

# Eigenmächtige Strukturbildung ohne äußeren Einfluss

Selbstorganisation geht auch ohne Emergenz – Technische Nutzung nimmt zu

Rolf Kickuth

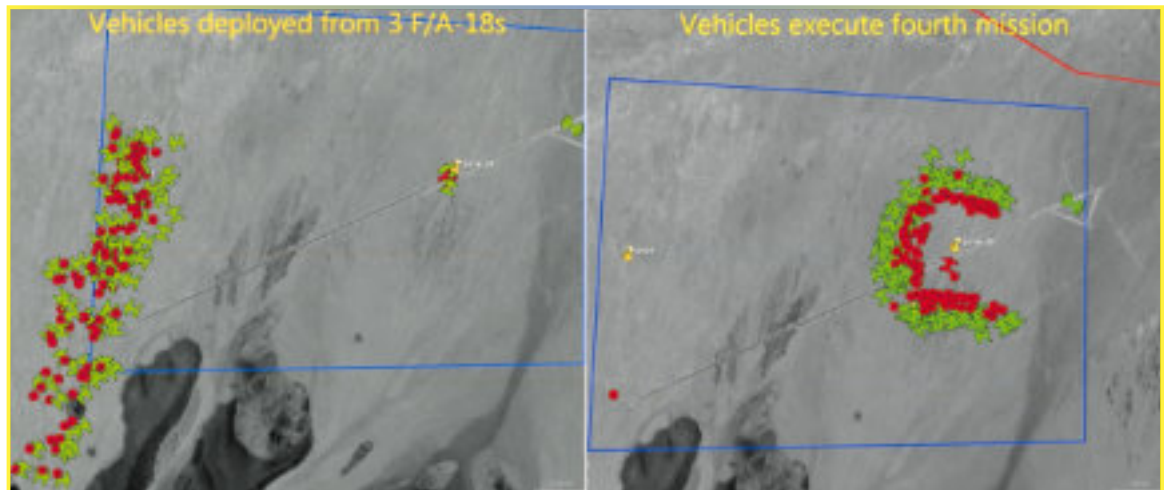


Abbildung 1: Schwarmverhalten ist ein typisches Beispiel von Selbstorganisation und Emergenz. Dessen technische Realisierung ist insbesondere für die Roboterentwicklung und das Militär von Interesse. Diese zwei Bildschirmfotos eines Videos von 2017 zeigen, wie über 100 Minidrohnern, die von drei F18-Kampfflugzeugen ausgesetzt wurden, sich selbstständig formieren und auf ein Ziel hinfliegen. Der Vorteil von Schwärmen: Sie sind nur schwer anzugreifen (Abb.: US-Verteidigungsministerium).

Selbstorganisationsprozessen verdanken wir unser Dasein. Erst nach und nach entdecken wir jedoch den großen Umfang ihres Wirkens – und fangen an, ihn für chemische, biologische und technische Entwicklungen zu nutzen (Abbildung 1).

Der Begriff der Selbstorganisation ist eng verwandt mit demjenigen der Emergenz. Er bedeutet „auftauchen“; plötzlich wird etwas Neues sichtbar, wo zuvor nur eine Ansammlung von Einzelteilen war. Aus vielen einzelnen

Elementen entsteht unvorhersehbar etwas Komplexes, im Sinne von: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Allerdings: Nicht immer bedarf es der Selbstorganisation, um Emergenz hervorzurufen, und Selbstorganisation andererseits führt nicht automatisch zu emergenten Phänomenen. Dieser Artikel zeigt Abgrenzungen der Begriffe und stellt neue technisch-wissenschaftliche Entwicklungen vor, die Selbstorganisation nutzen.

## 1. Selbstorganisation oder Emergenz?

Wie in der Einleitung gesagt: Nicht immer bedarf es der Selbstorganisation, um Emergenz hervorzurufen. Im Alltag werden die Begriffe oft synonym verwendet, aber es lassen sich Unterschiede herausarbeiten. Das Zusammenspiel verschiedener Effekte bei Systemen höherer Komplexität führt dann allerdings wieder dazu, dass es praktisch nicht gelingt, Emergenz und Selbstorganisation zu trennen. Dennoch ist ein Blick auf die Basis der Begriffe lehrreich, denn dies lässt den Grad der Ordnung beobachteter Prozesse einschätzen.

Der Autor:

Fasziniert von komplexen Systemen: Rolf Kickuth (67) ist Chemiker und Verleger der CLB. 1990 entwickelte der Autor mit der „AXON“ eine Zeitung für künstliche Intelligenz, insbesondere künstliche neuronale Netze. In den späteren 1990er Jahren war er auch Chefredakteur des „Informatik-Spektrum“, der Hauszeitschrift der Gesellschaft für Informatik. Ebenso war er seit 1985 zunächst beim Verlag Chemie, später in seinem Verlag „Rubikon“ für die Schweizer Wochenzeitung „Chemische Rundschau“ redaktionell tätig, von 1994-1999 als Leiter der Redaktion Deutschland.



### 1.1 Emergenz ohne Selbstorganisation

Typische Beispiele fehlender Selbstorganisation beim Auftreten von Emergenz sind Druck und Temperatur von Gasen. Von einzelnen Atomen oder Molekülen kann man keinen Druck und keine Temperatur angeben, bestenfalls eine zu einem Bezugspunkt relative Geschwindigkeit. Selbst im niedrigsten Bereich von Ultrahochvakuum bei einem Druck von einem Milliardstel Hektopascal (Millibar) enthält ein Volumen von einem Liter noch zehn Millionen Moleküle, die jedoch praktisch nur noch mit den Behälterwänden kollidieren. Ihre mittlere freie Weglänge – diejenige ohne Zusammenstoß mit anderen Molekülen – beträgt nämlich im Ultrahochvakuum rund zehntausend Kilometer. Wann tritt nun Druck auf? Es existiert offenbar für jedes System eine größere Anzahl von miteinander wechselwirkenden Bausteinen, die für die Entwicklung einer emergenten Eigenschaft notwendig ist.

#### 1.1.1 Druck durch Heliumatome im Fulleren

Dabei kommt es auch noch auf die Umgebung an. Anfang der 1990er Jahre beschäftigte sich Helmut Schwarz von der TU Berlin, später Präsident der Alexander von Humboldt-Stiftung, mit der Frage, ob man nicht in den 1985 entdeckten Fullerenen andere Atome einschließen könnte. Nach etlichen Versuchen gelang es, in  $C_{60}$ -Moleküle Helium einzuschließen, pro Molekül ein oder zwei Heliumatome. Der Fulleren-Käfig erwies sich als so stabil, dass selbst der Beschuss mit starker Laserstrahlung den eingefangenen Atomen keinen Ausgang öffnete. Lieber gab ein Fulleren dann einige C-Atome ab, verkleinerte sich also, als dass es den Gast freiließ. Die Heliumatome blieben gefangen, obwohl beispielsweise zwei Heliumatome in einem  $C_{60}$ -Molekül nach einer Abschätzung von Schwarz einen Druck von 2000 bis 4000 Atmosphären auf ihren Käfig ausübten; das ist wohl das kleinste Beispiel für die Emergenz von Druck [1]. Vergleichbare Überlegungen über minimale Bausteinzahlen gelten bei der Frage, wann eine Flüssigkeit vorliegt. Ein einzelnes Wassermolekül ist nicht als flüssig zu kennzeichnen.

Ein Schlüsselwort in dem vorangegangenen Absatz ist „wechselwirken“. Betrachtet man ein ideales Gas, beschränkt sich die Wechselwirkung der Atome lediglich auf gegenseitige elastische Stöße; aus deren Anzahl und Intensität lassen sich Druck und Temperatur ableiten. Es gibt aber auch zwischen Atomen und Molekülen weitere Formen von Wechselwirkungen; aus deren Zusammenspiel erwachsen auch Selbstorganisationsprozesse, die wiederum die Basis für Emergenz sein können.

Emergenz fügt neben einer Erhöhung der Ordnung noch eine Qualität hinzu: Emergenz bedeutet das Auftreten einer völlig neuartigen Makroebene – neu bezüglich Eigenschaften, Verhaltens, Strukturen, die sich aus den Wechselwirkungen zwischen den Teilen der Mikroebene ergibt. Anders ausgedrückt: Das Wesen der Emergenz beschreibt man am besten als das

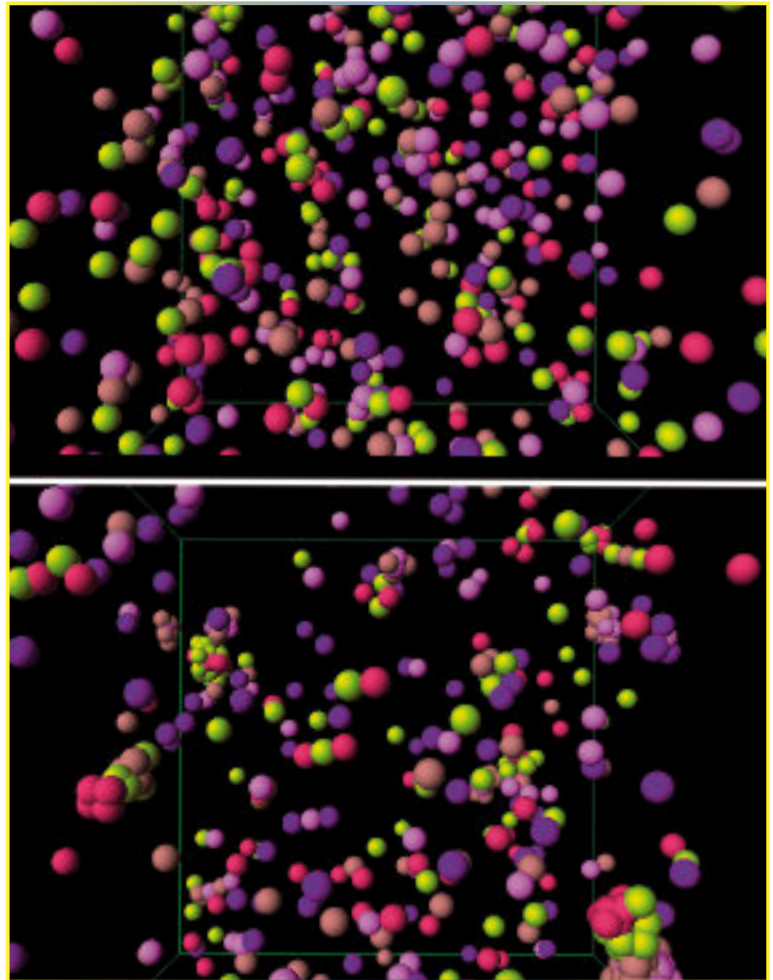


Abbildung 2: Was zu Anfang ein buntes, zusammengewürfeltes Gemisch kleiner und größerer Kugeln ist, wird mit ein paar Beziehungsregeln nach einem bestimmten Zeitablauf zu selbstorganisierten Haufen (Abb.: Kickuth).

Auftreten eines globalen Verhaltens, das neuartig ist, sich nicht aus den Bestandteile des Systems erschließt. Wenn eine dieser Eigenschaften nicht vorhanden ist, haben wir keine Emergenz.

### 1.2 Selbstorganisation ohne Emergenz

Schwieriger ist schon die Darstellung, inwiefern es Selbstorganisation ohne Emergenz geben soll. Im wahrsten Sinne offensichtlich ist Musterbildung durch Selbstorganisation (Abbildung 2). Erscheint – emergiert – da nicht ein Muster, wo vorher keins war? Nun: Hier hilft eine mögliche Definition weiter: Demnach ist Selbstorganisation gekennzeichnet durch die dynamische und adaptive Steigerung einer Ordnung oder Struktur ohne externen Einfluss [2].

Das Hauptmerkmal der Selbstorganisation ist hingegen ein anpassungsfähiges Verhalten, das sich autonom eine erhöhte Ordnung oder Struktur schafft und aufrechterhält. Selbstorganisation baut also eine Ordnung auf, die keine grundlegend neuen Eigenschaften mit Blick auf die Einzelelemente hat, aber eine höhere Komplexität aufweist. Emergenz übrigens führt zu einem Erscheinungsbild, das eher eine geringere Komplexität vermittelt als die Summe und Interaktion der Einzelteile darstellt.

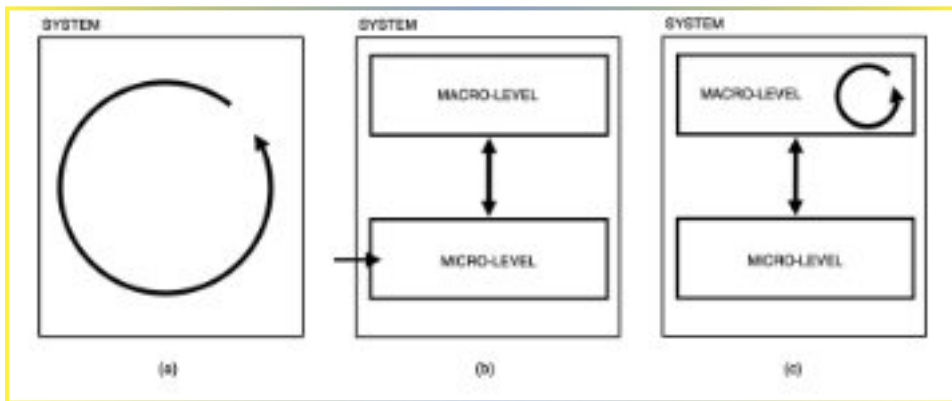


Abbildung 3: Selbstorganisation und Emergenz: (a) illustriert ein System der Selbstorganisation ohne Mikro-/Makroeffekt; es gibt keinen Außeneinfluss auf das System. Der Kreis Pfeil symbolisiert den inneren Organisationsprozess. (b) zeigt hingegen ein System ohne innere Selbstorganisation, aber mit Mikro-/Makroeffekt – typisch für ein emergentes System. (c) ist ein emergentes System, das Selbstorganisation in der Makroebene aufweist (Abbildung: [1]).

### 1.3 Oftmals ein kombiniertes Auftreten

Neben den hier gekennzeichneten Unterschieden zwischen Emergenz und Selbstorganisation gibt es aber auch Gemeinsamkeiten. So handelt es sich bei beiden Phänomenen um dynamische Prozesse, die sich im Laufe der Zeit entwickeln. Beide sind zudem robust. Allerdings ist Emergenz robust hinsichtlich seiner Gesamtfunktion, auch wenn einzelne der spezifischen Teile, die die emergenten Eigenschaften verursachen, ausfallen. Das Versagen eines einzelnen Teils führt also nicht zu einem vollständigen Versagen der emergenten Eigenschaft. Selbstorganisationsprozesse hingegen sind robust hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit an Veränderungen sowie ihrer Fähigkeit, die erhöhte Ordnung aufrechtzuerhalten.

Beide Phänomene lassen sich also unterschiedlich beschreiben, sind dennoch verwandt – und nicht nur das: Sie sind häufig auch in Kombination anzutreffen, ergänzen sich dann in ihren Eigenschaften. Das Verhältnis von Emergenz und Selbstorganisation verdeutlicht Abbildung 3.

Man kann also Systeme beobachten, die selbstorganisierend sind, und deren höher geordneten Elemente dann ein emergentes Verhalten zeigen. Es kann mehrere positive Rückkopplungen geben, auch negative und sich gegenseitig beeinflussende. Das kann zu Verstärkungseffekten führen, die zu einem Mitreiß-Effekt führen – in flüchtenden Gruppen, in Schwärmen, bis sich fast alles an diese zunächst zufällig entstandene Bewegung angepasst hat. Die Gesamtkonfiguration ist dann stabil, hört auf, zu wachsen; das System hat seine Ressourcen zur Ausbildung dieses Zustands erschöpft. Auf diese Weise kann sich ein emergentes System selbst organisieren.

Zusammengefasst lassen sich Emergenzen erster Ordnung allein auf die äußere geometrische bzw. Kraftfeld-Form der beteiligten Elemente zurückführen. Ein Beispiel dafür ist die Oberflächenspannung des Wassers, die sich aus der Wirkung der Wasserstoffbrückenbindungen der Wassermoleküle ergibt.

Emergenzen zweiter Ordnung beziehen neben

strukturellen Eigenschaften der Elemente auch den zeitlichen Verlauf eines Prozesses ein, so etwa das Wachsen von Schneekristallen oder von Eisblumen am Fenster.

Bei Emergenzen dritter Ordnung kommt zur Struktur der Elemente und zum Zeitverlauf ihrer Interaktion noch ein ihnen innewohnendes Programm zum Tragen, das die Bedingungen für die Emergenz setzt. So ein Konstrukt findet man natürlich bei dem genetischen Code von Lebewesen, der ihre räumlichen und zeitlichen Entfaltungsmöglichkeiten mitbestimmt.

### 1.4 Nichtlinearitäten

Selbstorganisationsprozesse beinhalten typischerweise auch nichtlineare Phasen: kleine Änderungen haben eine große Wirkung. Man spricht auch von schwacher Kausalität: Haben bei starker Kausalität ähnliche Ursachen ähnliche Wirkungen, lassen sich bei schwacher Kausalität sehr unterschiedliche Wirkungen auf ähnliche Ausgangssignale beobachten. Dies ist der Fall, wenn sich die Anfangsbedingungen in der Nähe eines labilen Gleichgewichts befinden: ein sehr kleiner Stoß auf eine Kugel, die sich im labilen Gleichgewicht auf einer Anhöhe befindet, kann Rollen in verschiedenste Richtungen verursachen. Als plastischer Begriff für dieses Verhalten hat sich der *Schmetterlingseffekt* etabliert: Das Schlagen des Flügels eines Schmetterlings in China kann in Deutschland einen Sturm verursachen. Ein Beispiel dafür beschreibt das *Dreikörperproblem*: Wenn etwa mehr als zwei Himmelskörper gravitativ aneinander gebunden sind, können minimale Änderungen der Ausgangssituation im Laufe der Zeit zu großen nichtvorhersagbaren Änderungen der Bahnen und Positionen führen.

Nichtlineare Systeme sind allgemein dargestellt Systeme, welche auf Eingangssignale (Systemreize) nicht in jedem Bereich proportional antworten (Abbildung 4). Sie sind wesentlich komplexer als lineare Systeme. Auch wenn man für viele Anregungen eines solchen Systems sein Verhalten, seine Antworten kennt, heißt es trotzdem, für neue Reize kann man das Verhalten nicht voraussehen. Da es zu nichtlinearen Systemen keine geschlossene mathematische Theorie gibt, gibt es auch keine allgemeine Methode zur Analyse unbekannter nichtlinearer Systeme.

#### 1.4.1 Statische nichtlineare Systeme

Man unterscheidet zudem noch statische und dynamische nichtlineare Systeme. Bei statischen erfolgt die Antwort unmittelbar auf das Eingangssignal. Sie lassen sich im allgemeinen durch algebraische Gleichungen beschreiben.



1.4.2 Dynamische nichtlineare Systeme

Dynamische nichtlineare Systeme besitzen hingegen Speicherelemente, ein „Gedächtnis“. Ihre Antwort hängt von der Stärke vorhergehender Eingangssignale, von einer „Vorgeschichte“ ab.

1.4.3 Positive Rückkopplung

Um einen nichtlinearen Effekt zu erreichen, bedient sich die Selbstorganisation einer positiven Rückkopplung. Oftmals ist Selbstorganisation auch verbunden mit Phasenwechseln, im physikalischen Beispiel gezeigt als der Wechsel von flüssig zu fest.

Allgemein versteht man unter Selbstorganisation das spontane Entstehen neuer Strukturen in offenen dynamischen Systemen, das auf das Zusammenwirken von Teilsystemen zurückgeht. Selbstorganisation führt zwar zu Strukturen höherer Ordnung, allerdings auf Kosten einer Erhöhung der Entropie des Gesamtsystems. Das bedeutet, dass für die Selbstorganisation Energie hinzugefügt werden muss.

2. Ordnung und Chaos

Im thematischen Umfeld von Selbstorganisation und Emergenz fällt gelegentlich noch der Begriff „spontane Ordnung“. Damit ist im Grunde ebenfalls Selbstorganisation gemeint. Allerdings nimmt man dabei hauptsächlich Bezug auf den Gegenpart von Ordnung, das Chaos; beschrieben werden meist Prozesse aus Gesellschaft und Wirtschaft. Spontane Ordnung ist das spontane, ungeplante Aufkommen von Ordnung aus vermeintlichem oder tatsächlichem Chaos.

Chaos – vom griechischen Wortstamm her so etwas wie „gähnende Leere“, und zwar dasjenige nichtlinearer Systeme, bedeutet hingegen nicht Unordnung. Die Bewegungsgleichungen, die solch ein Chaos beschreiben, sind gänzlich deterministisch. Trotzdem ist sein Zustand nach einer bestimmten Zeit wegen der bereits genannten Nichtlinearität, der starken Empfindlichkeit gegenüber den Ausgangsbedingungen, völlig unbekannt. Solch ein Chaos heißt daher auch deterministisches Chaos.

2.1 Chaos-Kriterium Periodenverdopplung

Chaotische Systeme verhalten sich also nicht zufällig; ihr Verhalten ist nur nicht vorhersagbar. Man kennt mittlerweile Kriterien, wann die Vorausberechenbarkeit solcher Systeme aufgrund ihres nichtlinearen Verhaltens in ein chaotisches übergeht. Das wahrscheinlich bekannteste Beispiel dafür ist der Periodenverdopplungsübergang: Bei Übergang von „normalem“, vorausberechenbarem periodischem Verhalten entsprechender dynamischer Systeme (Pendel, Planetenbahnen) zum Chaos nimmt die Oszillationsperiode stufenweise um den Faktor zwei zu. Dann wird das Verhalten unvorhersagbar, irregulär.

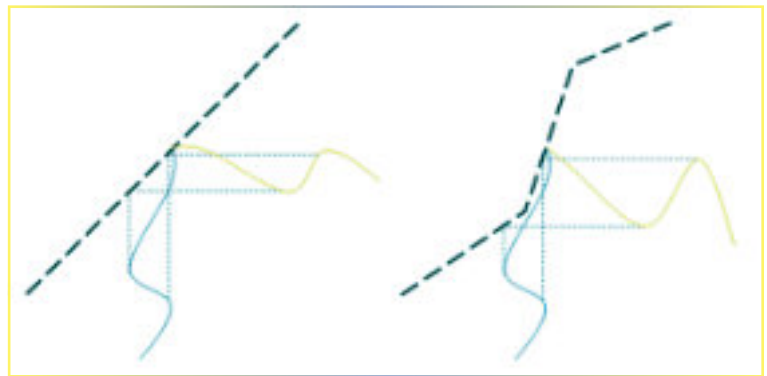


Abbildung 4: Statisches nichtlineares System: Veranschaulichung einer linearen Kennlinie (= lineares System, linkes Diagramm) gegenüber einer nichtlinearen Kennlinie (= nichtlineares System, rechtes Diagramm). Die gestrichelte Diagonale veranschaulicht die lineare bzw. nichtlineare Transformation, die blaue Kurve ist das Eingangs-, die gelbe das Ausgangssignal (Abb.: kku).

2.1.1 Das Elektron am Rande des Weltalls, Billard und Lotto

Dazu zwei erstaunliche Beispiele: Man nehme das kleinste Elementarteilchen, ein Elektron, platziere es möglichst weit weg, an den Rand des Weltalls, und betrachte die kleinstmögliche Kraft, die von ihm ausgeht, seine Gravitation: Sie reicht aus, um hier auf der Erde die Bahn eines Sauerstoffmoleküls bereits nach der 56. Kollision mit anderen Sauerstoffmolekülen unberechenbar zu machen.

Nun stößt so ein Molekül unter atmosphärischen Bedingungen pro Sekunde milliardenfach mit Seinesgleichen zusammen. In einem Gas baut sich Chaos also außerordentlich schnell auf. Aber auch die Bahn einer Billardkugel etwa wird schon nach der 9. Karambolage unberechenbar, nur weil die Gravitation eines Mitspielers Einfluss auf die Kugel nimmt (Abbildung 5; [3]). Ähnlich sieht es übrigens bei den Lottokugeln aus.

2.2 Musterentstehung

Nichtlineare dynamische Systeme können neben Chaos auch andere Verhaltensweisen zeigen, wie beispielsweise Konvergenz gegen einen Ruhezustand oder gegen einen periodischen Grenzyklus.

2.2.1 Mandelbrotmenge

Welches Verhalten auftritt, kann von den Anfangsbedingungen oder auch von anderen Kontrollparametern abhängen. Eine grafische Darstellung der entsprechenden Einzugsgebiete für bestimmte Verhaltensweisen als Funktion dieser Parameter ist oft fraktal. Das bekannteste Beispiel für die Darstellung eines Fraktals ist wohl das *Apfelmännchen*, wissenschaftlich die Darstellung einer Mandelbrotmenge, die sich aus einer mathematischen Folge ergibt. Das Bildungsgesetz, das der Folge zugrunde liegt, ist die einfachste nichtlineare Gleichung, anhand der sich der Übergang von Ordnung zu Chaos durch Variation eines Parameters provozieren lässt. Der Übergangsbereich zu chaotischem Verhalten zeichnet sich dabei



Abbildung 5: Die Bahn einer Billiardkugel etwa wird schon nach der 9. Karambolage unberechenbar, nur weil die Gravitation eines Mitspielers Einfluss auf die Kugel nimmt (Abb.: CLB-Archiv).

durch bestimmte Eigenschaften aus, wie beispielsweise plötzliche qualitative Änderungen des Verhaltens, die auch als Bifurkation bezeichnet werden. Das Titelbild dieser CLB wurde übrigens auch mit einem abgewandelten Mandelbrot-Generator erzeugt und mit einem astronomischen Foto hinterlegt (Abbildung 6).

### 2.2.2 Attraktoren

Wenn sich etwas deterministisch chaotisch bewegt, kann dabei dennoch quasi ein Muster im Raum auftauchen. Das lässt sich erkennen, wenn man Werte, die man aus den dieses System beschreibenden Gleichungen erhält, als Punkte in einem Raum (Phasenraum) anordnet. Die Koordinatenachsen des Phasenraums eines chaotischen Systems sind durch den Satz seiner unabhängigen Zustandsgrößen und deren Geschwindigkeiten gegeben. Beim Beispiel Pendel wird der Phasenraum durch den Auslenkwinkel und die zugehörige Winkelgeschwindigkeit aufgespannt.

Die einzelnen Punkte eines Musters im Phasenraum sind zwar wiederum nicht vorhersehbar, d. h. wenn dem Punkt 1 ein Punkt 2 folgt, muss einem Nachbarpunkt 3 nicht auch ein Punkt 4 in ähnlicher Relation wie zwischen den Punkten 1 und 2 folgen. Dennoch ergeben alle diese Punkte ein Muster. Für die Punkte im Phasenraum gesprochen bedeutet dies: Trotz unterschiedlicher Anfangsbedingungen streben sie immer auf dieselben Bahnen zu, einem „Attraktor“ – oder auf ähnliche Bahnen, aber immer irgend-

wie abweichend, mit fraktaler Geometrie; das nennt man dann „seltsamer Attraktor“.

### 2.3 Constructal Theory oder Energy Dissipation Pathways

Es gibt noch andere Prozesse, die aus Chaos heraus zu Selbstorganisation führen. So wird ein Mechanismus postuliert, der maßgeblich zum Ablauf der Evolution und zur Entstehung des Lebens beitragen soll. Gemeint ist damit das sich selbstorganisierende Verzweigen von Energieflüssen. So formulierte der rumänisch-Amerikanische Ingenieur und Physiker Adrian Bejan von der Duke Universität eine Theorie, die „Constructal Theory“ (CT): „For a finite size system to persist in time – to live, it must evolve in such a way that it provides easier access to the imposed currents that flow through it.“ [4]

Ihre Grundaussage ist: Damit ein endliches fließendes System im Lauf der Zeit bestehen oder überleben kann, muss das System seine Konfiguration so entwickeln, dass die Ströme, die ihn ihm fließen, einen immer besser werdenden Durchgang finden. Wichtig dabei ist, dass das System auch die Freiheit hat sich zu entwickeln. Jeremy England, Physiker am MIT formuliert in ähnlicher Hinsicht eine „dissipation driven adaption of matter“, der amerikanische Erfinder Alexander Nugent beschreibt dieses Entwicklungsprinzip als „energy dissipation pathways competing for conducting resources“. Ich selbst habe 2014 in der CLB postuliert: a) Je weiter ausgelaufen eine Evolutionsstufe ist – man könnte im Hinblick auf den Urknall auch sagen: je geringer die ursprüngliche Energiedichte wird, desto höher ist die Differenzierung von Objekten, Strukturen, Informationen in diesen Evolutionsstufen. b) Die Strukturen, Prozesse und Systeme entwickeln sich am schnellsten, am effektivsten, in denen der gesamte Informationsfluss am höchsten ist, am besten funktioniert.

Als Beispiele gelten in der Natur der Blitz, Flussdeltas, das verästelte System, mit dem Pflanzen Wasser und Nährstoffe bis in die Blätter transportieren oder das Netz der Blutgefäße und sowie biologische neuronale Netze (Abbildung 7). In unserer Kultur zeigen dies die Straßen- und Infrastrukturnetze, die immer wieder so adaptiert werden, dass je nach Transportart Menschen oder Güter möglichst effizient an ihr Ziel kommen. Die CT erklärt auch folgende menschliche Eigenschaft: Von der Luftröhre bis zu den Lungenbläschen, die Alveolen genannt werden, zählt man durchschnittlich 23 Verzweigungen. In die entsprechende Rechnung fließen u. a. die Gesamtlänge der Atemwege ein, die gesamte Alveolarfläche sowie der Gesamtwiderstand des Sauerstofftransports im Atmungsbaum. Ebenso lässt sich die Proportionalität zwischen der optimalen Fluggeschwindigkeit fliegende Körper (Insekten, Vögel, Flugzeuge) und ihre jeweiligen Massen erklären.

### 2.3.1 CT gegen Gleichmacherei

Die CT wurde auch auf das System Sonne, Erde und Weltall angewendet. Betrachtet man das Ganze als eine gigantische Wärmemaschine, so wird die geleistete Arbeit zum Antrieb der Meeres- und Luftströme genutzt. Auch Betrachtungen von Umwelt- und gesellschaftlichen Vorgängen erlaubt die Constructal Theorie – und gibt teilweise Erkenntnisse, die insbesondere dem Kommunismus nicht gut schmecken werden: Der Energieverbrauch pro Kopf in den entwickelten Ländern beispielsweise ist höher als in den unterentwickelten. Man könnte aus Überlegungen der Gerechtigkeit anstreben, dass wir zu Gunsten der anderen unseren Verbrauch reduzieren und möglichst eine Gleichverteilung anstreben sollten. Eine Maßnahme dazu wäre, pro Kopf der Weltbevölkerung ein fixes CO<sub>2</sub>-Kontingent festzulegen.

Allerdings: Unsere Massenströme (Güter, Energieträger) sind *notwendigerweise* nicht gleichmäßig verteilt, denn Fortschritt und Optimierung besteht gerade darin, mehr Masse, Information etc. über längere Distanzen oder über gleiche Strecken in kürzeren Zeiten entlang bestimmter Kanäle zu transportieren. Die CT zeigt nun, dass dafür nicht Gleichmäßigkeit die beste Lösung ist. Dies führt letztendlich zum Stillstand. Nach der CT setzt sich ein System durch, welches seine Unzulänglichkeiten so verteilt, dass der Gesamtwiderstand minimal wird. Hierzu verlagert es Kanäle mit großem Widerstand in Gebiete mit geringem Transportaufkommen [5].

### 2.4 Quantenchaos, Determinismus, Zufall

Nicht zu unterschlagen: Auch mit der Quantenwelt lässt sich Chaos in Verbindung bringen. Bekanntlich sind Ort und Impuls eines Objektes nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmbar. Diese Unschärfe ist bei makroskopischen Systemen gewöhnlich vernachlässigbar. Da sie bei chaotischen Systemen jedoch beliebig wächst, nimmt sie früher oder später makroskopische Dimensionen an. Hier kommt auch der Zufall zur Sprache. Es gibt ja auch stochastisches Chaos bzw. stochastische Prozesse, in denen nur der Zufall herrscht. Beispiele dafür sind etwa die Brownsche Bewegung oder Weißes Rauschen.

In der Quantenwelt gilt der radioaktive Zerfall als Prototyp für zufällige Ereignisse. Tatsächlich ist bis heute letztlich noch unentschieden, ob es sich dabei um einen echten Zufall handelt, oder auf die Deterministik der Welt auch in diese Bereiche vorgedrungen ist und noch unentdeckte – deterministische – Vorgänge den radioaktiven Zerfall verursachen. Die Einschätzung, ob unsere Welt in ihren Grundbausteinen deterministisch oder indeterministisch sei, hängt davon ab, welche Interpretation und philosophische Haltung man einnimmt [6].

Von den letztgenannten Aspekten abgesehen gilt jedoch, dass man (deterministisches) Chaos, Emergenz und Selbstorganisation in ihrer Entwicklung beschreiben kann.

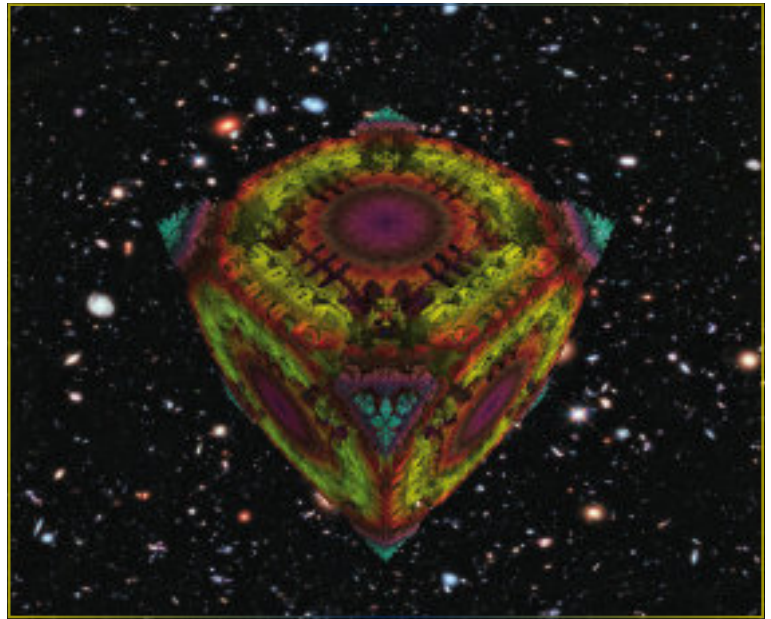


Abbildung 6: Mit einem Mandelbrotgenerator des Programms „Visions of Chaos“ erzeugte Grafik, hinterlegt mit einem Bild des Weltraumteleskop-Hubble-Projektes eXtreme Deep Field XDF (Abb.: Kickuth/NASA, ESA, G. Illingworth, D. Magee und P. Oesch (UCSC), R. Bouwens (Leiden Obs.) und das XDF Team).

## 3. Selbstorganisation technisch und wissenschaftlich nutzen

Ein selbstorganisierendes System zeigt oft sehr gute Eigenschaften bezüglich der Skalierbarkeit und der Robustheit gegenüber Parameteränderungen oder Störeinflüssen. Sie eignen sich daher als Grundlage für die Konstruktion komplexer technischer Systeme. Allerdings gibt es keinen einfachen Algorithmus, um die notwendigen lokalen Regeln für ein erwünschtes globales Verhalten zu erzeugen. Bisherige Ansätze bauen zum Beispiel auf Versuch und Irrtum auf und erwarten ein grundsätzliches Systemverständnis durch den Ingenieur.

Abbildung 7: Die einführende Illustration des Artikels „The Evolving Design of Our Life“ von Adrian Bejan in der Zeitschrift LA + DESIGN (Ausgabe 09, Frühjahr 2019) zeigt das Adergeflecht als ein Beispiel seiner Constructal Theory.





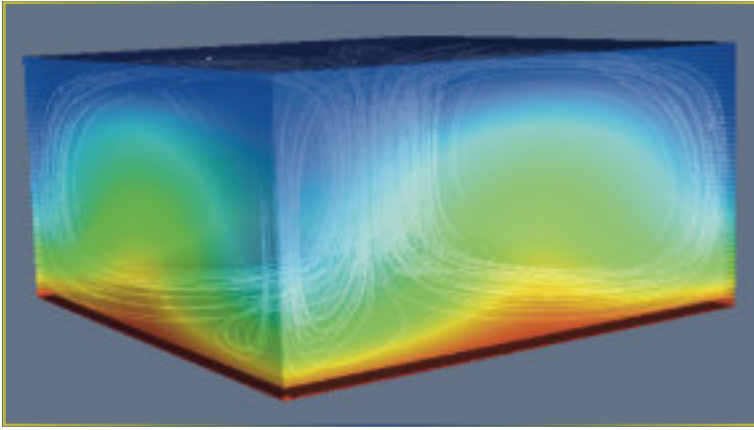


Abbildung 8: Simulation einer Rayleigh-Bénard-Konvektion von einem heißen Boden zu einer kühlen Oberfläche. Kontrollparameter bei diesem Selbstorganisationsprozess ist die zugeführte Wärme; Ordnungsparameter bilden sich unvorhersehbar in der Flüssigkeit aus. Wird die Hitze zu groß, folgen Turbulenzen; es liegt dann Chaos vor.

### 3.1 Synergetik:

#### Wenn Ordnungsparameter versklaven

Für die Entwicklung künstlicher, technischer Systeme ist entscheidend, herauszufinden, wie man Kontrollparameter (s. u.) konfigurieren muss, um gewünschte Ergebnisse zu erhalten. Eine wichtige Theorie zur Selbstorganisation nennt sich Synergetik, formuliert beginnend in den 1960er Jahren von Hermann Haken. Die Synergetik ist die Lehre vom Zusammenwirken von Elementen gleich welcher Art, die innerhalb eines komplexen dynamischen Systems miteinander in Wechselwirkung treten (bspw. Moleküle, Zellen oder Menschen). Sie liefert eine einheitliche mathematische Beschreibung dieser Phänomene, die universell in der Physik, Chemie, Biologie und Soziologie vorkommen.

#### 3.1.1 Beispiel Laser

Ausgangspunkt der Synergetik war die statistische Physik der Nichtgleichgewichtssysteme. Sie behandelte zunächst rein physikalische Systeme der Selbstorganisation fern vom thermodynamischen Gleichgewicht. Sehr bekannt dafür ist der Laser. In ihm bilden sich selbstorganisiert aus einer Vielzahl eingestrahelter Lichtwellen, die ungeordnet, also chaotisch auftreten, Lichtwellen gleicher Frequenz und Phase aus; der Laser emittiert monochromatisches Licht. Grundlage für den Selbstorganisationsprozess sind äußere Einflüsse, die sich Kontrollparameter nennen. Das kann zum Beispiel die Zufuhr von Energie in das System sein. Die Erzeugung von Strukturen höherer Ordnung hat dann andererseits zur Folge, dass „höherwertige Energie“ in „niederwertige Energie“ umgewandelt wird und die Unordnung (Entropie) im Umfeld des betrachteten Systems zunimmt.

Kontrollparameter beim Laser sind die zugeführte Energie sowie auch äußere Geometrien, etwa die Spiegelabstände. Nach anfänglich ungeordneten Bewegungen der Lichtteilchen in dem Lasersystem gewinnt eins die Oberhand, das am besten zu den

Rahmenbedingungen passt. Es wird zum *Ordnungsparameter*. Das Prinzip der Ordnungsparameter besagt, dass das Verhalten, also die Dynamik, der Systemteile eines komplexen Gesamtsystems durch einige wenige Ordnungsparameter bestimmt wird.

Während eines sich selbstorganisierenden Prozesses finden sich zunächst einzelne Elemente des Systems mit gleichen Eigenschaften zufällig zusammen. Unter dem Einfluss von *Kontrollparametern* – im Unterschied zu Ordnungsparametern von außen an das System herangetragen – wie zugeführter Energie oder auch äußeren Geometrien schließen sich ihnen dann eine Vielzahl anderer Elemente an. Man kann sagen, dass sich die individuellen Elemente durch einen Ordner *versklaven* lassen und sich so ein Phasenübergang bildet: Farbmuster aus vorher einfarbigen Systemen, bevorzugte Bewegungsrichtungen aus vorher zufälligen Bewegungsabläufen.

#### 3.1.2 Beispiel Konvektion

Sehr gut lässt sich dies bei der langsamen Erhitzung von Flüssigkeiten zeigen. Erreicht die Temperaturdifferenz – der Kontrollparameter – zwischen unterer und oberer Oberfläche einen kritischen Wert, setzt eine Bewegung der Flüssigkeit ein, die zur Musterbildung führt. Typisch sind zunächst Rollen; weiterhin können auch komplexe Muster entstehen (Bénard-Rayleigh-Konvektion; Abbildung 8). Welche Konvektionsformen entstehen, ist von Ordnungsparametern abhängig. Diese bilden sich nicht kausal, also nicht vorhersagbar, in der Flüssigkeit aus. Eine entstehende Flüssigkeitsrolle setzt sich dann allerdings durch, ordnet die Ausrichtung anderer Rollen der ihren unter, versklavt sie. Während des Phasenübergangs vom ungeordneten zu geordneten Zustand – von der einfachen Flüssigkeit zu der mit Konvektionsrollen – zeigen sich bereits Eigenschaften von beiden Phasen. Allerdings besteht keine Kausalität zwischen den Phasen. Es kann nicht vorhergesagt werden, welcher neue Zustand durch den Ordner hervorgerufen wird. Diese wie schon erwähnt *Versklavung* bezeichnete Funktion der Ordner ist jedoch keine Einbahnstraße. Die einzelnen Elemente (hier der Flüssigkeit) legen die Tätigkeit des Ordners fest, definieren in sogar. Diese Erscheinung nennt man *zirkuläre Kausalität*; hier erkennt man die Rückkopplung wieder. Einzelne Teile bestimmen auf dem Weg über einen Ordner ihr Verhalten gegenseitig. Im gesellschaftlichen Umfeld findet man eine Entsprechung in der Konsensfindung.

Kleinste Änderungen der Systemstruktur – eine Fluktuation – können eine riesige Auswirkungen auf den Systemzustand haben. Das System verhält sich nichtlinear, ein Verhalten, das wie schon gesagt auch chaotische Systeme aufweisen. Durch die Ordner findet eine Komplexitätsreduzierung und Informationskompression statt. Es ist nicht nötig, das genaue Verhalten der einzelnen Individuen zu kennen, es reicht zu wissen,

welche Ordner für die Individuen maßgebend sind, um ein Modell des Systems zu berechnen.

### 3.2 Schwarmbildung

Bereits angesprochen wurde auch das Beispiel der Schwarmbildung (Abbildung 9). Daran lässt sich gut ein Mechanismus erläutern, der emergente Phänomene mitbestimmt: Die gegenseitige Beeinflussung von Bottom up- und Top down-Prozessen. Bottom up bedeutet dabei: Zwischen den unabhängigen handelnden Einzelementen – Vögeln, Fischen etc. – bilden sich lokale Interaktionen aus, die zu einer globalen Ordnung führen. Das hat jedoch auch einen Top down-Prozess zur Folge: Diese globale Ordnung führt zu einem Bindungsverhalten der Einzelemente. Computersimulationen von Schwärmen durch den US-Informatiker Craig Reynolds (\*1953) zeigten 1986, dass sich Schwarmbildung mit nur drei Regeln beschreiben lässt:

- Bewege dich in Richtung des Mittelpunkts derer, die du in deinem Umfeld siehst (Kohäsion).
- Bewege dich weg, sobald dir jemand zu nahe kommt (Separation).
- Bewege dich in etwa in dieselbe Richtung wie deine Nachbarn (Alignment).

Als Folge dieser Regeln auf Individuenebene ergibt sich eine Gesamtstruktur, ein Schwarm emergiert. Wissenschaftler stellten ferner fest, dass Vögel sich an den sieben Nachbarvögeln ausrichten, was der höchsten Zahl entspricht, die Vögel typischerweise unterscheiden können. Generell halten sie mindestens eine Flügelspanne Abstand zueinander. Bei Richtungsänderungen des Schwarms reagiert nicht unbedingt die Schwarmspitze, jedes Individuum kann eine Richtungsänderung hervorrufen und der ganze Schwarm organisiert sich hierdurch um. Bei Annäherung von Greifvögeln verdichtet sich der Schwarm, um das Anvisieren eines Individuums zu erschweren.

Davon zu unterscheiden sind Zugvögel, die in V-förmigen Formationen fliegen, teils in langen Ketten. Auch dafür fand man Regeln, es langen zwei: 1. Nutze den Auftrieb, den der Flügelschlag eines vor dir fliegenden Vogels verursacht, und 2. nimm dabei eine Position ein, von der aus du ungestört nach vorn blicken kannst.

Technisch nutzt man Mechanismen der Schwarmbildung in der Robotik und – wen wundert es – in der Militärtechnik. Die US Air Force begann im Jahre 1998 mit der Erforschung eines autonomen Drohnensystems, genannt LOCAAS (Low Cost Autonomous Attack System). Dieses Drohnensystem nutzt einen Algorithmus, der auf dem Modell von Craig Reynolds basiert, um als Schwarm fliegen zu können (Abbildung 1).

### 3.3 Geführte Selbstorganisation

Zwischen 2008 und 2009 nahm ein Konzept der geführten Selbstorganisation Gestalt an. Dieser Ansatz zielt darauf ab, die Selbstorganisation für bestimmte Zwecke zu regulieren, damit ein



Abbildung 9: Ein Schwarm von Staren. Die Schwarmbildung lässt sich durch nur drei Regeln beschreiben. Ein Vogel im Schwarm richtet sich nach bis zu sieben Nachbarn aus (Foto: John Holmes).

dynamisches System bestimmte Attraktoren oder Ergebnisse erreichen kann. Dafür schränkt man einen selbstorganisierenden Prozess innerhalb eines komplexen Systems ein. Es werden Grenzen gesetzt für Interaktionen zwischen den Systemkomponenten.

#### 3.3.1 Flüssigkristallbildung steuern

Deutlich zeigt dies eine aktuelle Studie der Selbstorganisation von Flüssigkristallen [7]. Forscher hatten ein spezielles Flüssigkristallmaterial namens HAT6 (2,3,6,7,10,11-Hexakis(hexyloxy)triphenylen;  $C_{54}H_{84}O_6$ ) untersucht, dessen Einzelmoleküle scheibenförmig sind (siehe auch den CLB-Artikel über Flüssigkristalle „Vom Karottenextrakt zur blauen Phase“ in CLB 9/10-2013, Seiten 406-427). Sie ordnen sich unterhalb von etwa 70 Grad Celsius zu einem Flüssigkristall, durch Erhitzen auf rund 100 Grad lässt sich die Ordnung wieder aufheben. Dieses Material füllten die Wissenschaftler in einem Aluminiumoxid-Träger und kühlten es ab. Die zylindrischen Poren waren 17 bis 160 Nanometer (millionstel Millimeter) dick, 0,1 Millimeter lang und in einem hexagonalen Gitter angeordnet.

An DESYS Röntgenlichtquelle PETRA III in Hamburg, der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble (Frankreich) und der National Synchrotron Light Source (NSLS II) auf Long Island (USA) beobachtete man, wie sich das Flüssigkristallmaterial in den Nanoporen verhält. Die Geometrie und die chemischen Eigenschaften der Poren zwingen die Scheibenmoleküle des Flüssigkristalls dabei, sich auf unterschiedliche Weise zu ordnen. Die Porengröße und eine optionale Beschichtung der Porenwand steuern, wie sich die Flüssigkristalle beim Abkühlen organisieren. Dabei können beispielsweise nanometergroße Ringe oder gerade Säulen entstehen (Abbildung 10).

Je langsamer die Temperatur sinkt, desto besser bildet sich die jeweilige Ordnung aus. Mit einer hy-



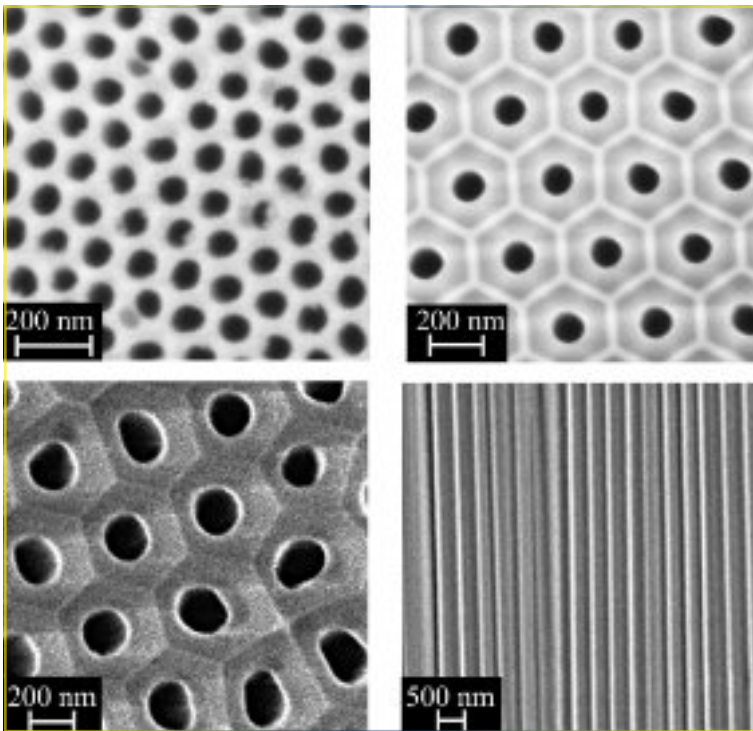
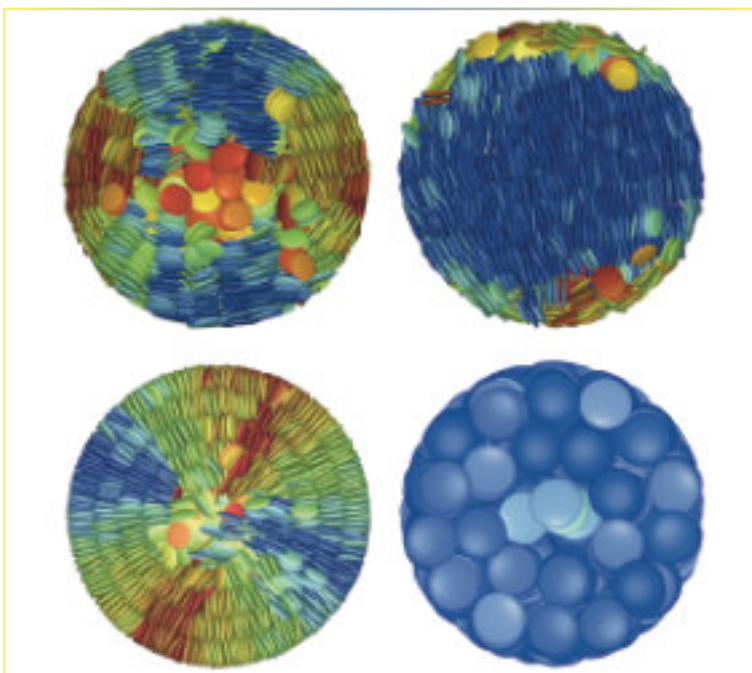


Abbildung 10: Die Nanoporen hatten Durchmesser zwischen 17 und 160 Nanometer und waren rund 0,1 Millimeter lang (seitliche Ansicht unten rechts; Abb.: [7]).

drophilen oder hydrophoben Beschichtung der Porenwand lässt sich dabei steuern, ob sich die scheibenförmigen Moleküle mit der flachen Seite oder ihrer Kante an die Porenwand anlagern. Computersimulationen der Flüssigkristall-Selbstorganisation vervollständigten die Experimente (Abbildung 11).

Die unterschiedlichen kollektiven Ordnungen der Flüssigkristalle haben verschiedene elektrische und

Abbildung 11: Die Simulation der verschiedenen Ordnungen des Flüssigkristalls deckt sich mit den Messungen (Simulation: Marco D. Mazza, MPI für Dynamik und Selbstorganisation und Loughborough University).



optische Eigenschaften. So ist etwa die axiale Anordnung der Moleküle elektrisch leitend, was durch die Zerstörung der Ordnung beim Erhitzen verloren geht. Damit ließen sich beispielsweise schaltbare, eindimensionale Nanodrähte konstruieren.

Die verschiedenen Ordnungen polarisieren zudem das Licht sehr unterschiedlich. Da jede Pore kleiner als die sichtbare Lichtwellenlänge ist, kann mit dem Kollektiv der Nanoporen und als Funktion der flüssigkristallinen Ordnung auf der Einzelporenebene gezielt der Polarisationszustand von transmittiertem oder reflektiertem Licht gesteuert werden. Dieser Effekt geht weit über das hinaus, was mit den Grundmaterialien, also dem Flüssigkristall und Aluminiumoxid, allein möglich ist. Solche maßgeschneiderten und adaptiven Metamaterialien sind die Grundlagen für die sich gerade rasch entwickelnde transformative Optik. Hierbei können Lichtwege in Materialien realisiert werden, die mit klassischen Materialien nicht umzusetzen sind. Beispiele sind extrem dünne optische Linsen mit starker Brechkraft oder Beschichtungen, die Objekte unsichtbar machen.

Auch für verschiedene Arten von Sensoren, zum Beispiel für die Temperatur, eignen sich diese Flüssigkristall-Festkörper Hybride. HAT6 ist nur eine von vielen Flüssigkristallsorten, deren Selbstorganisation sich in nanoporösen Medien für Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften nutzen lässt. Andere Geometrien und damit andere Eigenschaften sind bei anderen Flüssigkristallsorten möglich.

Aus materialwissenschaftlicher Perspektive zeigte die Untersuchung zudem, wie sich die Lücke zwischen der Bottom-up- und der Top-down-Selbstorganisation (S. o.) überbrücken lässt, um mechanisch stabile, makroskopische Materialsysteme zu designen. Bottom-up bedeutet ja, dass sich Strukturen aus kleineren Einheiten bilden. Top-down dagegen, dass Strukturen in großen Einheiten erzeugt werden.

Im vorliegenden Fall wurden die Poren durch ein Ätzverfahren produziert, bei dem sich von selbst regelmäßige Nanozylinder in einem makroskopischen Trägermaterial bilden und relativ zueinander hexagonal anordnen – eine Top-down-Selbstorganisation. Diese Poren wurden mit dem Flüssigkristallmaterial gefüllt, bei dem die einzelnen Moleküle durch Bottom-up-Selbstorganisation Strukturen formen. Das nanostrukturierte Aluminiumoxid bildet also ein mechanisch robustes Gerüst für die eher weichen und fragilen Flüssigkeitsstrukturen, so dass ein selbstorganisiertes Hybridmaterial entsteht, das mechanisch stabil ist und auch in makroskopischen Bauelementen eingesetzt werden kann. Besonders die fehlende mechanische Stabilität ist bei vielen anderen funktionalen Nanomaterialien immer noch eine große Hürde für deren technologischen Einsatz.

### 3.4 Selbstorganisation in der Biologie

Biologische Systeme sind Musterbeispiele von Selbstorganisation und Emergenz, deren Entwicklung

in der des menschlichen Gehirns gipfelt. Entsprechenden Mechanismen will man mit wissenschaftlichen und technischen Mitteln nacheifern. Aktuelle Forschungen verwenden beispielsweise evolutionären Algorithmen zum Entwurf eines selbstorganisierenden Systems. Ein evolutionärer Algorithmus findet Antworten auf gestellte Aufgaben, indem eine Vielzahl von Lösungen dieser Aufgabe rückgekoppelt, bewertet und neu berechnet werden. Als andere Alternative werden oft existierende Systeme in der Natur kopiert.

### 3.4.1 Geführte Selbstorganisation durch Konzentrationssteuerung der wechselwirkenden Bio-Bausteine

Die gerade dargestellte geführte Selbstorganisation erlaubt auch Einflussnahme über die Verfügbarkeit von Reaktanden. Die Wissenschaftler modellierten ein System, in dem eine begrenzte, biologisch relevante Anzahl von Bausteinen durch Selbstmontage zu bestimmten Zielstrukturen zusammengebaut werden [8]. Mithilfe mathematischer Simulationen konnten sie zeigen, dass in einem heterogenen System, bei dem sich also die Zielstruktur aus unterschiedlichen Teilen zusammensetzt, zufällige Effekte dazu führen können, dass sich überhaupt keine korrekten und vollständigen Strukturen bilden, obwohl chemische Berechnungen eigentlich eine perfekte Ausbeute erwarten lassen. Die Wissenschaftler bezeichnen dieses Phänomen als „stochastische Ertragskatastrophe“.

Die Situation lässt sich bildlich beschreiben: Es ist fast so, als wolle man ein Puzzle aus magnetischen Teilchen allein durch Schütteln der Schachtel zusammensetzen. Auch wenn jedes Puzzleteil vom richtigen Nachbarn angezogen wird, ist es sehr schwierig, das Puzzle in endlicher Zeit fertigzustellen. Das Problem wird noch größer, wenn mehrere Exemplare desselben Puzzles in einer Schachtel gleichzeitig zusammengebaut werden sollen, da sie sich dann gegenseitig Teile stehlen können, sodass kein einziges fertig wird. Da man keine Kontrolle über einzelne Teile hat, ist diese Ertragskatastrophe ein Effekt des Zufalls

Prinzipiell geht man davon aus, dass der Ertrag besser ist, wenn die Strukturen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander gebaut werden. Das heißt, die Initiierung neuer Strukturen muss viel langsamer als deren Wachstum erfolgen. Die Wissenschaftler haben jedoch festgestellt, dass insbesondere bei kleinen Systemen Schwankungen in der Verfügbarkeit der verschiedenen Teile die Initiierung neuer Strukturen begünstigen, sodass der Selbstmontageprozess unerwünschter Weise mit vielen unvollständigen Strukturen endet. Die Studie legt nahe, dass die Konzentration der verschiedenen Bausteine streng kontrolliert werden muss, damit effizient funktionelle Wirkstoffe hergestellt werden können.

### 3.4.2 Musterbildung bei Proteinen

Viele Prozesse in lebenden Organismen beruhen auf der korrekten Bildung biologischer Muster. Forscher haben nun minimale Funktionselemente der Musterbildung identifiziert und ein Modellsystem entwickelt, mit dem sich das Phänomen grundlegend untersuchen lässt.

Proteine etwa organisieren sich in lebenden Zellen selbst, um Schlüsselfunktionen wie Zellteilung, Kommunikation oder Fortbewegung zu ermöglichen. Die Teilung des stäbchenförmigen Bakteriums *E. coli* beispielsweise wird durch zwei sogenannte Min-Proteine gesteuert, MinD und MinE. Diese Proteine pendeln zwischen den beiden Enden der Zelle hin und her und erzeugen dabei ein Muster, das die Teilung in der Nähe der Zellpole verhindert, aber nicht in der Mitte der Zelle. Das System kann im Labor nachgebaut werden, sodass die für die Musterbildung notwendigen Funktionseinheiten kontrolliert und mithilfe von Mutationen manipuliert werden können.

Die Wissenschaftler haben dieses System nun weiter vereinfacht und die minimalen Komponenten identifiziert, die für eine Musterbildung notwendig sind [9]. Dazu schufen sie eine minimalistische Version von MinE, indem sie das Protein in eine Reihe funktioneller Sequenzen unterteilten, und untersuchten, welche der Sequenzen für die Musterbildung essentiell sind. Dabei zeigte sich, dass die kurze Sequenz mithilfe der MinE mit MinD interagiert, allein nicht ausreicht. Indem sie nacheinander weitere funktionelle Sequenzen von MinE anfügten, gelang es den Wissenschaftlern, mehrere minimale musterbildende Proteinmutante zu entwickeln. Dabei stellten die Wissenschaftler fest, dass mindestens eine weitere funktionelle Sequenz erforderlich ist. Dies kann entweder eine Sequenz für die Membranbindung sein oder eine Sequenz, über die sich das Molekül an weitere gleichartige Moleküle bindet.

Auf der Basis dieser Ergebnisse hat man ein mathematisches Modell entwickelt, das erklärt, warum diese Motive nötig sind, und wie sie die Musterbildung ermöglichen. Mit diesem Modell kann nun untersucht werden, welche Funktionsmerkmale, unabhängig von einem bestimmten Proteinsystem, kombiniert werden müssen, um eine Selbstorganisation und Musterbildung in der Biologie zu ermöglichen.

### 3.4.3 Schleimpilzintelligenz entschlüsselt

Kürzlich hat man auch den Mechanismus des komplexen Verhaltens im Schleimpilz (*Physarum polyce-*

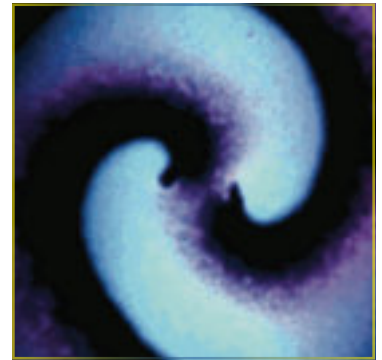


Abbildung 12: Das dynamische Verhalten von Min-Proteinen wurde in vitro unter Verwendung künstlicher Lipiddoppelschichten als Nachahmer für die Zellmembran rekonstituiert. Das erste Muster, das so erzeugt wurde, waren spiralförmige MinD-Wellen, die von MinE verfolgt wurden. Bemerkenswert ist, dass sich MinD und MinE abhängig von den Reaktionsbedingungen in einer großen Vielfalt von Mustern selbst organisieren können [10].



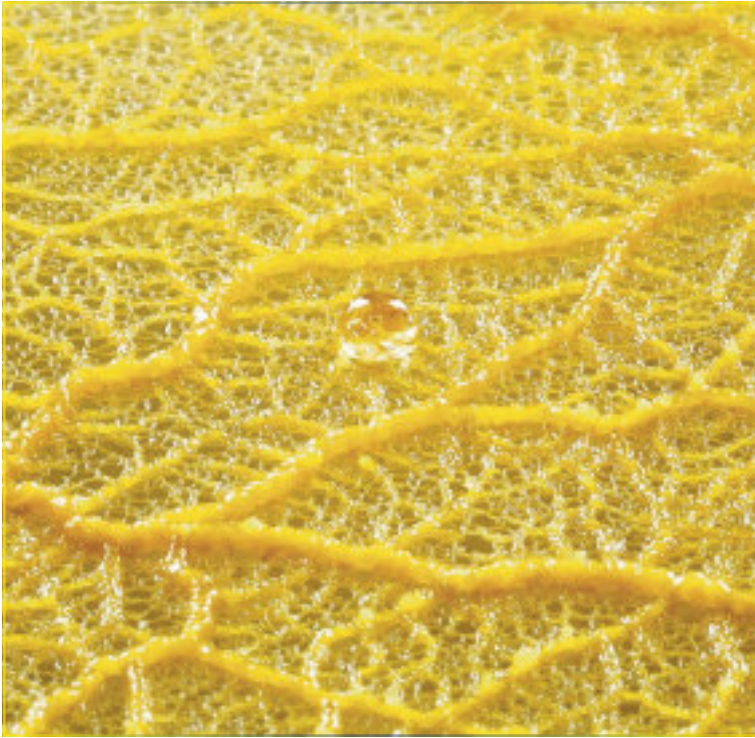


Abbildung 13: Ein kleiner Nahrungsreiz auf dem netzwerkförmigen Körper des Schleimpilzes *Physarum polycephalum* (Abb.: Natalie Andrew).

*phalum*) ergründet; er beruht ebenfalls auf Selbstorganisation [11]. Das Interessante an dem Pilz: Er löst komplexe Aufgaben. Beispielsweise findet er den kürzesten Weg zwischen zwei Nahrungsquellen – und das, obwohl der Schleimpilz kein Nervensystem besitzt und nur aus einer einzigen, zu einem Netzwerk geformten Zelle besteht.

In einem Schleimpilz strömt das flüssige Zytoplasma durch die Adern seines Netzwerks hin und her. Konzentrische Kontraktionen der Adern treiben die

rhythmische, peristaltische Strömung an. Um herauszufinden wie Informationen in diesem Netzwerk verschickt werden, untersuchten die Forscher zunächst die Reaktion des Schleimpilzes auf einen lokalen Nahrungsreiz (Abbildung 13). Dabei beobachteten sie eine erhöhte Kontraktion der Adern, die sich im Adernetz ausbreitet. Der Anstieg der Kontraktionen bewegt sich mit einer Geschwindigkeit, die der des strömungsbasierten Transports entspricht.

Basierend auf den Beobachtungen entwickelte man parallel dazu ein mathematisches Modell. Dieses Modell und die Beobachtungen unterm Mikroskop erklären das Prinzip, wie Informationen in den Adern des Schleimpilzes verschickt werden: Ein Reiz setzt Signalmoleküle im Zytoplasma frei. Die Strömung des Zytoplasmas verbreitet die Signalmoleküle im Netzwerk. Gleichzeitig kapern die Signalmoleküle ihr eigenes Transportmedium, indem sie die Kontraktionen erhöhen und damit die Strömung und ihren eigenen Transport verbessern.

Dieser sehr einfache Mechanismus allein reicht aus, um die vielfältigen, komplexen Verhaltensweisen des Schleimpilzes zu erklären: Die eine Beobachtung, dass sich die Strömung der Größe des Netzwerkes anpasst, oder die andere Beobachtung, dass der Schleimpilz die kürzeste Strecke zwischen zwei Nahrungsquellen findet. Als entscheidende Bausteine der Kommunikation ohne Nervensystem haben die Wissenschaftler also Signalmoleküle und den flüssigkeitsbasierten Transport identifiziert, aber insbesondere auch die Wechselwirkung zwischen beiden. Dieses sehr einfache Prinzip könnte auch in vielen anderen Organismen am Werk sein. Für die Forscher ist es spannend, solche Wechselwirkungen in technologischen Anwendungen umzusetzen, um selbstorganisierte Anpassung zu ermöglichen.

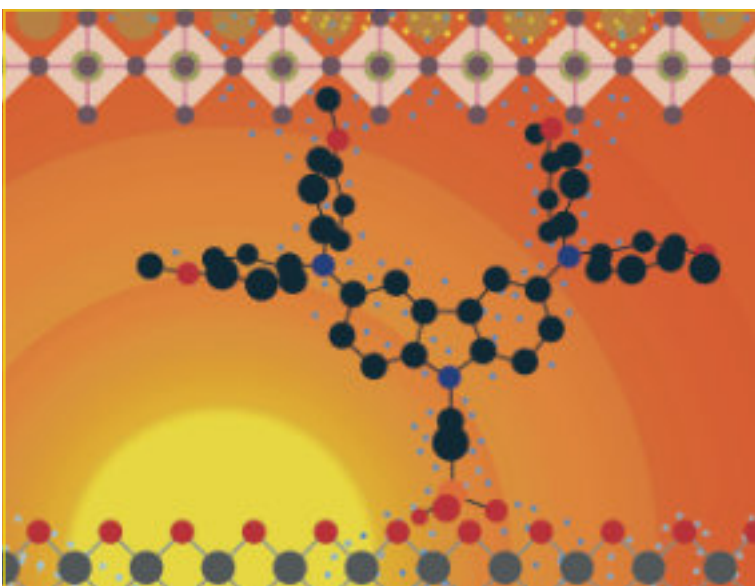
#### 3.4.4 Mit Selbstorganisation zu neuen Wirkungsgrad-Rekorden

Selbstorganisation wird zunehmend für technische Entwicklungen interessant. Ein aktuelles Beispiel dafür stammt aus der Solarzellen-Entwicklung. Man hat ein neues Verfahren entdeckt, um effiziente Kontaktschichten in Perowskit-Solarzellen zu realisieren: Es basiert auf Molekülen, die sich selbstorganisierend anordnen und eine Monolage bilden (Abbildung 14).

In den letzten Jahren konnten Solarzellen auf der Basis von Metall-Halid Perowskiten einen einzigartigen Anstieg im Wirkungsgrad erzielen. Diese Materialien versprechen kostengünstige und flexible Solarzellen und können mit konventionellen PV-Materialien wie Silizium zu besonders effizienten Tandem-Solarzellen kombiniert werden. Ein wichtiger Schritt zur Industrie-reife ist die Entwicklung effizienter elektrischer Kontaktschichten, welche die Abscheidung von Perowskit-Schichten auf unterschiedlichen Substraten erlauben.

Wissenschaftler aus Berlin haben nun also ein neuartiges selbstorganisierendes Monolagen-Molekül (engl. self-assembled monolayer, SAM) synthetisiert

Abbildung 14: Das Molekül organisiert sich selbst entlang der Oberfläche der Elektroden, bis eine geschlossene Monolage entsteht (Abb.: HZB/S. Magomedoviene).





und erfolgreich als lochleitende Schicht in Perowskit-Solarzellen eingesetzt [12]. Das Molekül ist Carbazol-basiert und bindet sich durch eine Phosphonsäure-Gruppe an das Oxid der transparenten Elektrode. Dabei organisiert sich dieses Molekül selbstständig an der Elektrodenoberfläche, bis eine geschlossene Monolage entsteht. Diese ultradünne Schicht zeigt keine optischen Verluste und könnte durch die Selbstorganisation konform alle Oberflächen bedecken, also auch texturiertes Silizium in Tandemarchitekturen.

Mit dieser Technik erreicht man einen äußerst geringen Materialverbrauch, und die chemische Struktur der SAMs kann je nach Anwendungsgebiet angepasst werden. Damit könnten die SAMs auch als Modellsystem für zukünftige Untersuchungen der Grenzflächeneigenschaften oder des Perowskit-Wachstums dienen. Am 11. November 2019 verkündete man, mit einer entsprechend aufgebauten Perowskit-Kupfer-Indium-Gallium-Selenid-(CIGS-)Solarzelle einen zertifizierten Wirkungsgrad von 23,26 Prozent erreicht zu haben: Neuer Weltrekord für diesen Typ von Solarzelle. Ein Grund für diesen Erfolg liegt in der beschriebenen Zwischenschicht aus organischen Molekülen, die sich selbstorganisiert so anordnen, dass auch raue Halbleiter-Oberflächen lückenlos bedeckt werden. Dafür wurden mittlerweile zwei Patente eingereicht. Die Tandemzelle besitzt eine aktive Fläche von einem Quadratzentimeter und erreicht damit einen weiteren Meilenstein, denn Perowskit-CIGS-Tandemzellen waren bislang deutlich kleiner (Abbildung 15).

#### 4. Schlussbemerkung

Man kann mittlerweile Prozesse der Selbstorganisation berechnen und steuern. Völlig ungeklärt ist natürlich, warum es Selbstorganisation überhaupt gibt. Sie ist ursächlich mit den Eigenschaften unseres Universums verbunden, mit dessen Materie, Energie und den Naturkonstanten. Man sollte jedoch nicht überheblich sein und sich aufgrund derer speziellen Beschaffenheit für etwas Besonderes halten. Weder ist unser Planetensystem einzigartig (wie man früher einmal dachte), noch gibt es nur einen Planeten, auf den Leben nach unserer Erfahrung möglich ist. Vielmehr gibt es wohl allein in unserer Galaxie – als einer von rund einer Billion Galaxien im Universum – Milliarden erdähnliche Planeten. Untersuchungen und Messungen des „Institut astrophysique de Paris“ ergaben, dass ein Stern der Milchstraße im Durchschnitt ein bis zwei Planeten hat. Dazu könnte Leben unter ganz anderen Umständen existieren. Gut möglich, dass es auch viele – vielleicht unendlich viele – weitere Universen gibt, ein Multiversum, mit anderen Bedingungen und Konstanten in anderen Universen. Auch wenn wir es – noch – nicht nachweisen können: Wichtige Theorien legen solche Möglichkeiten nahe. Sie grundsätzlich auszuschließen hieße, denselben Fehler zu begehen, den die mittelalterli-

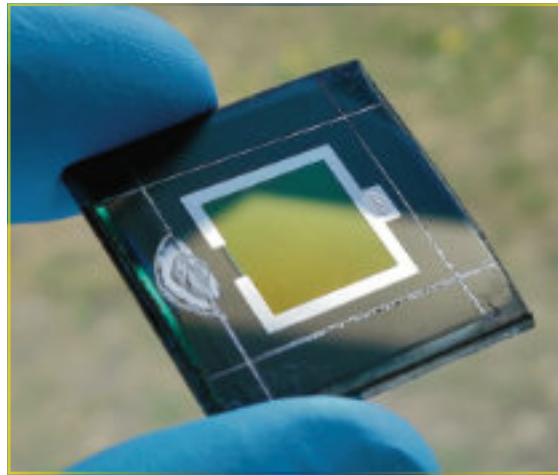


Abbildung 15: Die Pero-CIGS-Tandemzelle erreicht den Rekordwirkungsgrad von 23,26 Prozent (Abb.: HZB).

chen Kleriker machten, als sie das besonders von Galileo Galilei propagierte heliozentrische Weltbild von Kopernikus ablehnten. ►►

#### Quellenangaben

- [1] R. Kickuth: Helmut Schwarz über Fullerene; CLB 4/2011, S. 158-161.
- [2] T. Holvoet: Emergence Versus Self-Organisation: Different Concepts but Promising When Combined; Conference Paper in Lecture Notes in Computer Science; July 2004
- [3] M. V. Berry: Regular and Irregular Motion; Topics in Nonlinear Mechanics, ed. S. Jorna, Am.Inst.Ph.Conf.Proc No. 46, 16-120, 1978
- [4] A. Bejan and S. Lorente, The Constructal Law of Design and Evolution in Nature; Philosophical Transactions of the Royal Society B, Vol. 365, pp. 1335-1347, 2010
- [5] B. Hüttner: Constructal Theorie von Adrian Bejan; EIKE Europäisches Institut für Klima und Energie, 19.12.2010, <https://www.eike-klima-energie.eu/>
- [6] E. N. Zalta (Editor): The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Kap. 4.4 Quantum Mechanics; Stanford Universität, 2016
- [7] K. Sentker et al.: Self-assembly of liquid crystals in nanoporous solids for adaptive photonic metamaterials; „Nanoscale“ 48, 20.11.2019
- [8] F. M. Gartner et al.: Stochastic Yield Catastrophes and robustness in Self-Assembly; eLIFE 5.2.2020
- [9] P. Glock et al.: Design of biochemical pattern forming systems from minimal motifs; eLIFE, Nov 26, 2019
- [10] A. Vecchiarelli et al.: Membrane-bound MinDE complex acts as a toggle switch that drives Min oscillation coupled to cytoplasmic depletion of MinD"; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 113 (11): E1479–1488, 15.3.2016
- [11] K. Alim et al.: Mechanism of signal propagation in Physarum polycephalum; PNAS 2.5.2017
- [12] A. Magomedov et al.: Self Assembled Hole Transporting Monolayer for Highly Efficient Perovskite Solar Cells; Advanced Energy Materials, 32, 15.11.2018