen wesentlichen Unterschied: Je mehr sich die relative Geschwindigkeit eines Inertialsystems im Verhältnis zum Bezugssystem der Lichtgeschwindigkeit nähert, desto kritischer wird die digitale Simulation der Vorgänge. Bei energiereichen Teilchen müßte es zu Vorgängen kommen, die man gewissermaßen als ein »sich Verrechnen« des rechnenden Raumes bezeichnen kann. Dadurch könnte grundsätzlich anderes Verhalten von Teilchen sehr hoher Energie (höhere Geschwindigkeit bzw. höhere Frequenz) erklärt werden.

Information als physikalische Größe

Durch diese verschiedenen Betrachtungen erhält der Begriff der Information eine wesentliche Bedeutung. Die Informationstheorie hat den Begriff des »Informationsgehaltes« in bezug auf Nachrichtenübertragungssysteme klar formuliert. Man neigt daher dazu, die Informationstheorie für die Theorie der Information und vielleicht auch Informationsverarbeitung überhaupt zu halten. Das trifft jedoch nicht zu. Die leichtfertige Übertragung der Begriffe der Informationstheorie auf Nachbargebiete der Nachrichtenübertragung führt leider oft zu Unklarheiten. Auch bei der vorliegenden Betrachtung müssen wir uns klar werden, was unter Informationsgehalt usw. verstanden werden soll. Bei den rein physikalischen Prozessen kann man schlecht von Nachrichtenübertragung sprechen. Dies wäre an sich nur interessant, sobald wir den Menschen in die Betrachtung einbeziehen. Bei Annahme einer unendlich feinen Ausbreitung unserer beispielsweise durch elektromagnetische Wellen ausgesandten Nachrichten müßten diese ewig erhalten bleiben, sofern dem nicht die zeitliche Endlichkeit des Weltalls Grenzen setzt. Im übertragenen Sinne kann man dann auch davon sprechen, daß die Strahlen, die aus dem Weltall von anderen Sternen zu uns kommen, für den Menschen Nachrichten bedeuten, wodurch die Frage nach dem Informationsgehalt dieser

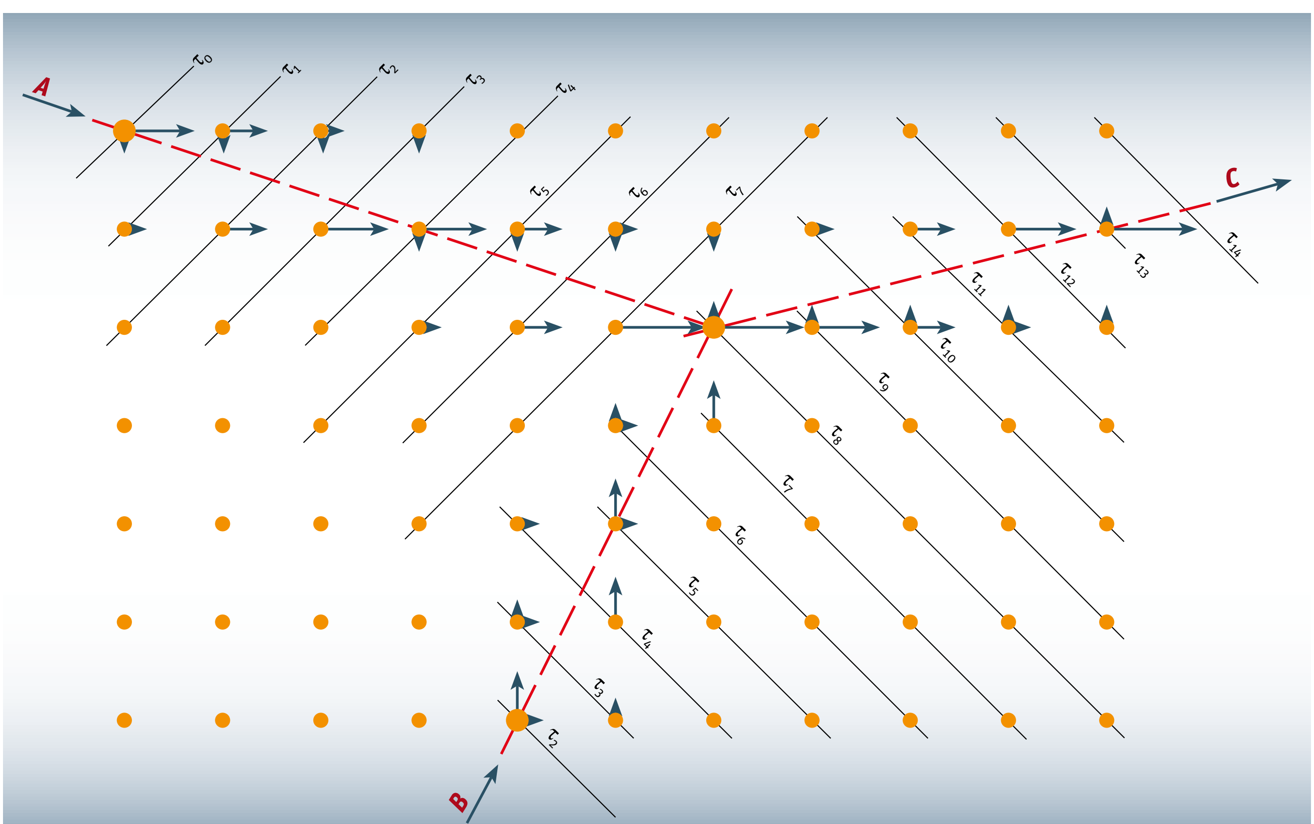


Fortpflanzung eines Teilchens entsprechend dem im Bild links dargestellten Gesetz. Pfeilverhältnis 5 : 2. Die Bewegungsrichtung entspricht dem Pfeilverhältnis. Das Teilchen hat die Periode $7\Delta\tau$ und durchläuft periodisch sieben Phasen. Die Teilchenbahn geht nur einmal pro Periode durch einen definierten diskreten Punkt des Koordinatensystems (Nullphasenpunkt *Q*). Zwischendurch »zerfließt« das Teilchen. Man kann Linien gleicher Phase τ_0 bis τ_6 konstruieren (Phasenlinien).

Nachrichten sinnvoll wird. Sieht man von dieser Bedeutung der Information als Mittel der Nachrichtenübertragung ab, so kann man trotzdem auch bei nicht belebten Systemen von einem Informationsgehalt sprechen, wenn man die Variationsbreite der möglichen Gestaltungen eines Gegenstandes, Musters oder dergleichen betrachtet. So kann ein Schlüssel aufgrund seiner Variabilität einen bestimmten Informationsgehalt, in Bit gemessen, enthalten. In diesem Sinne kann man den oben besprochenen Digitalteilchen einen Informationsgehalt zuordnen, der der Zahl der möglichen Variationen dieser Teilchen entspricht. Bei den in den Bildern auf dieser Doppelseite gezeigten Digitalteilchen hängt dieser Informationsgehalt von der maximalen Pfeilgröße (als ganze positive bzw. negative Zahl) ab.

Der Gedanke, daß die Information bei physikalischen Betrachtungen eine wichtige Rolle übernehmen kann, ist schon verschiedentlich ausgesprochen worden [2]. Die von Zemanek geäußerte Auffassung, daß die beiden elementaren Dimensionen naturwissenschaftlicher Betrachtungsweise, nämlich Stoff und Energie, um die Elementardimension Information erweitert werden können, kann man allerdings etwas abwandeln: Eine gründliche Bearbeitung des Problems wird wohl eher zu dem Ergebnis führen, daß die bisher verwandten Elementardimensionen mit Hilfe der Begriffe, die mit der Information in Zusammenhang stehen, erklärt werden müßten. Informationsgehalt ist nur einer dieser Begriffe. Hinzu kommen elementare Informationsverarbeitungsprozesse und Begriffe der Schaltalgebra, wie Schaltglied, Schaltvorgang, Schaltzeit und dergleichen. Auch die Erhaltungssätze der Physik könnten dann in entsprechenden Begriffen der Informationstheorie und Automatentheorie ihren Ausdruck finden. Am nächstliegenden ist die Frage, ob wir von einer Erhaltung der Information im Kosmos sprechen können. Faßt man den Kosmos im Sinne des rechnenden Raumes als große Rechenmaschine auf, die von außen nicht beeinflußbar ist, so

Zwei Digitalteilchen *A* und *B* vereinigen sich zu einem Teilchen *C*.



Klassische Physik	Quantenphysik	Rechnender Raum
Punktmechanik	Wellenmechanik	Automatentheorie
Korpuskel	Welle – Korpuskel	Schaltzustand, Digitalteilchen
analog	hybrid	digital
Analysis	Differentialgleichungen	Boole'sche Algebra
alle Größen kontinuierlich	einige Größen gequantelt	Alle Größen nehmen nur diskrete Werte an
keine Grenzwerte	außer Lichtgeschwindigkeit keine Grenzwerte	Minimal- und Maximalwerte sämtlicher Größen
unendlich genau	Unbestimmheitsrelation	begrenzte Rechengenauigkeit
Kausalität in beiden Zeitrichtungen	nur statistische Kausalität; Auflösung in Wahrscheinlichkeit	Kausalität nur in positiver Zeitrichtung. Einführung von Wahrscheinlichkeitstermen möglich, aber nicht nötig
	Klassische Mechanik wird statistisch angenähert	Wahrscheinlichkeitsgesetze der Quantenphysik durch determinierte Raumstruktur erklärbar
	Urformel	Urschaltung

Gegenüberstellung: Quantenphysik und Theorie vom rechnenden Raum

gilt im Sinne der Informationstheorie, daß die Information dieses Systems nicht vermehrt werden kann. Das gilt auch für Systeme, in denen die Entropie im physikalischen Sinne zunnimmt, selbst wenn die Informationstheorie lehrt, daß der Informationsgehalt eines Nachrichtensystems mit seiner Entropie steigt.

Bei digitaler Auffassung des Kosmos ist notwendigerweise der Informationsgehalt in einem abgeschlossenen Raumbereich begrenzt, was einige Konsequenzen nach sich zieht. Ebenso ist der Informationsgehalt eines Digitalteilchens begrenzt. Allerdings zeigt ein Blick auf die Natur, daß dieser sehr hoch sein muß. Betrachten wir ein Photon, so muß die Richtung seiner Fortpflanzung und die Wellenlänge in dieser Information ihren Ausdruck finden. Beide Größen müßten jedoch bei digitaler Auffassung so fein gestuft sein, daß eine solche Stufung bisher durch keinerlei Experiment entdeckt werden konnte.

Schwieriger wird die Frage nach dem Informationsgehalt von Teilchen, wenn man die Beeinflussung durch Felder betrachtet. Die Beschleunigung eines Teilchens erfolgt dann aufgrund einer Informationsverarbeitung. Ebenso ist die Frage nach der Informationsbilanz bei der Reaktion zwischen Teilchen interessant.

Determination und Kausalität

Mit informations- und automatentheoretischen Betrachtungen in engem Zusammenhang steht die Frage der Determination und Kausalität. Die Automatentheorie arbeitet mit dem Begriff des Zustandes eines Automaten. Finite Automaten können eine begrenzte Anzahl von Zuständen einnehmen. Liegt kein Eingangssignal vor, so ergibt sich aufgrund des dem Automaten zugrundeliegenden Algorithmus aus dem gegebenen Zustand der folgende. Das Gesetz eines Automaten kann daher durch eine Zustandstabelle dargestellt werden. Da die Automatentheorie mit abstrakten Begriffen arbeitet, erfolgt dieser Übergang von einem Zustand in den anderen in der Theorie ohne Zwischenstufen. Dabei fragt die Automatentheorie nicht danach, wie bei einem technisch tatsächlich ausgeführten Automaten ein solcher Übergang erfolgt. Es interessiert lediglich, daß z. B. ein Flip-Flop innerhalb einer gewissen Zeit, der Taktzeit, von einem stabilen Zustand in den anderen übergeht. Daß man diesen Vorgang des Umschlagens selbstverständlich technologisch analysieren kann, liegt außerhalb der Betrachtungsweise der Automatentheorie, solange diese sich nicht ausdrücklich bemüht, solche Einzelheiten mit zu erfassen.

Von Physikern wird mitunter die Ansicht vertreten, daß der stufenlose Übergang eines Atoms von einem stabilen Zustand in den anderen mit dem Kausalgesetz schlecht in Einklang zu bringen ist; z. B. Arthur March »Die physikalische Erkenntnis und ihre Grenzen«, Seite 19 [4]. Er versteht dort den Begriff der Kausalität so, daß der Übergang von einem abgeschlossenen System zum nächsten ein kontinuierliches Geschehen voraussetzt. Diese Auffassung wird einer automatentheoretischen Betrachtung physikalischer Prozesse kaum standhalten können. Es ist auch nicht anzunehmen, daß sie wirklich begründet werden kann. Das Denken in ganzen Zahlen und diskreten Zuständen erfordert ein Denken in unstetigen Übergängen, bei denen das Kausalgesetz durch Algorithmen formuliert ist. Das Arbeiten mit diskreten Zuständen und Quantisierungen als solches bedingt nicht notwendigerweise einen Verzicht auf eine kausale Betrachtungsweise.

Wichtig ist die Frage, ob die Determination in beiden Zeitrichtungen gilt. Das klassische Modell der Mechanik erfüllt diese Forderung nach zeitlicher Symmetrie bekanntlich in idealer Weise. Die statistische Quantenmechanik führt den Begriff der Wahrscheinlichkeit ein und sieht in der Zunahme der Entropie ein Abweichen von der zeitlichen Symmetrie. Finite Automaten folgen im allgemeinen nur den in positiver Zeitrichtung determinierten Gesetzen. Der Algorithmus setzt nur fest, welcher folgende Zustand sich aus dem gegebenen ergibt, nicht umgekehrt. Es lassen sich zwar Automaten konstruieren, bei denen auch der vorhergehende Zustand durch den folgenden bestimmt ist, was jedoch nicht notwendigerweise Symmetrie der Gesetze in zeitlicher Richtung bedeutet.

Ein Blick auf Rechenmaschinen möge dies veranschaulichen. Eine Rechenmaschine ist – einwandfreies Arbeiten vorausgestzt – in positiver Zeitrichtung determiniert. Im allgemeinen sind Rechenvorgänge nicht umkehrbar, was sich schon daraus ergibt, daß die logischen Grundoperationen, welche die elementaren Bausteine aller höheren Rechenoperationen darstellen, nicht umkehrbar sind (z. B. $a \vee b \Rightarrow c$). Ein Zählwerk stellt ein Beispiel einer Rechenmaschine dar, welche im Effekt in beiden Richtungen determiniert ist, da es in der einen Zeitrichtung vorwärts und in der anderen rückwärts zählt, sofern man nur die Zustandstabelle betrachtet und die Vorgänge im einzelnen nicht analysiert.

Will man das Modell der klassischen Mechanik durch Rechengeräte symbolisieren, so sind die Möglichkeiten durch den begrenzten Informationsgehalt der Geräte beschränkt. Das Modell der klassischen Mechanik setzt auch einen unendlichen Informationsgehalt nicht nur des Kosmos im Ganzen, sondern auch beliebig kleine Raumteile voraus. Dieser Umstand scheint bisher nicht genügend in Betracht gezogen worden zu sein.

Die in den Beispielen angeführten Digitalteilchen unterliegen, isoliert betrachtet, einem zeitlich symmetrischen Gesetz. Ein sich geradlinig fortschaltendes Teilchen kann in beiden Zeitrichtungen determiniert verfolgt werden. Bei Reaktionen von Teilchen untereinander liegt nur Determination in positiver Zeitrichtung vor. Es wird sicher schwierig sein, ein Gesetz für Digitalteilchen zu finden, das in beiden Zeitrichtungen determinierte Beziehungen festlegt. Kritisch ist dabei die Frage der Auslösung der Aufspaltung eines Teilchens in zwei neue Teilchen, welche der Umkehrung der Vereinigung zweier Teilchen entspricht.

Die Frage der zeitlichen Symmetrie der physikalischen Gesetze wird neuerdings vielfach in Zusammenhang mit den Spiegelungseigenschaften des Raumes diskutiert. Eine automatentheoretische Betrachtungsweise könnte diese Diskussion vielleicht wesentlich befruchten.

Bildlich wäre der rechnende Raum als Relaiskosmos deutbar, wobei wir uns allerdings von irgendwelchen konkreten Vorstellungen bezüglich der Relaistechnik selbst völlig frei machen müssen. Auch müßten die bereits angedeuteten Möglichkeiten wachsender bzw. variabler Automaten mit in Betracht gezogen werden.

Wenn auch die vorhergehenden Betrachtungen noch nicht zu handgreiflichen Lösungen führen, so dürfte doch gezeigt sein, daß der vorgeschlagene Weg einige neue Perspektiven eröffnet, welche wert sind, weiterverfolgt zu werden. Die Einbeziehung von Begriffen der Informations- und Automatentheorie in physikalische Betrachtungen wird umso dringlicher werden, je mehr mit ganzen Zahlen, diskreten Zuständen und dergleichen gearbeitet wird. Angesichts der Konsequenzen sind natürlich verschiedene Verhaltensweisen möglich. Man kann sagen, die Idee des rechnenden Raumes stehe im Widerspruch zu einigen heute anerkannten Sätzen der Physik (z. B. Isotropie des Raumes), infolgedessen könne es ihn nicht geben. Diese Auffassung wird heute vielfach von Physikern vertreten, ohne daß man sich wohl über die Konsequenzen ernsthaft Gedanken gemacht hat. Man kann aber auch den Versuch machen, die Gesetze des rechnenden Raumes so zu modulieren, daß diese Widersprüche verschwinden. Schließlich kann man auch die durch die Idee des rechnenden Raumes in Frage gestellten Vorstellungen kritisch betrachten und ihre Gültigkeit nach neuen Gesichtspunkten untersuchen.

In der Tabelle links oben ist eine Gegenüberstellung der möglichen Auffassungen versucht.

Es sei noch betont, daß die bisherigen Untersuchungen des Verfassers rein auf dem Papier durchgeführt worden sind. Weitere Untersuchungen müßten unter Zuhilfenahme moderner Rechengeräte vorgenommen werden. ◁

Anhang

Die Idee des Gitterraumes wurde in letzter Zeit in mehreren Aufsätzen durch Fritz Bopp behandelt [5]. Diese Arbeiten und die Arbeit des Verfassers erfolgen völlig unabhängig voneinander. Bopp geht als Physiker von anderen Vorstellungen aus und wendet eine etwas andere Betrachtungsweise an. Es ist jedoch zu hoffen, daß eine gegenseitige Befruchtung der beiden Standpunkte (des physikalischen und des automatentheoretischen) zu wertvollen Erkenntnissen führt. Für den physikalischen Laien ist es allerdings schwer verständlich, warum dem fiktiven Gravitationsradius ($6{,}7 \times 10^{-58}$ cm) eine solche Bedeutung beigelegt wird. Ein derartig feines Gitter würde bedeuten, daß im Raum von der Größenordnung der Elementarlänge von 10^{-13} Zentimeter noch einmal ein ganzer Kosmos untergebracht werden könnte, was vom automatentheoretischen Standpunkt wenig plausibel erscheint.

Autor und Literaturhinweise

Konrad Zuse, geboren 1910 in Berlin, entwickelte in den 1930er Jahren den ersten programmgesteuerten Universalrechner. Er gilt als Erfinder des Computers. Nach dem Zweiten Weltkrieg gründete er die Zuse KG, die mehrere Computer auf den Markt brachte, bis sie 1967 von Siemens aufgekauft wurde. Mit seiner Idee vom »rechnenden Raum« schuf er die Grundlagen der Theorie der zellularen Automaten. Unter dem Pseudonym »Kuno See« schuf er etliche Gemälde, darunter das oben abgebildete Selbstporträt. Zuse starb 1995 in Hünfeld (Hessen).

Dieser Artikel ist ursprünglich erschienen in: Elektronische Datenverarbeitung, Bd. 8, S. 336, 1967. Abdruck mit freundlicher Genehmigung

[1] Die Einheit der Physik. Von Carl Friedrich von Weizsäcker. Physiker-Tagung 1966, Plenarvorträge I. Teubner, Stuttgart

[2] Die Kybernetik als interfakultative Formelwissenschaft. Von Heinz Zemanek. Physiker-Tagung 1966, Plenarvorträge I. Teubner, Stuttgart

[3] Theory of Self-Reproducing Automata. Von John von Neumann. University of Illinois Press

[4] Die physikalische Erkenntnis und ihre Grenzen. Von Arthur March. Vieweg, Braunschweig

[5] a) Diracgleichung im Gitterraum als Beispiel einer aus Elementarprozessen folgenden Theorie; b) Quasirelativistische Urfermionen; c) Der Wechselwirkungsoperator im Gitterraum. Von Fritz Bopp in: Zeitschrift für Physik, Bd. 200, Nr. 2, S. 117 (a), 133 (b), 142 (c)

Weitere Literaturhinweise:

Konrad Zuses Rechenmaschinen: sechzig Jahre Computergeschichte. Von Raúl Rojas in: Spektrum der Wissenschaft 5/1997, S. 54

Wege und Irrwege des Konrad Zuse: Von Jürgen Alex in: Spektrum der Wissenschaft 1/1997, S. 78

Der Computer – Mein Lebenswerk. Von Konrad Zuse. 3. Auflage, Springer, Berlin 1993

Ansätze einer Theorie des Netzautomaten. Von Konrad Zuse. Nova acta Leopoldina, Bd. 43, Nr. 220, 1975

Rechnender Raum. Von Konrad Zuse. Vieweg, Braunschweig 1969

Alles über Konrad Zuses Werk. Zusammengetragen von Horst Zuse unter www.zuse.de