

Vergleich von Natur und Technik

Ausschnitt aus meinem Buch „Energie, Entropie, Leben“

2.5.5 Vergleich von Biochemie mit technischer Chemie

Die in der Chemie geläufigen technischen Standard-Reaktionen zur stofflichen Umwandlung, sind mit ihren großen Energiesprüngen und Mengenumsätzen auf kleinem Raum, in hoher Konzentration, vor allem aber in ihrer Undifferenziertheit, weit weg von den subtilen, isothermen biochemischen Reaktionskaskaden bzw. Kreisläufen. Was die Biochemie in Enzymsystemen durch Reaktionsanschub mittels Phosphatgruppen, bei nahezu konstanter Temperatur verwirklicht, schiebt die technische Chemie meist durch einfache Temperaturerhöhung, manchmal Bestrahlung an, oder forciert es durch Katalysatoren. Übliche Standardreaktionen im Labormaßstab laufen oft in 2 Liter-Kolben und im 1 molaren Bereich! Das sind gegenüber biochemischen Zellreaktionen natürlich gewaltige Mengen an Atomen oder Molekülen, die da in kurzer Zeit, dicht gepackt, mehr oder weniger vollständig reagieren. Manchem von Ihnen mag bekannt sein, dass 1 Mol einer Verbindung z.B. 18 g Wasser, $6,022 \times 10^{23}$ Teilchen enthält. Diese, Avogadro'sche Zahl genannte Größe, stellt auf den ersten Blick eine für die Biochemie kaum erreichbare Dimension dar.

Aber auch die Natur schafft es große Mengen umzusetzen, wenn man ihr Zeit lässt oder, wenn sie sehr, sehr viele, Milliarden bis zu Billiarden Reaktionsgefäße – Zellen -, parallel nutzt. Denken Sie nur an den Wandel der Leit-Gase in unserer Erdatmosphäre: Vor 600 Millionen Jahren waren es 16 % Kohlendioxid, heute sind es gerade noch 0,0385 %, allein durch das Wirken der Photosynthese (Fuchs, 2007, S. 18). Oder denken Sie an die Tatsache, dass auf rein biochemischem Weg täglich etwa 400 Millionen t bzw. 146 Milliarden t Biomasse pro Jahr, über den Kohlendioxidkreislauf entstehen.

Aktuelle Zahlen (Siehe „Nature“, September 2011) gehen von höheren Kohlendioxidwerten der letzten 30 Jahre aus. Dabei kommen die Wissenschaftler zu dem Schluss, dass der bisher angenommene Umsatz von 120 Milliarden t Kohlenstoff pro Jahr (umgerechnet auf Glukose: 300 Milliarden t), auf 150 t (umgerechnet auf Glukose: 375 Milliarden t) bis 175 Milliarden t (umgerechnet auf Glukose: 438 Milliarden t) zu ergänzen ist. Diesen gegenüber 146 Milliarden t Biomasse wesentlich höheren Werten, muss natürlich auch die Kohlendioxid liefernde Atmung der Pflanzen gegenüber gestellt werden. Das würde bedeuten, dass die Pflanzenwelt bis zu 45 % mehr an Kohlendioxid aufnimmt als bisher gedacht. Auswirkungen auf die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre, sind mittelfristig zu erwarten. Diese Entwicklung könnte auch über ein grundlegendes Gesetz der Chemie, das Massenwirkungsgesetzⁱ erklärbar sein. Sehr vereinfacht ausgedrückt sagt

dieses Gesetz: "Das Verhältnis von Ausgangsprodukt zu Endprodukt bleibt konstant". Wenn sich der Kohlendioxid-Anteil der Luft erhöht, muss auch das Reaktionsprodukt der Photosynthese, die Glukose, mehr werden. Aber das ist eine sehr oberflächliche Aussage, da z.B. Temperatur und Reversibilität entscheidend eingehen.

Forscher warnen allerdings vor einem „Düngen“ mit mehr Kohlendioxid. Es käme zur erhöhten Ausdünstung von Isoprenen über das Blattmaterial, ein Effekt, der sich angeblich negativ auswirkt. Aber den erhobenen Zeigefinger erleben wir ja tagtäglich. "Kein Ding ist ohne Fehl".

Es ist eben die ubiquitäre Verteilung der Myriaden von zellulären Mini-Chemiefabriken, die letztlich auch die technisch-chemische Produktion weit in den Schatten stellt.

Transparent wird der Unterschied des technischen zum biochemischen Pfad am ehesten, wenn Sie die Versuchsanordnung und das Ergebnis des typisch technisch-chemisch angelegten Miller-Versuchs (s.o.) vergleichen, mit einer „Versuchsanordnung“, wie sie die Biochemie gestaltet: Dazu sollten Sie sich z.B. in „Chemie - eine lebendige und anschauliche Einführung“, ein Buch von Dickerson und Geis, auf Seite 595, den „Mechanismus der Trypsin-Katalyse“ anschauen. Dabei kommt es nicht darauf an, dass Sie den genauen chemischen Hintergrund erfassen. Vielmehr zeigen die Autoren anhand von acht selbsterklärenden Bildern, auf welche Weise Enzyme, auf der Basis von Schlüssel und Schloss, biochemische Reaktionen eindeutig abwickeln. Jedes Molekül wird von Enzymen, sozusagen an die Hand genommen und durch einen hochspezifischen Reaktionstunnel geführt.

Diese „topologisch“ Situation, wie Sie H. Follmann (Follmann, 1981, S. 215) nennt, ist relativ genau für das Feld vieler Enzyme wie z.B. der Dehydrogenasen erforscht: *„Überall bilden 6 Peptidstränge in der sogenannten β -Faltblatt-Anordnung eine Nukleotidbindungsdomäne oder Nukleotid-Falte auf der ein NAD-Molekül durch ionische und andere Kräfte fixiert wird...“* Man kann wohl davon ausgehen, dass mit dieser Konstellation die Reaktion, mechanistisch gesehen, ein eindeutiges, reaktionsbeschleunigendes, katalytisches Zentrum besitzt.

Bei Millers technischer Rekonstruktion der Präbiotik, kommt, bei aller Würdigung seiner genialen Idee, nach einer Woche andauerndem Energiebeschuss, ein Häufchen schwarzer Dreck heraus, der nur durch aufwändige Trennmethode in ein Gemisch aus achiralen probiotischen Moleküle, neben viel undifferenziertem chemischem Abfall, zerlegt werden kann. Die Natur kann sich eine solche Verschwendung nicht leisten; sie arbeitet nachhaltig, über Kreisläufe, um die stofflichen Ressourcen zu erhalten. Lediglich Energie (Sonnenenergie) wird verbraucht. Materiell entstehen keine Verluste; alles, was chemisch aktivierbar ist, wird

verwertet. Etwas Wärme fällt in unserem Metabolismus als nicht direkt genutzte Reaktionswärme an. Das ist gut so, sonst gäbe es uns vielleicht nicht. Diese Abfallwärme – Körperwärme - erhält ein Zellsystem wie einen Warmblüter bei ca. 37 °C und schafft konstante, chemische Reaktionsbedingungen für die Zellen.

Der wesentliche Unterschied der biochemischen Reaktionsgestaltung zur technischen Chemie ist aber die Mikrosituation des eigentlichen Reaktionsgeschehens. Die Biochemie geleitet, im Gegensatz zur technischen Vorschlaghammer-Chemie, jedes einzelne Edukt-Molekül, wie schon erwähnt, durch passende Enzyme in die evolutionär optimierte Richtung. Der Transport der einzelnen Reaktionsteilnehmer erfolgt temperaturproportional durch die Brownsche Molekularbewegung. Treibende Kraft ist zum einen das Potential der Freien Energie. Das ist aber sozusagen nur die halbe Miete. Ganz entscheidend ist nämlich das Vorhandensein eines Reaktionsplateaus in Form eines Enzymsystems, das die Reaktionspartner wie den Schlüssel zum Schloss geleiten. Ein Mehr an Freier Energie im Edukte-System, gegenüber dem Addukte-System, kann also im Sinn der Stochastik der Anlass zu einem Potentialausgleich sein. So könnten die ersten biochemischen Reaktionen verlaufen sein. Es war das aber nur ein Initiationsschritt, der zu Produkten ohne Nachhaltigkeit führte. Wenn z.B. viele CO₂-Moleküle auf molekularer Ebene in einem Plateau, z.B. Pepidschleifen locker fixiert waren, konnte ein reduktionsfähiger Partner, mit entsprechender Freier Energie ausgestattet, eine Bindung zu diesem CO₂-Molekül eingehen. Die lockere Bindung gestattete Knüpfen und Lösen dieser Bindung: Reversibilität, die es gestattete Energiespeicherung wie auch Energieabgabe zu bewirken.

Wir denken in einfachen Bahnen und setzen voraus, dass Naturabläufe auch einfach, d.h. in unserem gewohnten Sinn einfach, sein müssten. Einfach, sicher auch bequem in diesem Sinn, ist unser lineares Denken: Nach A kommt B, dann C usw. Parallellauf, Rückkopplung, Reaktionshemmung, (WIKIPEDIA: "*Enzymhemmung (auch Enzyminhibition) ist die Hemmung einer enzymatischen Reaktion durch einen Hemmstoff, der Inhibitor genannt wird*"), also ausgewogene Aktivierung und Unterdrücken von Reaktionen sowie vor allem Kreisläufen, erscheinen uns aufwändig, komplex und unnötig bzw. unrentabel. Der Abfall unvollständiger, technischer Reaktionen, wird in Kauf genommen. Er wäre Gift für die Zelle, da er für sie unbrauchbar ist und die Zelle sehr schnell überfüllen würde. Man kann auch sagen, dass sich in der Zelle die Nichtordnung erhöhen würde, also die Entropie zunähme. Das aber ist das genaue Gegenteil von Leben.

Ein Chemiker führt oft zwei Edukt-Komponenten in einem geeigneten Lösungsmittel zusammen und überlässt es der Reaktionsfähigkeit der Materie, also der Freien Energie ΔG der Edukte sowie der Energieentfaltung des Heizsystems, das Zielprodukt in brauchbarer Ausbeute zu liefern. Diese Vorgehensweise repräsentiert ein offenes irreversibles System, gezündet durch das Potential der Freien Energie. Nach dieser Einbahnstraße-Reaktion ist das Pulver verschossen. Die Chemie des Lebens macht aber keine großen, sondern nur evolutionserprobte, enzymkontrollierte, meist reversible Trippelschritte, resultierend aus der Trial-and-Error Methode der Mutation und Selektion in Fließgleichgewichten. Sie bevorzugt, Entropie orientiert, energetisch beherrschte isotherme Reaktionen, in winzigen, sich selbstorganisierenden Zellen und dazu noch sozusagen unter „Betreuung“ durch spezielle Enzyme. Es gelingt ihr so, in diesen offenen Systemen, ordnungserhöhend, die Entropie-Erhöhung zu minimieren und dabei auch noch Arbeitsverrichtung bei konstanter Temperatur, in diesen kleinen Welten zu ermöglichen. Vor allem aber läuft in natürlichen Prozessen alles auf Kreisläufe hinaus.

Welch ungeheure Zahl an Reaktionen in jeder einzelnen Körperzelle vor sich gehen, mag aus meiner Berechnung von 10^{11} bis 10^{13} ATP-gesteuerten Reaktionen pro Zelle pro Tag erhellen. Siehe Abschnitt: Energiespeicherung durch Phosphateinbau (siehe 2.5.1.5).

Wir überbewerten unsere Standard- Chemie z.B. in der technischen Erzeugung von Kunststoffen, wie Polyethylen (PE) aus einfachen Monomeren oder im erreichten Niveau an Komplexität bzw. an chemischer Kreativität. Nicht, dass diese technologische und wirtschaftliche Errungenschaften klein geredet werden sollen; die Natur hat sich aber auf die Etablierung von z.B. langkettigen Polymeren nicht eingelassen. Der Grund ist nicht in der Schwierigkeit der Reaktionsführung zu sehen, sondern in der Zukunftsfähigkeit, die ein solches Polymer in der Natur erwartet. Für sie ist es toter Fremdkörper, ohne polare Brücken. PE ist nämlich nicht mehr leicht biochemisch angreifbar bzw. mineralisierbar und damit einem durchgängigen Grundprinzip der Evolution unzugänglich: der reversiblen Kreislaufführung.

In diesem Zusammenhang muss ich bekennen, dass mich die natürlichen Polymere der biochemischen Evolution - Zucker, Aminosäure, Nukleotide usw. - immer wieder überraschen. Besonders beeindruckend, wenn nicht gar bedrückend wird das, wenn man ein Lehrbuch über Molekularbiologie zur Hand nimmt. Es gibt regelrecht kognitive Barrieren, die Komplexität der Bausteine zu akzeptieren. Warum muss es z.B. D-Glukose sein, eines von 16 möglichen der tatsächlich existierenden Stereoisomeren bzw. 8 Antipoden

Paaren, dazu noch in der Lage in α - oder β -Pyranose-Form und minimal in Furanose-Form vorzuliegen? Man muss einfach akzeptieren, dass die Evolution diese Version aus der Masse unterschiedlicher molekularer Angebote sozusagen heraus selektioniert hat und dass unsere Vorstellungen davon getrübt sind, Komplexität zu sehen, wo sich vielschichtiger Synergismus etabliert hat und Angepasstheit dominiert.

Sozusagen getoppt wird diese Betrachtung, wenn man die ubiquitäre Bildung von D-Glukose aus Kohlendioxid und Wasser in der Natur betrachtet:

So kann klar und eindeutig gesagt werden: Die technische Chemie kann D-Glukose nicht durch Mischen und Erwärmen von Kohlendioxid und Wasser herstellen und wird es auch mit ihren Mitteln nicht versuchen.

Man kann sich vielleicht eine vielstufige Synthese mit abschließender Racemat-Trennung ausdenken. Durchführen wird das niemand, da es konkurrenzlos teuer würde.

Die Natur dagegen, kann das in jeder Pflanzenzelle seit Jahrmilliarden. Wir kommen dazu nochmals im Kapitel der Photosynthese. Allerdings ist das ein biochemischer Syntheszyklus von unglaublicher Kompliziertheit. Ich empfehle dazu den Artikel: *"Die Wasserspaltungsmaschine der Photosynthese. Ein Enzym, das die Welt veränderte, Lohmiller, Cox, Lubitz (Labor & mor, 08.15, Seite 10)*

Letztlich regiert und treibt auch hier wieder Energie, Hand in Hand mit der Evolution. Stabilität und effektive Nutzung geringster Energiepotentiale und vor allem Enzyme dominieren.

D-Glukose ist in diesem Auswahlverfahren der Evolution offensichtlich die nachhaltigste Komponente.

Die Biochemie des Lebens spielt sich in außerordentlich genau definierten, sehr niedrigen Energienischen ab. Ich darf nur an die elementare Funktion von Wasserstoffbrücken aller Art erinnern. Da ist es offensichtlich von Nachhaltigkeit getragen, wenn sich die energetischen Unterschiede von 2-Desoxy-D-Ribose in der DNA oder von D-Glukose in der Glykolyse, gegenüber den 7 weiteren Pentose- und 15 anderen Hexose-Stereoisomeren, in einer Art angewandtem Auswahlverfahren durchsetzen. Chemische Vielfalt war die Voraussetzung für Leben und beherrscht es heute im kleinsten Detail. Gering differenzierte Komplexität ist sicher eine Voraussetzung dafür, dass Mutation und Selektion überhaupt zur Entfaltung kommen können. Ein PE-Strang z.B. ist nicht mutierbar, sondern ein biochemisch nutzloses, nicht in Kreisläufe integrierbares Polymer.

Allerdings gab es in der Natur bereits in einem sehr frühen Stadium und heute noch Verbindungen mit bis zu 40 und mehr $-CH_2-$ Einheiten. Es sind dies u.a. Wachse, also lipidartige Glycerin-Ester und -Ether, bestehend aus langkettigen Säuren oder, und

Wachsalkoholen. Sie verfügen aber über eine biochemische angreifbare Carboxyl-Endgruppe. Weiter gibt es strukturell vergleichbare Harze. Sie beugen als feiner Blattüberzug der Austrocknung vor. Andere uralte Vertreter solcher langkettigen –CH₂- Einheiten, entstanden vermutlich durch Veränderungen von Porphyrin Seitenketten (Chlorophyllvariationen) im Rahmen der Diageneseⁱⁱ. Durch gaschromatographisch-massenspektroskopische Untersuchungen, konnten Gerüste, bis zu 3 Milliarden Jahren alt, als C₄₀-Ketten identifiziert werden.

PE aber enthält nur C und H Atome mit vielen tausenden von –CH₂- Einheiten und keine enzymatisch leicht hydrolysierbaren Ester-, Sauerstoff- oder Stickstoffgruppen. Es gibt keine Carboxyl-Endgruppe in einem solchen Polymer. Gäbe es die, wäre ein schrittweiser Abbau, ausgehend von dieser polaren Endgruppe, wie beim Fettsäureabbau, durch β-Oxidation möglich. Dieser Mangel wird uns allen langsam schmerzlich durch den „Müllstrudel“ in den Weltmeeren und die ungewollten „Kunststofflager“ unserer Mülldeponien bewusst. Ungeheure Mengen industriell erzeugter Plastikstoffe, widersetzen sich der Kreislauf-Führung und verrotten unter enormer Belastung der Ökosysteme erst in Lauf hunderter Jahre.

An dieser Stelle soll die Oberflächlichkeit, der bisher angeführten und noch kommenden biochemischen Betrachtungen angedeutet werden. Um Ihnen einen ungefähren Ausblick auf die wissenschaftlichen Grundlagen zu geben, sei nochmals an den kurzen Ausschnitt aus Albert L. Lehningers Buch „Biochemie“, eingangs des Teils 2, Die Entfaltung des Erdenlebens, erinnert. Zum Abschluss dieses Vergleichs von Biochemie und technischer Chemie, möchte ich die völlig konträren Bildungswege dreidimensionaler Formen auf biochemischem, im Gegensatz zum technischen Weg, aus der Gemeinsamkeit der Linearität eines Programms anführen. Die biochemische, ribosomale Verknüpfung von Aminosäuren zu dreidimensionalen Peptiden, wird mit dem technischen Beispiel eines 3-D-Druckers verglichen.

Ganz offensichtlich wird in beiden Fällen bewirkt, dass sich unter lokaler Entropie-Verminderung (Ordnungszunahme) räumliche Struktur entfaltet. Im Fall des Peptidaufbaus erfolgt das unter der Regie eines mit 4 verschiedenen Basen verschlüsselten DNA-"Programms", im 3-D-Drucker ist das eine mit "Nullen" und "Einsen" codierte Software. Mit diesem digitalen Steuerungsprinzip erschöpft sich aber die Gemeinsamkeit.

Es dominieren u.a. folgende Unterschiede:

1. Peptide entstehen DNA-gesteuert in der Winzigkeit aller, mit dem bloßen Auge kaum sichtbaren Körperzellen, in den Ribosomen. Dies geschieht in allen Lebewesen, in jeder Zelle, in jedem Moment, in einem zahlenmäßig kaum fassbaren Ausmaß.

Die Dimensionen eines 3-D-Druckers sind bekanntlich von ganz anderer Größenordnung.

2. Die lineare Verknüpfung der Aminosäuren zu Peptiden erfolgt äußerst schonend, bei Körpertemperatur, in einer wässrigen Zellmatrix, unter physiologischen Bedingungen, parallel zu millionenfach ablaufenden anderen Reaktionen in dieser Zelle.

Die Verknüpfung in einem 3-D-Drucker erfolgt mehr oder weniger durch Verschmelzung von Feststoffen in Form von Pulver.

3. Die Bausteine sind im Wesentlichen die 20 natürlichen L-Aminosäuren.
die über Peptidbindungen verknüpft. Eine riesige Vielfalt mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften ist kombinatorisch möglich und wird biochemisch auch vorgefunden. Denken Sie nur an die Histologie der ca. 200 verschiedenen Gewebesorten des Menschen.

Ein 3-D-Drucker kann zzt. nur Einkomponenten-Verschmelzen durchführen.

4. Alle Verknüpfungen entstehen durch komplexe, Enzym unterstützte, ATP-promovierte Synthesen, mit minimalem Energieaufwand (s.o.).

Der 3-D-Drucker benötigt erheblichen thermischen Schmelzaufwand. Der Strukturbildungsbereich liegt um viele Größenordnungen über dem des ribosomalen Bildungsbereichs.

5. Die Dreidimensionalität wird in den entstehenden Peptiden selbstorganisatorisch durch räumliche Faltung des primär gebildeten linearen Peptidstrangs in sekundäre und tertiäre Dreidimensionalität erreicht. Verantwortlich dafür sind zwischenmolekulare Kräfte, wie z.B. Wasserstoffbrückenbindungen im synthetisierten Peptidstrang.

Die Gestaltgebung im 3-D-Drucker muss in der Software vorgegeben werden.

6. Der Hauptunterschied: Leben kontra tote Technik.

Nochmals möchte ich auf bereits unter dem Aspekt – Abschnitt: 2.4.9 Wie könnte der genetische Code entstanden sein? - erörterte Zusammenhänge hinweisen:

Es gibt noch einen wesentlichen Unterschied, der mir beim Lesen von George Dysons Buch "Turings Kathedrale" auf den Seiten 403/404 (Dyson, 2016) begegnete. Nicht ein zeitorientiertes Programm, wie etwa in einem der heutigen Computer, gibt den Ton an. Vielmehr ist es ein stochastisches Identifizieren von Reaktionspartnern aufgrund molekularer Muster in der Winzigkeit der Zelle, worauf ich schon im Zusammenhang mit dem Verlauf des Zitronensäurezyklus hinwies.

Es zeigt sich, dass ein einfacher Vergleich dieses "DNA-Programms" mit einem uns geläufigen Software-Programm in unseren digitalen Computern nur vordergründig zuzutreffen scheint. Ein grundlegender Unterschied ist z.B. die zeitliche Dominanz in einer PC-Software: Alle Software-Schritte werden von einem eindeutig fortschreitenden Zeitregim geordnet und über ein Bus-System abgewickelt. Dazu müssen genau zugreifbare Speichereinheiten abfragebereit zugänglich sein. In biologischen Abläufen gibt es dieses Regim nicht. Es dominiert ein Nebeneinander von möglichen Reaktionen in der drangvollen Enge einer Zelle. Darüber hinaus gibt es keine "numerische Adresse, der ein physischer Ort zugeordnet ist, sondern nur molekulare Muster, welche die Identifizierung eines größeren, komplexen Molekül, anhand eines seiner kleineren, eindeutig erkennbaren Bestandteile ermöglicht. So kann ein stochastisches, auf Mustern basierendes Adressierungssystem ausreichend schnell arbeiten. Diese Fähigkeit - einen organisierten Nutzen aus planlos ablaufenden Prozesse zu ziehen - ist genau das Merkmal, das Informationsverarbeitung in lebenden Organismen von der Informationsverarbeitung bei digitalen Rechnern (bis jetzt noch) unterscheidet". (Dyson, 2016, S. 404)

Ein weiterer interessanter Unterschied ist die mögliche Umkehrbarkeit von "Programm-Abläufen", die in unseren Bus dominierten PCs nicht gegeben ist. Die in biologischen Prozessen ablaufenden Schritte, sind mit den gleichen Enzym-Aktivatoren umkehrbar und eröffnen damit Wege in Reaktionsumkehr, wie sie zum Beispiel in dem System Glykolyse versus Gluconeogenese evolutionär tatsächlich verwirklicht ist. Dabei handelt es sich um ein grundlegendes Moment in der Molekularbiologie, die erfolgreiche Wege nicht „vergisst“, sondern immer wieder, auch in Teilabschnitten, nutzt.

In Teilchenkollektiven entstehen viele großflächige Muster spontan durch sehr kurzreichweitige Wechselwirkungen der Teilchen mit ihren Nachbarn. Eine besonders spektakuläre Musterbildung gelang dem Moskauer

Chemiker Boris Belusov 1950, als er versuchte, eine vereinfachte Laborversion des „Zitronensäurezyklus“ herzustellen. Der Zitronensäurezyklus ist ein komplizierter Schlüsselprozess beim Stoffwechsel der Lebewesen. Was Belusov suchte, fand er nicht, dafür freilich etwas derart Fantastisches, dass die Kollegen Unseriosität vermuteten und eine Veröffentlichung der Belusovschen Entdeckung zunächst verhinderten. Belusov hatte ein Substanzgemisch entdeckt, das nicht sofort zu einer Endsubstanz durchreagierte, sondern oszillierte: mal hatte dieses Reaktionsprodukt die Oberhand, mal jenes. Es war, als wechselte ein Softdrink seinen Geschmack rhythmisch zwischen Himbeer- und Orangenaroma, ganz von allein, um schließlich bei Kirschsaff stehen zu bleiben. Der Wechsel des Belusov-Gebräus vollzog sich mit fast vollkommener Gleichmäßigkeit, bis nach einigen Dutzend Zyklen schließlich ein Gleichgewicht erreicht war. Als so genannter Belusov-Zhabotinsky-Versuch gehört die Reaktion heute zu den Standard-Demonstrationen an den Universitäten. <http://www.weltderphysik.de/gebiet/theorie/chaos-und-ordnung/ordnung-in-natur/>

ⁱ Das Massenwirkungsgesetz (MWG) beschreibt die Division der **Aktivitäten** der **Produkte** und der **Edukte** einer (chemischen) Reaktion im **chemischen Gleichgewicht**. Das Verhältnis ist konstant. Es gilt für jede Reaktion, die **reversibel** ist und bereits ihren Gleichgewichtszustand erreicht hat. Die resultierende Konstante hat unter gegebenen Bedingungen einen festen, für die betrachtete Reaktion spezifischen Wert, der einzig über die äußeren Bedingungen (z. B. die Temperatur) beeinflusst werden kann. Die **thermodynamische** Erklärung hierfür ist, dass es immer einen energetisch niedrigsten und damit günstigsten Zustand gibt. Nach WIKIPEDIA

ⁱⁱ Die Diagenese ist der **geologische** Prozess der Verfestigung von **Lockersedimenten** wie Schlamm und die Veränderung der Gesteine unter verhältnismäßig niedrigen Drücken und Temperaturen bis zu ihrer Abtragung. Nach WIKIPEDIA