

# *Praxis der*

# *Naturwissenschaften*

**Chemie in der Schule**



***Strukturbildende  
Prozesse***



dende Reaktionen wesentlichen mechanistischen Aspekt der Rückkopplung deutlich werden lassen.

Mit der neuen Sichtweise – eben der Interpretation des 2. Hauptsatzes „über den Tellerrand hinaus“ – ist ein prinzipielles Verständnis für die Existenz von Strukturen, die einen höheren Ordnungsgrad als ihre Umgebung aufweisen, gegeben. Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf biologische Systeme löst die eingangs erwähnte Inkongruenz auf. Gleichzeitig wird durch diesen Transfer am Ende der Unterrichtsreihe, das Wissen, wie u. a. von *Schecker* gefordert, in die Lebenswelt der Schüler eingebettet, da sich Sachwissen nur dann als bildend erweist, „wenn es in einen persönlichen oder gesellschaftlichen Kontext gestellt wird.“ [14, S. 489]

#### Literatur

[1] [http://www.sil.si.edu/digitalcollections/hst/scientific-identity/CF/display\\_results.cfm?alpha\\_sort=b](http://www.sil.si.edu/digitalcollections/hst/scientific-identity/CF/display_results.cfm?alpha_sort=b) (letzter Zugriff: 14.03.2007)

- [2] <http://www.know.nl/vanthoff/images/portret02.gif> (letzter Zugriff: 01.12.2007)
- [3] H. R. Christen, Chemie. Frankfurt 1984
- [4] J. G. W. Matthews, Demonstration of Spontaneous Endothermic Reactions. J. Chem. Educ. 43, 476 ff. (1966)
- [5] M. D. Hawkins, W. Dodd, A Vigorous Spontaneous Endothermic Reaction. J. Chem. Educ. 51, 178 ff. (1974)
- [6] H. Schmidkunz, Spontane endotherme Reaktion fester, kristalliner Stoffe. NiU-C 2, 65–68 (1990)
- [7] H. Schmidkunz, Neue spontane endotherme Reaktionen kristalliner Substanzen. Chemkon 4, 175–178 (2002)
- [8] W. Asselborn, M. Jäckel, K. T. Risch (Hrsg.), Chemie heute – Sekundarbereich II. Schroedel-Verlag, Hannover 1998
- [9] W. Amann et al, elemente Chemie II. Stuttgart 1989
- [10] E. Grimsehl, Lehrbuch der Physik. Leipzig 1909
- [11] <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Gallery/Clausius.GIF> (letzter Zugriff: 14.03.2007)
- [12] F. Jürgensen, Ein Erklärungskonzept der Triebkraft chemischer Reaktionen. CHEMKON 5/3, 121–126 (1998)
- [13] H. Kunz, Prinzipien der Selbstorganisation. Dissertation, Oldenburg 2001
- [14] H. Schecker, Naturwissenschaftlicher Unterricht im Kontext allgemeiner Bildung. MNU 49/8, 488 ff. (1996)
- [15] M. Tausch, H. Wambach, Entropie – Was ist wissenschaftlich vertretbar und didaktisch sinnvoll? PdN-Ch 2/43, 35 (1993)
- [16] H. Meyer, Unterrichtsmethoden – Praxisband. Berlin 1997

- [17] H. Schmidkunz, Das Streben nach Unordnung als treibende Kraft chemischer Reaktionen. NiU-P/C 35/24, 31 ff. (1987)
- [18] Autorenkollektiv, Grundsätze für eine reformpädagogische Neugestaltung des naturwissenschaftlichen Unterrichts. SVBI 10, 294 ff. (1995)
- [19] E. Sumfleth, Schülervorstellungen im Chemieunterricht. MNU 45/7, 410 ff. (1992)
- [20] H. R. Christen, Chemieunterricht. Basel 1990
- [21] H. Kunz, S. Wähler, M. Ducci, M. Oetken, Das mephistophelische Entropiekonzept. CHEMKON 7/4, 185 ff. (2000)
- [22] P. Coveney, R. Highfield, Anti-Chaos – Der Pfeil der Zeit in der Selbstorganisation des Lebens. Hamburg 1994
- [23] M. Oetken, C. Röttgen, M. Ducci, Passivitäts- und Oszillationseffekte an Metallen. CHEMKON 4/4, 170 ff. (1997)
- [24] M. Ducci, M. Oetken, Gekoppelte Oszillationen. MNU 51/4, 223 ff. (1998)

#### Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Marco Oetken, PH Freiburg, Kunzenweg 21, 79117 Freiburg

Prof. Dr. Matthias Ducci, PH Karlsruhe, Bismarckstraße 10, 76133 Karlsruhe

# Ordnung versus Chaos

## Fächerübergreifender Ansatz: Chemie und Kunst

J. Lipscher

*Whence is it that nature does nothing in vain; and whence arises all that order and beauty which we see in the world?*

Sir Isaac Newton, *Opticks*, 1704

*If order appeals to the intellect, then disorder titillates the imagination.*

Paul Claudel

### 1 | Vorbemerkungen

Die strukturbildenden Vorgänge sind von vielen Exponenten der Didaktik des gymnasialen Chemieunterrichtes auf ein Ehrenpodest in der „Hall of Fame“ der faszinierenden und relevanten Unterrichtsinhalte erhoben worden [3, 4, 9, 10, 16]. Der hohe Anspruch und die Eleganz der chemischen Zusammenhänge, die philosophischen Implikationen und die Bedeutung in der molekularen Evolution sowie die industriellen Anwendungen rechtfertigen diese Wertschätzung vollends. In diesem Beitrag plädiert der Autor für die Betonung der ästhetischen Aspekte dieser

chemischen Vorgänge, die ebenfalls zur Erhöhung der Lernmotivation herangezogen werden können [12]. Die Grundlage dieser Ausführungen bildet ein fächerübergreifendes Projekt über Ordnung und Chaos in der Chemie und in der Kunst [13], welches im Jahre 2002 mit einem Ehrenpreis im europaweiten Wettbewerb „Science Education Award“ des Verbandes der Europäischen Chemischen Industrien (CEFIC) ausgezeichnet worden war [5].

### 2 | Chemie und Kunst

Im chemischen Teil des Projektes wählen wir etliche in der Literatur beschriebenen strukturbildenden Reaktionen [1, 2, 10] aus und fügten noch einige neue Varianten hinzu. Die Studierenden nahmen sich zuerst vor, die chemischen Hintergründe dieser Vorgänge zu erforschen und befassten sich anschließend mit der Optimierung der Anleitungen, sodass die Ergebnisse auch im ästhetischen Sinne ansprechend

waren. Die optimierten Reaktionen wurden anschließend fotografisch dokumentiert und die Einzelbilder zu einer animierten Bilderserie zusammengestellt, welche im Internet abspielbar ist [13]. Die Beobachtung der spontanen Musterbildung aus einer homogenen Lösung, aus dem Chaos also, ist an sich bereits eine faszinierende und bereichernde Erfahrung. Die ästhetische Dimension der beobachteten Phänomene stärkt die emotionale und intellektuelle Wirkung auf die Lernenden im synergistischen Sinne.

Gibt es eine „Selbstorganisation“ der Wahrnehmung? Im zweiten, vom Kunstunterricht inspirierten Teil des Projektes, beschäftigten sich die Studierenden mit der Rolle des Intellekts bei der Wahrnehmung von Ordnung in chaotischen Strukturen und versuchten dann neue Wirklichkeiten zu erschaffen [13, 15].

Im Laufe der gesamten Projektarbeit ergaben sich reichlich Gelegenheiten zu philosophischen Diskussionen über die Ursachen

und Bedingungen der Entstehung geordneter Strukturen in einer Welt, die durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik regiert wird und auf lange Sicht einem Chaos zustrebt. Hier kann die Lehrkraft lenkend auf die Bedeutung der untersuchten chemischen Systeme in der molekularen Evolution [8] und die neueren philosophisch-naturwissenschaftlichen Ansätze, wie z. B. die Lehre von komplexen adaptiven Systemen von *M. Gell-Mann* [7] verweisen.

### 3 | Durchführung

● Die elf ausgewählten Reaktionen können grob in drei Gruppen eingeteilt werden.

1. Varianten der Belousov-Zhabotinskii-Reaktion.
2. Oxidation organischer Farbstoffe (zumeist Redox-Indikatoren) in alkoholischer Lösung: Safranin, Cacothelin und Methylenblau.
3. Oxidation organischer Polyphenole (zumeist fotografischer Entwickler) oder Farbstoffe in wässriger Lösung: Methylviologen, Amidol, Hydrochinon, Metol, Pyrogallol und Brenzkatechin.

#### Belousov-Zhabotinskii-Reaktion [4]

Man stelle die folgenden Lösungen her:

Lösung I: 2 mL konz. Schwefelsäure werden langsam (Schutzbrille!) in 50 mL dest. Wasser hinein pipettiert. Danach gibt man 5 g Natriumbromat zu und rührt bis zur vollständigen Auflösung des Bromats.

Lösung II: 1 g Natriumbromid werden in 10 mL dest. Wasser gelöst.

Lösung III: 1 g Malonsäure werden in 10 mL dest. Wasser gelöst.

Man mischt nun 12 mL Lösung I mit 1 mL Lösung II und 2 mL Lösung III. Das Gemisch wird unter einem Abzug solange gerührt, bis die braune Farbe des entstandenen Broms verschwunden ist. Danach setzt man ca. 2 mL einer käuflichen Ferroinsulfat-Lösung zu, rührt gut durch und lässt in einer Petrischale stehen.

#### Fluoreszierende Variante der Belousov-Zhabotinskii-Reaktion [4]

Man verfährt analog wie bei der oben beschriebenen klassischen Variante dieser Reaktion bis zum Verschwinden des Broms nach dem Zusammengießen der Lösungen I bis III. Danach setzt man ca. 1 mL einer käuflichen Tris (2,2'-bipyridin)-ruthenium(II)-chlorid-Lösung und eine Spur Ammoniumcarnitrat zu, rührt gut durch und giesst in eine Petrischale hinein. Die Petri-

schale wird nun auf ein weißes Rundfilterpapier gestellt und in einem dunklen Raum mit UV-Licht der Wellenlänge 366 nm bestrahlt. Die orange Fluoreszenz der Rutheniumverbindung kontrastiert hierbei mit der blauen Fluoreszenz des unterlegten Filterpapiers (optische Aufheller).

#### Safranin [10]

25 mg Safranin T werden in 40 mL Ethanol gelöst und mit 2 mL Hydroxyaceton sowie mit 4 mL Natronlauge,  $c = 2 \text{ mol/L}$ , versetzt. Die Lösung wird in eine Petrischale transferiert und stehen gelassen.

#### Cacothelin [10]

24 mg Cacothelin werden in 40 mL Ethanol gelöst und mit 1 mL Hydroxyaceton sowie mit 0,5 mL Natronlauge,  $c = 2 \text{ mol/L}$ , versetzt. Die Lösung wird in eine Petrischale transferiert und stehen gelassen.

#### Methylenblau [10]

25 mg Methylenblau werden in 40 mL Ethanol gelöst und mit 1 mL Hydroxyaceton versetzt. Die Lösung wird nun in eine Petrischale gegossen und mit 1 mL Natronlauge,  $c = 2 \text{ mol/L}$ , versetzt.

#### Methylviologen [4]

Einige Körnchen Methylviologen werden in 50 mL dest. Wasser gelöst und mit 3–4 Tropfen Triethanolamin versetzt. Man rührt bis zur völligen Auflösung des viskosen Triethanolamins. Zu der farblosen Lösung gibt man konzentrierte Natriumsulfid-Lösung bis die tiefe Blaufärbung des Methylviologenkations auftritt. Anschließend gießt man die Lösung in eine Petrischale und lässt an der Luft stehen.

#### Amidol

Ein halber Teelöffel der Substanz wird in 50 mL dest. Wasser gelöst, in eine Petrischale gegossen und mit 2 Pasteurpipetten Natronlauge,  $c = 2 \text{ mol/L}$ , versetzt.

#### Hydrochinon, Metol, Pyrogallol und Brenzkatechin [1]

Ein halber Löffel der Substanz und eine Messerspitze Natriumsulfid werden in 50 mL dest. Wasser gelöst, in eine Petrischale gegossen und mit 2 Pasteurpipetten Natronlauge,  $c = 2 \text{ mol/L}$ , versetzt.

#### Fotografische Dokumentation

Die Petrischale wurde auf einen Leuchtkasten gestellt, welcher durch einen grauen Karton mit kreisförmig ausgeschnittenem

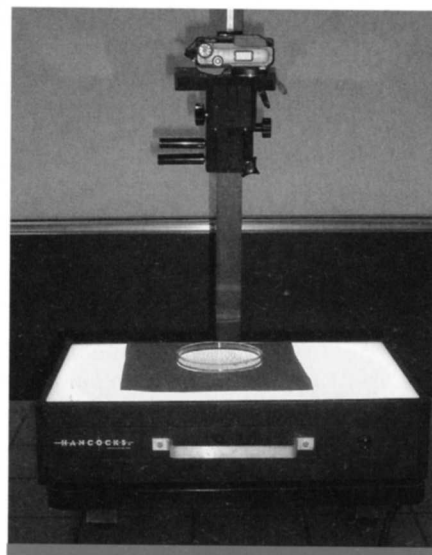


Abb. 1: Die fotografische Dokumentation der Musterbildung

Loch in der Größe der Petrischale abgedeckt wurde und mit einer Digitalkamera (auf einem Repröstander montiert) in geeigneten Zeitabständen fotografiert (Abb. 1). Die entstandenen Bilderserien wurden dann jeweils zu einer Animation aufbereitet, sodass man die Musterbildung aus einer homogenen Lösung bei jeder der elf untersuchten Reaktionen im Internet betrachten kann [13]. Beim Fotografieren ist es wichtig, dass man sowohl die automatische Belichtung als auch die automatische SchärfEinstellung der Kamera abschaltet und manuelle Einstellung der Belichtung und der Schärfe vornimmt. So gewährleistet man konsistente Bildqualität innerhalb der Bilderserie und verhindert unnatürliche Übergänge zwischen den einzelnen Bildern der Animation.

### 4 | Chemischer Hintergrund

● Bei der Belousov-Zhabotinskii-Reaktion handelt es sich um ein komplexes System von Reaktionen, an denen Bromid- und Bromat-Ionen und der Redox-Indikator Ferroin beteiligt sind [6, 17]. Die Mechanismen der restlichen Reaktionen sind bei *Kunz* [11] detailliert beschrieben. Bei Methylviologen, Amidol, Pyrogallol, Metol, Brenzkatechin und Hydrochinon werden die farblosen oder schwach gefärbten Substanzen in alkalischer Lösung mit Luftsauerstoff zu intensiv gefärbten Produkten oxidiert. Es handelt sich hierbei mit Ausnahme von Methylviologen um Stoffe, welche als Entwickler-substanzen in der Fotografie eingesetzt werden. Die besondere Rolle der Oxidationsprodukte von Pyrogallol und Brenz-



Abb. 2: Musterbildung durch die Luftoxidation des Pyrogallols in wässriger Lösung (1,2,3-Trihydroxybenzol; eine fotografische Entwicklersubstanz). Die Animation der Musterentstehung aus einer homogenen Lösung kann bei [13] betrachtet werden.

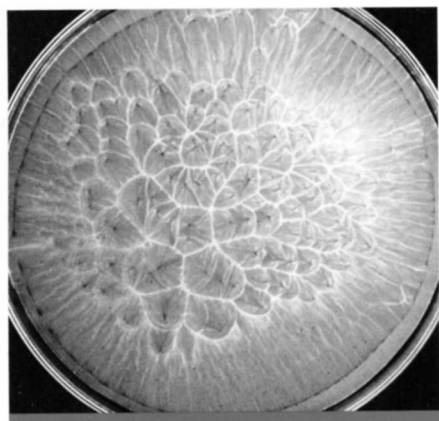


Abb. 3: Musterbildung durch Luftoxidation des Farbstoffes Cacothelein in alkoholischer Lösung. Die Animation der Musterentstehung aus einer homogenen Lösung kann bei [13] betrachtet werden.

katechin bei der Entwicklung von schwarz-weiß Filmen in den so genannten einfarbenden Entwicklern (staining developers) wurde an einem anderen Ort in dieser Zeitschrift beschrieben [14]. Die Farbstoffe Safranin, Cacothelein und Methylenblau werden mithilfe von Hydroxyaceton und Ethanolat-Ionen zu einer schwächer gefärbten oder farblosen Form reduziert, welche dann anschließend an der Luft zu der andersfarbigen Form oxidiert wird.

## 5 | Erklärung der Musterbildung

Die Erklärung der zeitlichen und räumlichen Muster bei der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion ist auf ein Zusammenspiel vieler gekoppelter Reaktionen zurückzuführen und wurde in der Literatur ausführlich beschrieben [6, 17]. Die Erkenntnisse zu den Ursachen der Musterbildung bei der Oxidation organischer Farbstoffe sind in der Dissertation von H. Kunz [11] umfassend dargestellt.

Die sich relativ langsam verändernden faserartigen Muster, welche sich bei der Oxidation der Polyphenole oder der Farbstoffe in wässriger Lösung ausbilden, beruhen wahrscheinlich auf Dichtegradienten. Der eingesetzte Stoff kommt an der Oberfläche mit Luftsauerstoff in Kontakt und wird zu einem gefärbten Produkt oxidiert. Bei geringer Tiefe (weniger als 15 mm) führt die Diffusion des farbigen Produktes von der Oberfläche nach unten zu einer Rollenbewegung und somit zur Musterbildung. Die Muster in alkoholischen Lösungen weisen eine viel stärkere Dynamik auf und entstehen aufgrund unterschiedlicher Oberflächenspannungen der oxidierten und der nicht oxidierten Form des Farbstoffes.

## 6 | Methodische Überlegungen

Beim Einsatz dieser Thematik im gymnasialen Chemieunterricht kann die Lehrkraft, so die Erfahrungen des Autors, leicht in eine Falle tappen. Die strukturbildenden Prozesse sind chemisch ausserordentlich interessant, sie sind philosophisch bedeutsam und haben weittragende industrielle Bedeutung, zudem sind die Reaktionen von seltener Schönheit. Die Lehrkraft darf jedoch nicht unreflektiert die gleiche Begeisterung bei den Studierenden von vorneherein erwarten. Man muss sich ja lediglich die fachlichen Voraussetzungen vor Augen führen, welche für ein konzeptuelles Verständnis dieses Gebietes unentbehrlich sind. Ausser der Redoxchemie sollten die Schülerinnen und Schüler die Rolle der Enthalpie und der Entropie bei chemischen Vorgängen verstanden haben, sie sollten fundierte Kenntnisse der Kinetik und des chemischen Gleichgewichtes mitbringen, um Vorgänge fern des Gleichgewichtes diskutieren zu können. Sollte sich die Behandlung der Strukturbildung in chemischen Systemen nicht auf das (durchaus zu empfehlende) Einstudieren eines Auftritts auf der vorweihnachtlichen Chemieshow beschränken, müssen zuerst die Grundlagen gelegt werden. Dies ist aus unschwer zu erkennenden Gründen nur in fortgeschrittenen Unterrichtsgefässen (Leistungskurse, SchwerpunktFach) sinnvoll zu bewerkstelligen. Eine andere Möglichkeit besteht in der Integration dieser Thematik in fächerübergreifenden Unterrichtseinheiten, welche die chemischen Aspekte in einen breiteren Rahmen stellen. So bietet sich eine Zusammenarbeit mit dem Fachkreis Kunstunter-

richt an, um beispielsweise, wie in dem hier beschriebenen Fall, das Wechselspiel von Ordnung und Chaos in der Chemie und in der Kunst zu thematisieren. Sollte die Frage nach dem Ursprung des Lebens im Zentrum einer Themenwoche stehen, so kann eine Zusammenarbeit mit der Kollegenschaft aus den Fachkreisen Philosophie und Biologie sinnvoll erscheinen.

### Hinweis

Siehe auch Abbildungen auf Seite 52.

### Literatur

- [1] H. Brandl, Bildung dissipativer Strukturen in einigen neuen, sehr einfachen chemischen Systemen, PdN-Chemie, 33 (11), 336 (1984)
- [2] H. Brandl, Selbstleuchtende chemische Wellen bei der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion, PdN-Chemie, 37 (1), 32 (1988)
- [3] H. Brandl, Oszillierende chemische Reaktionen und Strukturbildungsprozesse, Aulis, Köln 1987, 120 S. Reihe: Praxis-Schriftenreihe, Abteilung Chemie, 46
- [4] H. Brandl, Chemische Prozesse erzeugen Ordnungsstrukturen, PdN-Chemie, 35 (4), 22 (1986)
- [5] CEFIC Science Education Award 2002, Prize Book, <<http://www.cefic.org/Files/Publications/1SEA.pdf>>, Zugriff am 18.8.2007
- [6] I.R. Epstein et al., Oszillierende chemische Reaktionen, Spektrum 5/1983, 98
- [7] M. Gell-Mann, Das Quark und der Jaguar. Piper, München 1995
- [8] S. A. Kauffman, The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution. Oxford University Press, New York 1993.
- [9] E. K. Kretzer, Oszillierende Reaktionen als wichtiges Beispiel für komplexe Systeme im Chemieunterricht, Chimica didactica, 30 1/2 (Nr. 93/94), 48 (2004)
- [10] H. Kunz et al., Das mephistophelische Energiekonzept. Ein Vorschlag für die Einbindung strukturbildender Prozesse in den Chemieunterricht, CHEMKON 7 (4), 185 (2000)
- [11] H. Kunz, Prinzipien der Selbstorganisation: Untersuchungen zu Strukturbildenden Prozessen und Entwicklung einer experimentellen Konzeption zur Einbindung dieser Thematik in einen zeitgemässen Chemieunterricht, 275 S, Oldenburg, Univ., Diss., 2001, <http://www.bis.uni-oldenburg.de/dissertation/ediss.html>, Zugriff am 18.8.2007
- [12] a) J. Lipscher, Kunst und Chemie, PdN-ChiS 54 (5), 2 (2005) b) J. Lipscher, Echt falsch? Naturwissenschaftliche Methoden überführen Kunstfälscher, PdN-ChiS 53 (5), 7 (2004)
- [13] J. Lipscher und M. Pörtner, Ordnung und Chaos, <<http://www.swisseduc.ch/chemie/orderchaos>>, Zugriff am 18.8.2007
- [14] J. Lipscher, Silberfotografie – ein Schwanengesang?, PdN-ChiS 55 (5), 25 (2006)
- [15] M. Pörtner, unpublizierte Arbeit.
- [16] R. Reich, Oszillierende chemische Reaktionen, MNU, 43 (3), 145 (1990)
- [17] H. Wensisch und O. Herrmann, Oszillierende Reaktionen am Beispiel der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion, NiU-Chemie, 1 (2), 35 (1990)

### Anschrift des Verfassers

Dr. Juraj Lipscher, Kantonsschule Baden, Seminarstr. 3, CH-5400 Baden, Schweiz, E-Mail: [juraj@lipscher.ch](mailto:juraj@lipscher.ch)

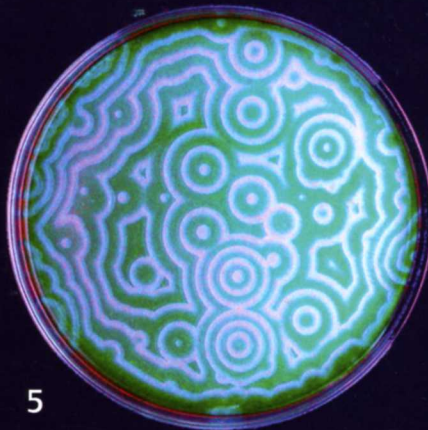


# Ordnung versus Chaos

J. Lipscher



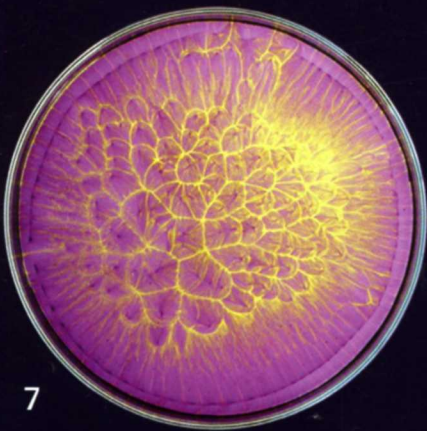
4



5



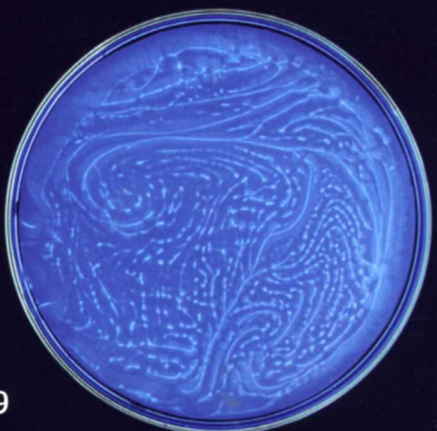
6



7



8



9



10



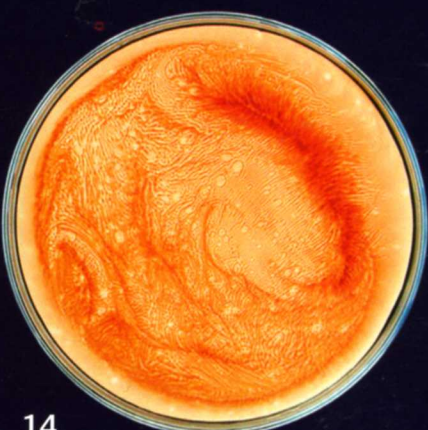
11



12



13



14

Abb. 4: Belousov-Zhabotinskii-Reaktion

Abb. 5: Belousov-Zhabotinskii-Reaktion, fluoreszierende Version

Abb. 6: Safranin

Abb. 7: Cacothelin

Abb. 8: Methylenblau

Abb. 9: Methylviologen

Abb. 10: Amidol

Abb. 11: Hydrochinon

Abb. 12: Metol

Abb. 13: Pyrogallol

Abb. 14: Brenzkatechin