

Naturwissenschaftliche und technische Systeme im Fokus von Fremdorganisation und Selbstorganisation – Kontrollierte Selbstorganisation im Nanobereich

Wolfgang Eisenberg, Uwe Renner
Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft e. V.
Leipzig

1. Einleitung: Die Selbstorganisation

Unter Selbstorganisation versteht man heute in den Naturwissenschaften einen spontanen Ordnungsprozess, der zumeist in nichtlinearen dissipativen dynamischen Systemen fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht auftritt und zur Ausbildung räumlicher, zeitlicher und raum-zeitlicher Strukturen führt.¹ Phänomene der Selbstorganisation spielen in vielen Bereichen der Natur eine bedeutsame Rolle. Heute gilt es daher, die Mechanismen der Selbstorganisation in nichtlinearen Systemen zu analysieren und in geeigneter Form auf technische man-made Systeme zu übertragen.

Der „Leipziger“ (Stuttgarter) Begründer der Synergetik, Herman Haken, startete seine begriffliche Diskussion² – übrigens wie Albert Einstein – mit Alltagsbegriffen, hier für Organisation und Selbstorganisation, um daran anknüpfend, die wissenschaftliche Verfeinerung zu gewinnen und darzustellen. Nach seiner Meinung sprechen wir von organisiertem Verhalten, wenn jeder Akteur auf vorgegebene äußere Anweisungen, z. B. des Operators oder des Chefs, auf wohldefinierte Weise reagiert. Denselben Vorgang werden wir danach als selbstorganisierend bezeichnen, wenn keine äußeren Anweisungen gegeben werden, die Akteure vielmehr über eine Art von gegenseitigen Verständnis zusammenarbeiten, wobei jeder seine Operation wie bei der organisierten Herstellung eines Produktes verrichten. Diese etwas vage Alltagsbeschreibung der Organisation und Selbstorganisation präzisierter Haken im nächsten Schritt mit Hilfe strenger mathematischer Begriffe. Dabei müssen Ursachen und Wirkungen (Handlungsanweisungen) in mathematische Termini übersetzt werden. Zu beachten ist dabei, dass diese wissenschaftlichen Begriffe auf eine breite Klasse unterschiedlicher Systeme anwendbar sein sollen, nicht nur auf die soziologischen, sondern auch auf die physikalischen, chemischen und biologische u. a. Systeme.

Wie gesagt, von Organisation³ sprechen wir dann, wenn Systeme auf äußere Anweisungen reagieren. In vielen Fällen erfolgt diese Reaktion sehr schnell im Vergleich zur langsamen Änderung der steuernden Kraft. Dann kann man die sogenannte adiabatische oder quasi-statische Näherung mit Erfolg verwenden. Das Versklavungsprinzip der Synergetik nutzt die Prämissen dieser Näherung zur Variablenreduktion; die „schnellen“ Variablen dominieren im temporären Systemverhalten die „langsamen“ Variablen. Im Falle der Selbstorganisation sind die steuernden Kräfte selbst Teil des Systems und erwachsen aus der inneren Dynamik. Sie sind keine vorgegebene Funktionen, sondern genügen Bewegungsgleichungen. Im idealen Fall kennt man diese genügend genau. Im nichtlinearen Bereich der Systeme können sich

¹ In: Technologiefrüherkennung – Kontrollierte SO für zukünftige technische Anwendungen – Fachgespräch - VDI – BMBF – Düsseldorf 2004 – Eckehard Schöll (TU Berlin): Prinzipien der SO, S.9; Ebeling, W.: Physik der Selbstorganisation und Evolution. – Akademie-Verlag Berlin, 1983

² H. Haken: Synergetik. Eine Einführung...

³ In: Gottfried Jetschke: Mathematik der Selbstorganisation. Qualitative Theorie nichtlinearer Systeme und gleichgewichtsferner Strukturen in Physik, Chemie und Biologie – Friedrich Vieweg & Sohn Braunschweig/Wiesbaden 1990, S. 299 ff.

sogar „ausgedehnte“ kooperative Zustände bilden und stabilisieren. Das erleichtert ungemein das Verständnis für den Übergang von den vielen Variablen im Mikrobereich zu den wenigen Zustandsvariablen im Makroskopischen. Interessant ist natürlich der mesoskopische Bereich, vor allem der Nanobereich, seine Erforschung und technische Nutzung. Hier ist nicht nur das Problem der Variablenreduktion zu beachten, sondern auch die Stabilitätsfrage der mesoskopischen Zustände.

Nicht nur unsere Publikationsreihe „Synergie, Syntropie, nichtlineare Systeme“ ist auf synergetische, kooperative und nichtlineare Zusammenhänge im Makro-, Mikro- und Nanobereich fokussiert, sondern auch unser Projekt zur Anwendung zelluläre Automaten.

In Bereichen der Biologie werden die Mechanismen der Selbstorganisation besonders deutlich. Zu den Besonderheiten in lebenden Systemen gehört, dass für diese die Selbstorganisation ein Grundphänomen ist. Aus relativ einfachen molekularen Bausteinen entstehen quasi wie von selbst hochkomplexe und differenzierte Lebensformen mit wohlhabend bestimmten spezialisierten Untereinheiten, deren kooperative Eigenschaften neu und deutlich emergent sind. Die Nano-Biotechnologie ist ein bekanntes Beispiel. Ein weiteres Beispiel ist die Nanotechnologie.⁴

Die Selbstorganisation per Exzellenz und materiell-geistig skaliert zeigt der Mensch: von der biochemisch dominierten Zellorganisation und -kooperation, über die gliederfunktionale muskelgesteuerte gangtypische Körperbewegung bis zu den selbst- und fremdorganisierten Hirnprozessen. Regeltechnisch gesprochen zeigt die Natur beim Menschen die Selbstorganisation als selbstorganisierende Kontrolle von hochkomplexen Regelkreisen. Die kontrollierte Selbstorganisation, d. h. das Einstellen bestimmter externer Kontrollparameter wird erst dann der Selbstorganisation in der Bio- und Nanotechnologie gleichwertig, wenn die Nanotechnik von übermorgen von einer Selbstorganisationskontrolle der kontrollierten Selbstorganisation sinnvoll und praktikabel sprechen kann. Ein im Traum vorgestelltes Beispiel wäre der von Herrn Dr. Thomas Runkler avisierte selbstwachsende molekulare Motor.⁵

2. Die kontrollierte Selbstorganisation⁶ in leistungsfähiger und billiger Technik

Die Selbstorganisation (self-assembly) verspricht für technische Anwendungen bei niedrigen Kosten einfache, effizientere Strukturierungsverfahren und die Beherrschung einer Komplexität, die mit konventionellen Methoden nicht möglich ist. Verantwortlich für die selbstorganisierten Ordnungsprozesse sind Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bausteinen: Atome, Verbund-Moleküle, Teilchen. Es ergeben sich sowohl einfache (Schneeflocke) als auch komplexe Gebilde (lebende Zelle). Sie entstehen allein aus den Anweisungen, die implizit im Ausgangsmaterial enthalten sind, wie Hermann Haken „vorgedacht“ hat.

In der technologischen Anwendung wird die einfache Vision „Ein komplexen Prozessor per Selbstorganisation in vitro ergibt sich selbstorganisiert durch Zusammenschütten von geeigneten Chemikalien und Etwas-Schütteln“ verabschiedet. Tatsächlich kann die

⁴ In: Technologiefrüherkennung – Kontrollierte SO für zukünftige technische Anwendungen – Fachgespräch - VDI – BMBF – Düsseldorf 2004 – Harald Fuchs (Universität Münster): Motivation und Herausforderung der SO, S.5

⁵ In: Technologiefrüherkennung – Martin Greiner, Thomas Runkler, Rudolf Sollacher (Siemens AG): Design selbstorganisierender Systeme – Beispiele und Algorithmen, S.15

⁶ Hoffknecht, A. und Wechsler, D.: Kontrollierte Selbstorganisation. – Physik Journal 4/2005, S. 43

kontrollierte Selbstorganisation in vielen Herstellungsverfahren einzelne Prozessschritte ersetzen, die effizienter, billiger und leistungsfähiger sind. Das potentielle Anwendungsspektrum ist breit gefächert: Verfahrens- und Produktionsprozesse – Produkte der Informations- und Kommunikationstechnologie – Werkstoff- und Umwelttechnik – Medizin/Pharmazie.

Die Selbstorganisation nutzt man häufig zum gezielten Aufbau materieller Systeme. Selbstorganisation und Kontrolle ist ein Widerspruch, der aber das gewünschte Endergebnis sicherstellt. Gemeint ist hier zum einen das Einprägen der Strukturinformation auf die einzelnen Bausteine. Das geschieht über die geometrische Form, die gewählten Bindungsplätze und die Oberflächenform der Bausteine. Andererseits kann man die Umgebungsbedingungen manipulieren, wie z. B. T, p, pH-Wert, elektromagnetische Felder und Teilchendichten oder -konzentrationen. Die Selbstorganisation beruht häufig auf schwachen Kräften, z. B. nicht-kovalente Bindungen. Dadurch sind ein leichter Auf- und Abbau und die Korrektur zufälliger Fehler möglich. Die Selbstorganisation ist also quasi selbstkorrigierend und ermöglicht Zielstrukturen mit hoher Präzision.

Die Technologieanalysen des VDI im Auftrag des BMBF (siehe www.zt-consulting.de) für die Strategieauswahl und Auswahl der Synergiepotentiale ergaben folgende Schwerpunkte: Hybride Strukturierungsverfahren, Montage mesoskopischer Bauelemente, Selbstorganisation von Quantenpunkten, Nanokristallen und Blockcopolymeren, Biofunktionale Erkennung für neue Konstruktionen und Produktionen. Der Sprachgebrauch hierfür ist die programmierte Selbstorganisation. Man kann zusammenfassend sagen, die Selbstorganisation ist im Übergang von der Utopie zur schrittweisen Gestaltung nachhaltiger Technologien mit deutlicher Kostenreduktion!

3. Fremdorganisation in überbrückender, treibender oder abbrechender Funktion

Doch nicht in jedem System und nicht unter beliebigen Systembedingungen kann sich die Selbstorganisation ausbilden, insbesondere nicht, wenn sie die Selbstreproduktion voraussetzt. So kann sich z. B. der versehrte Abschnitt in der linken Herzkammer nach dem Herzinfarkt nicht regenerieren, weil Herzmuskelzellen kaum teilungsfähig sind und damit ihr Nachschub entfällt. Zumindest können sie den Defekt offenbar nicht aus eigener Kraft beseitigen – die Selbstheilung gelingt nicht.⁷

Auch beim Knorpel gibt es ein solches Problem: Die Selbstheilungskräfte des Knorpel reichen oft nicht aus. Schon eine kleine Verletzung, z. B. ein Sturz beim Skifahren, kann sich unbehandelt einige Jahre später zur Arthrose ausweiten. Der kleine Schaden wirkt ähnlich wie ein Sandkorn im Getriebe. Das Gelenk läuft nicht mehr reibungslos und verschleißt dadurch immer mehr. Schuld daran ist die fehlende Durchblutung des Knorpels. Er bezieht seine Nährstoffe vorwiegend über die Gelenkflüssigkeit, die bei Belastung des Gelenks hineingepresst wird. Der Nachschub reicht, um die wenigen vorhandenen Knorpelzellen zu versorgen, nicht aber, um neues Gewebe zu bilden, das die Verletzung heilt.⁸

Man braucht hier also die Fremdorganisation in überbrückender und antreibender Funktion – im Zusammenhang mit der gewünschten Selbstorganisation! Noch deutlicher thematisieren diese Problematik der Fremd- und Selbstorganisation die Vertreter des Managements und der Pädagogik. Auch hier knüpfen die wissenschaftlichen Begriffsbildungen an die Beschreibung der Alltagssituationen an.

⁷ In: Spektrum der Wissenschaft Juni 2005, S. 49

⁸ In: Bild der Wissenschaft 5/2005, S. 32

Im Konzept des wandlungsfähigen Unternehmens dominieren die Prinzipien der geplanten Evolution und der gelenkten Selbstorganisation. Diese impliziert, das neben der Selbstorganisation – als notwendige Voraussetzung und Garant der Wandlungsfähigkeit – ein gewisses Minimum an Fremdorganisation unabdingbar ist. Dabei ist die Fremdorganisation durch die Differenz zwischen dem, der organisiert und dem, der organisiert wird, gekennzeichnet.⁹ Darüber hinaus unterscheidet man die plandeterminierte von der selbstreferentiellen Fremdorganisation, die mit der personen- oder gruppenzentrierten Selbstorganisation bzw. mit der systemischen Selbstorganisation verknüpft sind. Die Besetzung des Extrempunktes „reine Selbstorganisation“ in diesem Spannungsfeld erweist sich weder als sinnvoll noch als praktikabel, da die hier auftretenden Probleme (unklare Entscheidungslegitimation, fehlende Durchsetzungsmacht, lokale Nutzenmaximierung und uneinheitliche strategische Ausrichtung der Einheiten) noch weitgehend ungelöst sind. Eine zentrale Führungsaufgabe des wandlungsfähigen Unternehmens besteht darin, situativ zu bestimmen, welches Mindestmaß an Fremdorganisation die Selbstorganisation benötigt.

Nicht nur im Management, sondern auch in der Betriebswirtschaft gibt es Überlegungen zum Problem der Fremd- und Selbstorganisation. Sie enthalten sogar eine Graduierung der Fremd- und Selbstorganisation. Aber auch in der Didaktik und der Pädagogik gibt es anhaltende Diskussionen um ein wirksames Verhältnis von Fremd- und Selbstorganisation.

Ob diese terminologischen Überlegungen mathematisierbar oder durch physikalische Analogien oder Modelle interdisziplinär nutzbar sind, wird sich noch erweisen müssen. Das betrifft insbesondere die Unterscheidung zwischen plandeterminierter und selbstreferentieller Fremdorganisation und ihrer komplementären Begrifflichkeit einer personen- und gruppenzentrierten oder systemischen Selbstorganisation. Etwas vage bleibt natürlich, was plandeterminiert bedeutet. Ist bewusstes Handeln schon plandeterminiertes Handeln?

Wir gehen aber davon aus, dass eine interdisziplinäre Nutzung solcher Überlegungen sinnvoll und Schritt für Schritt entwickelt werden kann, wobei manche künstlichen Elemente verwendet und informationstechnologische Besonderheiten berücksichtigt werden müssen, wie das von uns vorgestellte Projekt belegt.

Entscheidend für die Praktikabilität, Kontrollierbarkeit und Realitätsnähe von Prozessmodellierungen sind natürlich die Zeiten zur Gestaltung einer gewissen erforderlichen selbstorganisierten Komplexität im System. Aber auch das zugehörige Informationsproblem als einer Basis effektiver Prozesssteuerungen ist zu lösen. Geben die natürlichen Strukturbildungen genügend Informationen preis – zum Auffinden der wichtiger Gestaltungsprinzipien? Denn die SO ist keine allgemeine, sondern eine spezielle Systemeigenschaft, die nur unter speziellen inneren und äußeren Bedingungen vorhanden ist! Die inneren und äußeren Bedingungen und deren Anteile werden bei den anderen Formen der SO, der konservativen SO (Strukturbildung der Kristalle, Biopolymere usw.) und der dispersiven SO (Bildung der Solitonenstrukturen), nicht dieselben sein. Auch die Verknüpfung von Fremd- und Selbstorganisation wird unterschiedlich sein!

4. Das Leben im Schwarm und die Selbstorganisation molekularer Aggregate

Bei der Vorbereitung unseres Projektes zur effizienten Beschreibung komplexer Prozesse haben wir unser Wissen über das Leben im Schwarm, die Selbstorganisation molekularer Aggregate, synergetisch aufbereitet und visionär mit der Methode der zellulären Automaten auf den Nanobereich fokussiert.

⁹ Walger, G.: Change management im Spannungsfeld von Selbst- und Fremdorganisation. Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Witten/Herdecke 1997., S.3

Ein Schwarm ist eine Gruppe von 3 oder mehr Tieren, die alle ihr Tempo und ihre Bewegungsrichtung ständig aufeinander abstimmen. Für das Leben im Schwarm¹⁰ benötigen die Tiere eine angeborene Disposition. Sperrt man die Tiere zusammen ein, die unter natürlichen Bedingungen einzeln leben, so sind diese unverträglich. Bei manchen Tieren kommt es unter Bedingungen zur Schwarmbildung. Im Experiment lässt sich nachweisen, dass der Zusammenhalt des Schwarms durch die sogenannte Sozialattraktion bewirkt wird. Teilt man nämlich ein Aquarium durch eine Glaswand, dann schwimmt der einzelne Fisch hinter der Glaswand immer zum Schwarm hin. Innerhalb des Schwarms wird aber andererseits immer ein Mindestabstand zwischen den Tieren eingehalten. Beim Auftauchen eines Feindes nimmt er z. B. immer ab. Die Mitglieder des Schwarms kennen sich nicht individuell und sind gleichberechtigt, so dass das Schwarmverhalten aus der Kooperation der Einzeltiere ergibt. Auf die Schwärme lassen sich nun sehr gut die Prinzipien der Synergetik anwenden. Ein Schwarm ist ja ein System aus vielen Einzelteilen, und die Einzeltiere erzeugen durch geordnetes Zusammenwirken eine makroskopische Struktur.

Die Selbstorganisation molekularer Aggregate¹¹ ist von größter Bedeutung für elementare Teilschritte der Morphogenese. Das Phänomen der spontanen Zusammensetzung komplizierter biologischer Strukturen aus vielen Makromolekülen wird auch in der deutschsprachigen Literatur als Self-Assembly bezeichnet. Dieser Self-Assembly-Prozess (SAP) wird durch spezifische Bindungsplätze der Kontaktzonen der aggregierenden Moleküle ermöglicht. Die Information zum Aufbau der Struktur ist also bereits in der Primärstruktur der Strukturbildner enthalten.

Da bei einfachen SAP keine zusätzlichen Steuerungsmechanismen benötigt werden, lassen sich diese Prozesse auch *in vitro* durch Anwendung geeigneter Messverfahren quantitativ analysieren und charakterisieren. Dabei stellt die Bildung linearer Strukturen einen theoretisch gut erfassten Spezialfall dar. Wenn alle Gleichgewichtskonstanten bekannt sind, dann ist eine vollständige thermodynamische Beschreibung möglich. Die Reaktionswege sind dabei nicht entscheidend. Die Gleichgewichtsthermodynamik liefert die energetischen Bilanzen für den möglichen spontanen Ablauf der Bioprozesse. Sie ist aber nicht exakt für lebende Systeme (siehe Erweiterung: Thermodynamik irreversibler Prozesse). Die offenen lebenden Systeme sind zudem durch viele gekoppelte Prozesse ausgezeichnet.

Der Reaktionsweg bestimmt aber die Kinetik des Gesamtprozesses. Daher sind kinetische Untersuchungen für die Aufklärung der Aggregationsmechanismen nötig. Das Einsetzen der Aggregation bei einer kritischen Konzentration kann bei vielen Self-Assembly-Systemen (SAS) beobachtet werden. Beispiele der SAS sind die Rekonstruktion der Ribosomen aus Proteinen oder funktioneller biologischer Membranen. Die Größenverteilung der Poly-Aggregate entspricht oft wegen der begrenzten Lebensdauer der primär kinetischen Verteilung und nicht der Gleichgewichtsverteilung.

Das biosoziale Schwarmverhalten und die Selbstorganisation molekularer Aggregate wurden beispielhaft in einer nicht primitiven Modellierung und Manipulation des Membranverhaltens in unserem Projekt verknüpft. Dabei weisen die zusätzlichen Steuerungsmechanismen der Akteure, im o. g. Projekt der zellulären Automaten, im Nanobereich neben der kontrollierten Selbstorganisation deutliche Anteile der Fremdorganisation auf.

¹⁰ H. Haken: Entstehung biologischer Information und Ordnung – S. 194-197

¹¹ Ackermann, Th.: Physikalische Biochemie – Springer-LB – 1992, S. 150ff.

5. Das Projekt: Modellierung und Simulation komplexer Prozesse durch nanozelluläre Automaten und ihre Manipulation durch Nanozelluläre Akteursverbände (NZVA)

A) Zielstellung des Projektes „Modellierung, Simulation und Manipulation komplexer Prozesse mit nanozellulären Akteursverbänden“

In diesem Projekt sollen, anknüpfend an schon bekannte und realisierte, neue und visionäre Aspekte der Modellierung, Simulation und Manipulation von komplexen Vorgängen mit nanozellulären Akteursverbänden vorgestellt und untersucht werden. Durch den möglichst einfachen Aufbau der informations- und feldgetriebenen ZAV und der externen Steuerung dieser nichtautonomen Akteure ist ein breites neues und visionäres Anwendungsspektrum (manipulierte Membranfunktionen, Medikamentenentwurf, Mikrofabrikationsanlagen) möglich. Die Hardware-Realisierung geschieht entweder mit echten Parallelrechnern (mehrere Prozessoren auf einem Board) oder virtuell (Zusammenschalten von Workstationen).

B) Neue und visionäre Möglichkeiten mikro-/nanozellulärer Akteursverbände in der Modellierung und Simulation komplexer Vorgänge: vollständige Kontrolle und nicht-autonome Intelligenz

Ein zellulärer Akteursverband ist ein aus sehr vielen (tausend und mehr) sehr kleinen, einfachen Einheiten (Akteuren) bestehender Zusammenschluss, der durch einen externen Kontrolleur gesteuert wird und eine bestimmte Aufgabe bzw. Programm ausführen kann. Dieses Programm wird dem System bzw. Verband der Akteure als externes Feld aufgeprägt. Dadurch wird eine flexible, anwendungsorientierte Programmierung ermöglicht. Zur Nutzung des ZAV muss natürlich eine geeignete Programmier- und Simulationsumgebung geschaffen werden.

Die Spezialisierung in diesem Projekt „Modellierung, Simulation und kontrollierte Manipulation, komplexer Vorgänge mit zellulären Akteursverbänden“ ist die Modellierung im mikroskopischen, insbesondere im nanoskopischen, Größenbereich, weil dort die neuen und visionären Möglichkeiten besonders klar werden. Die „typische“ und „übliche“ Modellierung muss natürlich hinterfragt werden, wenn neue experimentelle oder empirische Daten vorhanden sind oder ihr Anwendungsbereich eingegrenzt werden kann und soll. Dazu sind informative Modellerweiterungen im Rahmen der kinetischen Boltzmann-Gleichung (oder Quanten-Boltzmann-Gleichung) sinnvoll. Denn ihre einfachen Konzepte sind überzeugend.

Bekanntlich existieren im makroskopischen Bereich schon zahlreiche konkurrierende Ansätze für ähnlich gelagerte Aufgaben (z. B. autonome Agentensysteme, Roboter mit KI), mit denen der hier gemachte Ansatz nicht notwendig in Konkurrenz treten will. Die Akteure selbst sind nach dem Prinzip der größtmöglichen Einfachheit aufgebaut. Danach werden nur Strukturelemente verwendet, die zur konkreten Funktionsrealisierung des Akteurs erforderlich sind. Diese Zielstellung ist eine andere als die an einer Universalität eines Computers (z. B. nach den Vorstellungen von J. von Neumann) orientierte. Diese neue Richtung wird seit längerem in der Mikroelektronik durch den Einsatz spezieller MikroController, RISC-Prozessoren, DSP usw. eingeschlagen.

Diese hier avisierten Akteure sind vielmehr als Funktionselemente (FE) denn als Rechenelemente (RE) anzusehen. Ihre Funktionsweise ist im Wesentlichen die einer Automatenzelle eines zellulären Automaten. Die Akteure speichern kein lokales Programm,

ihre Programmierung erfolgt durch den externen Kontrolleur (Master). Nur die hierzu nötigen Schaltelemente sind Bestandteile des Akteurs. Ein weiteres Wesensmerkmal des Akteurs besteht in seiner Interaktion mit der Umgebung. Hierzu besitzt er einfachste Sensoren. Die möglichen 6 Sensoren könnten auf Temperatur oder Strahlungsfelder oder auch pH-Wert-Änderungen reagieren. Über einen Sender ist er in der Lage, Informationen über seinen Zustand den Nachbarn mitzuteilen. Die Natur des Senders wird offen gelassen. Denkbar sind auch hier Feldänderungen der verschiedensten Art. Aktuatoren und Werkzeuge versetzen ihn in die Lage, seine Umgebung zu beeinflussen bzw. zu manipulieren und sich in ihr zu bewegen.

Durch die geforderte Einfachheit im Aufbau der Akteure wird ein breites Spektrum an möglichen Realisierungen eröffnet. Zum einen könnte man an eine Miniaturisierung in Form von Strukturelementen denken, wie sie mit der Mikrosystemtechnik teils heute schon realisierbar sind, zum anderen könnten die Akteure spezielle „designte“ Makromoleküle mit bestimmten Aktionsgruppen darstellen, wofür aber noch die Regeln des Designs offen sind. Obwohl diese Akteure keine eigene (autonome) Intelligenz besitzen, entsteht durch ihre Kommunikation untereinander eine organische Einheit. Nach dem Grundprinzip eines zellulären Automaten verständigen sich Akteure (Zellen) in einer gewissen Nachbarschaft. Diese Nachbarschaft muss aber nicht notwendigerweise an eine feste Topologie bzw. Gitterstruktur gebunden sein.

Es ist bekannt, dass auch mit einfachen Regeln, wie sie durch ZAV realisiert werden, komplexe Organisations- und Verhaltensstrukturen, so z. B. Schwarmverhalten, entstehen können. Durch die vordefinierte externe Programmsteuerung besitzt die nicht-autonome Intelligenz den Vorteil einer prinzipiell vollständigen Kontrolle des Systems ZAV, was für viele Einsatzgebiete hinsichtlich der Zuverlässigkeit bedeutsam ist (Notfall-Reset, Reinitialisierung).

Das für eine autonome Intelligenz unbedingt erforderliche große Gedächtnis zur Umgebungserfassung (etwa in Gestalt eines neuronalen Netzes) ist für die Funktionsweise des ZAV nicht erforderlich. Diese würde nach Auffassung der Autoren auch dem beabsichtigten Ziel einer Miniaturisierung bis auf eine nanoskopische Gesamtstruktur widersprechen. Im ZAV werden lediglich aktuelle Aktionszustände gespeichert, was aber mit minimalem Aufwand möglich scheint und auf vielfältige Art physikalisch realisiert werden kann. Der gegenwärtige Trend der Nanotechnologien bestärkt diesen Ansatz.

C) Das Neue und Visionäre unseres Projektes soll die Modellierung von Membranfunktionen mit ZA und ZAV einschließen und fokussieren auf das Folgende:

- a) Die Änderung des Transportverhaltens der biologischen Membran durch Änderung der Proteinaktivität (Erhöhung, Erniedrigung) und die mobilen ZAV (lose Topologie der ZA);
- b) Geeignete Modelle zum Transport von Stoffen (Lipoproteine, Pharmaka) durch eine biologische Membran nebst den Erweiterungen auf andere Stofftransporte (Speicherstoffe, Viren); interessant ist dabei die Änderung des Stofftransports in der Membran bei einer Änderung der Lochstrukturierung in der Membran oder Zellwand. Die generierte oder vorhandene Lochstrukturierung kann durch geordnetes oder statistisches Andocken chemisch reagierender Moleküle oder durch mechanisch oder elektrisch angeregte Bruchstellen oder Risse in der Membran bedingt bzw. damit verknüpft sein. Es soll dabei untersucht werden, wie z. B. Löcher oder Kanäle unter bestimmten Bedingungen mit Hilfe der (mobilen) ZAV in die Membran gebracht bzw. repariert oder genutzt werden können.

- c) Geeignete Schüttgut-Modelle mit den ZA und den ZAV. Mittlerweile ist die diskrete Mechanik entwickelt worden, entweder mit den Methoden der molekularen Dynamik oder der ZA. Es wurden schon Modelle – mit stochastischen Elementen und relativ einfachen, physikalisch sinnvollen Stoffgesetzen – für die Dynamik von grobgranularem Schüttgut abgeleitet. Dabei spielt die Form der Partikel keine Rolle mehr. Interessant sind die Schüttgut-Modellierungen auch für die Simulation und Manipulation von Membranfunktionen. Man kann sich dabei sicher auch mikro- und nanozelluläre Automaten in Aktion vorstellen.

Wie oben ausgeführt, ist für dieses Projekt die kontrollierte Manipulation durch ZAV wesentlich. Beispielsweise wäre auch denkbar, dass ZAV als mikroskopische Chirurgen geschädigte Organe „operieren“. Die ZAV würden z. B. je nach Einsatzfall mit den passenden Instrumenten ausgerüstet werden, um etwa beschädigte Gewebe zu entfernen, Risse zu schließen oder bestimmte Stellen zu punktieren (Akupunktur). Als weitere Realisierungsform der ZAV könnte man an „aktive“ Medikamente denken, die Wirkstoffe koordiniert und gezielt am Bestimmungsort – so etwa einem Tumor – nach einem bestimmten Programm und nach einem optimalen Zeitregime freisetzen. Durch diesen optimierten Wirkstoffeinsatz könnten schädigende Nebenwirkungen minimiert oder sogar ausbleiben.

Wie oben angedeutet könnte man sich durch eine zukünftige Fabrikation des ZAV in der Umgebung einer Mikrofabrikationsanlage durch Selbstassemblierung vorstellen. Sie könnten aber auch dazu verwendet werden, fremde komplexe Strukturen im Raum zu erschaffen. Da ZAV mobile Einheiten sind, könnten sie auch an schwer zugängliche Stellen herankommen. Hierbei arbeiten die mikro-(nano)zellulären Automaten – M(N)ZA – gegen den Trend des lokalen thermodynamischen Gleichgewichtes der Membran durch Hinzunahme externer oder erlernter Information. Dies könnte etwa in solchen Fällen von Interesse sein, wo mit den gängigen Technologien, so dem Ätzen und verschiedenste Anlagerungsverfahren, die Strukturgebungsmöglichkeiten nicht mehr ausreichen. In solchen Fällen würden ZAV bestimmte Funktionselemente an den gewünschten Ort transportieren und montieren. In der Gentherapie sind Optimierungen der Wirkstofftransporte im Nanobereich jetzt schon ein Forschungsschwerpunkt.

D) Bezug zur kontrollierten SO, besser zur Fremd- und Selbstorganisation

6. Sicherheit und Zuverlässigkeit – eine Einsatzgarantie der neuen Technik

Sicherheit und Zuverlässigkeit gehören heute zu den wichtigsten Forderungen, die man an ein technisches Produkt stellt. Da die Sicherheit und Zuverlässigkeit bekanntlich nicht in ein Produkt hineingeprüft, sondern hineinentwickelt und gefertigt werden muss, setzen hohe Sicherheit und Zuverlässigkeit eine systematische Planung voraus. Übrigens sind die Forderung von Sicherheit und Zuverlässigkeit und deren systematisch geplanten Realisierung nicht neu. Das Fachgebiet technische Zuverlässigkeit – auch Zuverlässigkeitstheorie genannt – entstand in den 40er Jahren bei der Entwicklung des Flugkörpers F 103 in Peenemünde. Aufgrund des häufigen, unvorhersehbaren Versagens jeweils anderer Komponenten und Baugruppen wurden erstmalig wahrscheinlichkeitstheoretische und statistische Überlegungen zur Zuverlässigkeitsbewertung im ingenieurwissenschaftlichen Bereich – übrigens auch als Systemdenken – eingeführt.

Was ist Zuverlässigkeit?

Die Begriffe und Kenngrößen der Zuverlässigkeit sind in „DIN 40041“ genormt (siehe hierzu auch VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit, Richtlinien Nr. 4001 bis 4010). Hiernach

versteht man unter Zuverlässigkeit („dependability“) die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebener Zeitspanne bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderungen zu erfüllen bzw. einen Teil der Qualität im Hinblick auf das Verhalten der Einheit während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen. Zuverlässigkeit ist also verkürzt: Qualität auf Zeit!

Jede Forschung in einem interdisziplinären Bereich hat ihre Eigengesetzlichkeit. Zudem müssen die Zweifel der „Praktiker“ an der konsequenten Anwendung der Methoden solcher exakter Naturwissenschaften auf Probleme der empirischen und biochemischen Forschung berücksichtigt werden. Heute weiß man um den Vorteil sinnvoll begrenzter und gezielter Anwendungen physikalisch-chemischer Methoden für die Lösung von speziellen physiologischen Problemen. Die meisten Spezialfälle stammen aus der Theoretischen Biochemie, der Biophysik, der Molekular- und Zellbiologie und der Physikalischen Chemie. Unerwähnt sind verschiedene aktuelle Probleme der Stoffwechsel- und Sinnesphysiologie, Molekulargenetik, Biotechnologie, Biomechanik und grundsätzliche theoretische Probleme der Selbstorganisation und präbiotische Evolution.

Grenzen/Möglichkeiten physikalisch-chemischer Analyse biologischer Erscheinungen?

Leben an sich kann nur im Gegensatz zum toten Stoff definiert werden. Aber die Gesetze der Physik (NW) erstrecken sich auf die Bereiche der belebten und unbelebten Natur. Daher ist im Prinzip die Analyse physiologischer Gesamt-Vorgänge und Strukturen durch sinnvolle Verknüpfung quantitativ fassbarer physikalischer und chemischer Elementarprozesse vollständig theoretisch zu erklären. Dies ist aber bisher noch in keinem Fall gelungen. Die komplizierten physiologischen Vorgänge werden sich nur schrittweise erschließen lassen. Insbesondere auch deshalb, weil die Biosysteme mikroskopische und makroskopische Systembereiche umfassen.

Schlussbemerkungen: Einstein, die Wahrscheinlichkeit und die Mechanik¹²

Meiner Ansicht nach wird die Wahrscheinlichkeit eines speziellen Zustandes phänomenologisch eingeführt. Das hat den Vorteil, dass keine spezielle Theorie, wie die kinetische Theorie, dazwischengeschaltet werden muss.

Bei der Berechnung der Entropie auf molekulartheoretischem Wege wird häufig das Wort „Wahrscheinlichkeit“¹³ in einer Bedeutung angewendet, die sich nicht mit der Definition der Wahrscheinlichkeit deckt, wie sie in der Wahrscheinlichkeitsrechnung gegeben wird. Insbesondere werden die Fälle gleicher „Wahrscheinlichkeit“ häufig hypothetisch festgelegt in Fällen, wo die angewendeten theoretischen Bilder bestimmt genug sind, um statt jener hypothetischen Festsetzung eine Deduktion zu geben.

¹² Pais, A.: Raffiniert ist der Herrgott... Albert Einstein. Eine wissenschaftliche Biographie. – Spektrum Akademischer Verlag - Heidelberg, Berlin 2000, S. 57

¹³ Ebenda S. 69