

Zelle und Computer

Claudia Borchard-Tuch

Wir leben im Zeitalter der Information und glauben, dass wir mit dem Computer etwas völlig Neues geschaffen haben. Doch seit Millionen von Jahren bildet die Natur vielschichtige Systeme, welche Informationen verarbeiten können. So können nahezu alle Lebensvorgänge vom Stoffwechsel bis zur Vererbung als Informationsprozesse angesehen werden, deren Wurzeln bis auf die Ebene der biologischen Makromoleküle zurückreichen. Für die Kommunikation zwischen Lebewesen sind nicht einmal Sinnesorgane, ein Gehirn oder ein Nervensystem notwendig. Auch Zellen verfügen über feinfühligere Strukturen, welche Informationen verarbeiten und weitergeben können. Worin ähneln und worin unterscheiden sich die Informationssysteme einer Zelle und eines Computers? Auf diese Frage soll hier eine Antwort gefunden werden. Hierbei wird deutlich, dass es zurzeit noch nicht möglich ist, eine andere Frage zu beantworten, die in letzter Zeit des Öfteren gestellt wurde – ob wir einmal einen Computer kreieren können, der so gut ist wie die Natur selbst.

Die natürliche Zelle

Lebendige Umwelt

Äußerlich sieht jeder Einzeller von *Chlamydomonas* wie der andere aus: ein charakteristischer roter Augenfleck, ein großer, becherförmiger Chloroplast für die Fotosynthese und zwei Geißeln, mit denen die einzelligen Algen wie Brustschwimmer durch das Wasser rudern. Doch der äußere Eindruck täuscht. Neben den »normalen«, vegetativen Zellen, die sich durch Zellteilung vermehren, gibt es nämlich auch solche, die sich sexuell fortpflanzen. Unterscheiden lassen sich beide Zellarten nur durch ihr Paarungsverhalten, wenn jeweils zwei

Zellen gegensätzlichen Paarungstyps ihre Geißeln aneinander legen und anschließend zur befruchteten Eizelle verschmelzen. Was aber steuert die Umwandlung der vegetativen Zellen in solche Keimzellen? Es ist blaues Licht: Bereits in den Achtzigerjahren fand Christoph Beck von der Universität Freiburg heraus, dass der Switch von vegetativer zu sexueller Vermehrung lichtinduziert ist.

Das Verhalten des Darmbakteriums *Escherichia coli* wird dagegen nicht durch Licht, sondern durch Eiweißmangel verändert. Proteinmangel führt bei diesem Einzeller zu einer höheren Produktion von Flagellin – dem Baustein der Bakteriengeißel. Das Bakterium fängt an, sich schneller zu bewegen und nach Nahrung zu suchen.

Auch bei Traubenzuckermangel weiß sich das Bakterium zu helfen, da es über eine besondere Fähigkeit verfügt: Es kann Lactose als einzige Energiequelle nutzen. Hierbei hilft ihm ein Enzym, das Lactose in Glucose (Traubenzucker) und Galactose zerlegt – die β -Galactosidase. Dieses Enzym wird nur dann in größeren Mengen hergestellt, wenn dies erforderlich ist, d. h., wenn die Zellen auf einem Nährmedium heranwachsen, das keine Glucose, sondern Lactose enthält. Geregelt wird das Ganze über ein Gen: So ist das Gen für die β -Galactosidase (*lacZ*) ein »induzierbares Gen«, das nur bei Glucosemangel zur Synthese der β -Galactosidase führt.

Die Beispiele zeigen: Es sind mannigfaltige äußere Einflüsse wie Licht, chemische Substanzen, Temperatur oder Wassergehalt, die physiologische und generell biochemische Informationsprozesse eines Einzellers in Gang setzen. Hierbei nehmen die Umweltreize zum einen Einfluss auf die genetisch gesteuerte Herstellung wichtiger Enzyme (d. h. die Genexpression). Zum anderen verändern die äußeren Stimuli auch den Aufbau von bereits produzierten Genprodukten, etwa Enzymen oder Gerüsteiweißen. Je nach Zelltyp werden diese Genprodukte in vielfältiger Weise chemisch verändert – beispielsweise acetyliert, amidiert, glykosyliert, methyliert oder phosphoryliert.

Offensichtlich ist die zelluläre Informationsübertragung ein biochemischer Vorgang: Moleküle übersetzen Reize aus der Umwelt in Stoffwechselveränderungen, Verhaltensweisen und extrazelluläre Reize. Eine einzelne Zelle beherbergt ein kompliziertes chemisches Netzwerk, in dem Signale durch direkten Kontakt zwischen Molekülen übertragen werden. Hierbei ist – anders als in einem Computer – jede Einheit mit jeder anderen verbunden.

Zellen tauschen Informationen aus

Zellen können einander Nachrichten zuschicken. Hierbei schütten die Zellen Substanzen aus, die als chemische Boten wirken. Zumeist docken diese Botenstoffe an bestimmten Rezeptoren an: Die Boten wirken wie Schlüssel, die ausschließlich in das Schloss ihrer Zielzellen hineinpassen.

Dieses Schlüssel-Schloss-Prinzip ist sehr wichtig für eine sichere Übertragung der Botenstoff-Information an den richtigen Empfänger. Da ein Botenstoff, der sich in der äußeren Umgebung befindet, jede Stelle der Zelloberfläche erreichen kann, sollte er über eine hohe Unterscheidungsfähigkeit verfügen: Er muss genauestens erkennen, welche Zellstruktur seine Botschaft empfangen darf und welche nicht.

Indem ein Rezeptor einen Botenstoff bindet, erkennt er ein Signal. Zum anderen leitet er Signale weiter bzw. verarbeitet sie und löst damit Effekte aus. So führt die Stimulierung des Enzyms Adenylatcyclase (eines Enzyms der »ersten Stufe«) zur Spaltung von ATP zu cyclischem AMP (cAMP).

cAMP wiederum wandelt Enzyme der zweiten Stufe, die man als Kinasen bezeichnet, aus unwirksamen Formen in wirksame um. Die aktivierten Kinasen übertragen Phosphatgruppen auf Enzyme der dritten Stufe. Dieser Vorgang der Phosphorylierung ist eine in allen Zellen benutzte Methode, um den chemischen Zustand von Molekülen zu ändern. Phosphorylierte Enzyme sind enzymatisch aktiv, d. h., sie wirken wie Katalysatoren, die eine chemische Reaktion in Gang bringen und beschleunigen können. Die aktivierten Enzyme bringen so die Veränderungen hervor, die der äußere Reiz auslösen soll.

Diese cAMP-Kaskade ist nicht nur für den Informationsaustausch zwischen Zellen von Bedeutung – sie dient auch dazu, sich an eine unwirtliche Umgebung anpassen zu können. So führt ein Mangel an Eiweiß bei vielen Bakterien zu einem Konzentrationsanstieg von cAMP, und phosphorylierte Enzyme helfen nicht nur dem *Escherichia-coli*-Bakterium, ausreichend Nahrung zu bekommen: Die Enzyme verändern auch die Drehrichtung der Geißel und damit die Schwimmrichtung von anderen Bakterien. Sie bewegen sich dorthin, wo sie mehr und bessere Nahrung finden, und entfernen sich aus Gebieten, wo sie Hunger leiden und wo Gefahren drohen. Da die Signalübertragung vom Rezeptor bis zur Geißel nicht länger als eine

Zehntelsekunde dauert, ist die Reaktion der Bakterien ausreichend schnell.

Ebenso wie der Botenstoff den zu ihm passenden Rezeptor findet, ist auch eine einzelne rezeptortragende Zellstruktur fähig, zwischen den verschiedenen Botenstoffen, die sie zu binden vermag, zu unterscheiden. Je nach Art des Botenstoffs nimmt sie eine bestimmte Information auf und richtet ihr Verhalten danach aus. Kontraktilität, Sekretion und Zellteilung werden so beeinflusst, Genexpression und Immunabwehr ermöglicht.

Moleküle für die Kommunikation

Bei Stress reagieren wir, wie es in Situationen des Kampfes oder der Flucht seit Millionen von Jahren notwendig gewesen ist: Unser Herz schlägt schneller und der Blutdruck steigt. Das Blut strömt in die Muskeln; die Lungen erweitern sich zur vermehrten Sauerstoffaufnahme; die Muskeln werden vorgespannt, um plötzliche und rasche Bewegungen zu gestalten, und die Leber gibt Glucose und Fett ins Blut ab. Bewusst wird uns von alledem hauptsächlich, dass wir uns ärgern oder ängstigen.

Dabei laufen in unserem Inneren höchst komplexe Informationsprozesse ab: Die Nebenniere schüttet das Hormon Adrenalin aus und über eine Stimulierung zahlreicher Rezeptoren in verschiedenen Organen kommt es zu einer Reihe intrazellulärer Folgereaktionen. Innerhalb von Sekunden nach der Adrenalinausschüttung finden im Körper zahlreiche Veränderungen statt, die ihn zu höheren Leistungen befähigen und seine Energiereserven mobilisieren.

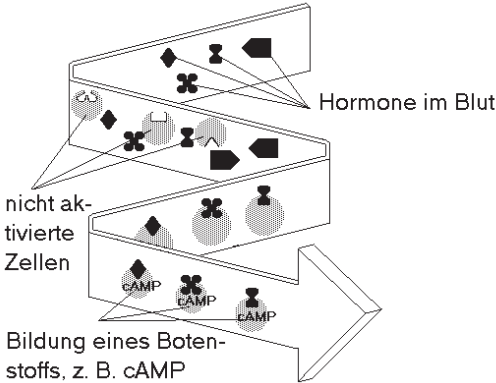
Dies alles ist möglich, weil mehrzellige Organismen über weitaus komplexere Einrichtungen für Kontaktaufnahme und Informationsaustausch verfügen als Einzeller: Höhere mehrzellige Organismen sind mit einem Hormon- und einem Nervensystem ausgestattet, in dem sich die Zellen mithilfe so genannter Kommunikationsmoleküle, d. h. mithilfe von Hormonen oder Transmittern, verständigen. So können vielfältige Aufgaben auf zahlreiche Zellen, Gewebe und Organe verteilt sein, die weit voneinander entfernt liegen.

Eine Nervenzelle sendet einzelne Signale an eine jeweils passende Gruppe von Zielzellen: Muskelzellen, Drüsenzellen oder andere Nervenzellen. Sie übermittelt ihre Botschaft, indem sie einen Transmitter von speziellen Stellen aus, den Synapsen, zur Zielzelle schickt.

Im Vergleich zu Neurotransmittern wirken Hormone gewöhnlich weniger direkt. Zwar gibt es die so genannten exokrinen Drüsen, die ihr Sekret über ein Gangsystem abgeben und damit direkt ihren Wirkort erreichen, der zumeist eine Oberfläche ist. Doch findet die häufigste Form der hormonellen Kommunikation im endokrinen, also innersekretorischen, System statt: Endokrine Drüsen haben keinen Ausführungsgang, sie geben ihre Hormone in die Blutbahn ab. Diese Hormone werden über den Blutweg transportiert und erreichen so die Organe, an denen sie ihre Wirkungen entfalten. Zu den wichtigsten endokrinen Drüsen zählen die Hirnanhangsdrüse an der Unterseite des Gehirns, die Schilddrüse und die Nebenschilddrüsen, die Bauchspeicheldrüse und die Nebennieren.

Ihre physiologischen Wirkungen entfalten Nerven- und Hormonsystem in ähnlicher Weise: Beide lassen ihre Kommunikationsmoleküle in Kontakt mit spezifischen Rezeptoren einer Zielzelle treten, wodurch eine cAMP-Kaskade ausgelöst werden kann.

Auf diese Weise ist gewährleistet, dass die durch das Hormon oder den Transmitter zu übermittelnde Information die richtigen Empfängerzellen erreicht – eine außerordentlich wichtige Funktion: Da alle mit dem Blut zirkulierenden Hormone zu jedem Körperorgan gelangen, muss ein Hormon erkennen, welche Organzellen es beeinflussen soll und welche nicht.



Jedes Hormon wirkt spezifisch nur auf Zellen eines bestimmten Zielgewebes. Das Hormon passt zu seiner Bestimmungszelle wie ein Schlüssel zu einem

Schloss. Gehen Hormon und Zielzelle eine Verbindung ein, so kann sich cAMP bilden (modifiziert nach Benner).

Die durch Hormone und Neurotransmitter hervorgerufenen Wirkungen in mehrzelligen Lebewesen entsprechen den durch Umweltreize verursachten in einzelligen Organismen. Aber Umweltreize spielen auch in mehrzelligen Organismen eine wichtige Rolle: Indem die Umweltreize Transmitter und Hormone kontrollieren, greifen sie in die intrazellulären informationsverarbeitenden Systeme ein. Da die meisten Zellen mehrere Arten von Kommunikationsmolekülen synthetisieren, verfügen sie über ein enormes Potenzial an Signalkombinationen. Auf diese Weise bildet ein Spektrum aus Transmittern und Hormonen die Wirklichkeit ab; Erfahrungen werden in Form einzigartiger Kombinationen von molekularen Symbolen verschlüsselt.

Hormon- und Transmitterwirkungen infolge von Umweltreizen, die nur Sekunden bis Minuten einwirken, sind oft noch tagelang nachweisbar. So zirkuliert das Adrenalin nach einem hektischen Tag in erhöhter Konzentration in unserem Körper und hält ihn im Zustand höchster Alarmbereitschaft – obwohl es Zeit zum Schlafen ist. Der Stress lässt uns auch dann nicht zur Ruhe kommen, wenn er längst vorüber ist.

Das Beispiel zeigt, dass (auch unerwünschte) Hormonwirkungen gespeichert werden und zur Gedächtnisbildung beitragen. Schaffen sich einzelne Zellen ein Erinnerungsvermögen durch biochemische Veränderung oder Abwandlung der Struktur, so speichern Zellsysteme ihr Wissen in den Verbindungen ihrer Zellen, d. h. als Verknüpfungsmuster. Auf diese Weise wird die Information eingebettet in ein Netz von Assoziationen. Jedoch besitzen Zellsysteme auch noch andere Gedächtnisformen: So unterscheidet das Immunsystem zwischen körpereigenem und körperfremden und genetisches Wissen ist in den Erbanlagen gespeichert.

Der Automat

Offenbar ist die Zelle ein höchst komplexes Gebilde. Indem wir eine Modellvorstellung von ihr entwickeln, nehmen wir ihr ihre Komplexität und ahmen die Informationsverarbeitung natürlicher Zellsysteme in vereinfachter Weise nach. Es entsteht ein Abbild der Wirklichkeit, ein Ding, das uns auch im alltäglichen Leben häufig begegnet und das nach eigenen Gesetzen selbstständig wirkt – ein so genannter endlicher Automat. Die Reduktion eröffnet zum einen die

Möglichkeit, Zellstrukturen mithilfe von Computern zu simulieren. Zum anderen lassen sich durch endliche Automaten all die Elemente nachbilden, die die Grundlagen heutiger Digitalrechner sind.

Endliche Automaten

Überall begegnen uns in unserem täglichen Leben endliche Automaten. Kaffeeautomat, Schreibmaschine, Musikinstrument, Taschenrechner – sie alle sind Beispiele. Ihnen ist gemeinsam, dass sie auf einige Signale und Eingaben der Umwelt in bestimmter Weise reagieren.

Umweltsignale können z. B. dadurch erzeugt werden, dass Tasten gedrückt werden wie bei Schreibmaschine, Taschenrechner oder Klavier, Münzen eingeworfen werden wie bei Fahrkarten- und Spielautomat oder Zeichen eingelesen werden, die evtl. zuvor auf einem Speichermedium wie etwa Magnetplatten oder Bändern gespeichert worden sind.

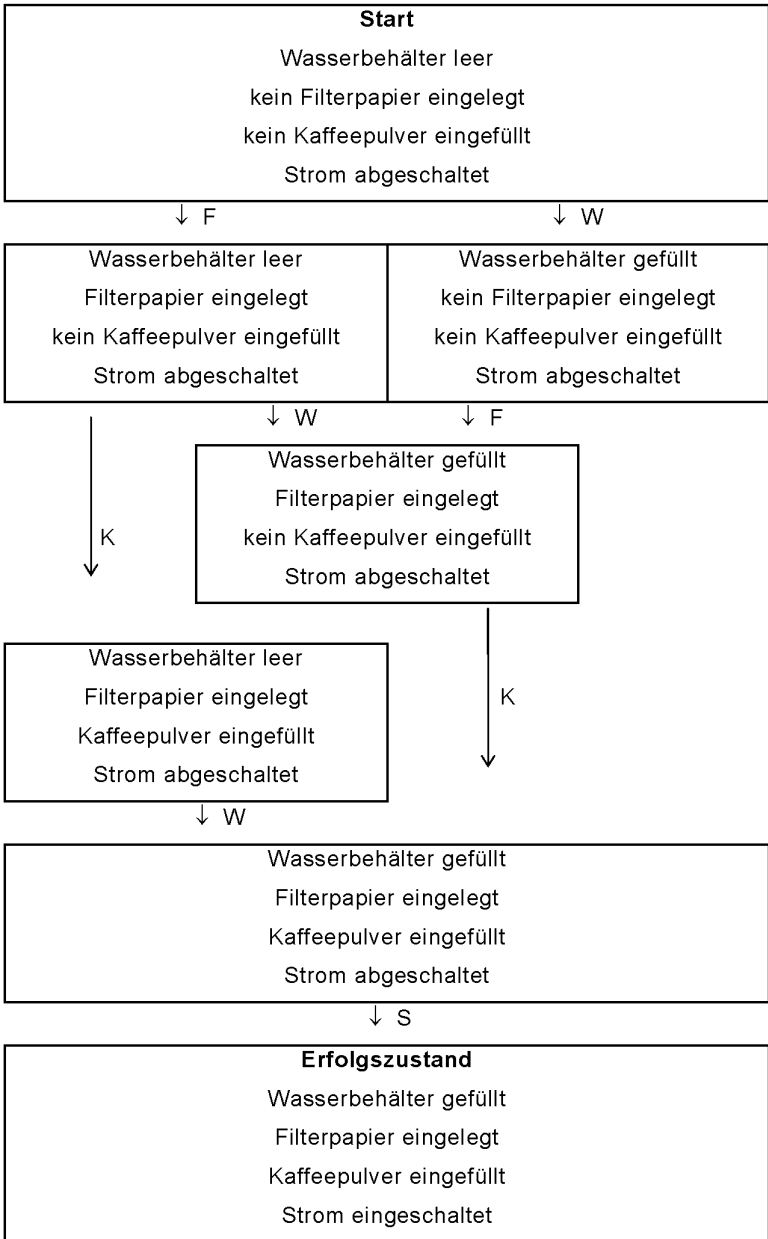
Für jeden Automaten gibt es somit eine für ihn typische Menge von elementaren Signalen, mit denen die Umwelt auf ihn einwirken kann und die der Automat »versteht«. Diese Menge ist das »Eingabealphabet« des Automaten.

Nehmen wir als Beispiel einen Kaffeeautomaten: Hier gibt es einzelne Funktionen, die durch Eingabesignale gesteuert werden, nämlich Wasser einfüllen, Filterpapier einlegen, Kaffeepulver einfüllen und Strom einschalten. Kürzen wir diese elementaren Operationen durch W, F, K und S ab, dann sind beispielsweise WFKS oder auch FKWS und FWKS als korrekte Eingabefolgen anzusehen, die nach einiger Zeit zum gewünschten Ergebnis führen, nämlich heißem Kaffee.

Dagegen sind die Folgen WFS (gefiltertes heißes Wasser), KWS (Kaffeesatz in der Kanne) oder SFK (Überhitzung des Gerätes) weit weniger erfolgreich.

Ein endlicher Automat verarbeitet Informationen

Die einzelnen Eingaben und somit auch Eingabefolgen verändern den »inneren Zustand« eines Automaten. Der Automat kann verschiedene endlich viele Zustände annehmen, die diskret, d. h. klar voneinander abgrenzbar und einzeln benennbar sein müssen. Zu je-



Die Zustände eines Kaffeeautomaten

dem Zustand können Ein- und Ausgaben gehören. Beim Übergang zwischen den Zuständen wird der Modellcharakter des endlichen Automaten besonders deutlich: Zustandswechsel erfolgen ohne Zeitverbrauch. Diese blitzschnellen Zustandswechsel können nur in der Vorstellung existieren. Stellt man sich beispielsweise den Wechsel zwischen Bewegung und Stillstand ohne Zeitverbrauch vor, sind beide diskrete Zustände.

Bei einer korrekten Bedienungsfolge, z. B. WFKS, wird der Anfangszustand des Kaffeeautomaten (Wasserbehälter leer, kein Filterpapier eingelegt, kein Kaffeepulver eingefüllt, Strom abgeschaltet) überführt in den Erfolgzustand (Wasserbehälter gefüllt, Filterpapier eingelegt, Kaffeepulver im Filter, Strom eingeschaltet), wobei einige Zwischenzustände durchlaufen werden.

Ein solcher Zwischenzustand ist z. B. »Wasserbehälter gefüllt, Filterpapier eingelegt, noch kein Kaffeepulver eingefüllt, Strom abgeschaltet«, der durch die Eingabe K in den nächsten Zwischenzustand (Wasserbehälter gefüllt, Filterpapier eingelegt, Kaffeepulver im Filter, Strom abgeschaltet) überführt wird. Der Automat reagiert also auf eine Eingabe durch Übergang in einen anderen Zustand, und zwar in Abhängigkeit vom momentanen inneren Zustand und vom gerade erhaltenen Eingabezeichen.

Zustände sowie Ein- und Ausgaben legen die Maschine fest. Es gibt keine zusätzlichen Informationen und insbesondere keine Möglichkeit, Informationen zu speichern.

Zelluläre Automaten

Die Erfinder der zellulären Automaten, John von Neumann und Stanislaw Ulam, wollten ein Modell sich wechselseitig beeinflussender Teilkomponenten entwerfen, mit dessen Hilfe die Entwicklung vernetzter Systeme studiert werden kann. Als Vorbild für ihren Entwurf sahen sie die natürlichen Zell- und Nervenzellverbände an. So verfügen die Teilkomponenten des Systems über eine vielleicht schon etwas unheimlich anmutende Fähigkeit: Es sind sich selbstständig vermehrende endliche Automaten, d. h. Maschinen, die einen anderen, völlig gleichen Automaten erzeugen können. Diese Automaten sind in einem gleichförmigen Gitter angeordnet, wobei jedes Feld einen einzelnen Automaten verkörpert. Die identischen Automaten, auch »Zellen« genannt, stehen untereinander in enger Verbindung:

Jeder erhält Eingabeinformationen von benachbarten Automaten, wobei die Nachbarschaftsverbinding in der gesamten Anordnung einheitlich ist. Der Zustand einer Automatenzelle kann durch wenige Zahlenwerte beschrieben werden und alle Zellen ändern ihren Zustand entsprechend den gleichen Regeln und zur gleichen Zeit.

Zelluläre Automaten haben sich als sehr nützlich erwiesen. So lassen sich mit ihrer Hilfe die unterschiedlichsten Systeme sich lokal beeinflussender Teile modellieren – von der Nebelbank bis zum Weltraum. Zelluläre Automaten können auch helfen, Antworten auf die unterschiedlichsten Fragen zu finden, z. B.: Wie arbeiten Computer in einem bestimmten Netzwerk zusammen?

An sich hatte der Entwurf von John von Neumann und Stanislaw Ulam natürliche Zellsysteme zum Vorbild und zelluläre Automaten können auch als Modell biologischer, zur Selbstreproduktion fähiger Zellsysteme angesehen werden. Hierbei wird der Modellcharakter eines zellulären Automaten besonders deutlich. Jede seiner Zellen ist von einer recht eintönigen Umwelt umgeben: Die Zelle empfängt eine kleine Menge diskreter Eingabesignale, die sich durch einfache Zahlenwerte darstellen lassen und der unmittelbaren Nachbarschaft entstammen. Es gibt keine Rezeptoren und keine Kommunikationsmoleküle, die einen differenzierten Informationsaustausch auch zwischen weiter entfernten Strukturen regeln. Die komplizierte Signalkaskade der wirklichen Zelle vereinfacht sich so zu einem blitzartigen Wechsel zwischen diskreten Zuständen.

Ein zellulärer Automat verarbeitet Informationen

Ohne große Auswahlmöglichkeiten schaltet die Automatenzelle zwischen ihren verschiedenen Zuständen umher. Hierbei bestimmt die Zelle ihren neuen Wert aus ihrem vorherigen und den alten Inhalten ihrer Nachbarzellen. Der Zustand einer Automatenzelle kann durch wenige Zustandswerte beschrieben werden – oft sind dies nur die Werte 0 und 1. Darin ähnelt sie einem Digitalcomputer, in dem jede Information ebenfalls nur durch digitale Einheiten – die begrenzte Abfolge unterschiedlicher Bits – ausgedrückt wird.

Auf den ersten Blick erscheinen die Entwicklungsmöglichkeiten eines zellulären Automaten recht eingeschränkt, doch dieser Schein trügt: Viele einfache Teile tun sich zusammen, um ein komplexes Ganzes zu formen.

Auch wenn die einzelne Zelle kaum Möglichkeiten der Entscheidung hat, ist die Kombinationsbreite für die Zustände des gesamten zellulären Automaten gewaltig. Sie hängt allein ab von der Zahl aller Zellen des Zellraumes. Enthält der Zellraum eines Automaten N Zellen, die nur zwei Zustände annehmen können, so gibt es 2^N verschiedene Möglichkeiten, die zwei verschiedenen Zustandswerte auf alle Zellen zu verteilen.

Das ganze Spektrum der Entwicklungsmöglichkeiten hängt sowohl von der Zahl der Zellzustände als auch von der Größe der Nachbarschaft ab. Jede mögliche Kombination der Zustandswerte einer Nachbarschaft kann mit einem eigenen neuen Zustand der Zelle verknüpft werden.

Nachbarschaftliche Beziehungen

Alle Zellen sind von gleicher Gestalt. Sie können die Form eines Quadrates, eines Sechsecks oder eines Dreiecks annehmen. Am häufigsten findet man ein zweidimensionales rechteckiges Gitter, in dem die Zellen wie die Felder eines Schachbretts angeordnet sind.

Die geometrische Grundform einer Zelle legt ihre nachbarschaftlichen Beziehungen fest: Hat eine Zelle in einem Sechseck-Gitter sechs Zellen in ihrer unmittelbaren räumlichen Nachbarschaft, so sieht dies in einem rechteckigen Gitter ganz anders aus. Hier ist eine Zelle direkt benachbart zu vier anderen Zellen (so genannte von-Neumann-Nachbarschaft). Statt sich nur auf diese vier Nachbarn einer Zelle zu beschränken, können auch die vier an den Ecken angrenzenden Zellen als weitere Nachbarn hinzugenommen werden (Moore-Nachbarschaft).

In eindimensionalen Automaten liegen die Variationsmöglichkeiten im Radius der Nachbarschaft. Einen Effekt auf die Entwicklung einer Zelle müssen nicht nur die zwei unmittelbar angrenzenden Zellen haben – auch über eine Entfernung von zwei oder drei Zellen kann die Entwicklung beeinflusst werden.

Welchen Einfluss der Zustand der Nachbarn auf die eigene Entwicklung nimmt, also die Art der Wechselwirkungen, legt die Regel des Automaten fest. Sie beschreibt das Programm, das für alle Zellen gleich ist und das wie in einem Parallelrechner von ihnen simultan ausgeführt wird: In jedem Zeittakt werden die Werte aller Zellen gleichmäßig nach einer vorgegebenen Regel verändert.

Das Spiel des Lebens

Im »Spiel des Lebens«, 1968 von John Horton Conway erfunden, entwickeln und vermehren sich die Akteure selbstständig wie Lebewesen. Es sind die Elemente eines Zellularautomaten, die über ein zweidimensionales rechteckiges Feld verteilt sind. Jedes dieser Elemente hat die Form eines Quadrates und steht in Moore-nachbarschaftlicher Beziehung zu seinen angrenzenden Zellen. Ein Element kann nur zwei Zustände annehmen, beschrieben durch 0 und 1. 1 erhält es, wenn sein eigener Zustand und der seiner Nachbarn zusammen 3 ergibt bzw. auch 4, wenn das Element selbst den Wert 1 hatte. In allen anderen Fällen wird dem Element der Wert 0 zugeordnet.

Hinter diesen Bedingungen steckt die Absicht, die Entwicklung eines wirklichen Zellsystems zu modellieren. Ein Element repräsentiert eine lebende Zelle, die in eine zweidimensionale rechteckige Gitterwelt hineingeboren wird. Je nach Bevölkerungsdichte in ihrer Umgebung bleibt sie am Leben oder stirbt: Ein Zustandswert von 1 bedeutet, dass sie lebt; ein Wert von 0 dagegen entspricht ihrem Tod. Eine Zelle wird zum Leben erweckt, wenn es in den acht um sie herum liegenden Gitterplätzen eine ideale Bevölkerungsdichte von genau drei lebenden Zellen gibt. Auch das Überleben einer Zelle hängt von der Zahl ihrer Lebensgefährten in der Nachbarschaft ab. Streiten sich mehr als drei lebende Zellen um den lokalen Lebensraum in ihrer Nachbarschaft, stirbt die Zelle. Das gleiche Schicksal ereilt sie aber auch, wenn sie nicht mindestens zwei lebende Nachbarn findet und an Einsamkeit zugrunde geht. Nur bei zwei oder drei lebenden Zellen in ihrer Umgebung sind somit die Voraussetzungen für das eigene Überleben gesichert.

Es ist nicht vorhersehbar, wie sich die Zellmuster im »Spiel des Lebens« entwickeln und es entstehen überraschende und vielfältige Zellmuster. Einige Muster verschwinden und werden nie mehr gesehen – sie sterben aus. Andere Muster durchlaufen zyklische Konfigurationen, bei denen nach einer gewissen Zeit das Ausgangsmuster wieder erreicht wird. Manche Muster wandern über die Bildfläche in horizontaler, vertikaler oder diagonaler Richtung und wieder andere enden in einer gleich bleibenden Konfiguration.

Das in diesen Automaten umgesetzte Prinzip lokaler Wechselwirkungen einfacher Bausteine erfasst auf eine leicht zugängliche Weise Grundcharakteristika der sich selbst organisierenden Welt natür-

licher Zellsysteme. Man kann sich mit ihnen den Phänomenen der Komplexität annähern, ohne erst einen umfassenden theoretischen Apparat im Detail zu studieren.

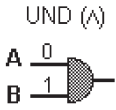
Spiegeln Zellularautomaten zum einen das Verhalten natürlicher Zellsysteme wider, ähnelt ihr Verhalten zum anderen auch dem von Computern. Mit den Regeln des »Spiel des Lebens« lassen sich all die Elemente nachbauen, die die Grundlagen heutiger Digitalrechner bilden. Es können beliebige Symbole codiert, manipuliert und gespeichert werden, d. h. Informationen verarbeitet werden.

Wie das »Spiel des Lebens« einen Computer nachbildet

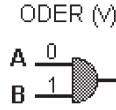
Sind es Moleküle, die in biologischen Systemen Informationen verarbeiten, so ist es in Computern elektrischer Strom. Das Ausführen einer Mikrooperation, d. h. einer in der Hardware eines Computers vorgesehenen, fest verdrahteten Elementaroperation, bedeutet die Umwandlung einer Information in ein elektrisches Signal, d. h. in einen der beiden Zustände »Strom fließt« bzw. »Strom fließt nicht«. In dieser elektrischen Form werden Informationen im Rechner verarbeitet, das bedeutet, dass sie gespeichert oder arithmetisch bzw. logisch miteinander verknüpft werden. Bei arithmetischen Operationen verkörpern die beiden elektrischen Zustände (»Strom fließt« bzw. »Strom fließt nicht«) die binären Ziffern 1 und 0, während sie bei der Verknüpfung logischer Ausdrücke für »wahr« und »falsch« stehen. Elektrische Schaltkreise ermöglichen die Verarbeitung der eingegebenen Bitfolgen. Die Basis all dieser Schaltungen sind drei elementare Grundbausteine, die so genannten logischen Gatter: die logischen Verknüpfungen UND, ODER und NICHT.

Die UND-Funktion ergibt den Wert »wahr«, wenn alle verknüpften Aussagen wahr sind. Die ODER-Funktion liefert den Wert »wahr«, wenn mindestens eine der verknüpften Aussagen wahr ist. Die NICHT-Funktion verwandelt den Wahrheitswert einer Aussage in sein Gegenteil. Die gesamte Informationsverarbeitung eines Computers beruht auf dem Hintereinanderschalten dieser drei logischen Schaltungen. Dabei wird zunächst jede Aktion des Computers auf die Manipulation einzelner Bits zurückgeführt.

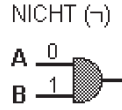
Informationsverarbeitung in Computern und Zellularautomaten entsprechen sich. Im »Spiel des Lebens« fließt natürlich kein Strom. Jede Information wird auf einem zweidimensionalen Gitter verarbei-



UND (0,0) = 0
 UND (0,1) = 0
 UND (1,0) = 0
 UND (1,1) = 1



ODER (0,0) = 0
 ODER (0,1) = 1
 ODER (1,0) = 1
 ODER (1,1) = 1



NICHT (0) = 1
 NICHT (1) = 0

Die drei logischen Gatter

tet und durch »belebte« Gitterplätze dargestellt. Doch gibt es Zellkonfigurationen, die genau wie in wirklichen Computern jede beliebige Eingabe binär verschlüsseln können. Es sind die so genannten Gleiter. Ein Gleiter ist eine bestimmte Anordnung »belebter« Zellen, die in vier aufeinander folgenden Generationen ihre Gestalt verändert, um dann nach genau vier Generationen in gleicher Form, nur diagonal um eine Zelle versetzt, wieder aufzutauchen. Ein Gleiter ist somit ein Muster, das sich in einem ewigen Lauf unverändert durch die Gitterwelt bewegt.

Folgen von Gleitern sind im Spiel-des-Lebens-Computer das Gegenstück zu elektrischen Impulsen. Das »Spiel des Lebens« kennt eine Konfiguration, die regelmäßig in Abständen von 30 Zeitschritten einen Gleiter erzeugen kann, die so genannte Gleiterkanone. Die Periodenlänge der Gleiterkanone, d. h. 30 Zeitschritte, bestimmt die Länge eines Arbeitstaktes des zellulären Computers. Ist ein Gleiter in einem Takt vorhanden, so ist dies gleichbedeutend zur »Strom an«-Phase im wirklichen Computer. Wird zu Beginn des nächsten Arbeitstaktes, d. h. nach 30 Zeitschritten, kein Gleiter auf die Reise geschickt, so ist der »Strom« ausgeschaltet. Da jede beliebige Folge von Gleitern möglich ist, kann genau wie in wirklichen Computern jede beliebige Eingabe codiert werden.

Auch die drei logischen Gatter können mithilfe von Gleitern erzeugt werden. Da sich beim Zusammenstoß zwei Gleiter gegenseitig vernichten können, kann so ein NICHT-Gatter nachgebildet werden, das die Eingabe 0 (falsch) in eine 1 (wahr) verwandelt und umgekehrt: Ist eine Folge von Gleitern Eingabestrom eines NICHT-Gatters, so wird eine zweite kontinuierliche Folge von Gleitern derart auf diesen Eingabestrom gerichtet, dass seine Gleiter (Einsen) in Nichtgleiter (Nullen) verwandelt werden. Falls der Eingabestrom an einer Stelle

keinen Gleiter enthält, kann der Gleiter aus dem kontinuierlichen Strom unbehelligt passieren, sodass eine 0 in eine 1 umgewandelt wird.

Mit kollidierenden Gleiterströmen lassen sich auch die anderen Gattertypen, also UND- und ODER-Gatter, nachbilden, sodass sich auf der Grundlage des »Spiels des Lebens« ein Computer vollständig konstruieren lässt.

Wie ein Computer einen zellulären Automaten nachbildet

Der vorhergehende Abschnitt zeigte, dass die Informationsverarbeitung eines zellulären Automaten in die eines Computers übersetzt werden kann. Umgekehrt ist es möglich, mithilfe eines Computers einen zellulären Automaten zu simulieren. So ist die Folge von Binärzellen im Speicher eines Computers mit den Anfangswerten eines Zellularautomaten vergleichbar. Während der Entwicklung eines Zellularautomaten wird diese in den Anfangswerten gespeicherte Information verarbeitet. Die Entwicklung aus einem Anfangszustand kann man als eine Berechnung ansehen, die die Informationen des jeweiligen Zustandes verarbeitet.

Jeder der Entwicklungsschritte lässt sich mithilfe eines Computerprogramms simulieren, sodass das Ergebnis nach einer bestimmten Zeit gefunden werden kann. Das Programm legt zunächst einen Bereich für die Zellen fest, wobei die Zellen den Speicherelementen im Computer entsprechen. Idealerweise wäre dieser Bereich unendlich groß, aber dies ist praktisch unmöglich. Um das Problem des offenen Randes zu vermeiden, kann man die Ränder des Zellraums miteinander verbinden. Im eindimensionalen Raum wird so aus einem einfachen Streifen von Zellen ein Ring, in zwei Dimensionen ein Torus.



Torus

Die zweite Möglichkeit der künstlichen Randerweiterung ist die Spiegelung der Randzellen. Hierbei wird die nicht vollständige Nachbarschaft einfach am tatsächlichen Rand des Raums gespiegelt, so-

dass jede Randzelle auch hier genauso viele Nachbarn besitzt wie die Zelle im Innern.

Das Programm sucht nun einzeln nacheinander jede Zelle auf, untersucht deren Nachbarzellen und berechnet den Wert für den nächsten Zustand der Zelle. Hierbei muss der Inhalt einer Zelle unverändert bleiben, bis ihr Wert von all den Zellen geprüft worden ist, deren Nachbar sie ist. Auf einem normalen Digitalrechner ausgeführt, durchläuft das Programm nacheinander die einzelnen Schritte. Dabei bildet es die Operationen vieler zusammenschalteter, gleichzeitig laufender Computer nach, d. h., es simuliert sie.

Gibt es eine wirksamere Möglichkeit, an das Ergebnis zu gelangen? Gibt es eine Abkürzung der schrittweisen Simulation, ein Verfahren, das das Ergebnis vieler Entwicklungsschritte abgibt, ohne jeden Schritt durchlaufen zu haben? Der Rechner könnte so die Entwicklung des Zellularautomaten ohne ausdrückliche Simulation vorherbestimmen. Eine einfache Überlegung führt zu dem Schluss, dass es keine allgemeine Vereinfachung geben kann, die die Entwicklung eines beliebigen Zellularautomaten bestimmt: Die meisten Zellularautomaten verfügen über eine universelle Rechenfähigkeit, d. h., dass sie jedes berechenbare Problem lösen können. Wäre ein Verfahren bekannt, das das Verhalten dieser Zellularautomaten schneller lieferte als sich der Automat selbst entwickelte, könnte man damit jede Berechnung beschleunigen. Da dies etwas Unmögliches ist (wie sich mathematisch beweisen lässt), folgt, dass sich die Entwicklung eines beliebigen Zellularautomaten nicht ohne weiteres vereinfachen lässt. Dieses Problem ist irreduzibel, nicht zu vereinfachen – das Ergebnis kann man nur durch schrittweise Simulation erreichen.

Allgemein scheint bei biologischen Systemen die rechnerische Irreduzibilität weit verbreitet zu sein: So könnte sich beispielsweise herausstellen, dass man die Entwicklung einer Zelle aus ihrem genetischen Code nur durch Verfolgung eines jeden einzelnen Entwicklungsschrittes bestimmen kann.

Zellularautomaten sind Modelle von Zellsystemen, deren Art der Informationsverarbeitung der eines Computers entspricht: Wie die vorhergehenden Abschnitte gezeigt haben, sind zum einen Zellularautomaten in der Lage, Computer nachzuahmen, und zum anderen ist es möglich, mithilfe von Computern Zellularautomaten zu simulieren. Jedoch sind Zellularautomaten stark vereinfachte Modellvorstellungen von Zellsystemen, die wenige ausgewählte Eigenschaften der Wirk-

lichkeit berücksichtigen. Bei genauer Betrachtung unterscheiden sich Zellen einerseits sowie Zellularautomaten und Computer andererseits deutlich in ihrer Art, Informationen zu verarbeiten.

Das Lösen von Problemen

Ein Computer löst ein Problem mithilfe eines Programms. Jedes Programm eines Computers lässt sich auch als Automat konstruieren – ein Modell des Verhaltens, das durch Eingabesignale, Zustände und Zustandsänderungen beschrieben werden kann. Gesteuert von einem solchen Programm, führt ein Computer fest vorgegebene Handlungsschritte aus – er selbst entwickelt keine Lösung zu einem Problem. Im Gegensatz zu natürlichen Systemen kennt er nur eine einzige Art von Daten, nämlich binäre Ziffern, und er arbeitet stets nach dem gleichen Satz von Regeln, nämlich dem eines ihm vorgegebenen Befehlssatzes, bestehend aus einzelnen Mikrooperationen. Ihre Ausführung bedeutet die Umwandlung einer Information in ein elektrisches Signal, das einen Schaltvorgang im Rechner auslöst. Zahlreiche Mikroinstruktionen werden vom Rechner automatisch hintereinander ausgeführt und bilden einen Maschinenbefehl – etwas, das einem Programmierer als kleinste unteilbare Einheit erscheint. Die einen Maschinenbefehl ausführende Folge von Mikrobefehlen bildet ein Mikroprogramm.

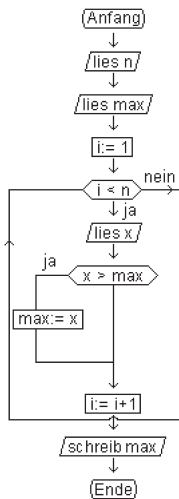
Die Art der Mikroprogrammierung entscheidet über die Flexibilität eines Rechners. So können Mikroprogramme fest verdrahtet oder in besonderen Speichern abgelegt sein. Für diese Speicher verwendet man gewöhnlich zwei Arten: einen Nur-Lese-Speicher, abgekürzt ROM (read only memory), und einen Schreib-Lese-Speicher mit wahlfreiem Zugriff (RAM, random access memory). Der Nur-Lese-Speicher enthält Informationen, die vom Hersteller fest einprogrammiert wurden und sich nicht mehr verändern lassen. Bei einem Schreib-Lese-Speicher können Informationen dagegen jederzeit nach Bedarf eingeschrieben und gelesen werden. Entspricht das Proteinnetzwerk natürlicher Zellen dem »random access memory«, so kann die in den Erbanlagen der DNA niedergelegte genetische Information mit dem Dauerspeicher und Betriebssystem eines Computers verglichen werden.

Es ergibt sich eine Schwierigkeit: Die Probleme, die ein Computer lösen soll, sind kaum jemals in seiner Sprache, d. h. mithilfe von Bits, formuliert. Stattdessen ist der Lösungsweg eines Problems von einem Menschen in Form eines Algorithmus beschrieben, eines aus endlich vielen Schritten bestehenden Verarbeitungsverfahrens. Die zu verarbeitenden Daten sind als Zahlen, Schriftzeichen, Symbole usw. ausgedrückt. Der Algorithmus selbst ist in natürlicher Sprache abgefasst, die voller Ungenauigkeiten und Mehrdeutigkeiten ist. Oft können diese nur durch Hintergrundwissen aufgelöst werden – etwas, über das ein Computer nicht verfügt. Zudem fasst die natürliche Sprache viele Einzelvorgänge zu einem Ganzen zusammen bzw. setzt sie implizit in Beziehung zueinander. Darin ähnelt sie der Informationsverarbeitung biologischer Zellsysteme, die gleichzeitig auf genomischer, molekularer, auf System- und Verhaltensebene stattfindet. Wie die natürliche Sprache verarbeiten biologische Systeme auch Ungenaues (etwas, das »fuzzy« ist).

Ein Computer der heutigen Rechnergeneration hingegen akzeptiert nur einen strengen Formalismus. Er ist nicht mehr als eine Maschine, die physikalische Regeln in ihrer vorgegebenen Form manipuliert. Zwar wäre es theoretisch möglich, ein fuzzy-System auf einem fuzzy-Computer zu verwirklichen, wie es von Zadeh angeregt wurde, doch diese Möglichkeit wurde bisher nicht verwirklicht. Bis zur Herstellung eines fuzzy-Computers bleibt nur die Simulation mithilfe von mathematischen Formeln, die, übersetzt in die Rechnersprache, von einem Computer abgearbeitet werden können.

So muss eine Vielfalt von Informationsdarstellungen von einer Maschine mit nur einem einfachen Sprachschatz – einem einzigen, festen Befehlssatz – verstanden werden. Hierzu wird der in natürlicher Sprache formulierte Algorithmus zunächst in eine Sprache übersetzt, in der die Bedeutung jedes Objekts und jeder Anweisung präzise und eindeutig definiert ist – in eine Programmiersprache. In ihr sind die Objekte des Algorithmus in genau festgelegter Form als Daten repräsentiert. Die Objekte erhalten Namen, genannt Variablen, wenn sie veränderlich sind, und Konstanten, wenn sie gleich bleiben.

Zusammen mit den Daten enthält das Programm eine vollständige Anweisungsfolge, die angibt, auf welche Art die Daten verändert werden sollen. Eine Programmiersprache ist nach strengen Regeln aufgebaut. Dennoch hat sie eine oberflächliche Ähnlichkeit mit einer



```

Program maximum (input, output);
VAR n, i: integer;
    max, x: real;
BEGIN
  read (n,max); i:= 1;
  WHILE i <= n DO
  BEGIN
    read (x);
    IF x > max THEN max:= x; i:= i+1
  END;
  writeln ('Die größte gelesene Zahl ist ',max);
END.

```

An dem Problem, die größte unter n natürlichen Zahlen zu bestimmen, sollen die Besonderheiten einer Programmiersprache gezeigt werden. Links ist das Ablaufprogramm eines Algorithmus für das Problem dargestellt. Die Übersetzung des Algorithmus in die Programmiersprache Pascal, eine problemorientierte Sprache,

ist rechts gezeigt. Kernstück des Algorithmus ist eine n -mal auszuführende Schleife. Bei jedem Durchlaufen der Schleife wird eine Zahl x eingelesen. Ist sie größer als die größte der bisher eingelesenen Zahlen (genannt »max«), nimmt den Wert von x an.

natürlichen Sprache. Sie verfügt über ein Vokabular von Wörtern, Zahlen und Schlüsselwörtern mit einer festen Bedeutung.

Der Schritt von der Programmiersprache in die Sprache des Rechners, die Maschinensprache, wird vom Computer selbst vorgenommen. Dies gelingt dem Computer mithilfe seiner Übersetzungsprogramme – während in natürlichen Organismen Moleküle Information von einer Form in die andere übertragen. Offensichtlich können sämtliche Aufgaben eines Computers auch von einem Netzwerk chemischer Botenstoffe ausgeführt werden: Datenaufnahme, -integration und -verstärkung ebenso wie die Speicherung von Informationen und ihre digitale Verarbeitung mithilfe logischer Entscheidungen. Darüber hinaus sind chemische Netzwerke wesentlich komplexer als die Netzwerke elektronischer Computer. Eine einzige biologische Zelle besitzt eine millionenfach kleinere Fläche als ein Mikrochip – dennoch beherbergt sie Hunderte verschiedener Rezeptoren und Proteine, die sich gegenseitig beeinflussen.

Vielleicht ist dies ein Grund dafür, dass natürliche Zellen über wesentlich komplexere Methoden der Problemlösung verfügen als Computer: Schon einzellige Organismen besitzen die Fähigkeit, eigene Lösungen zu einem besonderen Problem zu entwickeln. Sie brauchen keinen wohl definierten Prozess, mit dessen Hilfe sie eine Eingabe in eine Ausgabe überführen. Regeln müssen nicht explizit gelernt werden, sondern werden implizit generalisiert. Und das Erstaunliche dabei: Ihr ganzes Leben lang sind biologische Systeme in der Lage, sich veränderten Regeln nach eigener Regie anzupassen.

Literatur

- Adam, B.: Signaltransduktion bei Chlamydomonas, http://adam-radmanic.de/2003_07_LJ_S28-29_Sex_unter_Blaulich.pdf, 2006
- Albert, J., Ottmann, T.: Automaten, Sprachen und Maschinen für Anwender, B. I. Wissenschaftsverlag, Mannheim 1990
- Benner, K.-U., Hillenbrand, S. M.: Der Körper des Menschen, Weltbild Verlag, München 1995
- Black, I. B.: Symbole, Synapsen und Systeme, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg–Berlin–Oxford 1993
- Borchard-Tuch, C.: Computersysteme – Ebenbilder der Natur? Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig–Wiesbaden 1997
- Gerhardt, M., Schuster, H.: Das digitale Universum, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig–Wiesbaden 1995
- Signale und Kommunikation, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg–Berlin–Oxford 1993
- Singer, M., Berg, P.: Gene und Genome, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg–Berlin–New York 1992
- Thro, E.: Künstliches Leben, Addison Wesley 1994
- von Neumann, J. (Hrsg.: Burks, A. W.): Theory of self-reproducing automata. University of Illinois Press, Illinois 1966