

NaWi 9: Belebt oder nicht belebt ...

Publiziert am 6. August 2019 von Günter Dedie auf <https://www.zum-muendigen-buerger.de>



... *das ist hier die Frage*: Es gibt eine große Klasse von emergenten selbstorganisierten Prozessen und Systemen, bei der man wirklich ins Grübeln kommt, wenn man diese Frage beantworten will. Das sind die sog. *dissipativen autokatalytischen* Prozesse, die Ilja Prigogine und sein Team im Rahmen der Untersuchungen nichtlinearer irreversibler Prozesse erforscht haben. Sie treten schon im Bereich der Chemie auf, sind aber in der Biochemie und in allen höheren Ebenen des Lebens nicht nur ebenfalls

vorhanden, sondern dominant. Bild: BZR Wellenfronten (Quelle Pixabay)

Was sind das für Prozesse und Systeme?

Bei der *Bénard-Konvektion*¹ ging es um den Transport von Wärmeenergie durch eine Flüssigkeit oder ein Gas, bei der – abhängig von der zu transportierenden Wärmemenge – von selbst in mehreren Stufen stabile geometrisch angeordnete Konvektionszellen auftreten, die den Wärmetransport stufenweise verbessern. Ebenso treten bei der Strömung von Flüssigkeiten oder Gasen in Rohren o.ä. nach dem Bereich der gleichförmigen (*laminaren*) Strömung stabile Wirbel unterschiedlicher Art auf, wenn man den Durchsatz über bestimmte kritische Werte hinaus erhöht.

Heute geht es um *dissipative Prozesse*², die sowohl Energie *als auch Materie* aufnehmen, umwandeln und wieder abgeben. Das Erstaunliche ist, dass dadurch *von selbst* wohldefinierte, abgegrenzte Systeme entstehen, die ständig Energie und Materie mit ihrer Umgebung austauschen und dadurch ihre innere Ordnung und Struktur erzeugen (bzw. *Entropie*³ produzieren, wie die Physiker sagen). Diese Prozesse *erhalten sich selbst*, solange die von ihnen benötigten Ausgangsstoffe zur Verfügung stehen. Der einzelne Prozess befindet sich dabei in einer Art *Ko-Evolution*⁴ mit seiner Umgebung.

Dissipative Prozesse funktionieren ebenso wie die Bénard-Konvektion nur weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht. Entscheidend ist aber, dass sie mindestens einen sog. *autokatalytischen*⁵ (sich selbst vermehrenden) Prozess enthalten.

Das bekannteste Beispiel eines derartigen dissipativen autokatalytischen Prozesses ist die *Belousov-Zhabotinsky-Reaktion* (BZR), die um 1950 von Boris Pawlowitsch Belousov erstmals beobachtet wurde. Die BZR-Prozesskette besteht aus einer Anzahl von *selbstorganisiert* wechselwirkenden dissipativen Prozessen. Einer dieser Prozesse wirkt dabei autokatalytisch, weil aus *einem* bestimmten Molekül je Reaktionsschritt *zwei* dieser Moleküle erzeugt werden. Dieser autokatalytische Prozess wirkt als Katalysator, der den Gesamtprozess beschleunigt. Anschaulich kann man ihn auch als „Pumpe“ betrachten, die den Gesamtprozess antreibt. Aufgrund der positiven Rückkopplung in der autokatalytischen Stufe ist der Prozess nichtlinear und verhält sich deshalb zwar deterministisch, aber auch chaotisch (d.h. kleinste Änderungen am Anfang eines Prozesses führen zu großen, nicht vorhersehbaren Änderungen im weiteren Verlauf). Stark vereinfacht kann man die gesamte BZ-Prozesskette in dem folgenden Diagramm zusammenfassen:

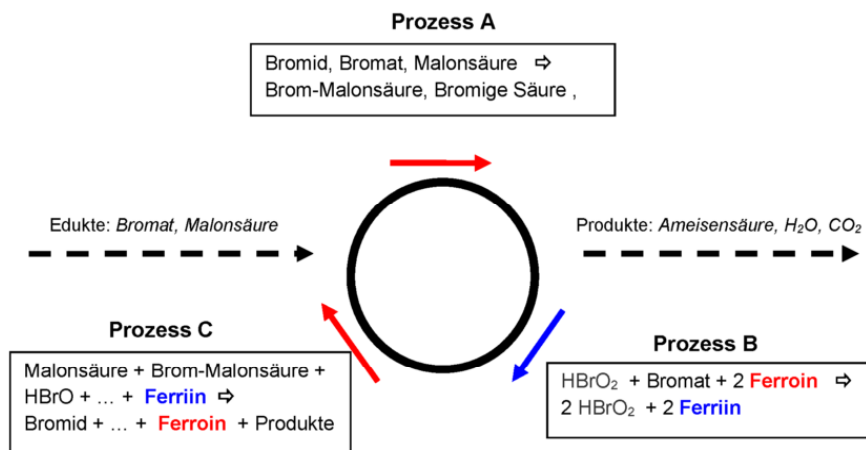


Bild: BZR-Prozesskette (Übersicht). Prozess B ist autokatalytisch, weil er aus einem Molekül HBrO₂ zwei Moleküle HBrO₂ erzeugt.

¹ <https://www.zum-muendigen-buerger.de/2019/07/07/nawi-5-die-benard-konvektion-und-das-erdmagnetfeld/>

² <https://de.wikipedia.org/wiki/Dissipativ>

³ <https://de.wikipedia.org/wiki/Entropie>

⁴ <https://de.wikipedia.org/wiki/Koevolution>

⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Autokatalyse>

Bei der BZR-Prozesskette sind am Anfang *Kaliumbromat* KBrO_3 , *Malonsäure* $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$, *Kaliumbromid* KBr und ein *Redox-Indikator*⁶ wie *Ferroin* (*tris*-Phenanthrolin-Eisensulfat) beteiligt. Während der Reaktionen werden die Ausgangsstoffe (sog. *Edukte*) Bromat und Malonsäure aus der Umgebung der Prozesskette aufgenommen und umgewandelt. Die BZR läuft deshalb nur so lange, bis die Edukte in der Umgebung aufgebraucht sind. Die *Produkte* Ameisensäure, Wasser und CO_2 werden von der BZR erzeugt und an die Umgebung abgegeben.

Der Zustand der Prozesskette wird durch den Zustand des *Redox-Indikators* angezeigt; er wechselt die Farbe zwischen der reduzierten und der oxidierten Form. In unserem Beispiel ist der oxidierte Indikator Ferroin blau und der reduzierte Indikator Ferroin rot-orange.

Die BZR besteht, wenn man sie genauer analysiert, aus 18 Reaktionsschritten, die mit sehr unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten ablaufen, und insgesamt 21 Reaktionsteilnehmern. Im Diagramm ist sie stark vereinfacht dargestellt und auf die drei wichtigsten Stufen der Reaktionsprozesse „eingedampft“:

Im Prozess **A** wird einerseits das Bromid verbraucht, die Malonsäure bromiert und *Bromige Säure* HBrO_2 erzeugt. (Für die Prozesse **A** und **C** werden der Einfachheit halber nur die wichtigsten Reaktionsteilnehmer aufgeführt.) Andererseits reagieren Bromid und HBrO_2 zu HBrO . Unterm Strich ergibt sich dabei eine sehr geringe HBrO_2 -Konzentration von 10–11 mol/Liter. Der Redox-Indikator bleibt im Prozess **A** unverändert. Das Bromid blockiert den Prozess **B** so lange, bis es vom Prozess **A** verbraucht worden ist. Erst dann kann Prozess **B** anlaufen.

In Prozess **B** wird Ferroin autokatalytisch von der Bromigen Säure HBrO_2 zu Ferroin oxidiert, denn mit jedem Reaktionsschritt wird die Konzentration von HBrO_2 verdoppelt und wächst deshalb zunächst exponentiell an (vgl. Prozess **B** im Diagramm; dort ist die Anzahl der beteiligten Moleküle angegeben). Obwohl damit eine positive Rückkopplung verbunden ist, läuft Prozess **B** ruhig und nicht explosiv ab, weil einerseits die HBrO_2 -Konzentration zu Beginn mit 10–11 mol/Liter sehr gering ist und andererseits auch das neu entstandene HBrO_2 wieder in HBrO und Bromat zerfällt. Dadurch stellt sich in Prozess **B** ein neues dynamisches Gleichgewicht bei einer 100 000 Mal größeren HBrO_2 -Konzentration von 10–6 mol/Liter ein, das die Zunahme der Konzentration begrenzt.

Die Farbe der Lösung ändert sich durch die Oxidation von Ferroin zu Ferroin von rot auf blau. Durch die unterschiedlichen Farben kann die dynamische Struktur des Gesamtsystems in der Lösung angezeigt werden, die als Folge der aufeinander folgenden Zyklen der BZR-Prozesskette entsteht (der emergente Prozess für die Struktur wird unten im Detail erläutert).

Sobald das Ferroin aufgebraucht ist, beginnt Prozess **C**: Unter Verbrauch von Malonsäure, Brom-Malonsäure und HBrO wird wieder Bromid (das den Prozess **B** zunehmend blockiert) und Ferroin gebildet. Außerdem werden dabei in weiteren Reaktionen *Ameisensäure* (HCOOH), Wasser und CO_2 erzeugt. Am Ende von Prozess **C** hat das System wieder den Ausgangszustand erreicht und Prozess **A** kann anlaufen, solange noch genügend Malonsäure und Bromat in der Umgebung vorhanden ist. Da das Ferroin wieder unverändert zur Verfügung steht, wirkt es in der BZR-Prozesskette wie ein Katalysator.

Emergente Aspekte der BZR-Prozesskette

Ein System, das sich von selbst bildet und sich selbst erneuert und damit erhält, nennt man auch *autopoietisch*.⁷ Beispiele dafür sind die BZR-Prozesskette und der bekannte *Nukleinsäure – Protein – Hyperzyklus* von Manfred Eigen (demnächst als Beitrag in ZmB). Die BZR-Prozesskette „weiß“, was sie zu importieren und zu exportieren hat und welche interne Struktur sie in dem von ihr gebildeten System erzeugt. Sie enthält also implizit die Information für ihre eigene („ontogenetische“) Entwicklung. Sie kann sich aber nicht „vermehren“: Wenn sie aus Mangel an Edukten ihren Betrieb einstellen muss, hinterlässt sie keine *individuelle* Information für *Nachfolger*-Prozessketten, wie es bspw. die Lebewesen bei der individuellen Vermehrung mit Hilfe der Gene vermögen. Die auf den fundamentalen Naturgesetzen aufbauenden Gesetze der Chemie beinhalten aber die nötigen Informationen, um ggfs. spontan neue *gleichartige* Prozesse zu erzeugen.

Man könnte dem BZR-Prozess nach dem oben gesagten sogar eine ganz einfache Art von *Bewusstsein* zuschreiben, nach Umberto Maturana einen *Kognitionsbereich*.⁸ Er ist autonom und findet und erhält seine Struktur und (Mindest-)Größe unabhängig von seiner Umwelt, solange diese die benötigte Energie und Materie liefert. Das Wissen für dieses „Bewusstsein“ steckt als neue Fähigkeit in den Reaktionsgleichungen des nichtlinearen, emergenten BZR-Prozesses.

Die Änderungszyklen der BZR mit ihren Farbwechseln können als zeitliche periodische Änderungen auftreten (sog. *Chemische Uhr*⁹), wenn man die Reaktionslösung ständig rührt. In einer flachen Schale können sie aber auch als regelmäßige, sich selbst organisierende emergente Muster beobachtet werden, wenn die Lösung nicht bewegt

⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Redoxindikator>

⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Autopoiesis>

⁸ <https://www.amazon.de/Baum-Erkenntnis-biologischen-menschlichen-Erkennens/dp/3442114608>

⁹ https://de.wikipedia.org/wiki/Oszillierende_Reaktion

wird, mit einer *Fernordnung*, wie in diesem Video¹⁰ zu sehen. Die Muster starten an Staubpartikeln oder anderen Unregelmäßigkeiten und breiten sich in Form von Kreisen, Ellipsen oder Spiralen aus, mit Geschwindigkeiten von einigen Millimetern pro Minute (im BZR-Video mit Zeitraffer). Die Staubpartikel wirken dabei als *Keime* der Muster. Bromid wird um den Keim herum durch Prozess **A** verbraucht, während in der übrigen Lösung noch genug davon vorhanden ist. Also kann um den Keim herum Prozess **B** starten und die Farbe wechselt dort von rot auf blau. Parallel dazu diffundiert Bromid aus der Umgebung an den Ort verringerter Bromid-Konzentration, so dass das Bromid auch in der Umgebung weniger wird und Prozess **B** dort ebenfalls anlaufen kann. Dadurch breitet sich eine blaue Zone in der Lösung aus. An der Rückseite dieser Zone bildet sich durch Prozess **C** aus Brom-Malonsäure und blauem Ferriin wieder Bromid und rotes Ferriin zurück. Dahinter kann dann wieder Prozess **A** anlaufen usw. Auf diese Weise wandern die farbigen Zonen langsam durch die Schale (vgl. BZR-Video).



Bild: Gebänderter Achat (Quelle Wikimedia)

Zum Schluss noch ein Schmeißerl fürs Auge: Im Jahre 1896, also lange vor der Entdeckung der BZ-Reaktion, beschrieb Raphael Eduard Liesegang periodische ringförmige Strukturen bei chemischen Reaktionen, wie sie z.B. beim Auftropfen von Silbernitratlösung auf ein mit Kaliumdichromat vermisches Gelatine-Gel auftreten. Derartige periodische Strukturen treten auch in Achaten häufig auf; das Foto zeigt ein schönes Beispiel. Er vermutete deshalb eine vergleichbare periodische Reaktion beim Wachstum der Achate. Neuerdings ist man aber der Meinung (Manfred Landmesser 1988), dass die Kieselsäure in einem langen Zeitraum in den Achat diffundiert ist, während sich periodisch die äußeren Bedingungen wie Druck, Temperatur und Begleitminerale geändert haben. Die geänderte Erklärung tut der Schönheit der Achate aber keinen Abbruch.

Literatur

Ilja Prigogine: *Vom Sein zum Werden*, Piper 1992

Richard J. Field, Friedemann W. Schneider: *Oszillierende chemische Reaktionen und nichtlineare Dynamik*; in *Chemie in unserer Zeit* 22, Nr. 1, 1988, S. 17–29

Günter Dedié: *Gesellschaft ohne Ideologie – eine Utopie?* tredition 2019

¹⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=PpyKSRo8lec>