

Selbstorganisation

Fahren wir mit einem Auto und bremsen, so kommt das Auto schliesslich zum stehen, wobei sich die Bremsen und die Reifen erhitzen. Durch das Erwärmen von Bremsen und Reifen ist hingegen ein Auto noch nie zum Laufen gebracht worden.

Lassen wir in einem Raum ein offenes Parfümfläschen stehen, so breitet sich der Duft nach einiger Zeit gleichmässig im ganzen Raum aus. Die spontane Rückkehr der im Raum verteilten Parfümteilchen ins Fläschen ist jedoch noch nie beobachtet worden.

Alle Vorgänge in der Natur laufen offensichtlich nur in einer Richtung ab. Diese Richtung ist dadurch gekennzeichnet, dass in einem abgeschlossenen und sich selbst überlassenen System die **Entropie** zunimmt. Nach diesem grundlegenden Naturgesetz wird das Chaos letztlich die Ordnung in unserem Universum besiegen. Alle hochwertigen Energieformen werden hierbei im Verlauf von Milliarden von Jahren schliesslich in minderwertige Wärmeenergie, d.h. in ungeordnete Bewegung der kleinsten Teilchen, umgewandelt.

Unsere Welt besteht jedoch zum jetzigen Zeitpunkt noch aus geordneten Strukturen. Sie erstrecken sich von den riesigen Spiralgalaxien in den unermesslichen Weiten des Weltraums bis in die für uns unsichtbare Welt der Atome und Moleküle. Jedes Lebewesen, vom einfachsten Einzeller bis hin zum Menschen, bietet uns eine unerschöpfliche Quelle für das Studium geordneter Strukturen. Notwendigerweise müssen also neben dem obenerwähnten Gesetz auch noch Naturgesetze existieren, welche die fortwährende Entstehung von Ordnung aus dem Chaos (Selbstorganisation) beschreiben und erklären.

Wir werden uns hier mit den erst in der neuesten Zeit erforschten, aber relativ einfachen Beispielen von Selbstorganisation in der Chemie befassen.

Die Selbstorganisation in chemischen Systemen scheint mindestens an drei notwendige Bedingungen geknüpft zu sein:

1. Der Aufbau und die Erhaltung der Ordnung in einem chemischen System erfordert eine ständige Zufuhr hochwertiger (hier chemischer) Energie, welche dabei zur Wärme degradiert wird. **Die lokale (örtlich begrenzte) Selbstorganisation ist also nur auf Kosten eines Anstieges der Unordnung (Entropie) in der Umgebung möglich.**
2. Das chemische System muss sich fern von einem Gleichgewichtszustand befinden.
Beispiel: Der hohe Ordnungsgrad eines menschlichen Körpers ist nur dank dem ständigen Materie- und Energieaustausch mit der Umgebung möglich. Solcher Austausch verhindert aber die Einstellung eines Gleichgewichtes.
Bleibt dieser Austausch aus (= keine Nahrungsaufnahme, kein Atmen, etc.), so kann sich ein Gleichgewichtszustand einstellen, dabei wird das Leben und die Erhaltung der Ordnung jedoch aus offensichtlichen Gründen nicht mehr möglich.
3. In dem chemischen System muss eine Art **Rückkoppelung** (Feedback) existieren, d.h. ein Stoff in der Reaktionsfolge muss seine eigene Bildungsgeschwindigkeit beeinflussen können. Anders ausgedrückt: Die Geschwindigkeit mit der ein Stoff gebildet wird, nimmt mit seiner eigenen Konzentration zu (oder ab). Diese Erscheinung wird in der Chemie als **Autokatalyse** bezeichnet.

Bisherige Untersuchungen konnten zwei Arten von Selbstorganisation in chemischen Systemen aufzeigen:

Einerseits kann sich eine Eigenschaft des Systems (z.B. Farbe) im Laufe der Zeit periodisch ändern. Wir erhalten dann zeitliche Oszillationen oder "**chemische Uhren**".

Andererseits können sich räumliche Muster oder "**chemische Wellen**" in einem Reaktionsgemisch ausbilden.

Oszillierende Reaktionen dürften bei biologischen Vorgängen eine wichtige Rolle spielen. So nimmt man an, dass die "innere Uhr", die z.B. den Tag-Nacht-Rhythmus steuert, auf oszillierenden chemischen Reaktionen beruht.

Das berühmteste Beispiel einer oszillierenden chemischen Reaktion wurde vom russischen Chemiker B.P. Belousow entdeckt und später vom A.M. Zhabotinski systematisch untersucht. Der genaue Verlauf dieser Reaktion ist recht kompliziert (21 verschiedene, zum Teil nur kurzzeitig erscheinende, Reaktionspartner nehmen an 18 Teilreaktionen teil). gibt eine vereinfachte Darstellung des Reaktionsablaufes wieder.

Die chemischen Vorgänge, welche die Farbumschläge verursachen laufen etwa wie folgt ab:

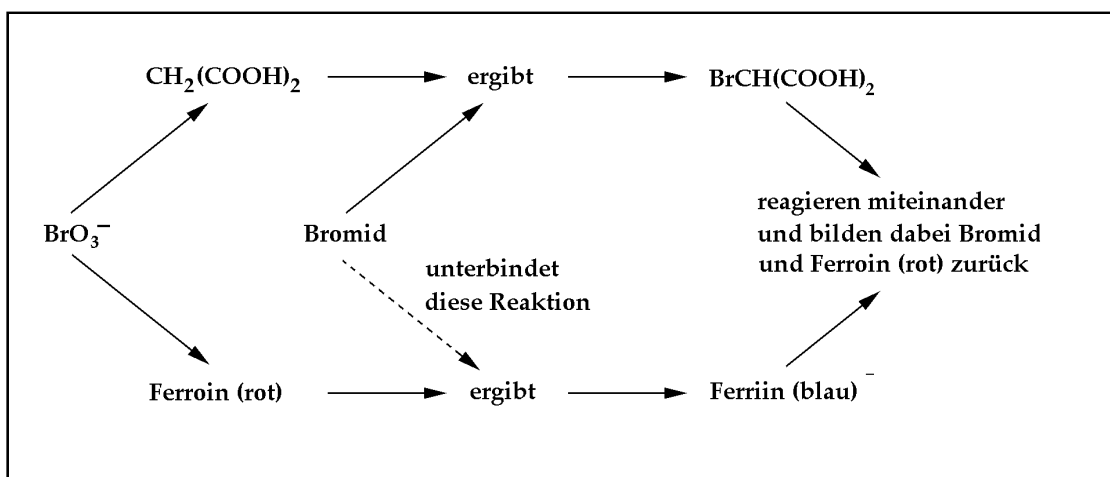
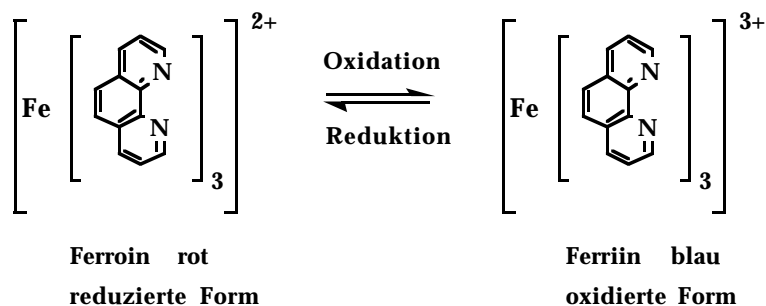


Abb. 1: Verlauf der Belousow-Zhabotinski-Reaktion

In der Lösung reagiert zunächst das Bromat-Ion (BrO_3^-) mit dem Bromid-Ion (Br^-), wobei elementares Brom (Br_2) entsteht. Nun wird die Malonsäure ($\text{CH}_2(\text{COOH})_2$) durch das entstandene Brom in Brommalonsäure ($\text{BrCH}(\text{COOH})_2$) umgewandelt. Das Bromat-Ion würde auch mit dem rotgefärbten Indikator Ferroin reagieren, wenn es dabei durch die Bromid-Ionen nicht gehindert wäre (Schon eine Bromid-Konzentration von 10^{-6} M verhindert diese Reaktion vollständig).

Das rote Ferroin ist eine organische Eisenverbindung mit der Oxidationszahl von Eisen = +II, welche durch Oxidation in das himmelblaue Ferriin (Oxidationszahl von Fe = +III) übergeht.:



Erst wenn durch die oben erwähnte Umsetzung mit den Bromat-Ionen und der Malonsäure alle Bromid-Ionen verbraucht sind, kann es zu einer Reaktion der Bromat-Ionen mit rotem Ferroin kommen, wobei dieses zu blauem Ferriin oxidiert wird. Die blaue Farbe der Lösung ist jedoch nicht stabil, weil nun die Brommalonsäure anfängt, das Ferriin wieder zu rotem Ferroin zu reduzieren. Da bei dieser Reaktion auch Bromid zurückgebildet wird, kann der Kreislauf von vorn beginnen.

Der Farbwechsel lässt sich solange beobachten, bis das Bromat-Ion oder die Malonsäure aufgebraucht ist.

Zeitliche Oszillationen (Chemische Uhren)

Es werden die folgenden Mengen der bereitgestellten Lösungen I.A, II.A und III in ein 100 ml Erlenmeyerkolben gegeben, welcher auf einem Magnetrührer aufgestellt ist.

32 ml Lösung I.A	(enthält Schwefelsäure und Natriumbromat)
2 ml Lösung II.A	(enthält Natriumbromid)
4 ml Lösung III	(enthält Malonsäure)

Der Magnetrührer wird eingeschaltet und die Lösung wird bis zum Verschwinden der braunen Färbung (Brom) gerührt. Anschliessend werden einige Tropfen der Ferroinlösung zugegeben.

Beobachtung:

Periodendauer:

Chemisches Blinklicht

In dieser faszinierender Variante der Belousow-Zhabotinski-Reaktion wird die Eisenverbindung Ferroin durch eine Rutheniumverbindung (Ruthenium: Element mit der Ordnungszahl = 44) ersetzt. Dieser Stoff kann, ähnlich wie das Ferroin, durch die Einwirkung des Bromat-Ions in eine oxidierte Form übergeführt werden.

Die reduzierte Form hat im Gegensatz zu der oxidierten Form die Eigenschaft, das (unsichtbare) ultraviolette Licht aufzunehmen und als oranges Licht wieder abzustrahlen (Fluoreszenz). Wird also das Reaktionsgemisch, in welchem die reduzierte Rutheniumverbindung periodisch oxidiert wird, mit einer UV-Lampe bestrahlt, sollte sich dies in einem Wechsel zwischen orangem Leuchten und Dunkelheit manifestieren.

Durchführung

In einem abgedunkeltem Raum werden je 50 ml der Lösungen I.B und II.B in einem hohen Becherglas vermischt. Unter ständigem Rühren (Magnetrührer) und Bestrahlung mit einer UV-Lampe werden etwa 5 Tropfen der gelösten Rutheniumverbindung zugegeben.

Beobachtung:

Periodendauer:

Räumliche Muster (chemische Wellen)

Bei der Beobachtung der zeitlichen Oszillationen in den vorhergehenden Versuchen war es nötig, die Lösung zu rühren, damit die Farbe überall gleichzeitig umschlägt. Andererseits können sich in unbewegten Lösungen räumliche Muster ausbilden, die sich von einzelnen Punkten aus in Form von Kreisen, Ellipsen oder Spiralen mit Geschwindigkeiten von einigen Millimetern pro Minute ausbreiten (Abb. 2).

Die räumlichen Muster und die zeitlichen Oszillationen beruhen natürlich auf den gleichen chemischen Reaktionen.

Während normalerweise die Bromid-Ionen überall in der Lösung gleichmässig mit Bromat-Ionen und Malonsäure reagieren, kann ein Staubteilchen oder ein Kratzer an der Glaswand die Reaktion örtlich beschleunigen. Dadurch werden Bromid-

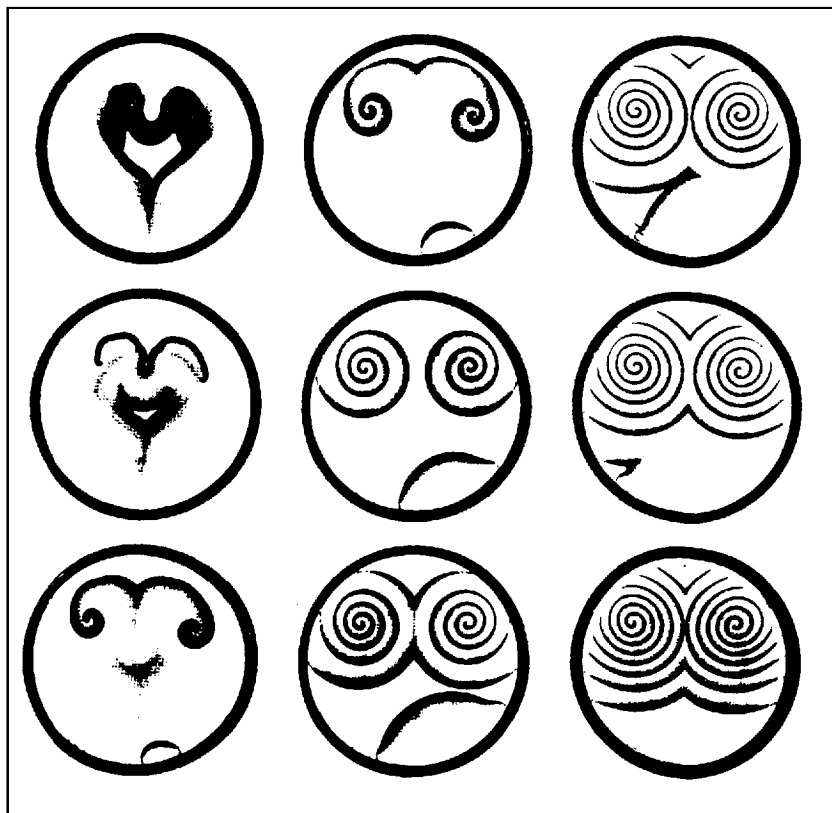


Abb. 2: Räumliche Muster bei der Belousov-Zhabotinski-Reaktion

Ionen an dieser Stelle verbraucht, während in der übrigen Lösung noch genügend davon vorhanden ist. Dies hat zweierlei Konsequenzen: Einmal schlägt die Farbe von Ferroin an der Stelle, welche kein Bromid enthält, von Rot nach Blau um. Zum anderen diffundieren Bromid-Ionen aus der Umgebung zu der Stelle an der das Bromid aufgebraucht ist. Dadurch verarmt die Umgebung an Bromid, so dass auch hier Ferroin durch Bromat oxidiert werden kann und sich blau färbt. Somit breitet sich eine blaue Welle in der Lösung aus. In ihrer Ausbreitungsrichtung ist sie schmal, da die blaue Farbe an ihrer Rückseite schnell verschwindet, wenn sich aus Brommalonsäure und blauem Ferroin wieder Bromid und rotes Ferroin zurückbilden.

8 ml Lösung I.C, 0,5 ml Lösung II.C und 1 ml Lösung III werden in eine Petrischale hineingegossen. Danach gibt man 1 Tropfen einer Seifenlösung zu und wartet, bis die braune Farbe der Lösung verschwunden ist. Nun wird die Schale erschütterungsfrei auf einem Hellraumprojektor (oder weisser Unterlage) plaziert und 1 volle Pipette Ferroinlösung zugegeben. Die Schale wird gut umgeschwenkt und auf dem Projektor abgelegt.

Beobachtung:

Weiterführende Literatur

Brandl H.: Oszillierende biologische und chemische systeme, Praxis der Naturwissenschaften, 30, 65 (1981).

Brandl, H.: Bildung dissipativer Strukturen in einigen neuen, sehr einfachen chemischen Systemen. Praxis der Naturwissenschaften, 33, 336 (1984).

Brandl, H.: Chemische Prozesse erzeugen Ordnungsstrukturen. Praxis der Naturwissenschaften, 35, 22 (1986).

Brandl, H.: Eine oszillierende Reaktion mit sichtbarer Chemolumineszenz. Praxis der Naturwissenschaften, 33, 47 (1984)

Küppers, B.-O.: Ordnung aus dem Chaos. Prinzipien der Selbstorganisation und Evolution des Lebens. Spektrum, 1988 (4), 120

Wenisch, H. und Herrmann, O.: Oszillierende Reaktionen am Beispiel der Belousov-Zhabotinski-Reaktion. Naturwissenschaften im Unterricht (Chemie), 1, (2), 35 (1990)

Müller, S.C. Spiraldynamik in Erregungswellen. Neue Zürcher Zeitung, 25.8.1993.

Epstein, I.R. et al. Oszillierende chemische Reaktionen. Spektrum 1983 (5), 98.

Materialliste

Allgemein

- Lösungen in Erlenmeyerkolben (mit einem Stift anschreiben):
 - Lösung I.A 3 ml H_2SO_4 konz.
 100ml H_2O (ITW)
 9 g NaBrO_3
 - Lösung II.A 1 g NaBr (1.33 g $\text{NaBr} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$)
 10ml H_2O
 - Lösung III.A 5 g Malonsäure
 50 ml H_2O
 - Lösung I.B 4 g Malonsäure in 80 ml ITW lösen, danach 10 ml
 H_2SO_4 konz. zufügen und auf 100ml auffüllen.
 - Lösung II.B 1.4 g KBrO_3 in 100ml ITW gelöst
 - Lösung I.C 67 ml H_2O (ITW) + 1 ml H_2SO_4 konz. + 5 g NaBrO_3
 - Lösung II.C 20 ml H_2O + 3 g NaBr (entspricht 4 g $\text{NaBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Ferroin - Lösung
- UV - Lampe

Pro Arbeitsplatz

- 2 Erlenmeyer weithals 100ml
- 2 Bechergläser hoch 250ml
- je 1 Messzylinder 5ml / 10ml / 50ml
- 1 Petrischale
- 1 Magnetprüher mit Magnetfisch