

Vergleichende Untersuchungen zur Musterbildung in erregbaren Medien mit Vermerken zum Einfluss schwacher magnetischer Felder

Schwerpunkt: Belousov-Zhabotinsky Reaktion

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

Fakultät Naturwissenschaften

Universität Hohenheim

Institut für Physiologie

vorgelegt von

Kerstin Dolzmann

aus Frankfurt a.M.

2006

Dekan: Prof. Dr. H. Breer
1. berichtende Person: Prof. Dr. W. Hanke
2. berichtende Person: Prof. Dr. H. Rösner
Eingereicht am: 19. Dezember 2006
Mündliche Prüfung am: 26. Februar 2007

Die vorliegende Arbeit wurde am 08. 02. 2007 von der Fakultät Naturwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften“ angenommen.

gewidmet meinem Vater

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Dissertation selbständig gemäß § 8 Abs. 2 Ziffer 2 der Promotionsordnung angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Kerstin Dolzmann

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort	1
2. Musterbildung in erregbaren Medien	3
2.1. Was sind erregbare Medien?	3
2.2. Theoretische Grundlage chemischer Wellen	4
2.3. Theoretische Betrachtung oszillierender Systeme	5
2.4. Gibt es Musterbildung in neuronalen Geweben?	6
3. Beispielsysteme zur Untersuchung von Musterbildung	8
3.1. Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (Chemie)	8
3.2. Ferrofluide (Physik)	11
3.3. Spreading Depression (Biologie)	13
3.4. Mathematik/ Computer-Simulation	17
3.5. Wirkung schwacher externer Kräfte auf die Musterbildung einzelner Systeme	18
3.6. Begründung zur Auswahl der Systeme für die praktische Untersuchung	19
4. Material und Methoden	20
4.1. Materialien	20
4.1.1. Chemikalien	20
4.1.2. Geräte	20
4.2. Versuchsaubauten	20
4.2.1. Belousov-Zhabotinsky Reaktion	20
4.2.2. Ferrofluide	25
4.2.3. Retinale spreading depression	26
4.2.4. Computersimulation	26
4.3. Datenanalyse	27
5. Versuchsergebnisse	28
5.1. Belousov-Zhabotinsky-Reaktion	28
5.1.1. zeitliche Oszillation	28
5.1.2. Einfluss eines schwachen magnetischen Feldes auf die zeitliche Oszillation	38

5.1.3. Einfluss eines schwachen magnetischen Feldes auf die räumliche Oszillation	43
5.2. Ferrofluide	49
6. Diskussion der Ergebnisse	51
6.1. Biphasische Signale bei nicht-stationärer BRZ	51
6.2. Einfluss eines schwachen magnetischen Feldes auf die Musterbildung	55
6.2.1. Extern angeregte Ferrofluiden	55
6.2.2. Belousov-Zhabotinsky-Reaktion	56
6.3. Vergleichbarkeit mit neuronalen Systemen	59
7. Zusammenfassung	61
7.1. Zusammenfassung (deutsch)	61
7.2. Summery (english)	62
8. Literatur	63
9. Anhang	69
9.1. Erregbare Medien und Musterbildung in der Schule	69
9.2. Liste der Abkürzungen	70

1. Vorwort

Was haben die Musterungen eines Leopardenfells mit der Ausbreitung der elektrischen Wellen über den Herzmuskel, die Wolkenwirbel der Stratosphäre mit den Sandwellen in der Wüste oder die Entstehung von Autobahnstaus mit dem Verhalten des Schleimpilzes *Dictostylium discoideum* gemeinsam? Gar nichts?

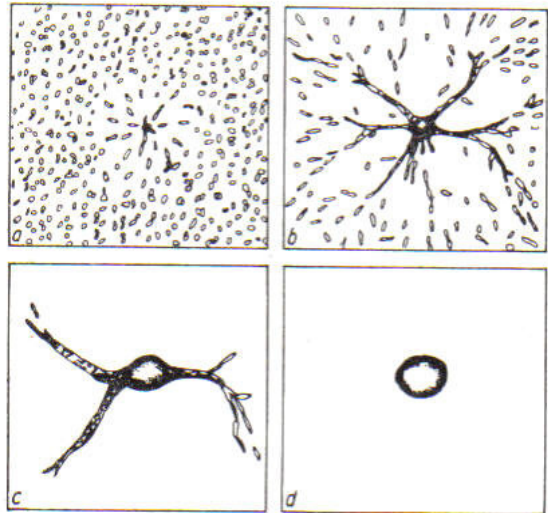


Abbildung 1: Beispiele für Musterbildung im Großen und Kleinen (v.l.o.n.r.u.) Wolkenwirbel in der Stratosphäre (<http://www.weatherquestions.com/hurricane.jpg>), *Dictostylium discoideum* (nach Sinz, 1980), Giraffenfell, durch vertikale Vibration erzeugte Sandwellen.

Auf den ersten Blick scheint es, als sei dies alles eine zufällige Zusammenstellung beliebiger Phänomene aus den unterschiedlichsten Bereichen der Physik, Chemie, Biologie, Meteorologie oder Soziologie. Es gibt aber dennoch eine Gemeinsamkeit: Sie alle besitzen die Fähigkeit, selbständig aus zuvor chaotischen Zuständen Muster zu generieren, oftmals sogar geometrisch exakte. Fraglich ist nun, wie kommen diese Systeme dazu, sich zu ordnen, Muster zu bilden.

Stellt man eine offene Parfümflasche in ein Zimmer, verteilen sich die Duftmoleküle des Parfüms nach einiger Zeit aufgrund der ihnen innewohnenden Energie gleichmäßig im Raum. Es hat aber noch niemand beobachtet, dass sich dieser Prozess umkehrt. Grund dafür sind die Gesetze der Thermodynamik, denen alle Vorgänge auf der Erde gehorchen müssen. Demnach laufen alle spontanen Prozesse in einer bestimmten Richtung ab: auf eine höhere Entropie zu; gleichzeitig nimmt die freie Enthalpie ab. Also müsste, wenn alles auf eine größere Unordnung zusteuert, die Welt langsam im Chaos versinken. Tatsache ist aber, dass aus chaotischen Zuständen immer wieder geordnete Muster entstehen, im Großen wie im Kleinen – in Galaxien wie auf molekulare Ebene bei der Embryogenese.

Die Auflösung dieses scheinbaren Paradoxons liegt in der Unterscheidung von offenen und geschlossenen Systemen, wie es I. Pirogine 1955 in seinem Aufsatz beschrieb. Seiner Theorie nach gelten der 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik nur für geschlossene Systeme, die in keinem Austausch mit der Umwelt stehen. Offene Systeme dagegen können sich unter bestimmten Bedingungen in Richtung abnehmender Entropie bewegen, also Muster bilden.

Die Untersuchung solcher spontan sich entwickelnder komplexer Muster (Selbstorganisation) ist mittlerweile ein interdisziplinäres Thema, das in allen Lebensbereichen und somit auch allen wissenschaftlichen Fachrichtungen auftaucht. Oftmals dienen dabei Erkenntnisse aus dem einen Fachbereich dazu, Rückschlüsse auf andere Systeme zu ziehen. Alle den zur Musterbildung befähigten Systemen liegt eine nichtlineare Dynamik zugrunde, die verantwortlich dafür ist, dass sich komplexe, kohärente, oftmals periodisch schwankende Strukturen ausbilden (Sangués & Epstein, 2003). Letztendlich ist es dieses Phänomen der Selbstorganisation, das dafür sorgt, dass die Welt sich nicht irgendwann im Chaos verliert. Man kann also sagen, dass die Musterbildung das grundlegende Prinzip ist, „was die Welt im Innersten zusammenhält.“¹

¹ Goethe, J.W.: Faust I, Nacht – Monolog Faust V.

2. Musterbildung in erregbaren Medien

Bei der Untersuchung komplexer Systeme hat man festgestellt, dass die meisten von ihnen bestimmte Merkmale gemeinsam haben: Sie setzen sich aus zahlreichen Komponenten (Individuen) zusammen, die in wechselseitiger Interaktion miteinander verknüpft sind. Das Hervorbringen einer höheren Ordnung innerhalb des Systems geschieht durch den Zusammenschluss der Einzelkomponenten in größeren Gemeinschaften. Die Entstehung von Mustern, Strukturen, Wiederholungen und Ordnung basiert auf der Tatsache, dass ein jedes Individuum das eigene Verhalten auf das der anderen abstimmt (Interaktion). Der entscheidende Punkt zum Verständnis der Komplexitätsforschung ist deshalb die Erkenntnis, dass in komplexen Systemen oft die Einzelteile und ihr isoliertes Verhalten weniger aussagekräftig sind als die wechselseitigen Interaktionen zwischen den Individuen und die Regeln, die diese Interaktionen bestimmen und steuern. Das Ganze ist dabei immer mehr als die Summe der Einzelteile.

Das erregbare System, an dem die Grundlagen der Musterbildung zuerst erforscht wurden, ist die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (BZR). Diese von Belousov im Jahre 1950 zufällig entdeckte Reaktion zeigt einen periodischen Farbwechsel zwischen gelb und farblos. Zhabotinsky untersuchte diese oszillierende Reaktion 1962 – 1973 weiter und entdeckte so auch die Bildung von Spiralmustern in dünnen Schichten von Reaktionslösungen. Heute beschäftigen sich viele Arbeitsgruppen weltweit mit der Erforschung der Musterbildung an sich, ihrer Beeinflussbarkeit durch externe Kräfte und den dahinterstehenden Mechanismen. Die BZR ist dabei über die Jahre zum Modellsystem für erregbare Medien geworden.

2.1. Was sind erregbare Medien?

Erregbare Medien sind ein Teilbereich der komplexen Systeme. Der Begriff an sich stammt aus der Physik und beschreibt Systeme, die folgende Reihe von notwendigen aber nicht hinreichenden Voraussetzungen erfüllen:

- Zur Musterbildung sind nur thermodynamisch offene Systeme fähig, die im Austausch mit ihrer Umgebung stehen. Dabei kommt es entweder zur Aufnahme oder Abgabe von Energie oder Materie.

- Das System befindet sich weitab vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand. Alle im System ablaufenden Prozesse sind zum Stillstand gekommen, alle Gradienten wurden ausgeglichen.
- Es handelt sich um ein dissipatives System bei dem die Bruttoreaktionen exothermer Natur ist.
- Sie verfügen über kooperative Prozesse. Mindestens ein Reaktionsschritt muss positiv oder negativ rückgekoppelt sein, d.h. eines der Produkte beeinflusst die Reaktionsgeschwindigkeit eines anderen.
- Die Zeitabhängigkeit wird mittels eines nicht-linearen Gleichungssystems beschrieben.

Als Konsequenz dieser Bedingungen besitzen erregbaren Medien spezifische Eigenschaften wie beispielweise Oszillationen (BZR) oder sich ausbreitende Erregungswellen (BZR und Spreading Depression (SD)), lassen interessante Muster entstehen (Ferrofluide) oder eine Tendenz zur Selbstorganisation erkennen.

Eine Oszillation solcher Systeme entsteht durch das Vorhandensein von mehr als einem Zwischenprodukt, dessen Konzentration auf die Bildung anderer Zwischenprodukte zurückwirkt. Eine solche Reaktion könnte wie folgt aussehen:



Das Zwischenprodukt X katalysiert in diesem Fall seine eigene Bildung. Die so steigende Konzentration von X bewirkt ihrerseits einen Anstieg der Konzentration von Y. Diese Reaktion ist aber negativ rückgekoppelt mit der Reaktion, die zur Bildung von X führt, wodurch die Oszillation entsteht (nach Manz, 2002).

2.2. Theoretische Grundlage chemischer Wellen

Sowohl die Wellen, die bei der BZR auftreten, als auch die der retinalen SD sind chemischer Natur und basieren auf einem Diffusions-Reaktions-System. Bei einem solchen System wird an einer Stelle der Stoff X gebildet, welcher dann an einen anderen Ort diffundiert, wo er wiederum seine eigene Bildung initiiert. So breitet sich die Reaktion räumlich immer weiter aus. Ist dieser Zweischrittmechanismus Reaktion-Diffusion erst einmal angestoßen, ist er

selbsterhaltend. Er folgt „einem Alles-oder-Nichts-Prinzip und kann sich potentiell unendlich weit fortpflanzen, solange nur die Möglichkeit zur Reaktion und Diffusion besteht.“ (Weimer 2003)

Da die durch die Reaktionen entstehenden Konzentrationsgradienten aufgrund der Diffusion im Medium propagieren, breitet sich die Reaktion wie eine Welle im Raum aus. Dabei gibt es eine definierte Ausbreitungsrichtung, da das System auf der Rückseite der Wellenfront refraktär ist. Aus dem selben Grund kommt es beim Aufeinandertreffen zweier Wellen zu einem gegenseitigen Auslöschen (Annihilation). Überhaupt unterscheiden sich chemische Wellen in ihrem Verhalten deutlich von ihren mechanischen, akustischen oder elektrodynamischen Verwandten: So besitzen sie keine Interferenz und keine Fähigkeit zur Reflexion an Hindernissen (Manz, 2002).

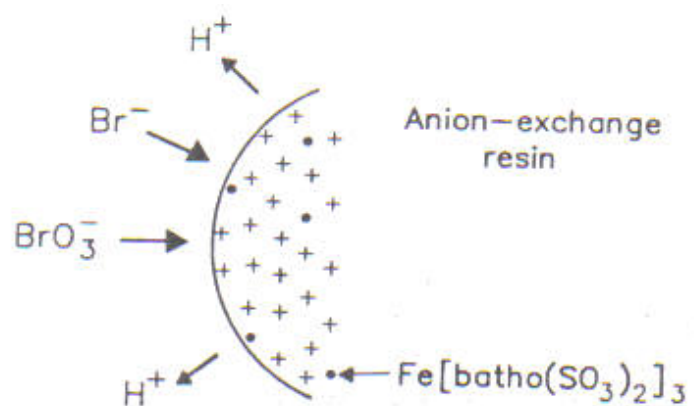


Abbildung 2: Als Beispiel für eine chemische Welle ist im linken Foto die Spiralwelle einer BZR zu sehen ($3 \times 3 \text{ cm}^2$). Das rechte Bild zeigt dazu die lokale Verteilung der beteiligten Ionen an einer solchen Wellenfront (nach Yamaguchi et.al., 1991)

2.3. Theoretische Betrachtung oszillierender Systeme

Der 1955 von I. Pirogine und Mitarbeitern entwickelte „Brüsselator“ stellte eine theoretische Betrachtung der Verhältnisse in einer oszillierenden Reaktion dar (Prigonine & Lefever, 1968; Tyson, 1973). Der Brüsselator beschreibt dabei ein hypothetisches System.

Im konkreten Fall der BZR bietet das FKN-Modell (Field et.al., 1972), das aus 11 bzw. 18 Einzelschritten besteht, eine theoretische Darstellung der während der Oszillation ablaufenden Prozesse.

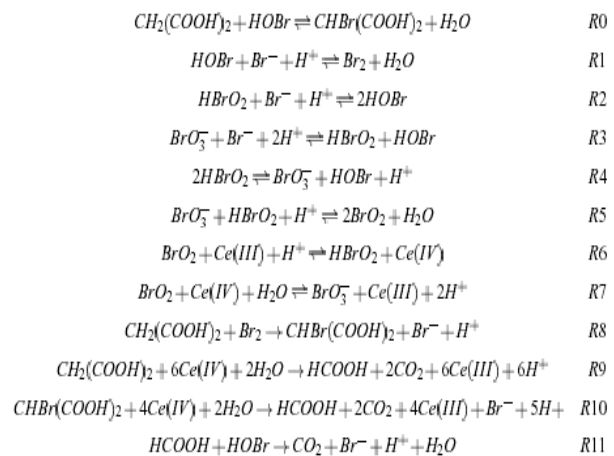
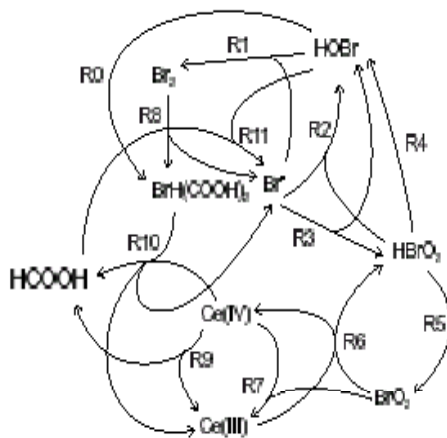
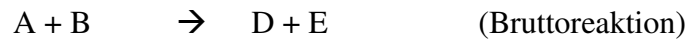
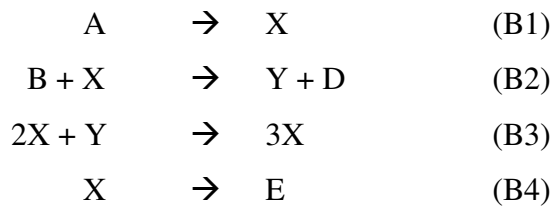


Abbildung 3:

Oben) Pirogines Brüsselalator

Unten) 11 Einzelschritte des FKN-Modells zur Beschreibung der Reaktionsschritte einer BZR ohne zusätzlichem Katalysator (nach Field et.al., 1972).

2.4. Gibt es eine Musterbildung in neuronalen Geweben?

Welche Bedeutung aber kommt den erregbaren Medien in bezug auf die Neurophysiologie zu? In neuronalen Geweben agieren eine Vielzahl von Nervenzellen zusammen, deren ATP-verbrauchenden Einzelprozesse miteinander rückgekoppelt sind. Zugleich ist jede Zelle über Stoffwechselfvorgänge und Materialaustausch mit der Umgebung verbunden und befindet sich aufgrund der vorhandenen großen Energiereserven in Form von Konzentrationsgradienten und ATP-Mengen weitab von einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand. Die Vorgänge in einem neuronalen Gewebe lassen sich theoretisch, wenn überhaupt, nur mit nicht-linearen Gleichungssystemen beschreiben (z.B. Hodgkin-Huxley-Gleichung zur Beschreibung

eines Aktionspotentials). Vergleicht man dies mit den Merkmalen erregbarer Medien, müssen neuronale Gewebe allgemein – und somit auch das Gehirn – als erregbares Medium betrachtet werden (Dolzmann & Hanke, 2005). Gestützt wird diese Annahme durch experimentelle Untersuchungen, bei denen Vorgänge in neuronalen Geweben gefunden wurden, die den Eigenschaften erregbarer Medien entsprechen.

3. Beispielsysteme zur Untersuchung von Musterbildung

Um die Interdisziplinarität der Musterbildung in erregbaren Medien zu verdeutlichen sind hier Systeme aus verschiedenen Bereichen der Naturwissenschaften kurz erklärt.

3.1. Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (Chemie)



Abbildung 4: Zeitliche Oszillation einer Belousov-Zhabotinsky-Reaktion mit Ferroin als Katalysator (reduziert: rot, oxidiert: blau); Zeitspanne zwischen den Einzelbildern 4 sec.

Das bekannteste Beispiel für oszillierende Systeme ist die nach ihren Entdeckern benannte Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (BZR). Dabei handelt es sich allgemein um eine Reaktion bei der „Bromat in einer stark sauren Lösung durch das organische Substrat in Gegenwart eines metallischen Katalysators reduziert wird“ (Manz, 2002). Man kann bei der BZR zwei

verschiedene Varianten der Musterbildung beobachten: Zum einen den periodischen Farbwechsel in einem gerührten System, der die gesamte Flüssigkeit betrifft; zum anderen entstehen chemische Wellenstrukturen (Spiralwellen oder konzentrische Kreiswellen) in einer dünnen, sich in Ruhe befindlichen Schicht des Reaktionsansatzes (Zaitkin & Zhabotinsky, 1970).

Um 1950 entdeckte Boris Pavlovich Belousov die oszillierende Reaktion eher zufällig. Er konnte bei der Oxidation von Zitronensäure mit schwefelsaurer Bromatlösung und Cer-Ionen als Katalysator einen periodisch auftretenden Farbwechsel der Lösung zwischen gelb und farblos beobachten (Belousov, 1959; Belousov, 1981). Heute kann man sowohl die Zitronensäure, z.B. durch Malonsäure, als auch das Cer durch andere Stoffe ersetzen. Zhabotinsky selbst benutzte statt Ce^{3+}/Ce^{4+} auch Mn^{2+}/Mn^{3+} . Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von zusätzlichen Katalysatoren wie Ferroin/Ferriin (2/3fach geladenes Tri1, 10-Phenanthrolin-Eisen-Ion).

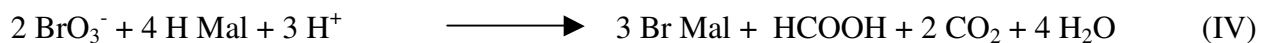
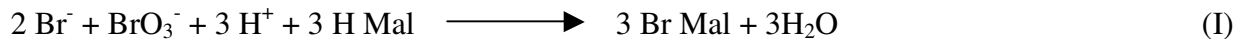
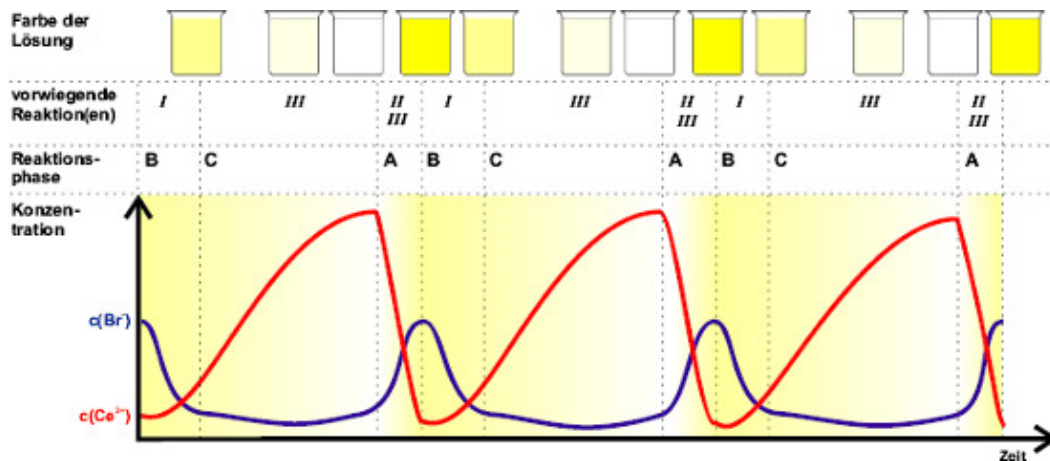


Abbildung 5: Darstellung des Reaktionsmechanismus der BZR. Oben ist eine zeitliche Darstellung einer idealisierten Oszillation zu sehen. Die Großbuchstaben kennzeichnen wichtige Punkte im Reaktionsverlauf, die römischen Ziffern stehen für die ablaufenden Reaktionen (nach Krieger, 2001). Darunter sind die drei grundlegenden Reaktionsgleichungen (I – III) und die Bruttogleichung (IV) dargestellt.

Obwohl man mittlerweile mehr als 50 Reaktionsschritte der BZR entdeckt hat, reichen zum prinzipiellen Verständnis der Abläufe, die zur Oszillation führen, die drei in Abbildung 5 dargestellten Einzelreaktionen.

Gleichung (IV) stellt die Bruttogleichung der BZR dar. Ce^{3+}/Ce^{4+} fällt aus dieser Bruttogleichung heraus, man kann es demnach als Katalysator interpretieren. Die Gleichungen (I) stellt den nicht-radikalischen Prozess dar, bei dem Malonsäure bromiert wird. In einem zweiten, radikalischen Prozess wird das farblose Ce^{3+} durch das in (I) aus Bromat reduzierte Br_2 zum gelben Ce^{4+} oxidiert, wobei gleichzeitig hypobromige Säure entsteht. Alleine würden diese beiden Schritte aber nicht für eine Oszillation ausreichen. Erst der Prozess (III) regeneriert die verbrauchten notwendigen Substanzen (Bromid und reduziertes Ce^{3+}).

Hat man die Edukte (Bromid, Bromat, Malonsäure, Ce^{3+} und konzentrierte Schwefelsäure) in einer wässrigen Lösung zusammengeführt, so beginnt die BZR zu oszillieren. Nach einer Induktionsperiode erreicht das System Zustand A (siehe Abbildung 4) mit maximaler Ce^{3+} - und fast minimaler Br^- -Konzentration. Die Lösung ist klar. Nun laufen zuerst Reaktion (II) und (III) ab (Phase AB). Die Reaktion (I) kann nicht ablaufen, da die Br^- -Konzentration unter einem kritischen Wert liegt. Reaktion (III) läuft dabei langsamer ab als Reaktion (II), d.h. das oxidierte Ce^{4+} wird langsamer wieder reduziert wodurch sich die Lösung gelb färbt (Phase B). Gleichzeitig mit der Reduktion der gelben Ce^{4+} , wodurch die Lösung wieder farblos aussieht, wird im Prozess (III) das Bromid regeneriert, so dass ab einem gewissen kritischen Wert die Reaktion (I) startet (Phase BC). Reaktion (II) kommt vollkommen zum Erliegen, da Ce^{3+} und Br^- um das Bromat konkurrieren.

Als Produkte entstehen neben Brommalonsäure ($BrCH(COOH)_2$) noch Ameisensäure ($HCOOH$) und das ausperlende Gas Kohlenstoffdioxid (CO_2). Bromat dient in der Reaktion als Oxidationsmittel, die organische Säure (z.B. Malonsäure) ist das Reduktionsmittel. Die Oxidation findet durch die Substituierung des Broms an das C_2 Atom statt. Das Cer dient im gesamten System als Elektronenüberträger. Es wird in abwechselnd oxidiert und wieder reduziert, wodurch der Farbwechsel der Reaktion erzeugt wird.

Ergänzt man die Reaktion um Ferroin, erhält man einen deutlicheren Farbwechsel. Wenn die Konzentration von Ce^{4+} hoch ist, oxidiert es das Ferroin und wird selbst wieder zu Ce^{3+} reduziert. Dadurch wird die zuvor rote Lösung blau. Aufgrund seines Redoxpotentials hat Ferroin einen signifikanten Einfluss auf die Oszillationsperiode (Dutt, 2002; Giles et.al., 1992).

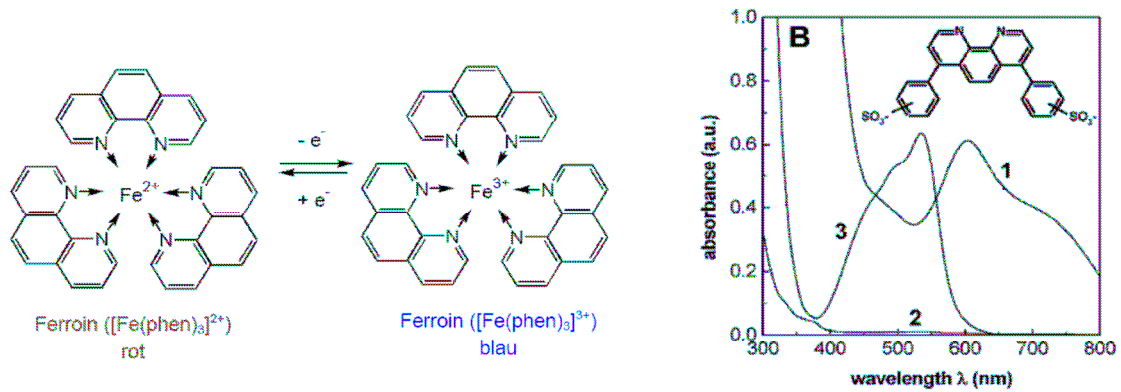


Abbildung 6:

Links) Strukturformeln der beiden Ferroin-Zustände

Rechts) Absorptionsspektren von oxidiertem (1) und reduziertem Ferroin (3) nach Ginn et al., 2004. Gut zu sehen ist die hohe Transmission des oxidierten blauen Zustandes im Wellenlängen-Bereich um 500 nm

3.2. Ferrofluide (Physik)

Ferrofluide sind im weitesten Sinne magnetische Flüssigkeiten. Sie bestehen aus einer flüssigen Komponente, z.B. Wasser, Öle, Kerosin, Heptan, in denen winzige Eisenoxidpartikel mit einem Durchmesser von ca. 10 nm (Rinaldi Ramos, http://www.atomo.uprm.edu/faculty/rinaldi/complex_fluids.htm) schwimmen. Dieses besitzt magnetische Eigenschaften, wobei die Spins der einzelnen Partikel aufgrund der geringen Größe durch die Austauschwechselwirkung parallel zueinander bleiben. Die Einzelpartikelmagnetisierung ist betragsmäßig konstant und gleicht in etwa der Sättigungsmagnetisierung des magnetischen Materials. Bezogen auf das gesamte Ferrofluid ist die Sättigungsmagnetisierung auf den Volumenanteil des magnetischen Materials reduziert; typischerweise < 10-15 %. Um die Agglomeration zu verhindern sind die einzelnen Partikel mit einer Polymerhülle von etwa 2 nm Dicke umgeben. „Die thermische Energie der Brown'schen Bewegung dieser Teilchen ist im Allgemeinen ausreichend, um einerseits Sedimentation und andererseits Kettenbildung durch langreichweitige magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkung zu verhindern.“ (Lücke: <http://www.uni-saarland.de/fak7/luecke/SFB/index.html>).

Das Verhalten eines Ferrofluids auf makroskopischen Längen- und Zeitskalen und seine Beeinflussbarkeit durch Magnetfelder wird von den Eigenschaften der Nanoteilchen und ihrer Wechselwirkung mit der Trägersubstanz bestimmt. Vermittelt wird diese Wechselwirkung durch Kräfte, die an der Oberfläche der Polymerhülle wirksam sind. Die Viskosität der Fer-

rofluide z.B. ist zum einen abhängig von den Eigenschaften der Trägerflüssigkeit und der Größe des Feststoffanteils, kann aber auch durch ein externes Magnetfeld beeinflusst werden.

Beim Anlegen eines Magnetfeldes lagern sich die Feststoffteilchen zu langen Ketten zusammen, was die Viskosität des Ferrofluids erhöht. Besonders eindrucksvoll tritt diese feldabhängige Viskosität zutage, wenn ein starr rotierendes Ferrofluid einem statischen Magnetfeld ausgesetzt wird. Anders als bei „gewöhnlichen Flüssigkeiten“, deren Starre-Körper-Rotation reibungsfrei abläuft, erfährt das Ferrofluid im Feld ein dissipatives Drehmoment, da die durch das Feld ausgerichteten Nanopartikel an der rotierenden Trägersubstanz reiben und somit die Bewegung behindern. Anschaulich darstellbar ist dieses Phänomen beim Versuch des „Floating Penny“. Hierbei wird eine Münze auf eine dünne Schicht Ferrofluid gelegt. Je nachdem, ob man diesen Aufbau nun einem externen Magnetfeld aussetzt oder nicht, kann man beobachten, dass die Münze auf dem Ferrofluid schwimmt oder darin versinkt.

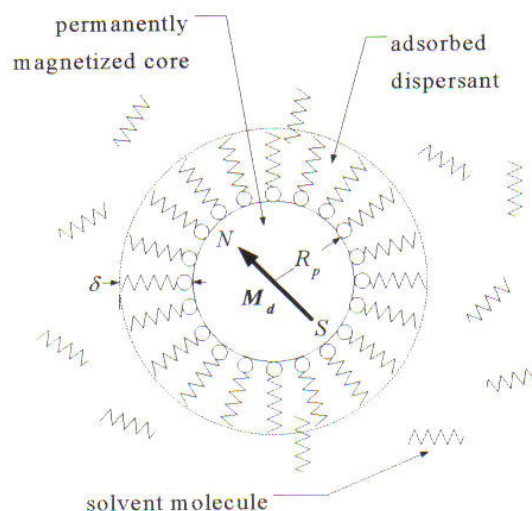


Abbildung 7: Schemazeichnung des Aufbaus eines Ferrofluids (nach: Rinaldi Ramos http://www.atomo.uprm.edu/faculty/rinaldi/complex_fluids.htm)

Ferrofluide sind per se keine erregbaren Medien. Werden sie jedoch über ein nichtstationäres Magnetfeld (Spulen, an die Wechselspannung gelegt wird) angeregt, erhält das System Energie, die für die Ausbildung von Mustern notwendig ist. Die Energie kann alternativ auch über eine mechanische Vibration induziert werden. Unter diesen Bedingungen gehören Ferrofluide dann zu extern angetriebenen erregbaren Medien. Auch andere viskose Flüssigkeiten oder granuläre Medien (z.B. Sand) können, wenn ihnen extern Energie zugeführt wird, als erregbare Medien betrachtet werden.

In räumlich inhomogenen Magnetfeldern wirken nicht nur Drehmomente auf Ferrofluide. Durch die sogenannten Kelvin-Kräfte kommt es auch zur Ankopplung an die Linearimpulsbilanz. Diese Verkopplung von Magnetfeld, Magnetisierung und Impulsdichte ist Grundlage für die Beeinflussung von Struktur, Dynamik und Stabilität freier Oberflächen bzw. Grenzflächen. Wird in einem offenen Schälchen die Flüssigkeitsschicht durch vertikale Vibration erregt, entstehen, oberhalb einer kritischen Größe von Amplitude und/oder Frequenz, Oberflächenwellen, was als Faraday-Instabilität bezeichnet wird (Müller, b). Die so erzeugten Muster können durch Modulation der Energiezuführung zwischen unterschiedlichen Mustern und chaotischen Zuständen wechseln. In einem statischen magnetischen Feld senkrecht zur Ferrofluidschicht weist die Dispersionsrelation von freien Oberflächenwellen einen charakteristischen nicht-monotonen Verlauf auf mit einem Ast anomaler Dispersion im Mittelteil. Ist das Magnetfeld hinreichend stark, so tritt eine spontane stationäre Oberflächendeformation, die sogenannte Rosenzweig-Instabilität auf (Müller, a).

Von den (hydro-) mechanischen Eigenschaften der Ferrofluide haben bisher nur Viskosität, Dichte und Aggregatzustand wesentliche Bedeutung für die technischen Anwendungen gefunden. Sie werden bereits in vielen Bereichen des täglichen Lebens angewendet. So sind sie Bestandteile in Lautsprechern oder elektrischen Transformatoren, um die durch die Spule erzeugte Wärme abzuleiten (Rinaldi Ramos, http://www.atomo.uprm.edu/faculty/rinaldi/complex_fluids.htm), oder werden als flüssige Dichtung im Maschinenbau und bei der Herstellung von Computer-Festplatten eingesetzt.

3.3. Spreading Depression (Biologie)

Nervenzellen besitzen die Eigenschaft, dass sie im weitesten Sinne elektrisch aktiv sind. Reizt man sie, antworten sie darauf mit der Bildung eines elektrischen Potentials, das sie in einer Richtung über den Nerv ausbreitet.

Im Jahre 1944 beobachtet der Brasilianer Leao, bei der Untersuchung der Auswirkungen von Reizen auf die epileptische Aktivität in der Großhirnrinde von Kaninchen (Bureš, 1993), nach einem elektrischen Stimulus einen starker Rückgang der elektrischen Aktivität im EEG. Diese Unterdrückung der neuronalen Aktivität wandert mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 3 mm/min wellenförmig über den Cortex. An der Front der Welle lässt sich im EEG eine leichte Hyperaktivität erkennen. Nach einer gewissen Zeit der Ruhe kehrt dann die elektrische Aktivität des Gewebes zurück. Diese Wellen wurden von Leao als „spreading depression“ (SD), d.h. als sich ausbreitende nervliche Hemmung bezeichnet.

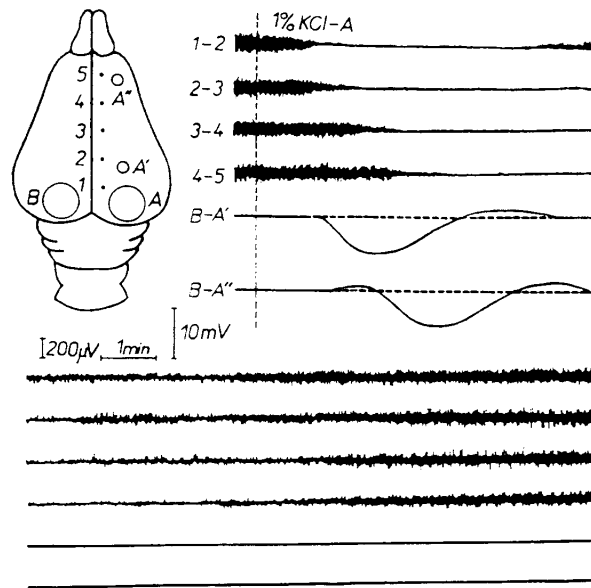


Abbildung 8:

Applikation einer K-Pulses an den Punkten A und B mit anschließender Wellenausbreitung über Messpunkte 1 – 5 an einem Rattenschädel (nach Bureš et.al., 1974).



3 min

7 min

10 min

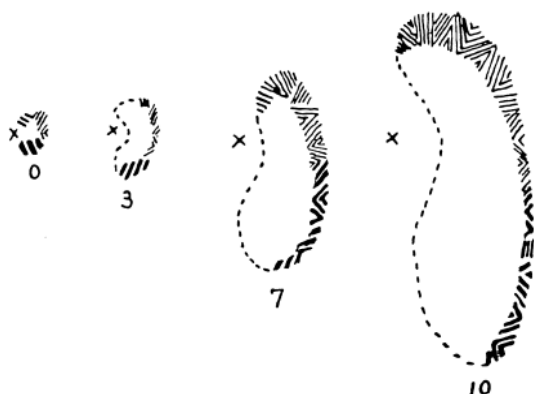


Abbildung 9:

Oben) Darstellung des Flimmerskotoms, wie sie ein Migränepatient während einer Kopfschmerzattacke sieht.

Links) Die Zeichnung des selben Phänomens von Lashley (nach Lashley, 1941) zu sehen.

In beiden Bildern stehen die Zahlen für die Zeitabstände in Minuten zwischen den Einzelbildern.

Die molekularen Zusammenhänge, die zur Entstehung des Phänomens führen sind in ihrer Gänze noch nicht entschlüsselt worden. Man geht aber davon aus, dass die Kalium- und Glutamat-Konzentrationen, sowie die Gap-Junctions der Gliazellen eine zentrale Bedeutung dabei spielen (Weimer, 2003; Fernandes de Lima et.al., 1999).

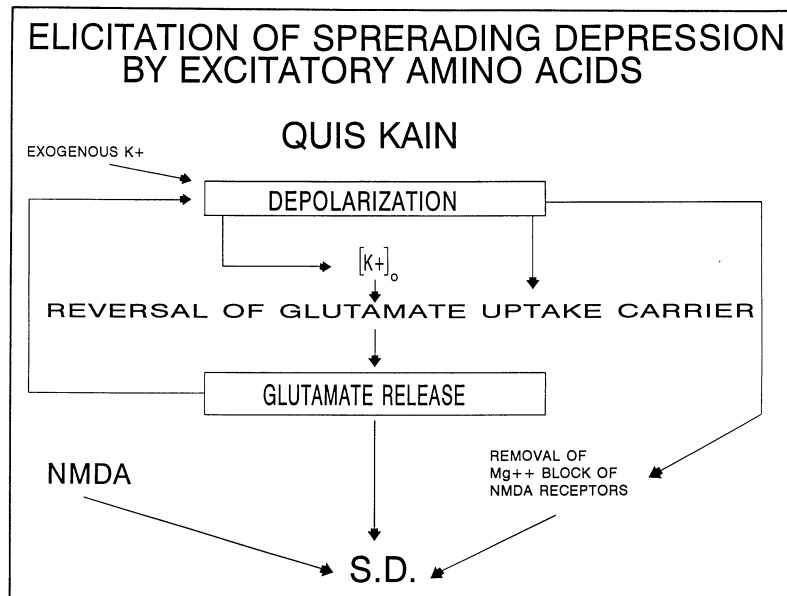


Abbildung 10:

Darstellung des möglichen Mechanismus mit dem exzitatorische Aminosäuren und K⁺ eine SD auslösen (nach: Sherdown, 1993)

Im Verlauf einer SD-Welle brechen alle Ionengradienten über den Zellmembranen transient zusammen, was sich natürlich mit elektrophysiologischen Messungen, z.B. als Spannungsmessung im Gewebe, oder mit ionensensitiven Elektroden, nachweisen lässt. Zusätzlich entsteht im Gewebe aber auch eine Änderung der optischen Eigenschaften, des intrinsischen optischen Signals (IOS). Dieses ist besonders in retinalem Gewebe sehr leicht zu sehen, da im physiologisch bedingt hochtransparentem Gewebe der Retina optische Veränderungen besonders gut zu erkennen sind. Im Experiment können so Kückenretina als Versuchsobjekte genommen werden, in der das sogenannte intrinsische optische Signal des Gewebes gemessen (IOS) wird. Hierbei wird die Helligkeit eines Punktes über der Zeit dargestellt. Der Anstieg der Helligkeit ist im wesentlichen durch ein temporäres Anschwellen der Zellen aufgrund osmotischer Veränderungen durch den Zusammenbruch des Ionengradienten über die Membranen nach der Reizung bedingt (genauer s. Weimer, 2003, 2005 a und b). Dieses Anschwellen führt zu einer transienten lokalen Trübung des Gewebes, was im IOS als An-

stieg der Reflexion zu erkennen ist und den Aufstrich des ersten Peaks bildet. Der Abstrich wird durch die aktiv wieder hergestellten Ionengradienten erzeugt, als dessen Folge die Trübung zurückgeht und die Pigmentschicht im Hintergrund der Retina das Licht absorbiert. Der zweite Peak entsteht aufgrund des Metabolismus, der das beim Wiederaufbau der Konzentrationsgradienten verbrauchte ATP regeneriert.

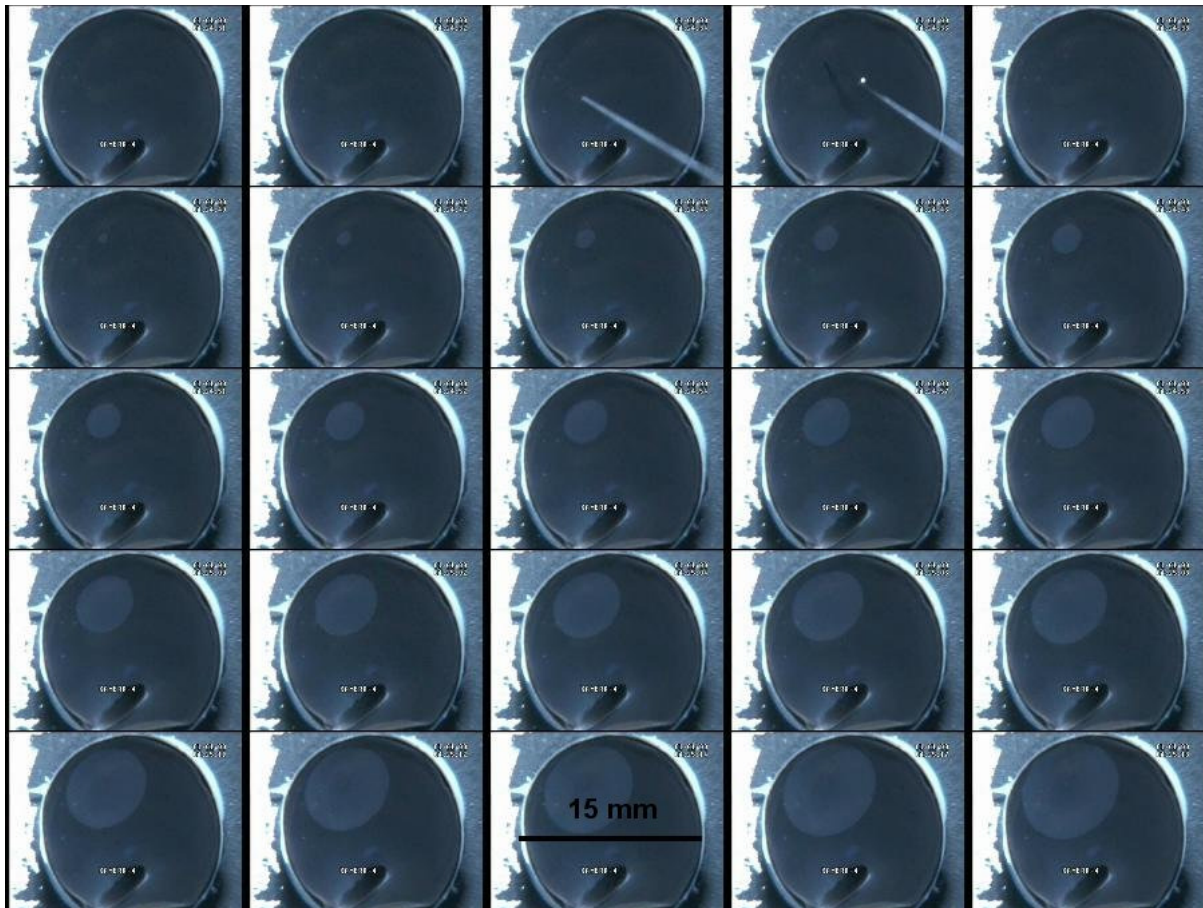


Abbildung 11: Darstellung einer retinalen SD. Die Zeitintervalle zwischen den Einzelbildern betragen 4 sec. Nach dem Stimulus (Bilder 3 und 4) breitet sich ein heller Fleck über das Nervengewebe aus.

Als Welle in einem erregbaren Medium ist die SD in ihren Eigenschaften von äußeren Parametern abhängig, z.B. von der Gravitation (Wiedemann & Hanke, 2002; Wiedemann et.al. 2002), von elektrischen Feldern (Hanke et.al., 2001) aber auch von vielen pharmakologischen Substanzen (z.B. Fernandes et.al., 1999). Untersucht werden dabei u.a. ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit und ihre Auslösbarkeit, sowie Änderungen im IOS in Abhängigkeit von den externen Faktoren.

3.4. Mathematik/ Computer-Simulation

Die Chaosforschung basiert auf der Erkenntnis, dass die Entwicklung vieler chaotischer, nicht-linearer Systeme nicht berechenbar ist. So war statt einer quantitativen oft nur eine qualitative Forschung möglich, d. h. man konnte das Verhalten eines Systems nicht vorausberechnen, sondern musste sich mit einer Beschreibung seines grundsätzlichen Verhaltens begnügen.

Dabei hat man bei vielen natürlichen Systemen eine zunächst nicht erklärbare Fähigkeit zur Selbstorganisation festgestellt. Dieser Fähigkeit geht die Komplexitätsforschung nach. Sie widmet sich der generellen Frage, wie aus dem Chaos Ordnung entstehen kann. Dafür war und ist es nötig, eine große Anzahl komplexer natürlicher Systeme zu untersuchen, um so Aussagen über Eigenschaften und Verhalten dieser Systeme treffen zu können.

Zelluläre Automaten sind nun ein mathematisches Modell zur abstrakten Erfassung eines komplexen Interaktionsgeschehens. Mit ihrer Hilfe kann man für diverse komplexe Systeme die Wechselwirkungen beliebig vieler ihrer Teilkomponenten (Individuen oder Zellen) beschreiben, die alle genau den gleichen Regeln folgen und sich nur in ihrer unmittelbaren lokalen Nachbarschaft ihres Lebensraumes mit den anderen Komponenten austauschen können. Es scheint in der Literatur zwei verschiedene Auffassungen bzw. Interpretationen bezüglich des Begriffes „Zelluläre Automaten“ zu geben. Die einen beziehen den Begriff der „Automaten“ nur auf die einzelnen Individuen eines Systems, die anderen nennen das gesamte System „einen zellulären Automaten“, der wiederum aus sogenannten „Teilautomaten“ besteht. Dies lässt sich aus folgender Erläuterung des Begriffes durch Gerhardt & Schuster (1992) erkennen:

„Der Name „zellulärer Automat“ erwies sich auch als eine ausgesprochen gute Wahl. Seine beiden Teile beschreiben bereits die wesentlichen Eigenheiten, die diese Modelle von anderen unterscheiden. Jeder von uns hat eine naive Vorstellung davon, was ein „Automat“ ist. Wir denken dabei etwa an den Zigarettenautomaten an der Straßenecke, in den wir Markstücke hinein werfen, eine Taste drücken und eine bestimmte Zigaretten Sorte herausziehen. Genau dieses Bild umfasste auch der [...] in der Wissenschaft bereits etablierte Begriff eines Automaten: Man betrachtete ihn allgemein als eine Maschine, die nach logischen Gesetzen Informationen verarbeitet, indem sie von außen kommende Daten aufgrund festgelegter innerer Anweisungen auswertet und daraufhin ein bestimmtes Verhalten erzeugt. [...]

Das Attribut „zellulär“ kennzeichnet eine wesentlich Besonderheit dieser speziellen Gattung von Automaten: Sie bestehen nämlich aus vielen Komponenten, die wie die Zellen eines Organismus miteinander wechselwirken. In der Sprache der Automatentheorie sind im Grunde alle Zellen einzelne Automaten, die alle nach exakt den gleichen Regeln funktionieren. Die besondere Eigenschaft eines solchen „Teilautomaten“ ist, dass in seine Zustandsentwicklung

nicht nur sein eigener Zustand, sondern auch der benachbarter Teilautomaten eingeht. (S. 18)²

Anders ist es im Falle der Simulation von Aktionspotentialen (AP). Wie bereits ausgeführt, kann man Neuronen auch als erregbare Medien definieren. Zur mathematischen Beschreibung der chemo-elektrischen Vorgänge über die Axonmembran gibt es die Hodgkin-Huxley-Gleichung. Mit Hilfe dieser können Veränderungen in der Zusammensetzung der Umgebung oder der Einfluss schwacher externer Kräfte, z.B. in Form von Medikamenten und deren Einfluss auf das Verhalten einzelner Ionenkanäle, simuliert und dargestellt werden.

3.5. Wirkung schwacher externer Kräfte auf die Musterbildung einzelner Systeme

Jede Musterbildung in erregbaren Medien ist durch schwache externe Kräfte beeinflussbar, z.B. durch Gravitation, Medikamente und auch schwache elektrische, elektro-magnetische oder magnetische Felder. Offen bleibt nur, wie stark die jeweilige Beeinflussbarkeit ist und in welcher Art und Weise sie sich auf die Muster auswirkt. Dies wurde bereits in früheren Arbeiten für verschiedene Systeme untersucht. So zeigen SD-Wellen eine Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Gravitation (Wiedemann & Hanke, 2002), Temperatur (Weimer, 2003) und unterschiedlichen Medikamenten (z.B. Fernandes et.al., 1999). Auch das Aktionspotential von Neuronen zeigen eine Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei Gravitationsschwankungen (Meissner & Hanke, 2005).

Am besten untersucht ist die Auswirkung schwacher externer Kräfte auf die Musterbildung im Falle der BZR. Hier gibt es neben ersten Aussagen über die Abhängigkeit von Gravitation (Pojman et.al., 1997; Fujieda et.al., 1999; Wiedemann et.al., 2002; Fernandes de Lima et.al., 2002), Temperatur (Foerster/ Müller/ Hess, 1990) und Konzentrationsänderungen der Protonen- und Bromatkonzentration (Tyson & Manoranjan, 1984; nach Manz, 2002; Ross/Müller/Vidal, 1988; Ševčíková/ Schreiber/ Marek, 1996) auch Ergebnisse in bezug auf elektrische Felder (Almirants & Kaufmann, 1995; Miyakawa & Mizoguchi, 1998; Blank & Soo, 2003)³. So wird in einem DC-Feld durch die Elektromigration die Wellenform verändert, neue Wellen von bereits bestehenden abspalten und die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Feldorientierung verlangsamen bzw. beschleunigen (Ševčíková/ Kosek/

² Weitere detaillierte Ausführungen in Wolfram, 2002.

³ Da die Elektroden in den beschriebenen Versuchen in die Reaktionslösungen eingetaucht waren, wurde ein Elektronenstrom induziert aber kein echtes elektrisches Feld erzeugt.

Marek, 1996). Die Größe des Ablenkungswinkels ist dabei von der induzierten Stromstärke abhängig (Steinbock/ Schütz/ Müller, 1992). In einem AC-Feld können oberhalb einer kritischen Grenze bestehende Wellen zur Umkehrung der Ausbreitungsrichtung oder zur Abspaltung weiterer Wellen gebracht werden (Pornprompanya, 2004/05).

3.6. Begründung zur Auswahl der Systeme für die praktischen Untersuchungen

Übergeordneter Gedanke der Arbeit war die allgemeine Vergleichbarkeit erregbarer Medien untereinander und deren Übertragbarkeit auf neuronale Systeme. Untersucht werden sollte der Einfluss eines schwachen externen MF auf die Musterbildung erregbarer Systeme. Aus diesem Grund wurden die Ferrofluide und die BZR als Beispielsysteme ausgewählt⁴.

Bei den Ferrofluiden handelt es sich um eine magnetische Flüssigkeit. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass es eine Interaktion mit dem MF gibt. Das System unterscheidet sich zu sehr von der BZR oder der SD, als dass von den Ergebnissen Rückschlüsse auf neuronale Systeme gezogen werden könnten. Dies liegt vor allem daran, dass dem System keine eigene Energie innewohnt. Zur Musterbildung muss dem System Energie von außen zugefügt werden, im konkreten Fall durch vertikale Vibration, oder durch zeitveränderliche elektromagnetische Felder.

Frühere Arbeiten haben bereits gezeigt, dass man Parallelen zwischen Ergebnissen der BZR auf neuronale Systeme übertragen kann. Aus diesem Grund wurde dieses chemische System als zweiter Versuchsblock ausgewählt. Zudem sind die praktischen und grundlegenden theoretischen Hintergründe nicht zu komplex, als dass Schüler sie nicht begreifen und durchführen könnten. Aussagen über den Einfluss des externen MF's auf die Musterbildung könnten Impulse für weitere Forschungen der Neurophysiologie geben.

⁴ Ein weiteres Auswahlkriterium war die Einfachheit der Systeme. Die Arbeit ist aus dem ursprünglichen Gedanken entstanden, wie man das Thema Selbstorganisation an der gymnasialen Oberstufe umsetzen kann. Da Tierversuchen an den Schulen verboten sind, fielen Versuchen zur SD weg. Weitere Aspekte zum Thema Umsetzbarkeit in der Schule sind im Anhang zu finden.

4. Material und Methoden

4.1. Materialien

4.1.1. Chemikalien

Alle verwendeten Substanzen, Lösungsmittel und Chemikalien waren mindestens vom Reinheitsgrad p.a. und wurden von Sigma, Aldrich und Merck beschafft. Das für die physikochemischen Versuche verwendete Wasser war Monodestillat aus einer Edelstahldestille der Firma GFA (Burgwedel). Für die biologischen Versuche sowie teilweise für die Belousov-Zhabotinsky Versuche wurde Bidestillat aus einer Edelstahldestille ebenfalls der Firma GFA verwendet.

Das verwendete Ferrofluid (EFH1, Lot FASK 16) wurde von der Firma Ferrofluidics (Nashua, NH, USA) bezogen.

4.1.2. Geräte

Die Versuchsaapparaturen wurden im eigenen Labor unter Verwendung der weiter unten angegebenen Komponenten zusammengebaut. Teile der Apparaturen wurden in der eigenen Werkstatt gefertigt.

4.2. Versuchsaubauten

4.2.1. Belousov-Zhabotinsky Reaktion

a) Aufbau zeitliche Oszillation:

Für die zeitliche Reaktion wurden 4,292 g Malonsäure und 0,715 g Cerammoniumnitrat in 150 ml 1M Schwefelsäure (H_2SO_4) in einem 250 ml Becherglas gelöst. Unter Rühren wurden dann 1,415 g Natriumbromat (NaBrO_3) hinzugefügt. Nachdem ein erster Farbumschlag von gelb nach farblos zu erkennen war, wurde noch 0,025 M Ferroin-Lösung hinzu pipettiert, damit sich ein besser sichtbarer Farbumschlag Blau/Rot einstellt.

Die so gestartete Reaktion wurde auf einen Magnetrührer mit Heizung während der gesamten Versuchsdauer gerührt. Alternativ wurde bei Experimenten mit angelegtem Magnetfeld durch einen mechanischen Rührer (Eigenbau) von oben langsam gerührt⁵. Mittels des Heizrührers wurde die Temperatur der Reaktions-Lösung eingestellt und über ein Thermometer gemessen. Die Temperaturdaten wurden auf dem Computer aufgezeichnet. Von der Seite entweder mit einer monochrome Hochleistungs-LED mit einer Wellenlänge von 480 nm oder über einen Lichtleiter mit weißem Licht aus einer 150 Watt Xenon-Bogenlampe beleuchtet. Gegenüber der Lichtquelle war ein Fotomultiplier (Hamamatsu) montiert, mit dem die Helligkeit gemessen und in Spannungswerte umgewandelt wurde. Es wurde über ein 10-fach Objektiv (Zeiss) mittels Lichtleiter über dem Becherglas angekoppelt. Die Messfläche betrug ca. 10 mm². Für die Messdatenaufzeichnung wurde ein Computer mit einem AD-Wandler der Firma Spectra (Samplingrate 5Hz bis 5 kHz, je nach Aufgabenstellung) zusammen mit dem Softwarepaket DasyLab (Spectra) verwendet. Zur Vermeidung von Sampling-Artefakten wurde vor den AD-Wandler ein Tiefpass-Filter mit angepasster Grenzfrequenz (20 Hz bei 3 dB, 48 dB/Oct.) geschaltet.

Für die Aufnahme der spektral aufgelösten Transmission bei Verwendung von weißem Licht wurde gegenüber der Lichtquelle ein Spektrometer montiert, dessen Spektrum über eine normale CCD Farbvideokamera auf Videorekorder aufgezeichnet wurde. Die Videobänder wurden später Off-Line analysiert (siehe Datenauswertung).

Das magnetische Feld (MF) wurde mittel zweier Helmholtzspulen generiert (Windungszahl 320; Gleichstromwiderstand ca. 6 Ω ; Belastbarkeit 2 A; Spulendurchmesser 13,5 cm). Diese waren über je zwei 4-mm-Buchsen weiter verschaltet. Um die Temperatur kontrollieren zu können, wurde unter den Gefäßen mit den Reaktionslösungen ein digitales Thermometer installiert. Zur Konstanthaltung der Temperatur der Spulen wurde noch ein kleiner Ventilator am Messtand befestigt.

Für die Erzeugung des Wechselfeldes (AC) wurden die Spulen an einen Frequenzgenerator (Votcraft) und einen nachfolgenden Verstärker (Phillips oder Conrad) mit Filter in Reihe geschaltet. Zur Kontrolle wurde dazu noch ein True-RMS Voltmeter parallel zum Spulenpaar geschaltet, sowie ein Ampèremeter in Reihe. Das erzeugte magnetische Feld (MF)

⁵ Im eingeschalteten Magnetfeld arbeitete der Magnetrührer nicht gleichmäßig und verfälschte die Ergebnisse der Messungen. Um eine gleichmäßige Durchmischung zu gewährleisten, musste deshalb mechanisch umgerührt werden.

hatte durch die Stellung der beiden Spulen senkrecht zum Behälter mit der Reaktionslösung ebenfalls eine senkrechte Orientierung relativ zum Reaktionsgefäß.

Zur Erzeugung des Gleichspannungsfelds (DC) wurden die Spulen direkt an ein Netzteil angeschlossen und bei maximal 4 A betrieben. Die Spulen wurden dabei parallel geschaltet.

b) Aufbau räumliche Oszillation:

Für die räumliche Oszillation wurden zunächst in Petrischalen (Durchmesser 100 mm) Silica-Gele hergestellt: 5 ml $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ -Lösung, 1 ml 0,025 M Ferroin-Lösung, 0,5 ml H_2O und 0,8 ml 1M H_2SO_4 werden vermischt und in eine Petrischale gegossen und mit 0,3 M Schwefelsäure überschichtet. Nachdem sich die Gele über Nacht verfestigt haben, kann die Reaktion nach Abgießen der Schwefelsäure durch Zugabe von 2 ml Starterlösung gestartet werden. Die Starterlösung setzt sich aus 3,44 g Malonsäure, 4,98 g NaBrO_3 und 620 mg NaBr gelöst in 100 ml 0,33 M H_2SO_4 zusammen.

In den Versuchen wurden die Petrischalen auf eine monochrome LED-Leuchtplatte gestellt (Wellenlänge der LED's 480nm) und von unten her beleuchtet. Die Gele sind ohne Wellen rot, an der Wellenfront findet eine Aufhellung in den blauen Spektralbereich statt.

Das Abgreifen der Farbveränderungen erfolgte mittels eines Fotomultipliers (Hamamatsu) (siehe zeitliche Oszillation). Zusätzlich wurden die Versuchsabläufe optisch über eine Videokamera (CCD- Farbkamera) aufgenommen und zur späteren Auswertung auf einem VHS-Videorekorder auf Video-Kassette gesichert. Alternativ wurden die Videodaten auf einem DVD Rekorder aufgezeichnet.

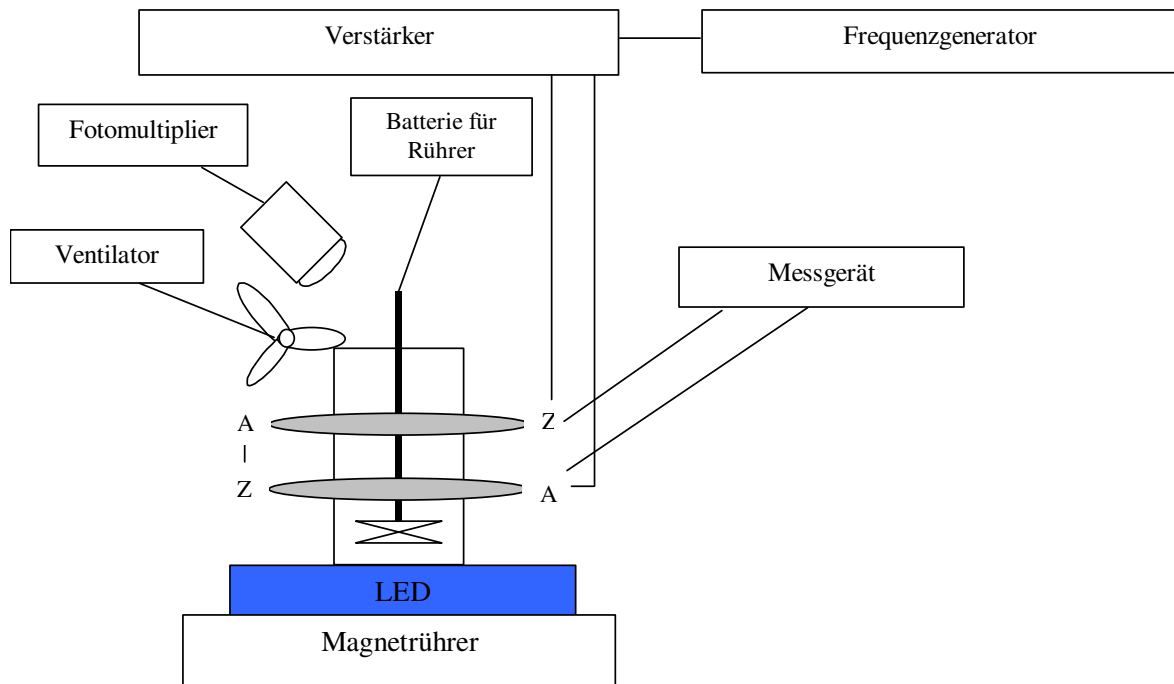
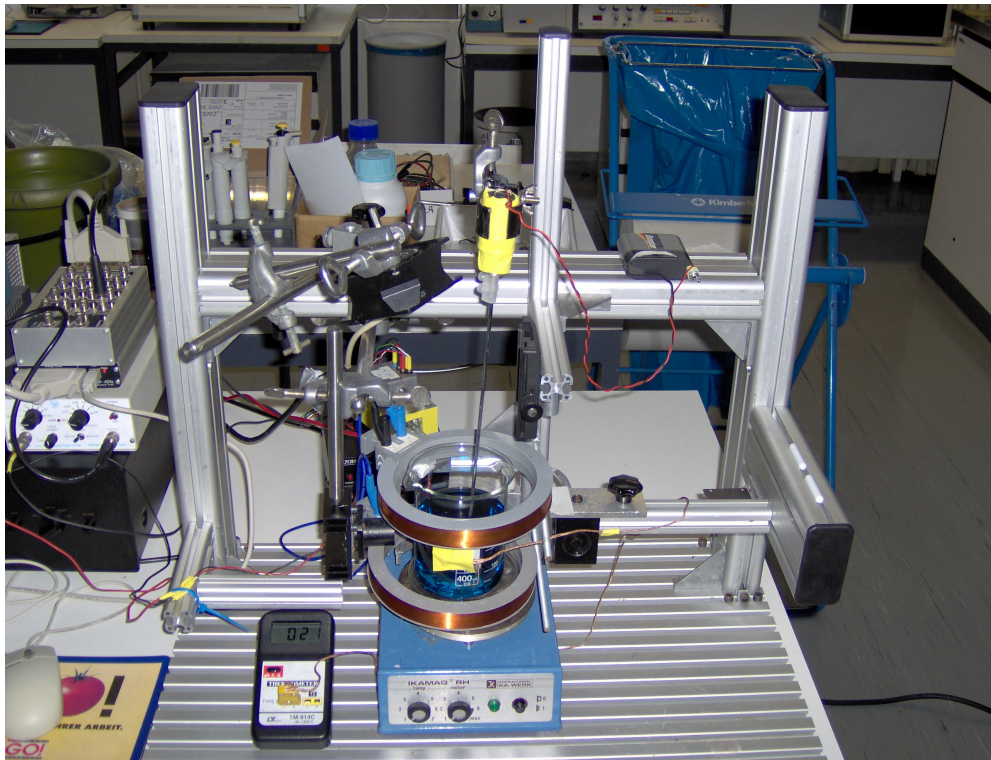


Abbildung 12: Versuchstand zur Untersuchung zeitlicher Fluktuationen in einer gerührten Belousov-Zhabotinsky Reaktion. Der Versuchsaufbau beinhaltet zusätzlich ein Helmholtz-Spulenpaar zur Applikation eines Magnetfeldes. Unter dem Foto ist das Blockschaltbild dargestellt.

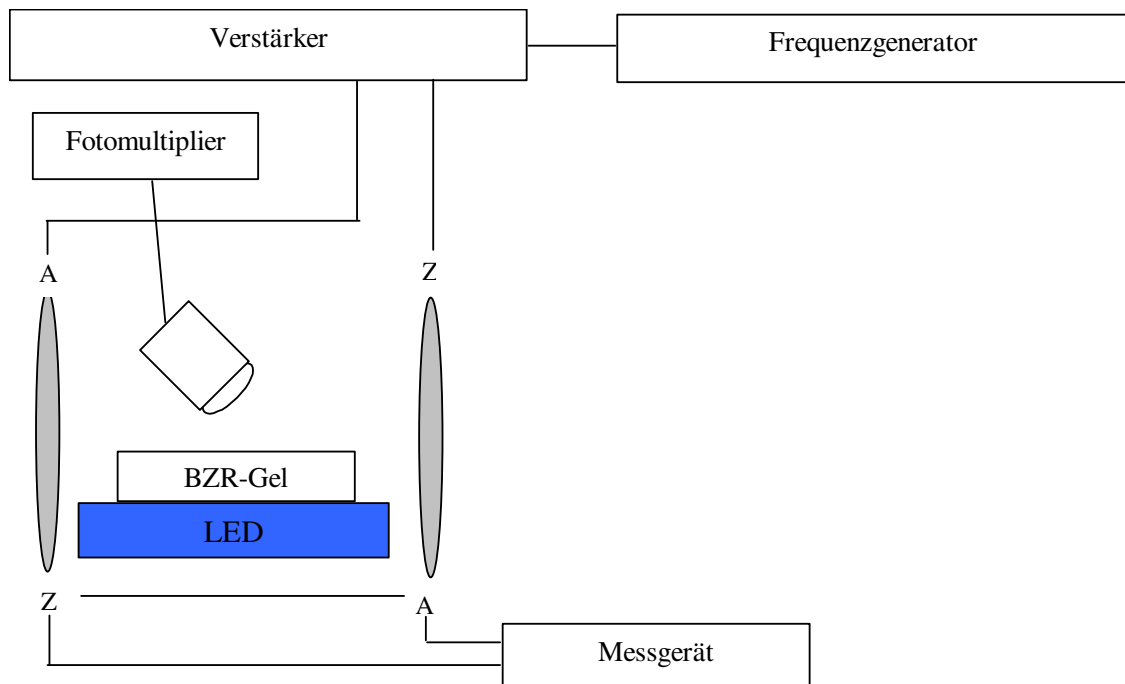


Abbildung 13: Foto des Versuchsaufbaus zur Messung der räumlichen Strukturbildung in Gelen der Belousov-Zhabotinsky Reaktion. Der Versuchsaufbau beinhaltet zusätzlich ein Helmholtz-Spulenpaar zur Applikation eines Magnetfeldes. Der untere Teil zeigt das Blockschaltbild des Messaufbaus.

4.2.2. Ferrofluide

Der Versuchsstand für die Untersuchung der Auswirkungen eines MF's auf mechanisch ange-regte Ferrofluide entspricht im Wesentlichen dem der räumlichen BZR in Gelen. Allerdings wurden die Daten nur optisch mittels Video und Bildschirm ausgewertet und nicht mit einem Fotomultiplier.

Damit die Ferrofluide ein Muster bilden können, muss diesen Energie von extern zugeführt werden. Dazu wurde das Reaktionsgefäß auf einem handelsüblichen Membranlautsprecher montiert, der mit einer Aluminiumplatte nach oben abgeschlossen wurde. Angetrieben wurde der Lautsprecher über einen Frequenzgenerator (Votcraft) und einen Verstärker der Firma Phillips in einem Frequenzbereich von 5 Hz bis 1 kHz bei maximal 25 Watt.

Das Ferrofluid wurde in dünnen Schichten (2 mm) in 35 mm Petrischalen gefüllt, die dann mit einem Deckel dicht verklebt wurden. Mittels doppelseitigem Klebeband wurden die Petri-schalen dann auf der Aluplatte über dem Lautsprecher befestigt.

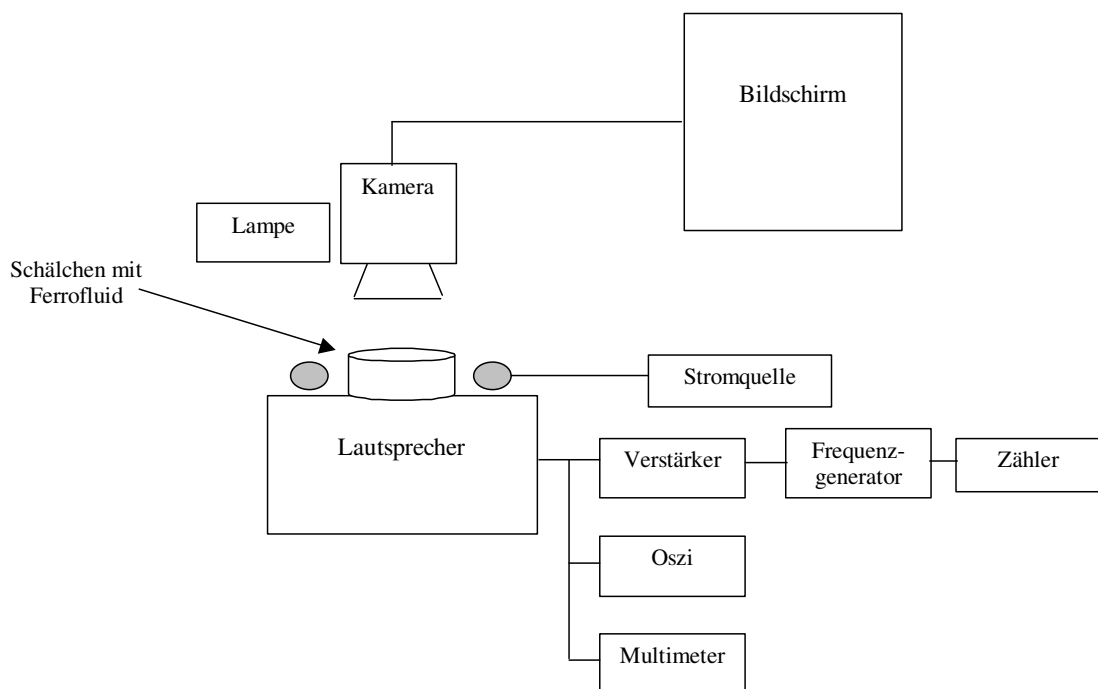


Abbildung 14: Blockschaltbild des Messstandes zur Untersuchung von extern über einen Lautsprecher angetriebenen Mustern in dünnen Ferrofluidfilmen.

4.2.3. Retinale Spreading Depression

Die Experimente zur retinalen Spreading Depression können auf einem Versuchstand durchgeführt werden, in dem die Retina (in einer intakten eye-cup Präparation) mit einer Videokamera von oben aufgenommen wird. Die SD Wellen werden mechanisch ausgelöst und die Videodaten werden auf Videoband oder auf DVD Rekorder für eine spätere Off-Line Analyse aufgezeichnet. Eine detaillierte Beschreibung des Messstandes sowie der Protokolle zur Durchführung von retinalen Spreading Depression Experimenten ist in der Literatur zu finden⁶ (Fernandes de Lima et al., 1999)

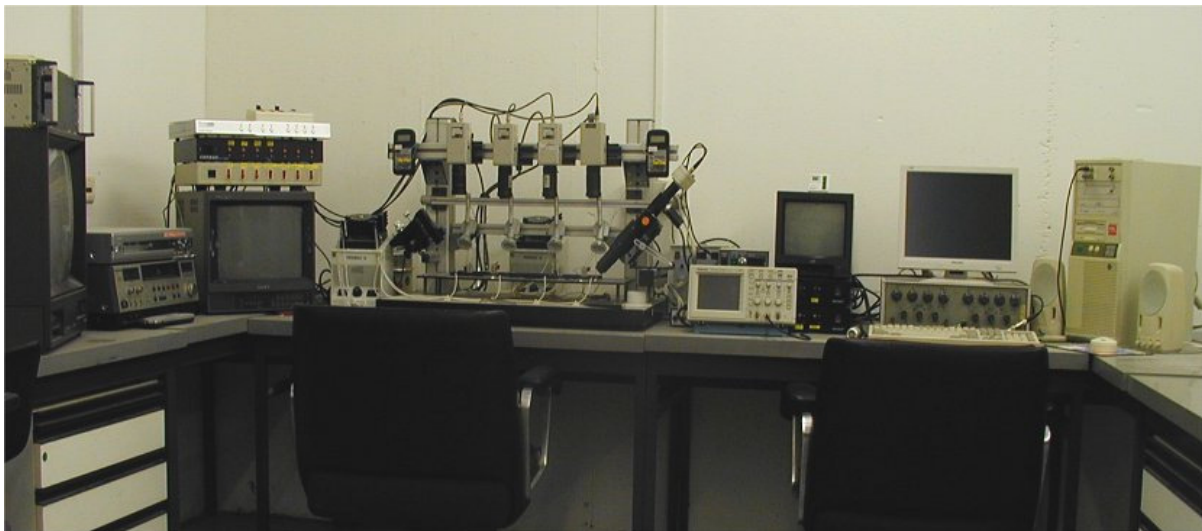


Abbildung 15: Foto des Messstandes der zur Untersuchung der retinalen Spreading Depression verwendet wurde. Die optischen Daten aus 4 Retinas werden gleichzeitig über Videokameras aufgezeichnet.

4.2.4. Computersimulationen

Für die Computersimulationen (Standart PC mit Windows XP Professional) wurde ein frei im Netz verfügbares Programm (Win-Life, www.winlife32.com) als einfachstes Beispiel für einen zellulären Automaten verwendet. Es handelt sich um eine Adaptation des von Conway 1970 entwickelten „Game of Life“ (Gardner, 1970).

Für die Simulation der AP's wurde das Programm Neurosim der Firma BioSoft verwendet, und aus diesem das Modul HH zur Simulation von Nervenimpulsen. Ausgehend von der

⁶ Hier finden sich auch alle weiteren notwendigen Informationen zu den verwendeten Versuchstieren, Geräten und Materialien.

Hodgkin-Huxley Theorie (Weiss, 1997) werden mittels dieses Programms Aktionspotentiale unter verschiedenen Bedingungen simuliert.

Weitere Details zu beiden genannten Programmen sind den Handbüchern der Programme zu entnehmen.

4.3. Datenanalyse

Die Zeitserien der Messdaten, Temperatur, Photomultiplierdaten etc., wurden mit den Programmen GraphPad Prism (GraphPad Software) und Origin (OriginLab) ausgewertet und graphisch dargestellt.

Die Videodaten wurden über das Programm Adobe Premiere (Adobe) mit einem Video-Grabber auf einen Computer überspielt und dort mit dem Programm DaviDeo in das .avi-Format umgewandelt. Die Filmdateien wurden dann mit dem Programm VirtualDub in Sequenzen von Einzelbildern zerlegt (.jpg Format), und mit dem Programm ImageJ weiterverarbeitet. VirtualDub und ImageJ sind als Freeware im Internet verfügbar.

5. Versuchsergebnisse

In dieser Arbeit dienen die BZR und die Ferrofluide als Beispiele für erregbare Medien. Dies liegt zum einen daran, dass Systeme aus unterschiedlichen naturwissenschaftlichen Bereichen untersucht werden sollten. Zum anderen ist die BZR das grundlegende erregbare System, an dem die Musterbildung erforscht wird. Nach einer genaueren Untersuchung der Oszillation bei der BRZ – zeitlich wie auch räumlich – wurde im Anschluss der Einfluss eines schwachen magnetischen Feldes auf die Musterbildung beider Systeme ausgewertet.

Vergleichsmessungen wurden auch noch über Computersimulationen und an der retinalen Spreading Depression durchgeführt. Diese Daten sind zur besseren Übersicht nur in der Diskussion aufgenommen.

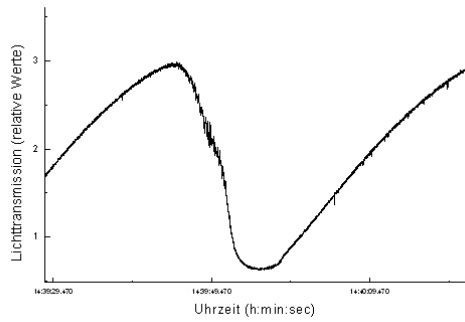
5.1. Belousov-Zhabotinsky-Reaktion

Bei der BZR unterscheidet man zwei Varianten von Musterbildung: die zeitliche Oszillation und die räumliche. Bei der zeitlichen Oszillation werden die Chemikalien in einem Becherglas miteinander verrührt und bilden ein homogenes Gemisch. In Anwesenheit des Katalysators Ferroin wechselt die Farbe der Flüssigkeit nach dem Start der Reaktion zwischen der blauen oxidierten Form, und der reduzierten roten. Bei der räumlichen Oszillation dagegen befinden sich die Reagenzien im Gel und einer dünnen Schicht Starterflüssigkeit. Das hierbei generierte Muster besteht aus hellen Ringe oder Spiralen, die über die rötliche Oberfläche des Gels propagieren.

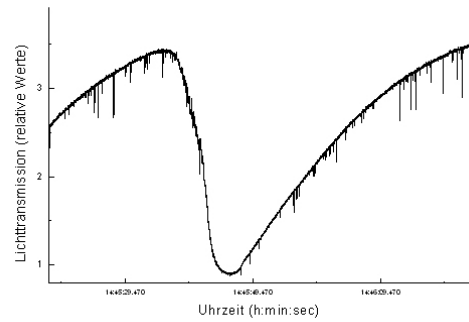
5.1.1. zeitliche Oszillation

Als Vergleichswert wurde zuerst die Langzeitmessung einer nicht-stationären BZR ohne den zusätzlichen Katalysator Ferroin aufgezeichnet (Farbwechsel zwischen gelb und farblos). Die Kurve zeigt einen normalen monophasischen Kurvenverlauf (Abb. 17), wie er bisher auch in der Literatur beschrieben wurde. Wenn sich die Reaktion in der reduzierten gelben Phase befindet kommt beim Fotomultiplier am wenigsten Licht an, der Kurvenverlauf zeigt ein Minimum. Entsprechend zeichnen sich bei der oxidierten Phase, die weiß ist, Maxima im Kurvenverlauf ab. Sowohl die Minima der Kurve als auch die Maxima zeigen einen exponentiellen Kurvenverlauf, der sich jeweils einem Grenzwert annähert.

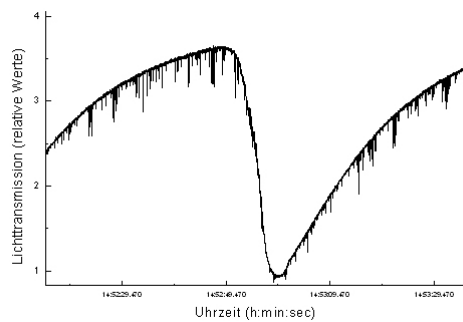
Die Zeitdauer der einzelnen Oszillationen wird im Verlauf der Reaktion immer länger. Als einzelne Oszillation wird dabei die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Farbwechseln von farblos nach gelb definiert.



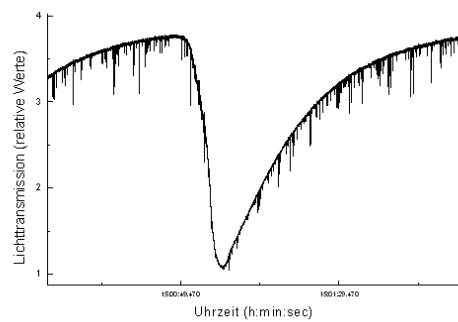
Peak 2



Peak 10



Peak 18



Peak 26

Abbildung 16: Vergrößerungen einzelner Peaks einer nicht-stationären gerührten BZR ohne ergänzenden Katalysator zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Nummern folgen der Abbildung 17. Die Artefakte des Kurvenverlaufs am Ende der Messung liegen an Störsignalen von anderen elektrischen Geräten, die im selben Raum betrieben wurden

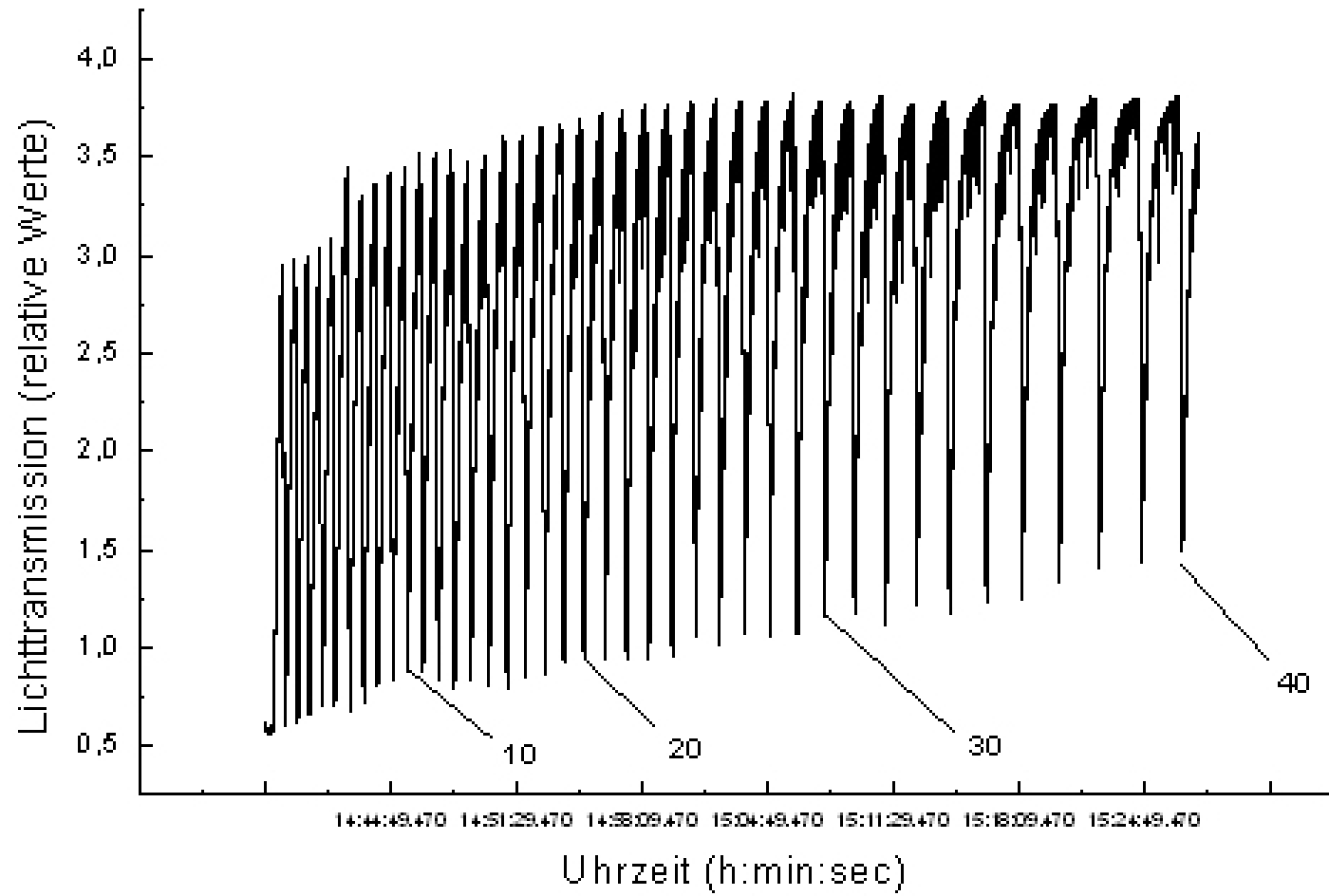


Abbildung 17: Langzeitmessung einer nicht-stationären gerührten BZR ohne weitere Zusätze von Ferroun.

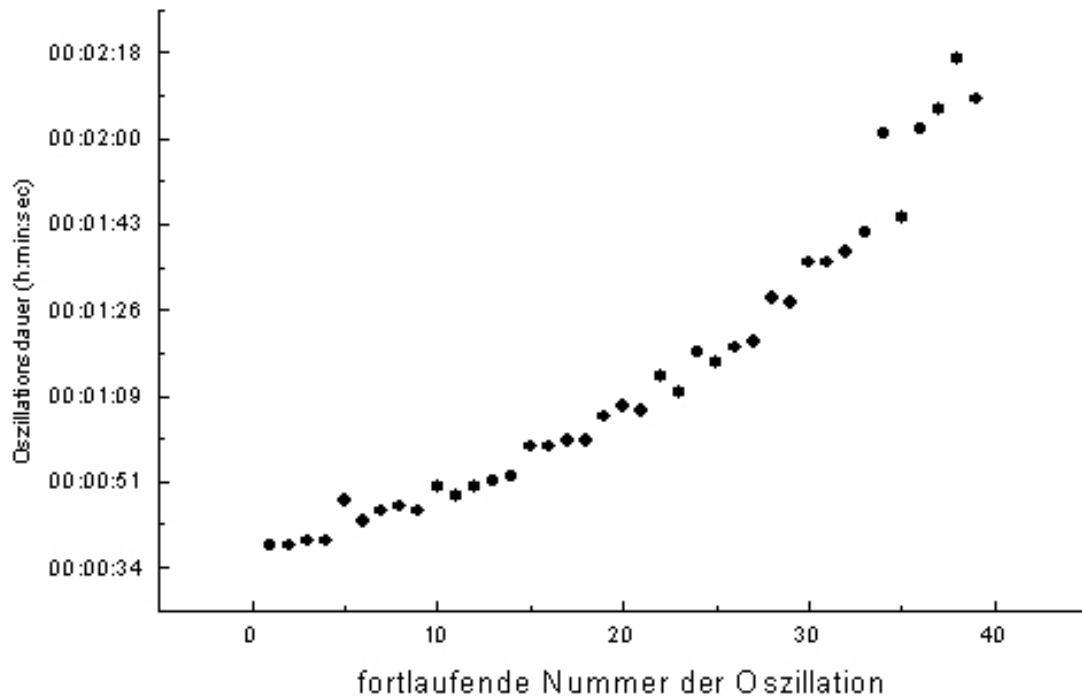


Abbildung 18: Zeitgang einer nicht-stationären gerührten BZR ohne den ergänzenden Katalysator Ferrouin. Die Werte basieren auf den Daten aus der Abbildung 17.

Mit dem gleichen Messaufbau wurde anschließend die BZR mit dem ergänzenden Katalysator Ferrouin durchgeführt. Der Kurvenverlauf ist spiegelverkehrt zum vorherigen ohne Ferrouin (Abb. 19). Das Ce^{4+} , das die Reaktionslösung gelb erscheinen lässt, oxidiert das Ferrouin, wodurch dieses seine Farbe zu blau wechselt. In der Kurve stellen die lokalen Maxima diese blaue Phase der Reaktion dar, die Minima entsprechen der roten, reduzierten. Eine zweite Veränderung im IOS ist das Auftauchen eines doppelten lokalen Maximums während der ersten Oszillationen. Die Kurve sinkt hierbei nach dem ersten Peak kurzfristig ab, steigt dann wieder zu einem zweiten lokalen Maximum, bevor sie wieder auf den Basiswert fällt.

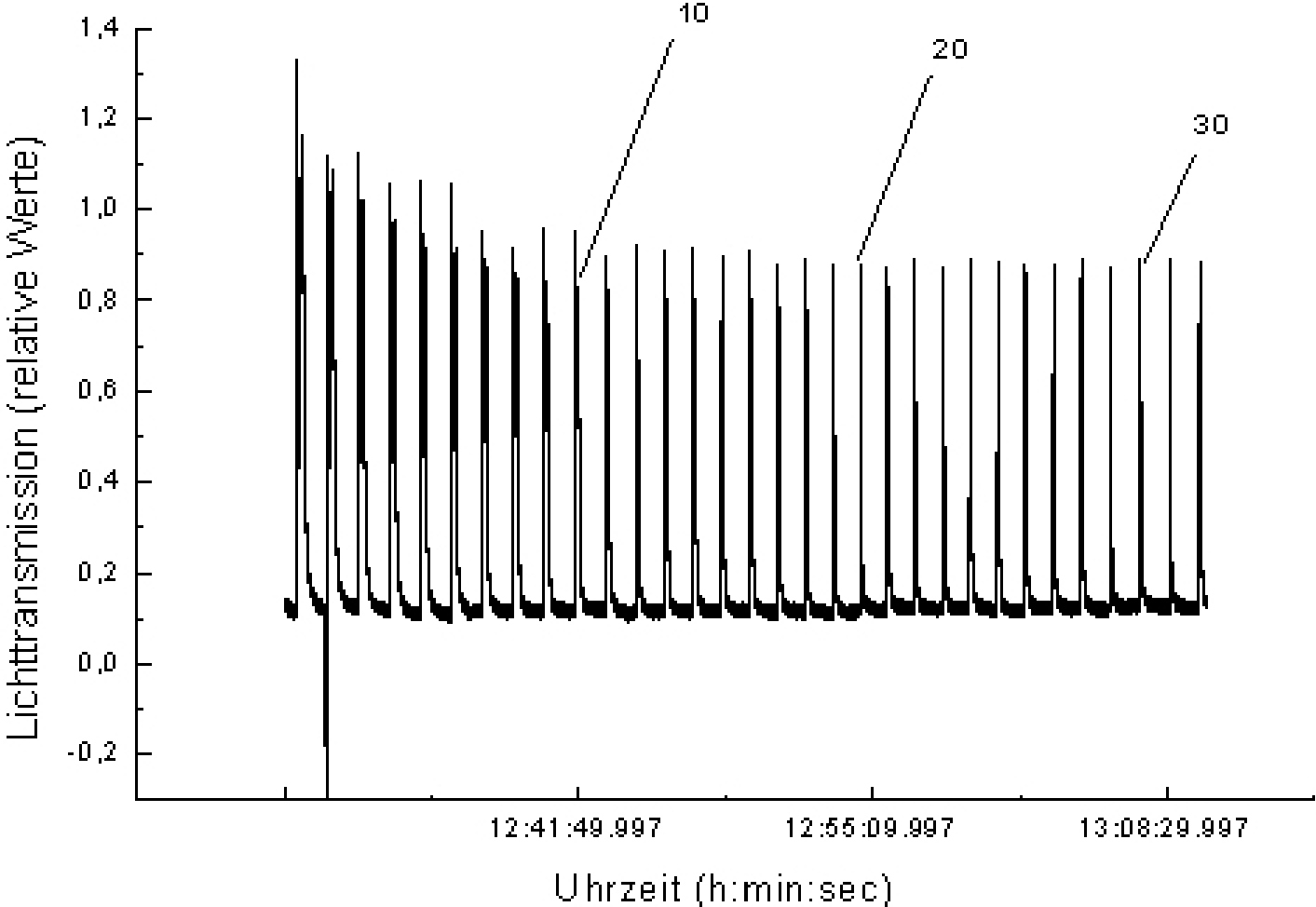
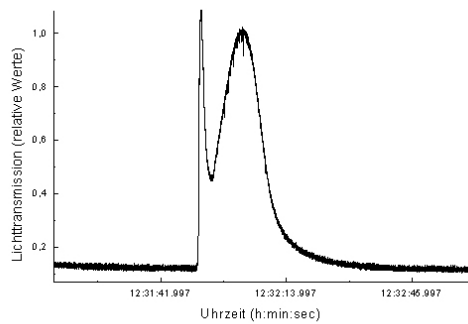
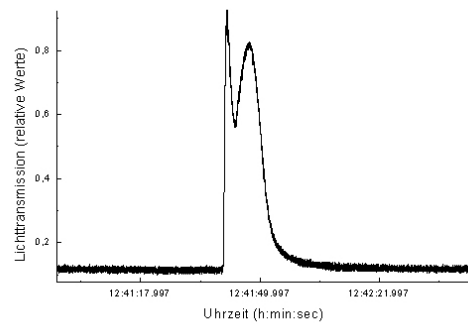


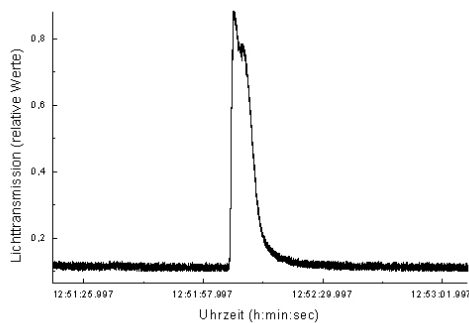
Abbildung 19: Langzeitmessung einer nicht-stationären gerührten BZR mit 0,4 mM Ferriin.



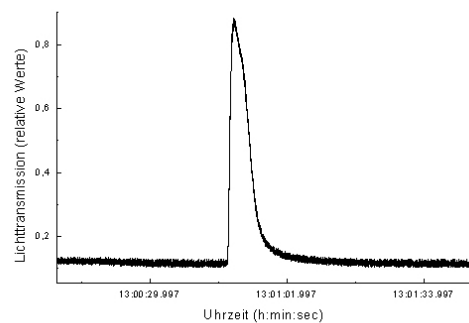
Peak 3



Peak 10



Peak 18



Peak 25

Abbildung 19: Vergrößerungen einzelner Peaks aus einer Langzeitmessung einer nicht-stationären gerührten BZR mit 0,4 mM Ferroin zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Nummern folgen der Abbildung 20.

Das biphasische Verhalten ist nur über wenige Oszillationen zu beobachten (20. – 24. Oszillation bei $N = 5$ Wiederholungen). Zudem ist es von der Ferroinkonzentration abhängig. Die Versuche zeigen, dass Doppelpeaks nur bei einer Ferroinkonzentration zwischen 0,1 bis 1 mM auftreten. Bei höheren oder niedrigeren Werten (Untersuchungsspanne 0 mM bis 2 mM) konnten mit den verwendeten Geräten und Messmethoden keine Doppelpeaks ermittelt werden⁷.

Für die BZR stellt Ferroin ein Katalysator dar, der die Reaktion beschleunigt. Zu Beginn (Oszillationen 1 – 15) der Reaktion mit Ferroin scheint sich die Oszillationsdauer erst zu verlängern, dann wieder zu verkürzen (Abb. 21). Der so entstandene „Buckel“ fällt zusammen

⁷ Aus diesem Grund wurden alle weiteren Messungen zur Untersuchung des Einflusses von schwachen magnetischen Feldern bei einer Konzentration von 0,4 mM Ferroin durchgeführt.

mit dem Phänomen des Doppelpeaks. Danach geht die Kurve in eine monotone, leichte Steigung über.

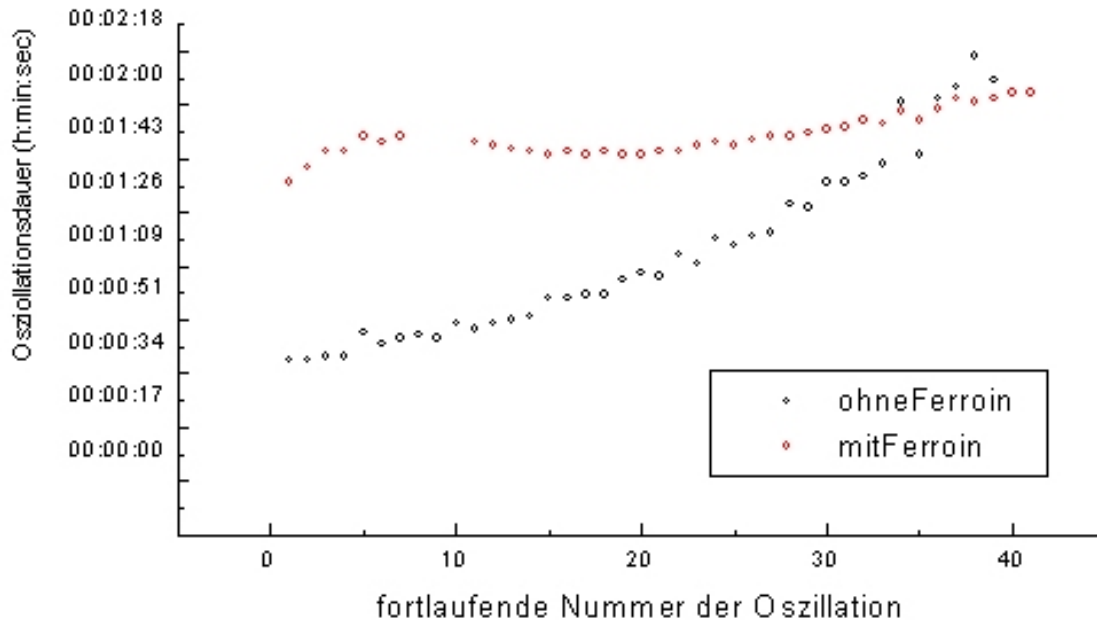


Abbildung 21: Vergleich der Oszillationsdauer zweier nicht-stationärer, gerührter BZR mit und ohne Ferroin. Die Werte basieren auf den Abbildungen 17 und 19.

Im Anschluss wurde das Verhalten des Doppelpeaks genauer analysiert. Die Werte des zweiten Peaks und die der Senke nähern sich einander an und gehen schließlich ineinander über, was das Verschwinden des Doppelpeaks zur Folge hat. Zweiter Peak und Senke bilden für eine kurze Zeit eine plateauartige Ausbuchtung. Dieses wird mit jeder Oszillation immer kürzer und verschwindet dann ganz. Die IOS-Kurven mit und ohne Ferroin sehen nun annähernd gleich aus – wenn auch gegenläufig.

Zur Verdeutlichung der Art und Weise wie der zweite Peak verschwindet wurde die Fläche unter der Kurve berechnet. Die Gesamtfläche – über dem Zeitrahmen einer Oszillation – nimmt dabei stetig ab. Die Fläche unter dem ersten Peak bleibt jedoch ungefähr gleich (Abb. 22).

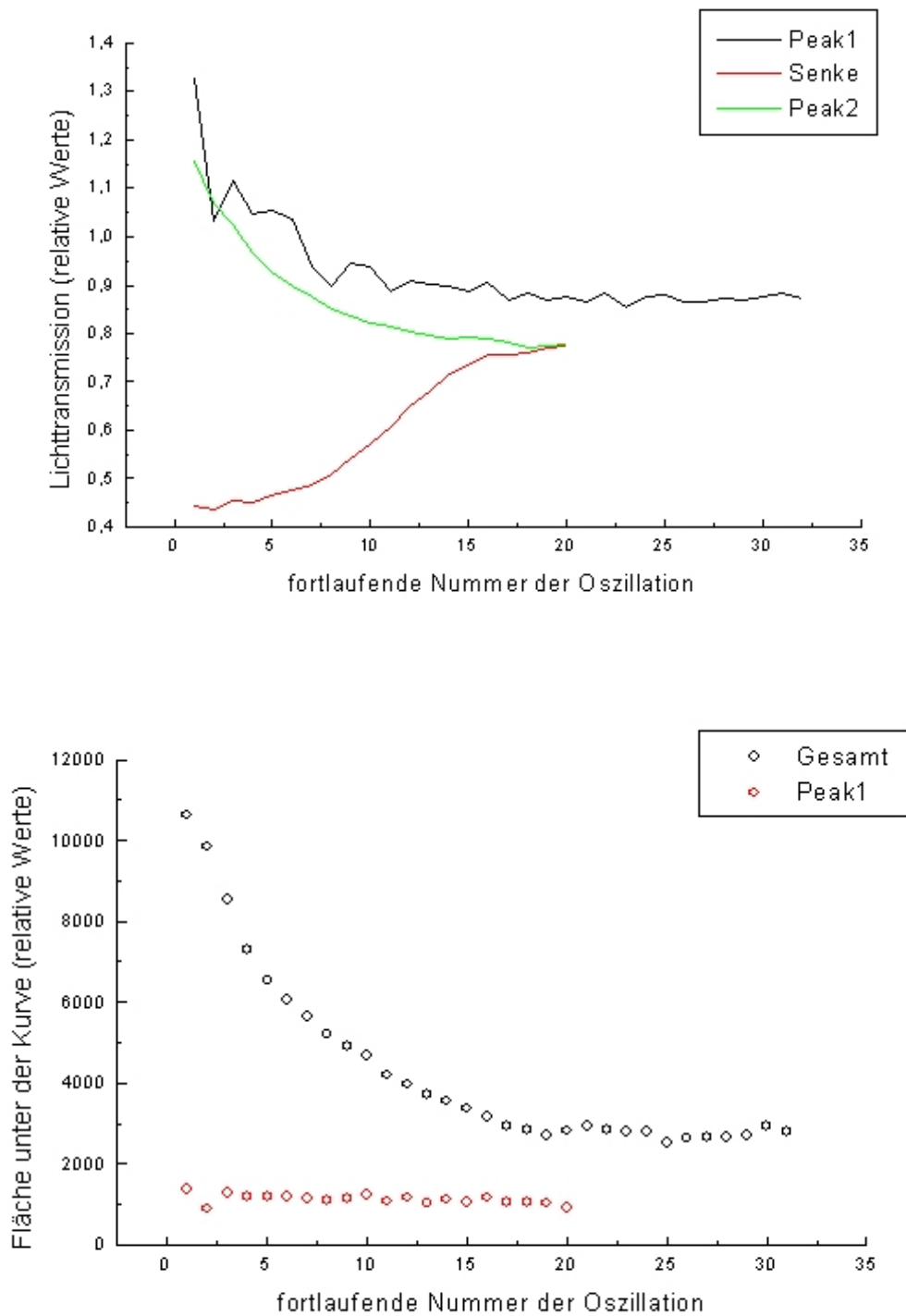


Abbildung 22: Genauere Aussagen zum Verhalten des Doppelpeaks.

Oben) Verhalten der lokalen Maxima des Doppelpeaks und der Senke dazwischen.

Unten) Flächen unter der Kurve: Gesamtfläche unter einer Oszillation und Fläche unter dem ersten Peak (Beginn der Oszillation bis lokales Minimum der Senke). Die Werte beider Diagramme basieren auf den IOS-Daten der Abbildung 19.

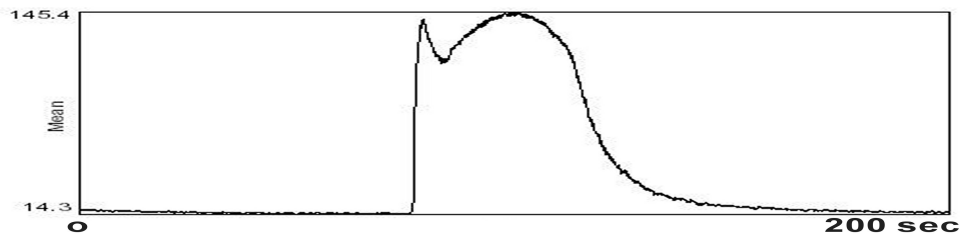
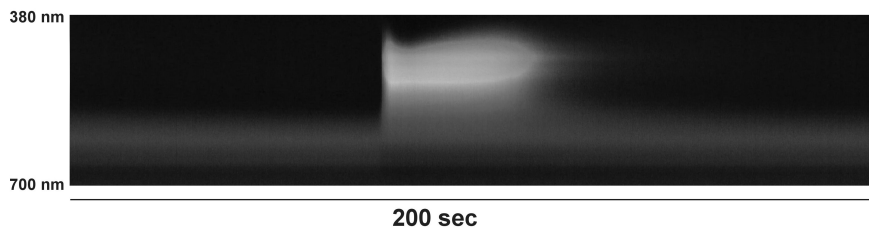
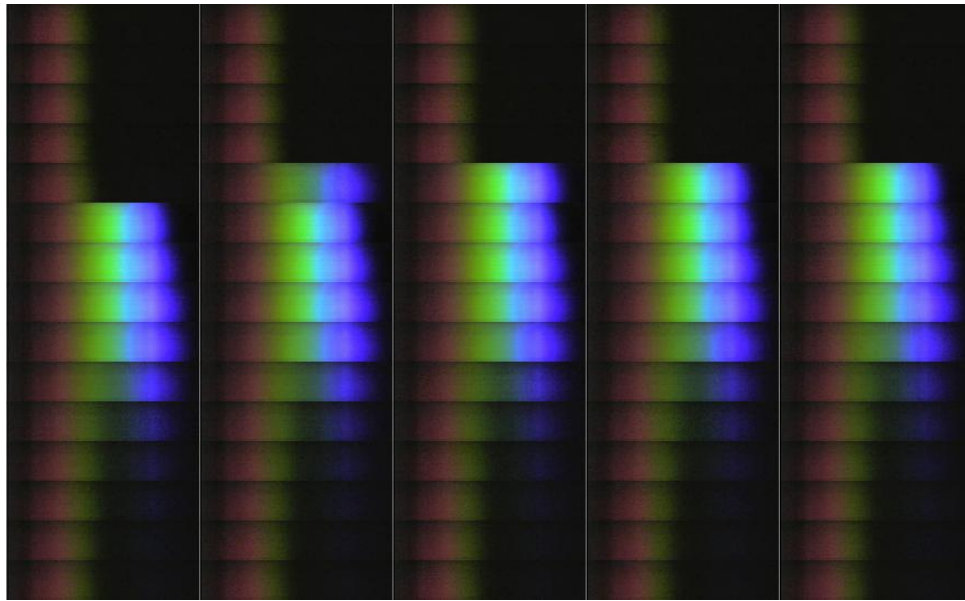


Abbildung 23: Spektrale Auswertung einer gerührten, nicht-stationären BZR mit 0,4 mM Ferriin.

- Oben) Im weißen Licht aufgenommenen Spektren von 5 Oszillationen (Zeitverlauf jeweils von oben nach unten). Die Spektren decken ein Zeitfenster von ca. 200 sec. ab und enthalten einen biphasischen Farbwechsel.
- Mitte) Optisches Signal eines biphasischen Verhalten zu Beginn der Reaktion im Weißlicht.
- Unten) Querschnitt über ein Spektrum bei 480 nm . Der resultierende Kurvenverlauf gleicht dem aus der Abbildung 20.

Um weitere Informationen zum biphasischen Verhalten der BZR zu bekommen, wurde der Farbwechsel des Systems im weißen Licht mit einem Spektrometer aufgenommen (Abb. 23). Bei der Zerlegung in die einzelnen Wellenlängen erkennt man, dass der rote Farbbereich im Hintergrund der Oszillation beständig vorhanden ist und nur zeitweise von den grünen, blauen und violetten Bereichen überlagert wird. Erstellt man bei 480 nm einen Querschnitt der Daten des Spektrogramms, erhält man den gleichen Kurvenverlauf, wie bei den IOS-Daten (Abb. 20).

Da die BZR mit Ferroin zwischen Rot und Blau oszilliert, wurden von den Spektrogrammen Querschnitte im Wellenbereich der beiden Farben erstellt, d.h. es wurde über die Zeit in einem abgegrenzten Spektralbereich die mittlere Helligkeit aufgezeichnet. In den Kurven erkennt man, dass der Doppelpeak seinen Ursprung im blauen Bereich hat (Abb. 24).

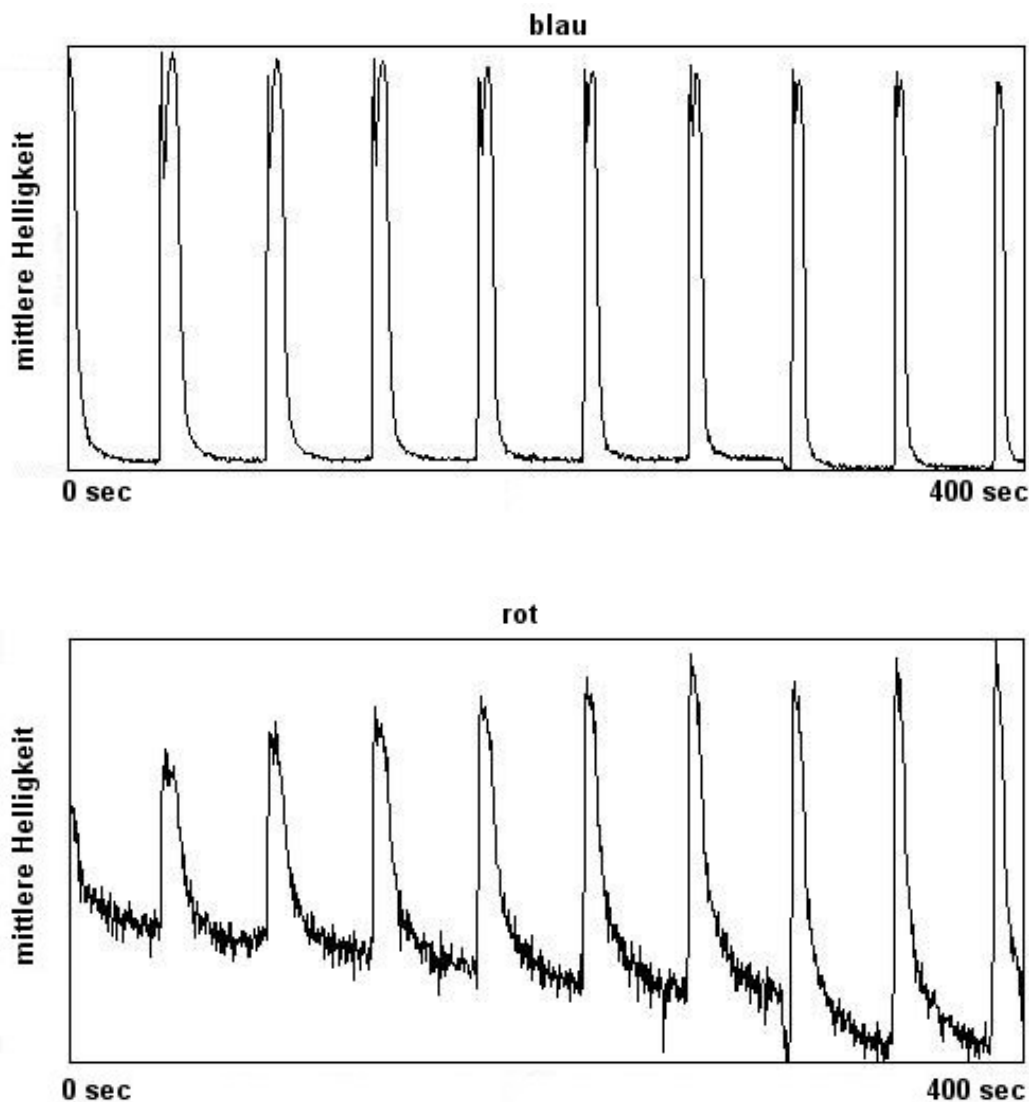


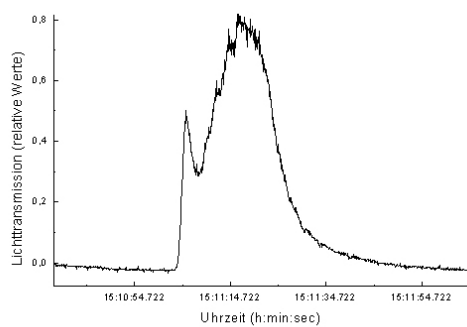
Abbildung 24: Querschnitt des Spektrogramms einer nicht-stationären BZR mit 0,4 mM Ferroin im blauen (oben) und im roten (untern) Spektralbereich.

Die Kurve des blauen Bereichs sieht im wesentlichen so aus wie die reinen IOS-Daten bei blauer Beleuchtung (vergl. Abb. 20). Im roten Bereich dagegen vergrößert sich zu Beginn der Reaktion mit jeder Oszillation die Amplitude etwas. Gleichzeitig liegt die Basis der Oszillation auf einer abwärts weisenden Geraden.

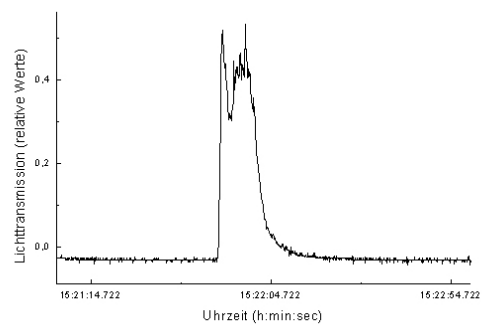
5.1.2. Einfluss eines schwachen magnetischen Feldes auf die zeitliche Oszillation

Der gleiche Versuch wie oben beschrieben (mit 0,4 mM Ferroin) wird nun im MF durchgeführt. Dazu wurde das Becherglas mit den Reagenzien zwischen zwei parallel befestigte Helmholtz-Spulen gestellt. Diese beim DC-Feld und beim AC-Feld in Serie geschalteten Spulen sind mit einem Frequenzgenerator und im zweiten Fall mit einem Verstärker und einem Messgerät verschaltet.

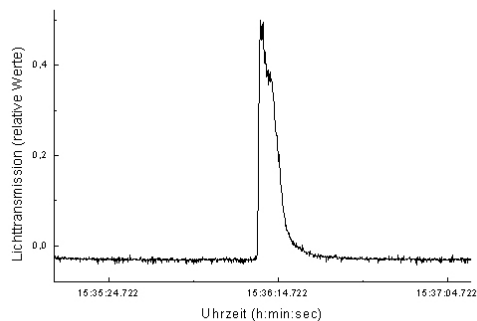
a) DC-Feld:



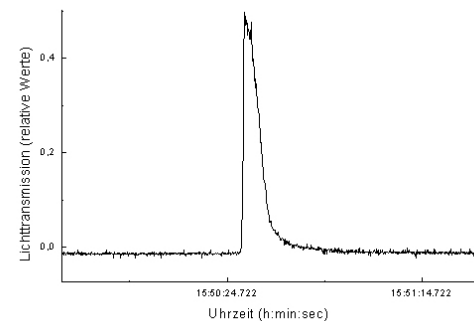
Peak 2



Peak 10



Peak 20



Peak 30

Abbildung 25: Vergrößerungen einzelner Peaks einer nicht-stationären gerührten BZR mit 0,4 mM Ferroin im DC-Feld (Feldstärke: 0,1 mT) zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Nummerierung folgt der Abbildung 26.

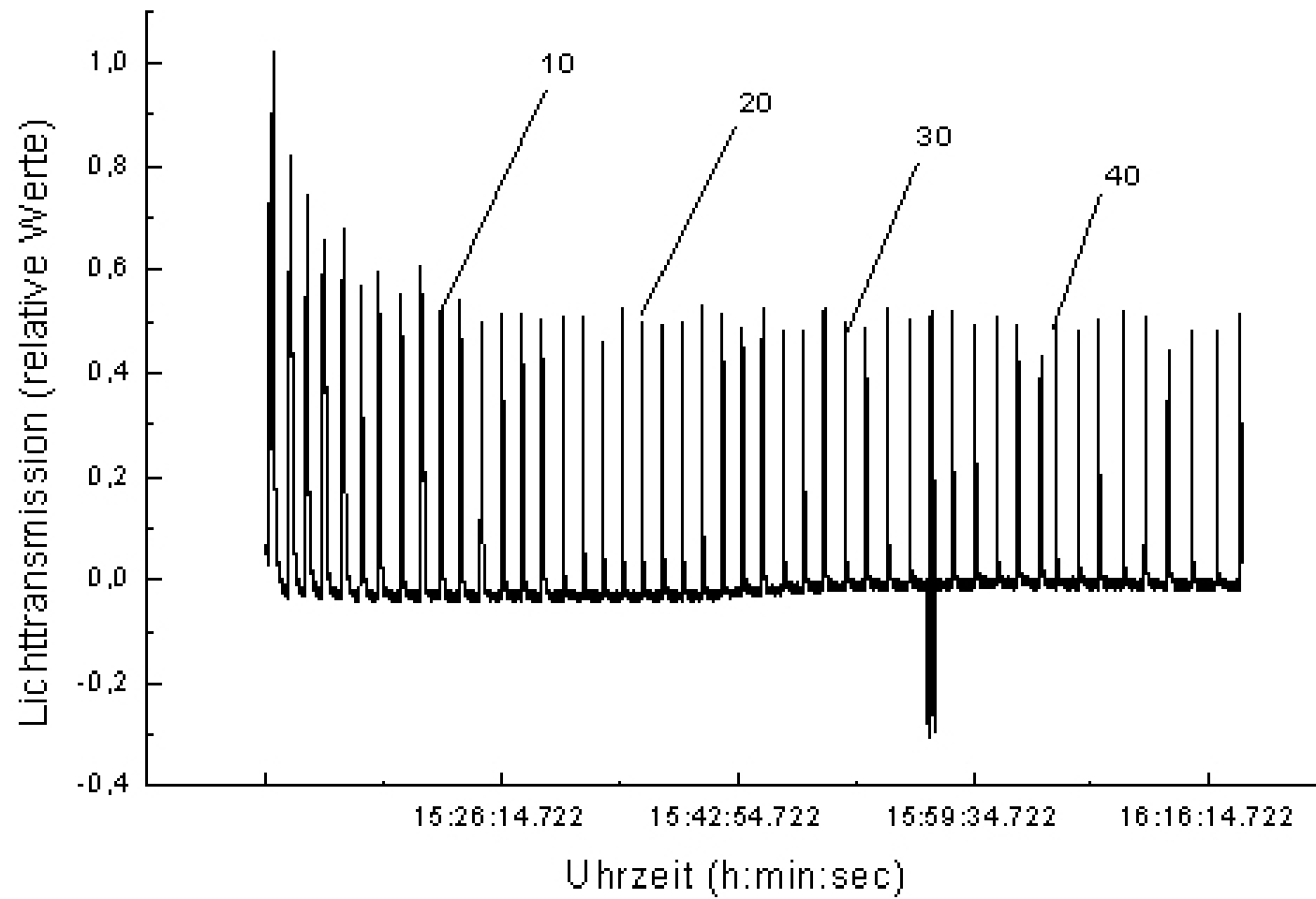


Abbildung 26: Langzeitmessung einer nicht-stationären gerührten BZR mit 0,4 mM Ferroin unter Einfluss eines externen DC-Feldes (Feldstärke 0,1 mT)

Auch im MF ist ein biphasisches Verhalten der Oszillation zu beobachten. Im Unterschied zum IOS ohne Feld fällt aber auf, dass die Kurve auch in sich leicht oszilliert (Abb. 25).

Eine weitere Veränderung in den IOS-Daten im MF verglichen mit den Werten ohne tritt im Verhältnis der zwei Peaks einer Oszillation auf. Ohne MF nehmen die Werte der zwei lokalen Maxima einer Oszillation ungefähr im gleichen Maße ab. Die Werte des ersten Peaks sind dabei immer größer als die des zweiten. Im DC-Feld dagegen übersteigen die Werte des zweiten Peaks anfangs die des ersten (Abb. 27).

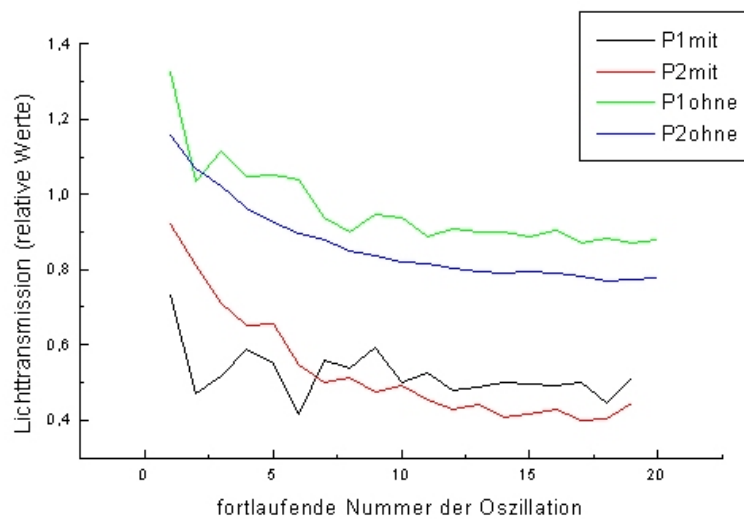
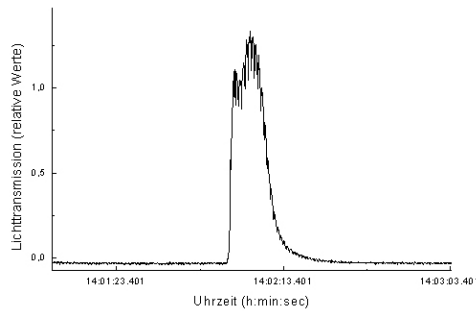


Abbildung 27: Vergleich des Verhaltens der zwei Peaks (Peak 1 und Peak 2) eines Doppelpeaks einer gerührten, nicht-stationären BZR mit 0,4 mM Ferroin ohne und mit externem MF (Feldstärke: 0,1 mT). Die Werte basieren auf den Abbildungen 19 und 26.

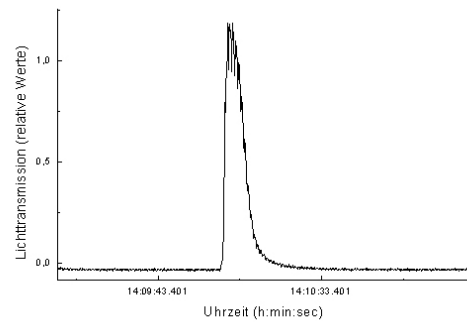
Die Werte des ersten Peaks im DC-Feld bleiben dabei tendenziell gleich groß, wohingegen die des zweiten Peaks abnehmen. Die Tendenz im Verhalten des zweiten Peaks gleicht dabei dem ohne MF.

b) AC-Feld:

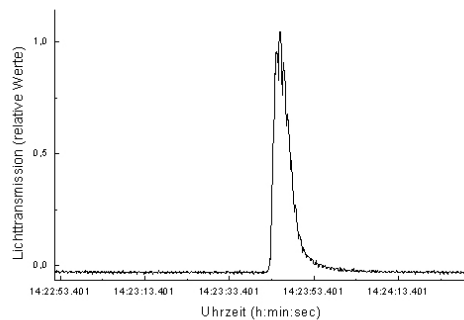
Über wenige Oszillationen tritt im IOS ein Doppelpack auf (Abb. 28). Wie im DC-Feld ist auch hier der erste Peak zu Beginn der Reaktion kleiner als der zweite. Auch die zusätzliche Oszillation der Kurve ist deutlich erkennbar. Diese scheint im AC-Feld noch ausgeprägter zu sein. Als Folge davon schwanken die Werte der lokalen Maxima der IOS-Daten stärker als im DC-Feld. Ohne externem MF liegen die lokalen Maxima der Oszillationen auf einer Linie, die durch eine einfache exponentielle Gleichung beschrieben werden kann. Im MF dagegen schwanken sie, im AC-Feld stärker als im DC-Feld.



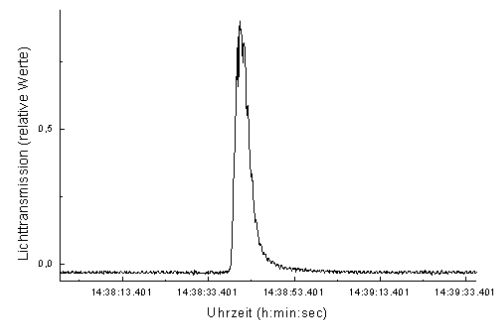
Peak 4



Peak 10



Peak 20



Peak 30

Abbildung 28: Vergrößerungen einzelner Peaks einer nicht-stationären gerührten BZR mit 0,4 mM Ferroin im AC-Feld (Feldstärke: 0,1 mT) zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Nummerierung folgt der Abbildung 29.

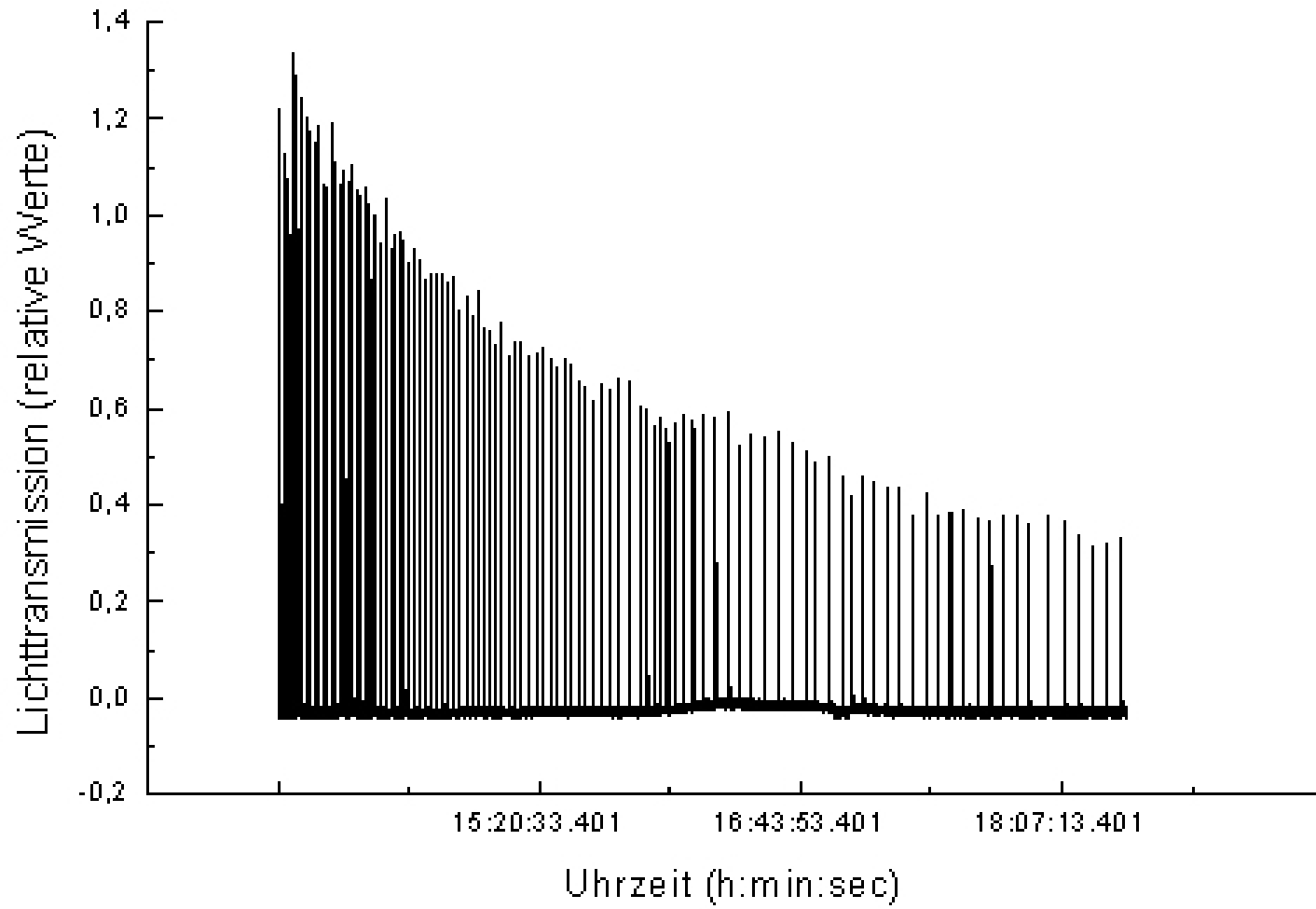


Abbildung 29: Langzeitmessung einer nicht-stationären gerührten BZR mit 0,4 mM Ferroin unter Einfluss eines externen AC-Feldes (Feldstärke 0,1 mT)

5.1.3. Einfluss eines schwachen magnetischen Feldes auf die räumliche Oszillation

Je nachdem an welcher Stelle sich im Gel eine kleine Störung in Form z.B. eines Staubkorns oder ähnlicher Kondensationskeime befindet, startet die Oszillation, indem sich dort ein lokaler Konzentrationsgradient bildet. Im Falle der räumlichen Oszillation zeigt sich dies als Umschlag der ansonsten rötlichen Farbe des Gels in eine helle Bande. Aus dem Pulsator entwickeln sich, je nach Bedingungen in der Umgebung, konzentrische Ringe oder Spiralen, die sich wellenartig auswärts bewegen. Treffen zwei Wellenfronten aufeinander, löschen sich diese gegenseitig auf, was man als Annihilation bezeichnet.

Im IOS der nicht-stationären räumlichen Oszillation im Gel konnten mit der verwendeten Messtechnik keine Doppelpeaks gefunden werden.

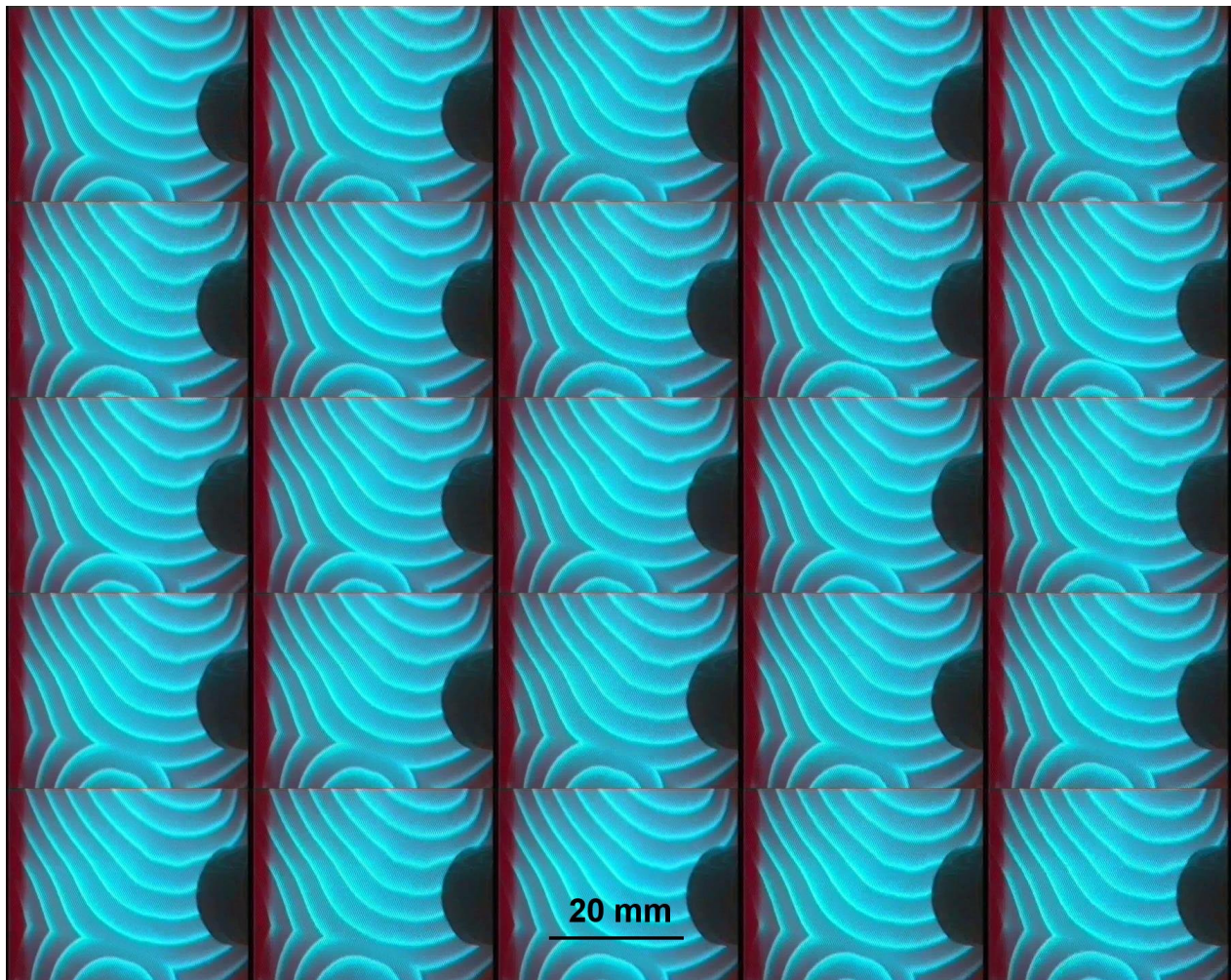


Abbildung 30: Die Bildserie einer räumlichen Oszillation. Die BZR im Gel bildet Wellenmuster aus propagierenden konzentrischen Ringen (können auch Spiralen sein). Beim Aufeinandertreffen zweier Wellenfronten (unteres Drittel der Einzelbilder) löschen sie diese gegenseitig aus (Annihilation). Die Zeitintervalle der Bildserie betragen 4 sec. Am rechten Bildrand erkennt man das Objektiv des Fotomultipliers, mit dem die Wellen zur weiteren Auswertung aufgenommen wurden.

Über die Dauer des Versuchs ist ein allmähliches Hellerwerden des Gels zu beobachten. Die Basis der IOS-Kurve steigt linear an und geht nach einer Versuchsdauer von ca. 5 Stunden in eine waagrechte Gerade über (Abb. 32). Die Höhe der Amplitude variiert im Verlauf des Versuchs. Außer der starken Amplitudenverkleinerung bei den ersten drei Oszillationen ist aber keine eindeutige Tendenz zu erkennen.

Der Verlauf des IOS eines BZR-Gels im MF unterscheidet sich fast nicht von denen ohne. Auch hier ist kein Doppelpack im Kurvenverlauf zu erkennen (Abb. 31). Die Basis der Kurve steigt ebenfalls linear an.

Da jedes Gel ein neues System darstellt, können sie sich in ihrer jeweiligen Grundhelligkeit unterscheiden (Abb. 35). Aus diesem Grund kommt es zu einer Verschiebung auf der y-Achse.

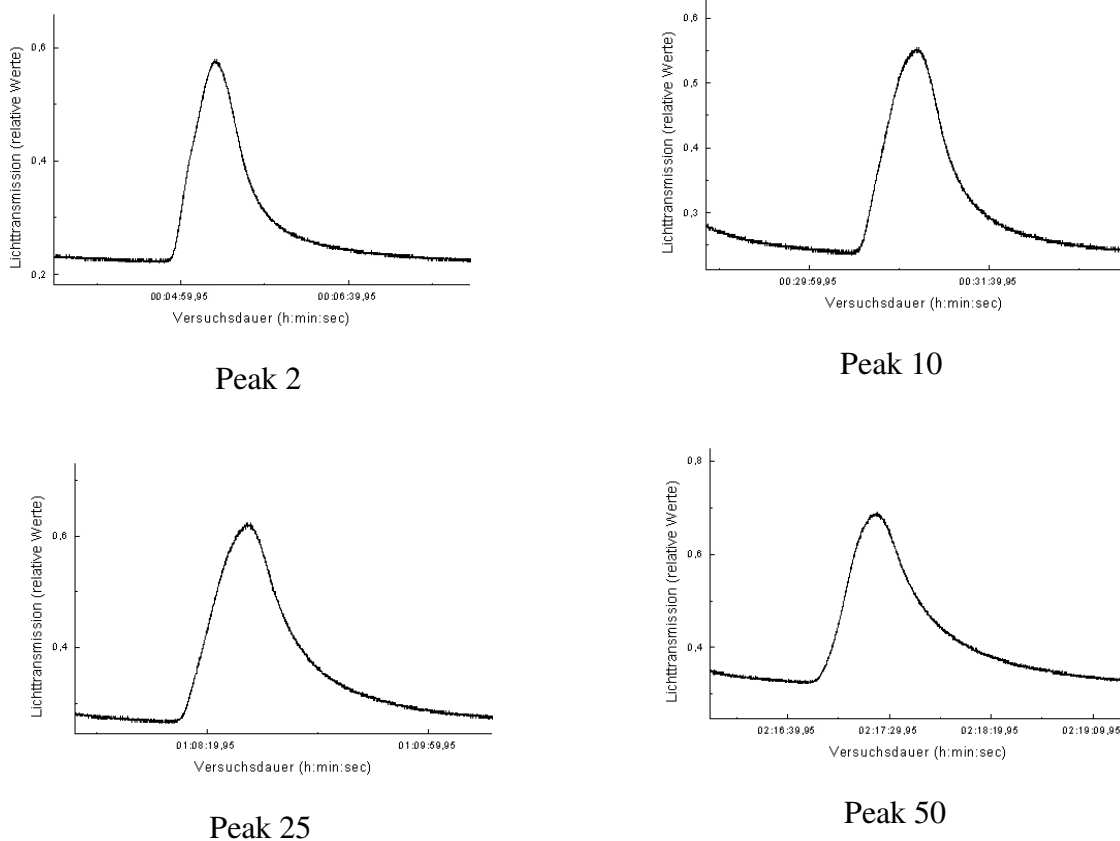


Abbildung 31: Vergrößerungen einzelner Peaks eines nicht-stationären BZR-Gels zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Nummerierung folgt der Abbildung 32.

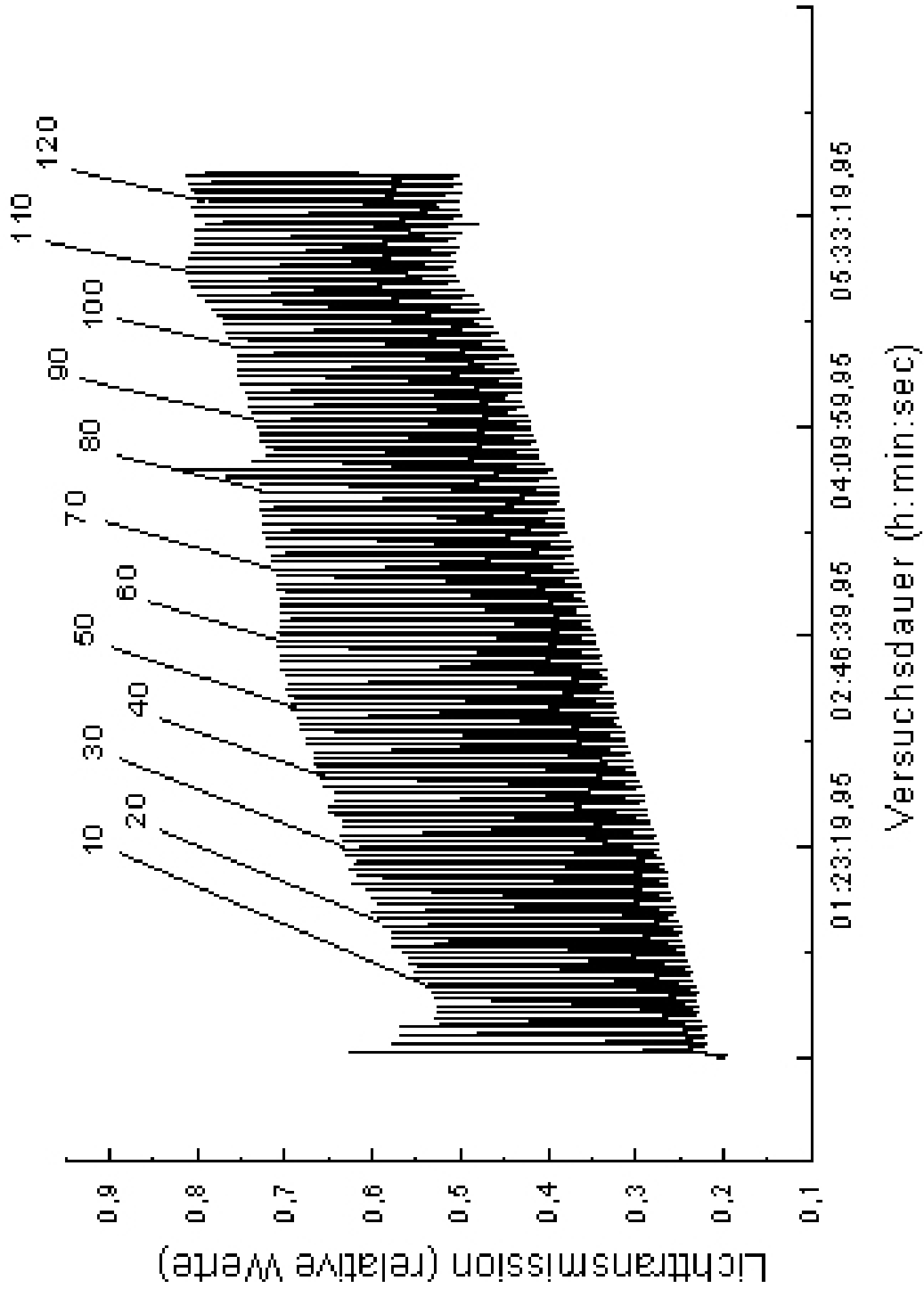


Abbildung 29: Langzeitmessung eines nicht-stationären BZR-Gel.

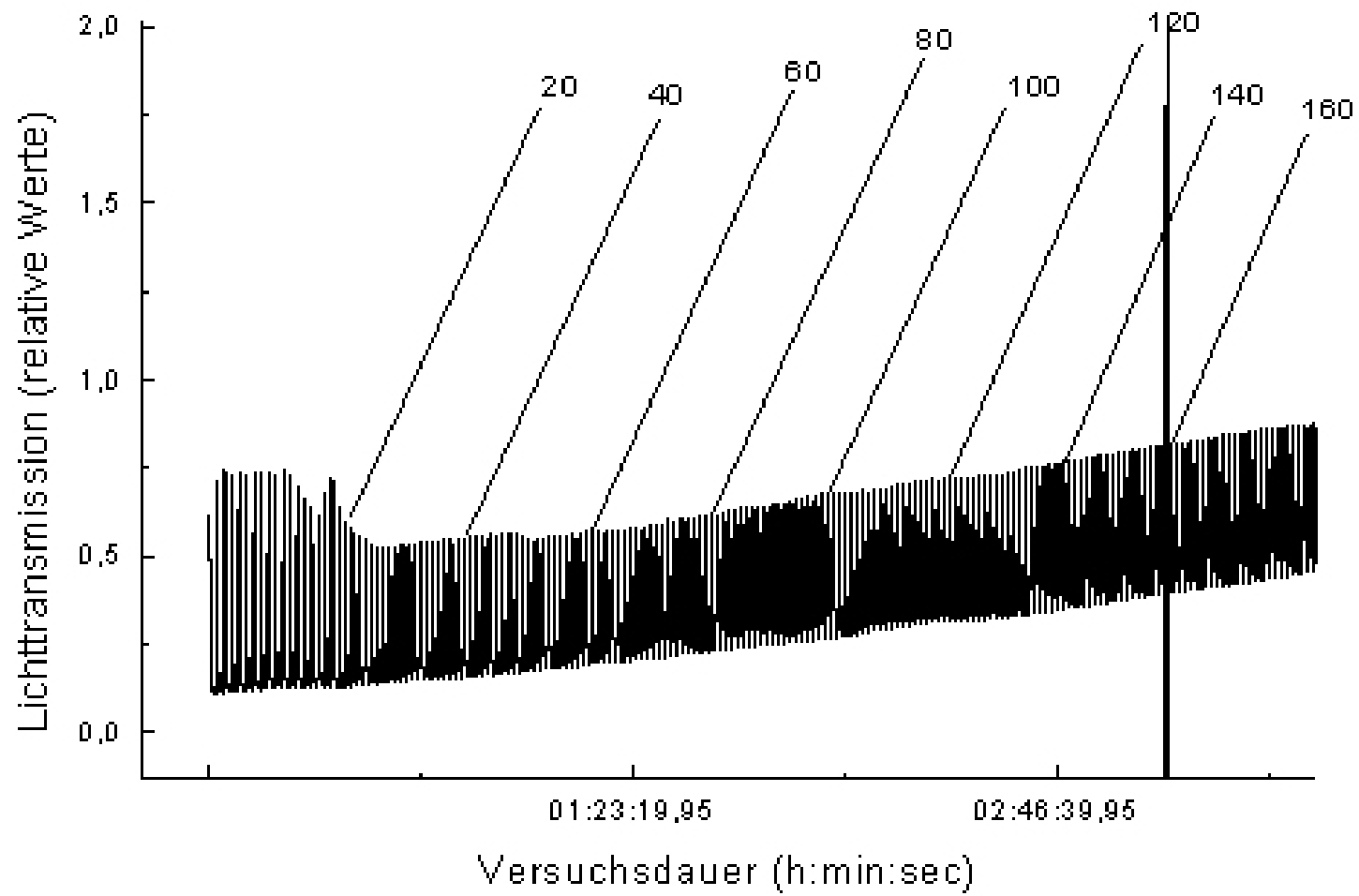


Abbildung 29: Langzeitmessung eines nicht-stationären BZR-Gel unter Einfluss eines externen DC-Feldes (Feldstärke 0,1 mT)

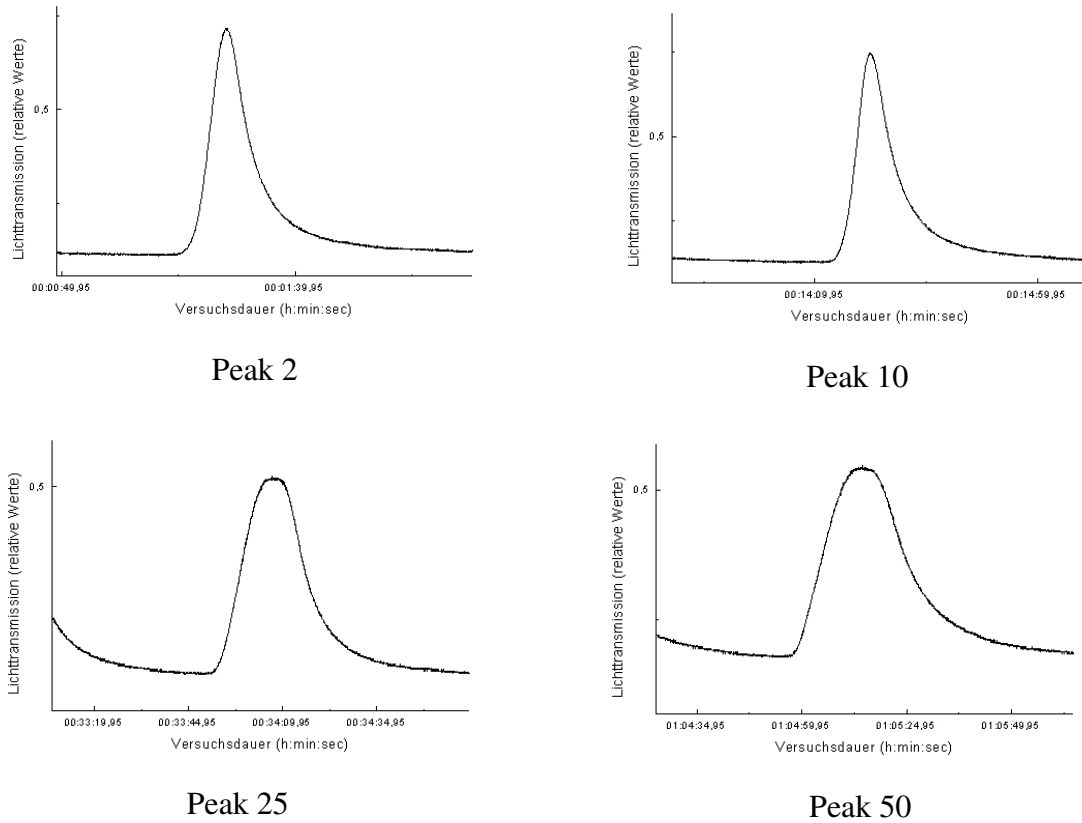


Abbildung 34: Vergrößerungen einzelner Peaks eines nicht-stationären BZR-Gel im DC-Feld (Feldstärke: 0,1 mT) zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Nummerierung folgt der Abbildung 33.

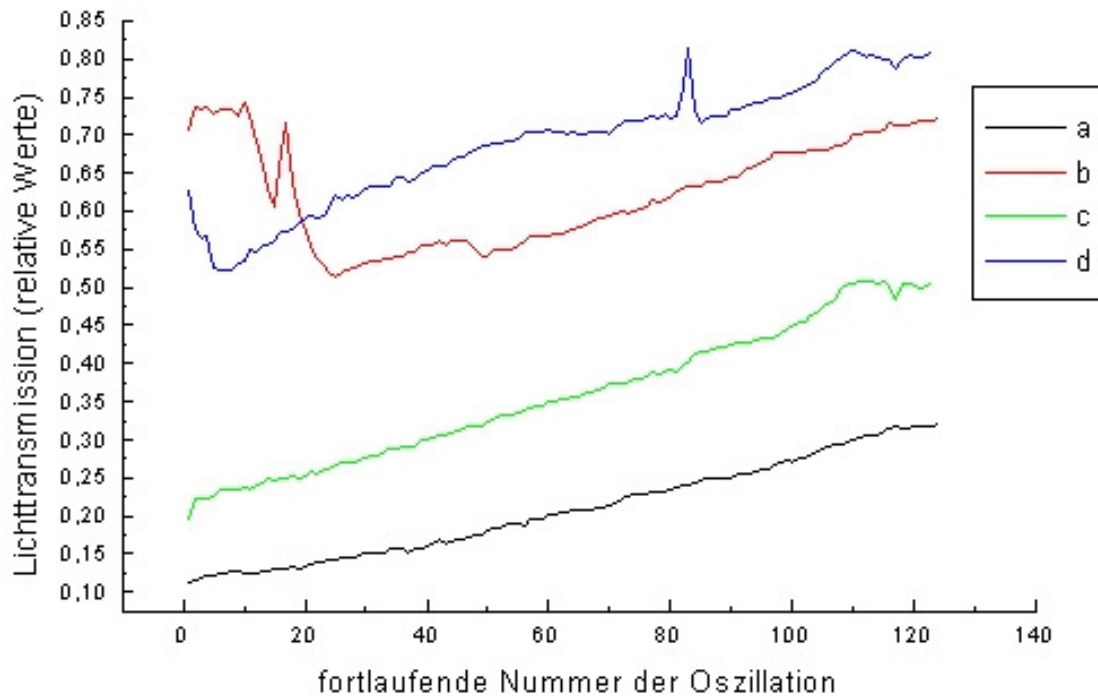


Abbildung 35: Vergleich der lokalen Minima und Maxima der Langzeitmessungen nicht-stationärer BZR-Gele a) lokales Minimum mit DC-Feld, b) lokales Maximum mit DC-Feld, c) lokales Minimum ohne MF, d) lokales Maximum ohne MF. Die Werte basieren auf den Abbildungen 32 und 33.

Man kann also nicht die absoluten Werte miteinander vergleichen, sondern nur deren Tendenzen im Verhalten.

Beim Vergleich der lokalen Minima und Maxima kann keine quantitative Aussage über ein unterschiedliches Verhalten mit oder ohne MF gemacht werden. In beiden Fällen ist aber die Tendenz ähnlich. Ein Effekt des MF ist hier statistisch signifikant nicht erkennbar. Allerdings verändert sich die Oszillationsdauer im MF (Abb. 36). Während sich die Oszillationen ohne MF kontinuierlich verlangsamen, ist die Tendenz im MF eher umgekehrt. Die Verschiebung in der auf der y-Achse ist wieder dadurch bedingt, dass die beiden Gele unterschiedliche Systeme sind.

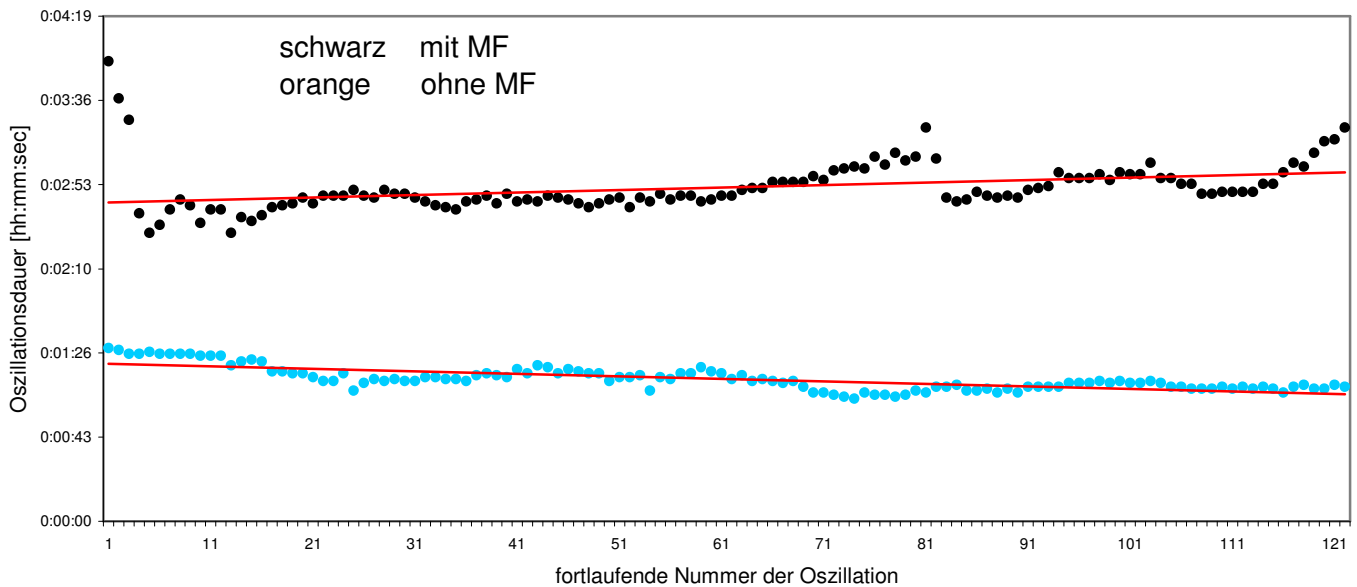


Abbildung 36: Vergleich der Oszillationsdauern zweier nicht-stationärer BZR-Gele. Die Werte stammen aus den Abbildungen 32 und 33.

5.2. Ferrofluide

In diesen Versuchen wird eine kleine Petrischale ca. 5 mm hoch mit dem Ferrofluid gefüllt und auf einer Lautsprechermembran befestigt. Mittels eines Frequenzgenerators wird das Ferrofluid dann über die Lautsprechermembran in Schwingung versetzt. Verändert man nun die Amplitude der Schwingung, indem man am Frequenzgenerator die Voltzahl variiert, kann man Phasenübergänge bei den entstehenden Mustern erkennen.

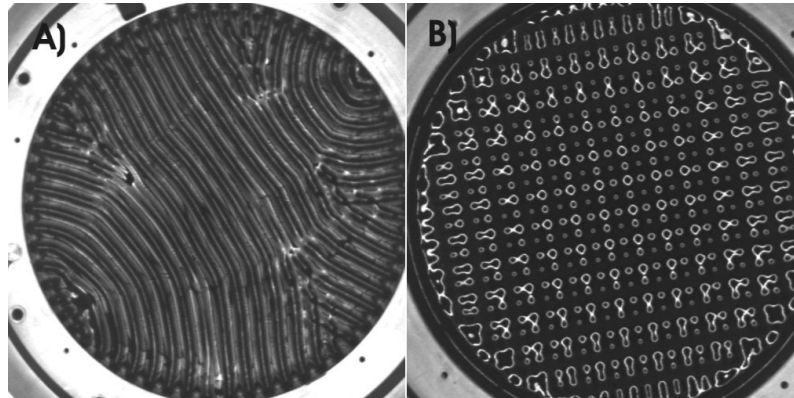


Abbildung 37: Muster in extern erregten Ferrofluiden. Einen Phasenübergang stellt z.B. der Wechsel zwischen dem Linienmuster links und dem Rautenmuster rechts dar (nach Lücke: <http://www.uni-saarland.de/fak7/luecke/SFB/index.html>.)

Nun wurden zwei Phasenübergänge bei unterschiedlichen Frequenzen ermittelt (1. Phasenübergang: glatt – konzentrischen Kreisen; 2. Phasenübergang: Kreise – Rautenmuster). Jeder Grenzwert wurde dabei sowohl von oben als auch von unten angenähert. Die Wiederholung der Messungen war dabei $N = 6$. Um den Einfluss eines externen magnetischen Feldes auf die Musterbildung der Ferrofluide zu ermitteln, wurde der Versuchsaufbau anschließend durch zwei Helmholtz-Spulen ergänzt. Diese erzeugten nun ein Elektromagnetfeld, dessen Feldlinien senkrecht zur Oberfläche des Ferrofluids stehen. Die Messungen wurden nur bei Gleichspannung (DC) durchgeführt, da ein Wechselfeld (AC) selbst das Ferrofluid in Schwingung versetzt hätte. Mit dem verwendeten Versuchsaufbau konnten keine verwertbaren Messergebnisse erzielt werden, da das Ferrofluid am Deckel der Schälchen hängen blieb und so optisch kein Phasenübergang mehr erkannt werden konnte. Die Feldstärke des DC-Feldes betrug $0,1 \text{ mT}$, und ist somit mit dem Feld bei den BRZ-Versuchen vergleichbar. Beim Vergleich der beiden Kurven ist zu erkennen, dass jeweils die Kurve mit dem MF geringfügig steiler verläuft als die jeweilige ohne (Abb. 38).

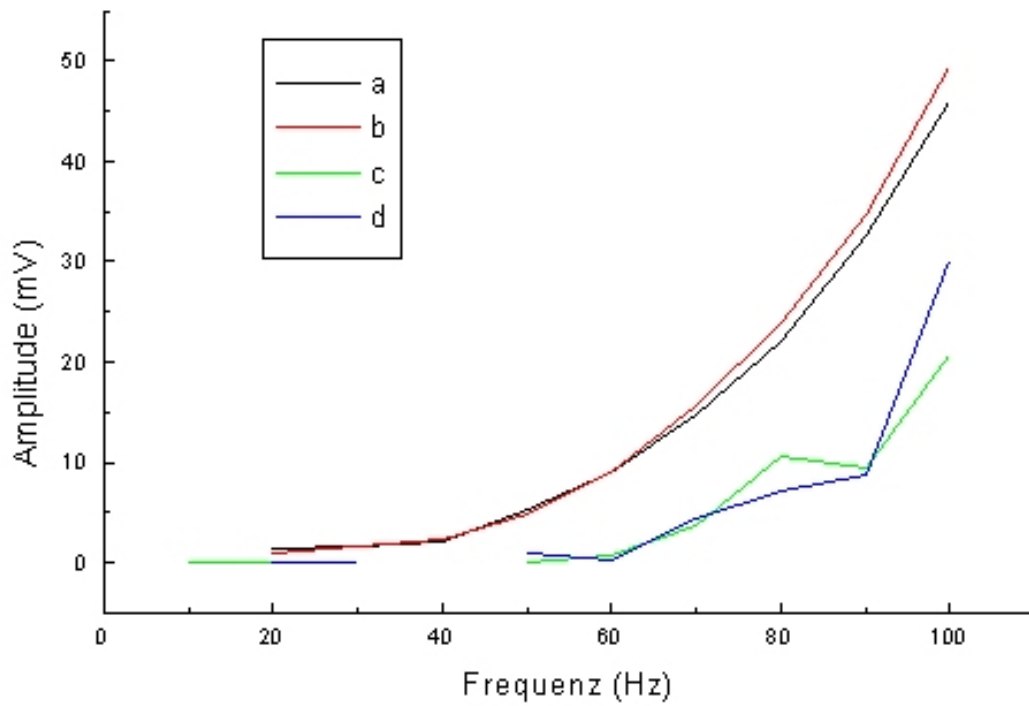


Abbildung 38: Darstellung der Phasenübergänge eines durch vertikale Schwingungen extern ange-regten Ferrofluids mit und ohne magnetischem Feld (Feldstärke: 0,1 mT) bei unterschiedlichen Frequenzen. a) 1. Phasenübergang ohne MF; b) 1. Phasenübergang mit MF; c) 2. Phasenübergang ohne MF; d) 2. Phasenübergang mit MF. (alle Messungen $N = 6$)

6. Diskussion der Ergebnisse

6.1. Biphasische Signale bei nicht-stationären BZR

Die zeitliche Oszillation einer BZR in einem quasi stationären System wird durch die theoretischen Modelle normalerweise als periodischer Farbwechsel mit monotonem Anstieg und nachfolgendem Abfall beschrieben. Experimentell wird dies auch durch viele Versuche belegt (für einen Überblick siehe Krieger, 2001 und Manz, 2002).

Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass sich dieser monophasische Wechsel durch die Zugabe von Ferroin innerhalb eines Konzentrationsbereichs von 0,1 mM bis 1 mM in nicht-stationären Systemen vorübergehend in einen Doppelpeak aufteilt. Einzelne Vermerke zu diesem komplexen Verhalten sind bereits publiziert worden. Gáspár et.al. (1985) wiesen darauf hin, dass ein Ferroin-katalysiertes System einen „höheren Level von Komplexität“ aufweist, womit ein begrenzter Bereich von Bistabilität gemeint ist. In ihren Versuchen konnten sie eine Interaktion zwischen Bromat und Ferroin nachweisen, die oszillierenden Charakter besitzt. Dass die Bifurkation der Oszillationsspitze abhängig von den Konzentrationen unterschiedlicher Komponenten der Reaktionslösung ist, haben Wang et.al. 2005 gezeigt.

Laut Literatur (Dutt, 2002; Giles et.al., 1992) ist Ferroin ein Katalysator, der die Reaktion beschleunigt. In den Versuchen zeigte sich aber, dass die Reaktion im nicht-stationären System mit Ferroin zu Beginn der Reaktion langsamer als ohne verläuft (Abb. 21). Erst nach einiger Zeit ist die Verlangsamung ohne Ferroin so stark, dass die Reaktion langsamer als die Ferroin-katalysierte ist. Dagegen ist die absolute Verlangsamung der Reaktion mit zusätzlichem Katalysator über den gemessenen Zeitraum deutlich geringer (Differenz der Oszillationsdauer: mit Ferroin 20 sec.; ohne 38 sec.).

Parallel zum Auftreten des Doppelpeaks in einer Ferroin-katalysierten BZR kommt es im Zeitgang der Reaktion nach anfänglicher Verlangsamung der Oszillationsdauer sogar zu einer kurzzeitigen Beschleunigung. Nach dem Verschwinden des biphasischen Verhaltens aus der IOS-Kurve vergrößert sich die Oszillationsdauer wieder, wenn auch nur sehr gering. Es ist anzunehmen, dass die Rückkopplung, die den Doppelpeak bewirkt, auch die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflusst.

Weitere Untersuchungen sollen Aufschlüsse über Art und Verhalten des Doppelpeaks geben. Durch die Auswertung der Flächen unter der Kurve wird deutlich, dass die Fläche unter dem

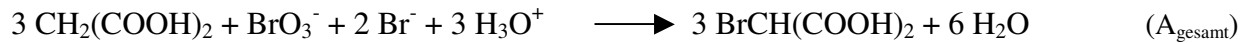
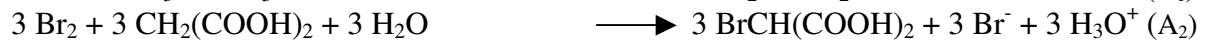
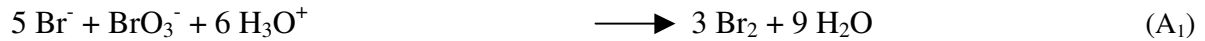
ersten Peak die ganze Zeit über ungefähr gleich bleibt (Abb. 22). Die Fläche unter der gesamten Oszillation dagegen nimmt kontinuierlich ab, bis sie sich einem Grenzwert anzunähern scheint und gleich bleibt. Auch gehen die Werte des lokalen Maximums des zweiten Peaks und des lokalen Minimums der Senke zwischen den beiden Peaks einer Oszillation ineinander über. Beides deutet darauf hin, dass der durch das Ferroin erzeugte Effekt allein im Auftreten des zweiten Peaks liegt. Wie aber entsteht dieser zweite Peak und warum verschwindet er nach einigen Oszillationen?

Die Einzelanalyse der aufgezeichneten Spektren im roten und blauen Wellenlängenbereich zeigen den Doppelpeak nur im Blauen (Abb. 24). Die rote Farbe bleibt die ganze Zeit über erhalten (zumindest im aufgezeichneten Zeitraum) und wird von den anderen Wellenlängen nur kurzzeitig überlagert. Das Ferroin ist im reduzierten Zustand rot. Da die Rotfärbung andauert, ist anzunehmen, dass nicht das ganze im Reaktionsgefäß vorhandene Ferroin mit den entstehenden Ce^{4+} -Ionen reagiert, sondern erhebliche Teile in der roten, reduzierten Form bleiben. Ein möglicher Grund dafür wäre, dass während der Oszillation nicht genug Ce^{4+} -Ionen entstehen, so dass nicht alle vorhandenen Ferroin-Moleküle oxidiert werden. Es kann sich aber auch um ein Problem der Reaktionsgeschwindigkeiten handeln. Wenn die Reaktion III (vergl. Abb. 39) zu schnell startet und abläuft, verschwindet das Reduktionsmittel, die Ce^{4+} -Ionen, da sie selber wieder zu Ce^{3+} -Ionen reduziert werden.

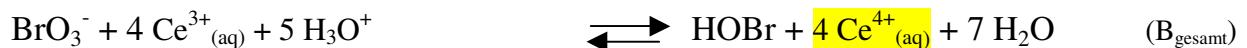
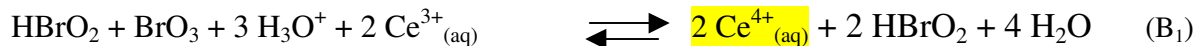
Beim Kurvenverlauf im roten Bereich fällt auf, dass die Amplituden der Kurve zu Beginn immer größer werden und die Grundlinie tendenziell absinkt (Abb. 24). Dieser Effekt dauert aber nur wenige Oszillationen lang an. Danach ist der Kurvenverlauf gleichbleibend über den gemessenen Bereich. Im blauen Wellenlängenbereich tritt kein solcher Effekt auf. Hier haben die Amplituden der einzelnen Oszillationen ungefähr identische Höhe und gleichem im Verlauf der Kurve der IOS-Daten.

Prozess I

Bromierung der Malonsäure unter Verbrauch von Bromat und Bromid


Prozess II

Oxidation des farblosen $\text{Ce}^{3+}_{(\text{aq})}$ Redoxkatalysator durch Bromat, wodurch die Reaktionsprodukte hypobromige Säure und das für die gelbe Farbe verantwortliche $\text{Ce}^{4+}_{(\text{aq})}$ entsteht (B_2 begrenzt dabei B_1)


Prozess III

Negative Rückkopplung: Neubildung von Bromid-Ionen, wodurch der Prozess II mit zeitlicher Verzögerung inhibiert wird und bei genügend hoher Bromid-Ionen-Konzentration wieder Prozess I im System vorherrscht.

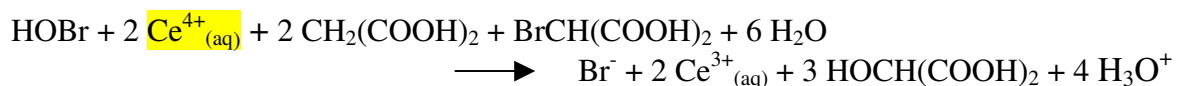
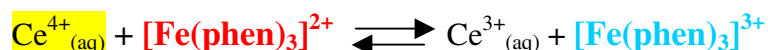

Katalysator Ferroin


Abbildung 39: Darstellung der zum Verständnis der zum Erklärungsmodell der Diskussion notwendigen Einzelreaktionen der BZR.

Der Doppelpeak im blauen Wellenlängenbereich deutet auf einen rückgekoppelten Zwischenschritt im Reaktionsablauf hin. Eventuell werden Teile des bereits reduzierten Ferroins wieder oxidiert, da die Lichtintensität im blauen Spektralbereich abnimmt bevor sie erneut ansteigt. Vorstellbar wäre eine Interaktion zwischen dem zu Beginn der Oszillation bei Reaktion II noch vorhandenen Ce^{3+} mit dem reduzierten Ferroin. Eine solche Möglichkeit ließe aber ungeklärt, warum das komplexe Verhalten nach einer gewissen Zeit verschwindet. Wenn aber die Ce^{3+} -Konzentration noch während des Ablaufens von Reaktionsschritt II durch einen quasi autokatalytischen Schritt hoch bleibt, verzögert sich das Einsetzen des nachfolgenden Reaktionsschritts III. Diese Erklärungsvariante passt mit dem Auftreten des „Buckels“ im Zeitgang der Reaktion zusammen (Abb. 21)

Es sind weitere theoretische und auch praktische Herangehensweisen notwendig, um das Phänomen der Doppelpeaks und der daraus resultierenden Effekte zu erklären. Vielleicht muss man sich dazu auch von den bisherigen Erklärungsmodellen lösen, was auch in der Literatur schon angedacht wurde (Wang et.al., 2005).

Obwohl in den Gelen ebenfalls Ferroin enthalten ist, konnten mit den verwendeten Messmethoden und –Geräten keine Doppelpeaks nachgewiesen werden. Gründe könnten die im Vergleich zur gerührten Reaktion verschiedenen Konzentrationen der chemischen Komponenten und das Hinzufügen des $Na_2S_2O_3$ im Falle der Gele sein. Zudem unterscheiden sich die Wellenform eines dreidimensionalen Systems, wie es die nicht-stationäre, gerührte BZR darstellt, deutlich von denen der zweidimensionalen Gele (Abb. 40).

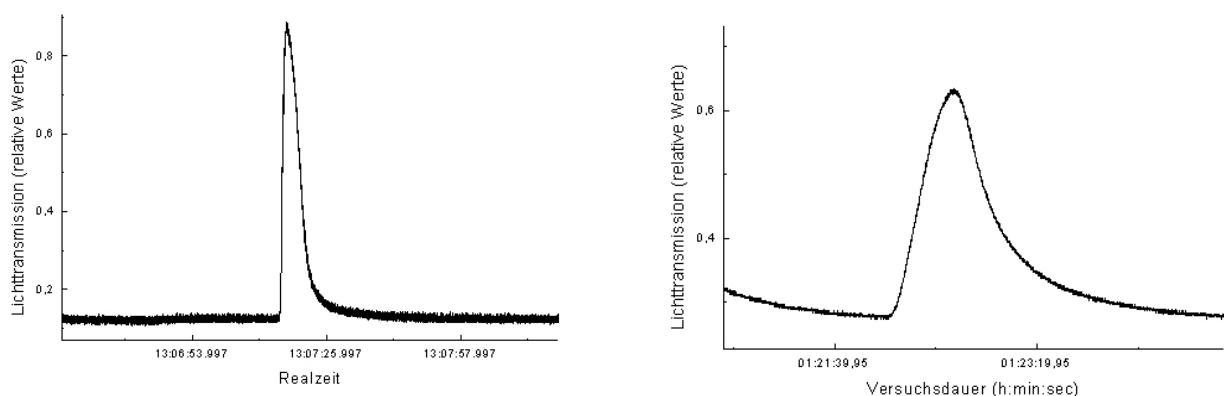


Abbildung 40: Die dreidimensionale Welle einer nicht-stationären, gerührten BZR (rechts) hat einen vollkommen anderen Verlauf als die zweidimensionale Welle eines Gels (links). Die Kurven sind Ausschnittvergrößerungen der 30. Welle der Abbildungen 19 und 32.

Die Kurve der IOS-Daten des Gels ist deutlich kleiner in der Gesamtamplitude, dauert dafür aber länger. Der Anstieg der Kurve ist weniger steil und der Abfall auf die Grundhelligkeit dauert länger. Die gerührte BZR dagegen senkt sich schnell nach der Oszillation auf eine „Basislinie“ ab und hat einen linearen Verlauf vor dem erneuten Anstieg zur nachfolgenden Oszillation. Auch der Zeitgang der beiden System ist unterschiedlich: Die Welle eines Gels dauert ungefähr dreimal so lang wie die einer gerührten BZR. Beim Übergang zwischen zwei- und dreidimensionalen Wellenanalysen treten immer Unterschiede in den Ergebnissen auf, die sich mit theoretischen Modellen mathematisch beschreiben lassen. Da es auch zwischen den beiden hier beschriebenen Systemen einen Unterschied in der Dimensionalität gibt, liegt die Vermutung nahe, dass die beiden Wellen nicht miteinander vergleichbar sind; es also beim Gel gar keinen Doppelpeak gibt.

6.2. Einfluss eines schwachen magnetischen Felds auf die Musterbildung

Erregbare Medien sind durch schwache extern Kräfte beeinflussbar, wie frühere Arbeiten zeigen (siehe dazu Kapitel 3.5. „Wirkung schwacher externer Kräfte auf die Musterbildung einzelner Systeme“). Zu diesen zählen auch schwache magnetische Felder im Bereich von einigen mT⁸.

Erzeugt werden diese Felder mittels stromdurchflossener Spulen in einer Helmholtz-Konfiguration. Werden diese von einem Gleichspannungs-Strom durchflossen, kommt es zur Bildung eines homogenen magnetischen Feldes mit gleichbleibender Polung im Volumenbereich zwischen den Spulen. Als Folge besitzt das magnetische Feld eine definierte Richtung. In einem Wechselfeld dagegen wechselt diese Richtung mit der Frequenz des Spannungswechsels, wodurch es zum Fließen kleiner elektrischer Ströme in leitenden Medien im Bereich des Feldes kommt.

6.2.1. Extern angeregte Ferrofluide

Die Beeinflussbarkeit der extern angeregten Ferrofluide durch ein schwaches MF ist in den Versuchen erkennbar. Um einen Phasenübergang im System herbeizuführen, musste im MF die Energiezuführung, d.h. die Amplitude der vertikalen Schwingung, leicht erhöht werden.

⁸ Zum Vergleich, das Erdmagnetfeld bewegt sich größenmäßig im μT -Bereich.

Dies entspricht den Erwartungen, da es sich bei Ferrofluiden um magnetische Flüssigkeiten handelt, die also per se auf magnetische Felder reagieren müssen. Die Spins der Nanopartikel richten sich in einem DC-Feld nach den Feldlinien des magnetischen Feldes aus. Dadurch kommt es zu Wechselwirkungen zwischen den Einzelpartikeln, sie bilden lange Ketten. Wie im Versuch mit dem „floating Penny“ (siehe „3.2. Ferrofluide (Physik)“) erhöht sich dadurch die Viskosität der Flüssigkeit. Dies wiederum hat zu Folge, dass eine höhere Energie notwendig ist, um das Muster zu bilden bzw. zu verändern (Abb. 38). Würde man die Feldstärke erhöhen, so nähme die Kettenbildung der Einzelartikel auch zu. Die Viskosität des Ferrofluids stiege und die für den Phasenübergang notwendige Energiezufuhr läge höher. Im Diagramm fällt zudem auf, dass mit zunehmender Frequenz auch eine vergleichsweise höhere Energie zugeführt werden muss, um den Phasenübergang zu bewirken. Der Grund hierfür liegt in der Trägheit des Systems.

6.2.2. Belousov-Zhabotinsky-Reaktion

a) zeitliche Oszillation

Die Versuche haben nur einen deutlichen Einfluss des magnetischen Feldes auf die Oszillation der gerührten nicht-stationären, Ferroin-katalysierten BZR gezeigt. Sowohl im DC-Feld als auch im AC-Feld konnten zusätzliche Oszillationen beobachtet werden. Damit ist gemeint, dass der Kurvenverlauf der IOS-Daten während einer Oszillation weitere periodische Schwankungen aufweist (Abb. 41).

Mit jeder weiteren externen Kraft, mit der man die nicht-stationäre, gerührte BZR von außen beeinflusst, geht die Musterbildung offensichtlich durch Bifurkation immer weiter in einen chaotischen Zustand über. Im ursprünglichen Zustand zeigt das IOS eine einfache Oszillation, einen periodischen Wechsel zwischen rot und blau. Mit der Erweiterung des Systems um den zusätzlichen Katalysator Ferroin kommt es zu einem temporären biphasischen Verhalten des IOS. Ein weiterer Schritt zum chaotischen Zustand wird durch die Beeinflussung des Systems durch ein externes magnetisches Feld erreicht. Jetzt wird die zuvor biphasische Kurve durch eine weitere Oszillation überlagert. Diese zusätzliche Oszillation wird noch ausgeprägter, wenn durch das AC-Feld zusätzlich kleine Ströme in das System induziert werden.

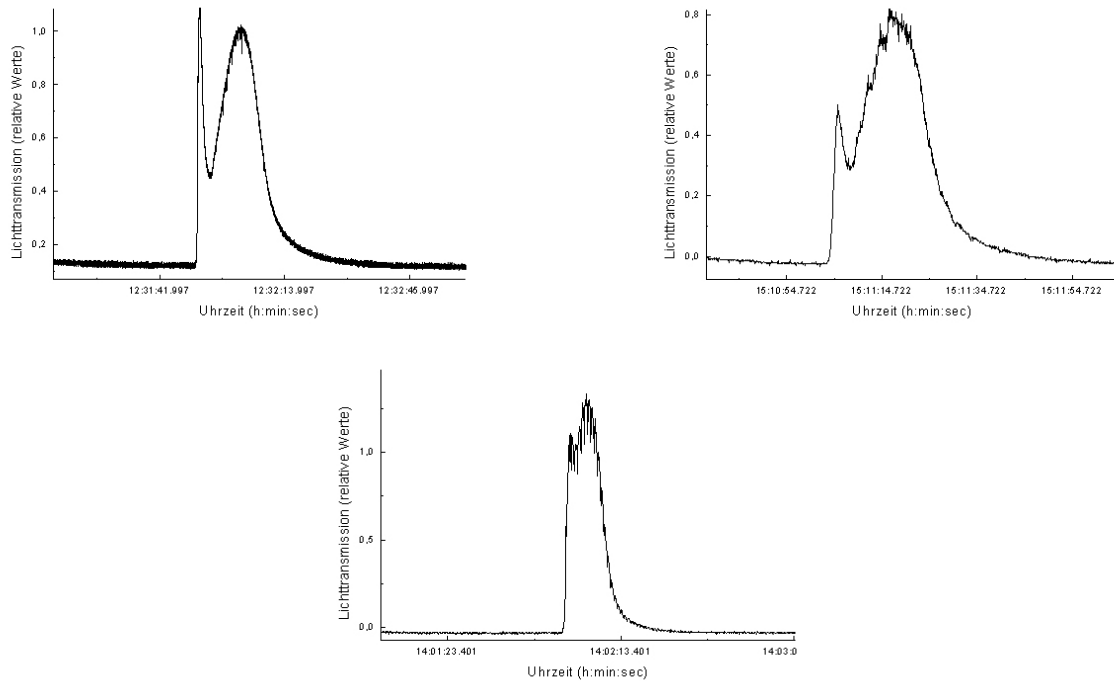


Abbildung 41: Vergleich der Vergrößerung des Doppelpeaks der 2. Oszillation nach Start der gerührten, nicht-stationären BZR mit 0,4 mM Ferroin als zusätzlichem Katalysator (Daten aus den Abbildungen 19, 26 und 29).

Links oben: ohne MF
 Rechts oben: DC-Feld (Feldstärke: 0,1 mT);
 Unten: AC-Feld (Feldstärke: 0,1 mT).

Im MF tritt noch eine zweite Veränderung auf. Sowohl im DC- als auch im AC-Feld ist über einige Oszillationen beim Auftreten eines Doppelpeaks der erste Peak einer Oszillation niedriger als der zweite. Ist das Auftreten des zweiten Peaks eine Folge des Ferroins, so ist anzunehmen, dass das MF die Höhe des ersten Peaks beeinflusst. Die Werte des zweiten Peaks mit MF gleichen im Verhalten dem ohne MF (Abb. 27). Über die Verschiebung auf der y-Achse kann man keine quantitative Aussage machen, weil es sich um zwei getrennt Systeme handelt. Zusätzlich zur Aufspaltung der Peaks unter den oben genannten Bedingungen geht im Feld auch die Amplitudenstabilität verloren. Die mittlere Amplitude der Peaks fangen an sehr stark zu schwanken (Abb. 29). All dies sind immer weitere Schritte hin zu einem chaotischen Verhalten. Es ist zu vermuten, dass mit dem Hinzufügen einer weiteren Komponente das System ganz ins Chaos übergeht. Der Übergang zum Chaos wurde bisher schon mittels starker externer Kräfte erzeugt (z.B. Epstein et.al., 1989).

Der Einfluss elektrischer Felder auf die Oszillation einer BZR wurde bereits früher publiziert, allerdings nur für Gele. Hier folgen die an der Reaktion beteiligten Ionen den elektrischen

Strömen. Da in allen bekannten Fällen allerdings mit in die Reaktionsmasse eingetauchten Elektroden gearbeitet wurde, erscheint es sinnvoller von einer Stromabhängigkeit und nicht von einer Feldabhängigkeit zu sprechen

In den hier beschriebenen Versuchen wurden magnetische Felder mittels Hemholtzspulen erzeugt. Zusätzlich gibt es in einer nicht-stationären, gerührten BZR dagegen keine Vorzugsrichtung, da es sich um eine homogene Lösung handelt. Nur im AC-Feld treten kleinste Ströme auf, da gemäß der 1. Maxwell'schen Gleichung in einem magnetischen Feld, in dem sich die Feldstärke zeitlich ändert, Energieströmungen stattfinden. Wie also beeinflusst ein zeitlich konstantes schwaches MF von 0,1 mT die Musterbildung einer BZR? In beiden Fällen – AC- und DC-Feld – ist ein Effekt messbar. Es muss also in beiden Fällen zu einer Interaktion der an der Reaktion beteiligten Ionen mit dem umgebenden MF kommen. Dies führt dann dazu, dass zu Beginn jeder Oszillation am Anfang der Reaktion weniger Ferroin in die blauen, reduzierten Form vorliegt. So kommt es erst zu einem geringeren Anstieg der Lichttransmission, der Wert des ersten Peaks des Doppelpeaks liegt unter dem zweiten.

Weitere Versuche mit unterschiedlich starken MF's könnten Aufschluss darüber geben, ob dadurch auch die Stärke des Effekts variiert. Um den Grund für das beobachtete Verhalten im Einzelnen aufzuklären, könnte man über ionenselektive Elektroden die Konzentrationen der beteiligten Ionen messen und so vielleicht Rückschlüsse auf die ionalen Prozesse ziehen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten diese Analysen nicht geleistet werden.

b) räumliche Oszillation

Bei den Gelen war zwar kein Doppelpeak erkennbar, ein Einfluss des MF's auf die Musterbildung konnte aber dennoch beobachtet werden. Eine qualitative Aussage über die Stärke des Effekts ist nicht möglich, da es sich bei jedem Gel um ein eigenständiges und voneinander unabhängiges System handelt. Im schwachen DC-Feld beschleunigten sich die Wellen (Abb. 36). Um die Wandergeschwindigkeit der Wellen zu verändern, muss die refraktäre Phase verkürzt worden sein. Dies geschieht beispielsweise dadurch, dass sich die Regeneration der Bromid-Ionen in Reaktion III beschleunigt.

Eine andere Erklärungsmöglichkeit könnte in der Position der Spulen und damit in der Orientierung der Feldlinien liegen. Gele besitzen eine räumliche Orientierung, da es sich um dünne Schichten von Reagenzien handelt. Das MF war in den Versuchen parallel zu Oberfläche der Gele orientiert. An der Oberfläche gibt es eine Grenzfläche zwischen dem Gel,

das Ferroin und H_2SO_4 , den Protonendonator, enthält, und der Starterflüssigkeit, in der die restlichen Komponenten sind. Die helle Bande im Gel entspricht der blauen Phase in der gerührten BZR. Eventuell kommt es an der Wellenfront aufgrund der Feldes hier zu einer Interaktion der Bromid-Ionen, dem EM-Feld und den Bestandteilen des Silica-Gels, das die gemessene Beschleunigung bewirkt. Um genaue Aussagen zu den Zusammenhängen machen zu können, muss Verhalten jeder an der Reaktion beteiligten Ionen über die Zeit aufgezeichnet und analysiert werden.

6.3. Vergleichbarkeit mit neuronalen Systemen

Ähnlichkeiten zwischen der Musterbildung in chemischen und biologischen Systemen wurden schon in unterschiedlichen Arbeiten aufgezeigt (Maini et.al., 1997; Toth et.al., 1994). Der für einige Zeit vorhandene Doppelpeak im IOS einer gerührten, nicht-stationären BZR erinnert von seinem Verlauf an Signale, wie man sie von biologischen Systemen kennt. Zwei erregbare biologische Systeme, die retinale Spreading Depression und die Ströme bei Aktionspotentiale von Neuronen, zeigen ein ähnliches Verhalten, auch wenn in beiden Fällen die Zeitdimensionen andere sind (Abb. 42). Die Natriumströme über die Membran von Neuronen während eines AP's weisen ebenfalls einen Doppelpeak auf (Ruoff, 1983).

Sowohl das Aktionspotential (Hodgkin & Huxley, 1952 a-e; Weiss, 1997) als auch die retinale spreading depression (Hodgkin, 1959) können theoretisch mit den Hodgkin-Huxley-Gleichungen beschrieben werden. Es liegt nun nahe, dass diese Gleichungen auch geeignet ist, um das nicht-lineare Verhalten einzelner Komponenten einer gerührten BZR zu beschreiben.

Schon früher wurde die BZR als Modell-System zu Erklärung neuronaler Prozesse herangezogen (u.a. Fernandes de Lima, 1999). Die nun gezeigten Parallelen im Kurvenverlauf untermauern dies nun weiter und verdeutlicht zugleich, dass es sich bei neuronalem Gewebe ebenfalls um erregbare Medien handelt.

In wie weit man von den Auswirkungen des schwachen MF auf die Musterbildung in der nicht-stationären gerührten BZR auf die Bedeutung für neuronale Prozesse zurückschließen kann, muss aber in weiteren Untersuchungen noch geklärt werden. Im Falle einer oszillierenden Enzymreaktion wird von einer Beeinflussung durch ein magnetisches Feld von 3000G (entspricht 0,3 T)⁹ berichtet (Møller & Olsen, 1999). Hierbei handelt es sich aber zum

⁹ 1 Tesla = 10 000 Gauss

einen um ein relativ hohes Magnetfeld, zum anderen um einen durch Enzyme katalysierten Stoffwechselfvorgang.

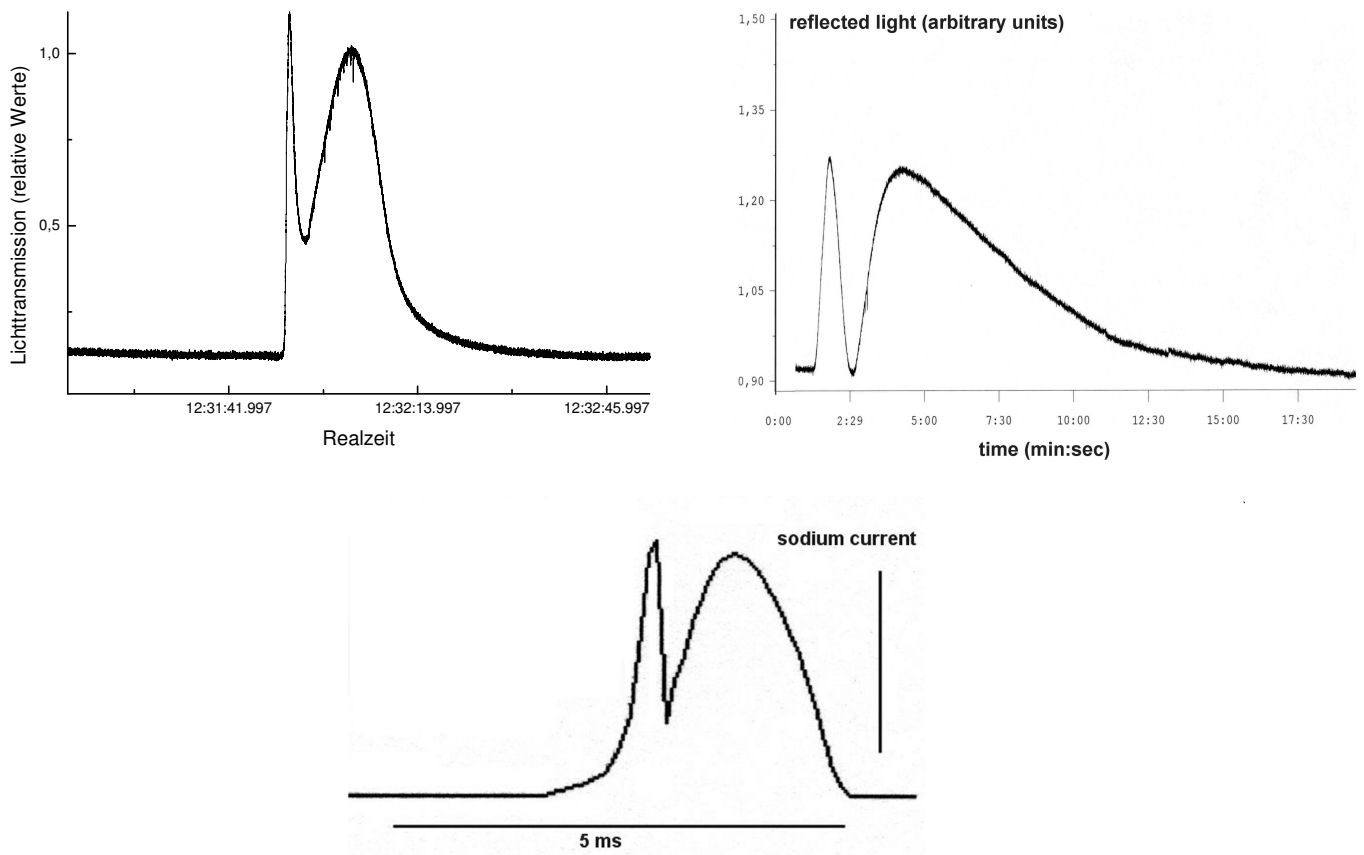


Abbildung 42: Vergleich des IOS einer gerührten nicht-stationären BZR (oben) mit dem einer spreading depression (Mitte) und der mittels dem HH-model¹⁰ (NeurosimTM) simulierten Natriumströmung über die Membran während eines Aktionspotentials (unten) (nach: Dolzmann et.al., inpress 2006).

Aufgrund der augenscheinlichen Parallelen zwischen BZR und dem biologischen System darf man annehmen, dass schwache magnetische Felder – wie sie z.B. auch in der direkten Nähe elektrischer Geräte entstehen – einen Einfluss auf neuronale Gewebe haben. Wie in der Einleitung schon beschrieben, können andere schwache externe Kräfte, Gravitation, Medikamente oder elektrische Felder erregbare Medien beeinflussen. Nur ob dieser Einfluss im Falle des magnetischen Felds im messbaren Bereich liegt, ist fraglich. Auch kann keine Vorhersage darüber getroffen werden, welcher Art dieser Einfluss ist. Er könnte negativ, aber auch positiv sein.

¹⁰ Werte für die Simulation:

$K^+_{out} = 10 \text{ mM}$; $Na^+_{out} = 418 \text{ mM}$; $K^+_{in} = 300 \text{ mM}$; $Na^+_{in} = 64 \text{ mM}$; $T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$
 membrane cap. = $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$; leak cond. = $0.3 \text{ mS}/\text{cm}^2$;
 max Na^+ cond. = $120 \text{ mS}/\text{cm}^2$; max K^+ = $36 \text{ mS}/\text{cm}^2$

7. Zusammenfassung

7.1. Zusammenfassung (deutsch)

In der Arbeit wurde der Einfluss eines schwachen magnetischen Feldes (MF) auf die Musterbildung erregbarer Medien untersucht (Gleichspannungs- (DC) und Wechselfeldspannungsfelder (AC)). Als Beispielmuster dienten die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (BZR) und Ferrofluide.

Die durch vertikale Vibration angeregten Ferrofluide zeigen bei Erhöhung der zugefügten Energie (Vergrößerung der Amplitude) Phasenübergänge in ihrer Musterbildung. Im DC-Feld erhöhte sich die Viskosität der magnetischen Flüssigkeit, wodurch die Phasenübergänge verschoben werden.

Eine nicht-stationäre, gerührte BZR zeigt einen periodischen Farbwechsel zwischen gelb und farblos – oder rot und blau, wenn man sie um den Katalysator Ferroin ergänzt. Diese Oszillation wird in der Literatur als einfache Kurve dargestellt. Im Versuch konnte aber ein weitaus komplexerer Kurvenverlauf aufgezeichnet werden. Die intrinsischen optischen Signale (IOS) einer Ferroin-katalysierten, gerührten BZR wiesen zu Beginn der Reaktion Doppelpeaks auf, die nach einigen Oszillationen wieder verschwanden. Dieses Verhalten ist in seinem Auftreten abhängig von der Ferroin-Konzentration und gleicht den elektrischen und optischen Signalen neuronaler Gewebe (z.B. retinale spreading depression). Diese Ähnlichkeit untermauert die bisherige Verwendung der BZR als Modellsystem für die Erforschung neuronaler Vorgänge, auch wenn die dahinter liegenden Mechanismen vollkommen unterschiedlich sind. Setzt man dieses System dem Einfluss eines schwachen magnetischen DC-Feldes aus, kommt zum Doppelpeak eine weitere interne Oszillation der IOS-Kurve hinzu. Auch verhält sich der Doppelpeak selbst anders als ohne externes Feld. Bei weiterer Erweiterung, z.B. durch die Erzeugung kleiner Ströme in einem elektromagnetischen AC-Feld, geht das System dann langsam in ein chaotisches Verhalten über. Jedes Hinzufügen einer zusätzlichen Komponente hat eine erneute Bifurkation des Systems zur Folge und führt letztendlich – so vermuten wir – zum Übergang des Musters ins Chaos.

BZR-Gele zeigen helle propagierende konzentrische Ringe oder Spiralen als Muster. Mit den verwendeten Messmethoden und –Geräten konnte keine Veränderungen im Muster beobachtet werden, wenn das System um Komponenten erweitert wurde. Man kann aber vermuten, dass sich im DC-Feld das zeitliche Verhalten der Gele verändert: Es scheint insgesamt schneller zu werden.

7.1. Summary (english)

In this work we did some research on the influence of a weak external magnetic field (MF) on the creation of patterns in excitable media (duration field (DC) and alternating field (AC)). As examples we chose the well known Belousov-Zhabotinsky reaction (BZR) and ferrofluids.

If ferrofluids are stimulated mechanically by vertical vibration they show changes of phases in the building of patterns while raising the induced energy (here by different heights of amplitudes). The viscosity of the magnetic fluid is increasing in a DC-field. Because of this the changing of the phase is different from the ones without an external force.

A non-stationary stirred BZR shows a periodic change of colour between yellow and colourless – or red and blue, if ferroin is added as a catalyst. This oscillation is described as a simple curve in literature. We, however, found a much more complex behaviour in the experiment. The intrinsic optical signals (IOS) of a ferroin-catalysed, stirred BZR show a double-peak at the beginning of the reaction, which is fading after a few further oscillations. This behaviour depends on the concentration of ferroin and resembles very much electrical and optical signals known from neuronal processes (e.g. retinal spreading depression). This basic similarity makes the BZR an ideal model for a variety of neurophysiological signals, even if the underlying mechanisms are completely different.

If this system is put to the influence of a weak external magnetic DC-field a further inner oscillation is added to the double-peak behaviour of the IOS. Also the double-peak itself looks different from the one without external field. If further components are added to the system it gradually changes to chaotic behaviour. This could be the induced little currents in an AC-field. Each expansion of the system is followed by further bifurcation culminating in a transition from pattern to chaos.

BRZ gels show bright propagating concentric rings or spirals as a pattern. With the used materials and methods of measurement we were not able to record changes in the formation of patterns if the system was expanded. But one can assume that the behaviour of the gel is changing in the DC-field: all in all it seems to get faster.

8. Literatur

- Almirants, Y. & Kaufman, M. (1995):** Chiral selecting of rotating waves in a reaction-diffusion system: The effect of circularly polarized electromagnetic field. in: *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 5, No. 2: 507 – 518.
- Belousov, B.P. (1959):** Eine periodische Reaktion und ihr Mechanismus (translated Russian to German). in: *Sbornik referatov po radiacionnoj medicine za 1958 g Moskau*, 147: 145.
- Belousov, B.P. (1981):** Eine periodische Reaktion und ihr Mechanismus. in: Kuhnert et.al. (Eds.): *Selbstorganisation chemischer Strukturen*. Frankfurt Main: Verlag Harri Klein: 73- 83.
- Blank, M. & Soo, L. (2003):** Elektromagnetic acceleration of the Belousov-Zhabotinsky reaction. in: *Bioelectrochemistry*, 61: 93 – 97.
- Bureš, J., Buresova, O. & Krivanek, J. (1974):** The mechanism and applications of Leao's spreading depression of electroencephalographic activity. New York: Academic Press.
- Bureš, J. (1993):** History of experimental spreading depression. in: Lehmkuhler, A., Grote-meyer, K.-H. & Tegtmeier, F. (Eds.): *Migraine – basic mechanisms and treatment*. München/ Wien/ Baltimore: Urban & Schwarzenberg: 279 – 291.
- Dolzmann, K. & Hanke, W. (2005):** Selbstorganisation in neuronalem Gewebe: Muss das Gehirn den Gesetzen der Thermodynamik gehorchen?. in: *Biologie in unserer Zeit*, Heft 4: .
- Dolzmann, K., et.al. (2006):** Biphasic optical signal of an oscillating non-stationary Belousov-Zhabotinsky bulk reaction and its similarity to some neurophysiological events. in: *Bifurcation and Chaos*, inpress.
- Dutt, A.K. (2002):** Complex dynamical behavior from coupling between a catalyzed Belousov-Zhabotinskii-like reaction and its uncatalyzed oscillatory component in a flow reactor. in: *Journal of Physical Chemistry*, B 106: 11069 – 11072.
- Epstein, I.R., Kustin, K., DeKepper, P. & Orbán, M. (1989):** Oszillierende chemische Reaktionen. in: *Spektrum der Wissenschaften – Chaos und Fraktale*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft: 72 – 81.
- Fernandes de Lima, V.M., Goldermann, M. & Hanke, W. (1999):** The retinal spreading depression. Aachen: Shaker Verlag.

- Fernandes de Lima V.M., Piquera, J.R.C. & Hanke, W. (2002):** Development of one experimental module to study the modulation of the propagation velocity of chemical excitation waves in gel by weak external force (gravity). in: Proceedings of Life in Space to Life on Earth. 8th European Symposium of Life Sciences Research in Space. 23rd Annual international Gravitational Physiology Meeting. Stockholm: 243 – 244.
- Field, R.J., Körös, E. & Noyes, R.M. (1972):** Oscillations in chemical systems. A thorough analysis of temporal oscillations in the bromate-cerium-malonic acid system. in: Journal of American Chemical Society, 94: 8649 - 8664.
- Foerster, P., Müller, S.C. & Hess, B. (1990):** Temperature dependence of curvature-velocity relationship in an excitable Belousov-Zhabotinskii reaction. in: Journal of Physical Chemistry, Vol. 94, No. 26: 8859 – 8861.
- Fujieda, S. et.al. (1999):** Nonequilibrium/ nonlinear chemical oscillation in the virtual absence of gravity. in: Advances of Space Research, 23: 2057 – 2063.
- Gáspár, V., Bazsa, G. & Beck, M.T. (1985):** Bistability and bromide-controlled oscillation during bromate oxidation of ferroin in a continuous flow stirred tank reactor. in: Journal of Physical Chemistry, 89: 5495 – 5499.
- Gerhardt, M. & Schuster, H. (1995):** Das digitale Universum – zelluläre Automaten als Modelle der Natur. Braunschweig, 1995.
- Giles, C.C.D. et.al. (1992):** Uncatalysed Belousov-Zhabotinskii reaction with pyrogallol: Experimental behaviour in a flow reactor and the influence of ferroin as catalyst. in: Chemical Society of Faraday Transaction, 88: 917 – 924.
- Ginn, B.T. et.al. (2004):** Microfluidic system for the Belousov-Zhabotinsky Reaction. in: Journal of Physical Chemistry, 108: 1325-1332.
- Györgyi, L. et.al. (1992):** Confirmation of high flow rate chaos in the Belousov-Zhabotinsky reaction. in: Journal of Physical Chemistry, 96: 1228 – 1233.
- Hanke, W., Wiedemann, M. & Fernandes de Lima, V.M. (2001):** Control of the excitability of neuronal tissues by weak external forces. in: Faraday Discussion 120: 237 – 248.
- Hodgkin, A.L. (1959):** Spreading depression: Gravenstein's hypothesis. Unpublished manuscript, Cambridge (UK).
- Hodgkin, A.L. & Huxley A.F. (1952 a):** The components of membrane conductance in the giant axon of *Loligo*. Journal of Physiology, 116: 473 – 496.

- Hodgkin, A.L. & Huxley A.F. (1952 b):** Currents carried by sodium and potassium ions through the membrane of giant axon of *Loligo*. *Journal of Physiology*, 116: 449 – 472.
- Hodgkin, A.L. & Huxley A.F. (1952 c):** The dual effect of membrane potential on sodium conductance in the giant axon of *Loligo*. *Journal of Physiology*, 116: 497 – 506.
- Hodgkin, A.L. & Huxley A.F. (1952 d):** Movement of sodium and potassium ions during nervous activity. in: *Cold Spring Harbor Symposia on Quantative Biology*, Vol. 17. Long Island Biological Society, Cold Spring Harbor, New York: 43 – 52.
- Hodgkin, A.L. & Huxley A.F. (1952 e):** A quantitative description of membrane currents and its application to conduction and excitation in nerve. *Journal of Physiology*, 117: 500 – 544.
- Jayalakshmi, V. & Balasubramanian, N. (1997):** Study of self oscillatory Belousov-Zhabotinsky systems under the perturbation of external EMF. in: *Collection of the Czechian Chemical Community*, Vol. 62: 1863 – 1870.
- Krieger, J. (2001):** Oszillierende chemische Reaktionen am Beispiel der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion. nach: www.jkrieger.de/bzr/jufo.pdf (entnommen 2006).
- Lashley, K.S. (1941):** Patterns of cerebral integration indicated by the scotomas of migraine. in: *Archives of neurological Psychiatrie*. 45: 331-339.
- Lücke, M.:** Grenzflächenbestimmte Materialien - Teilprojekt B13: Transport-, Response- und Instabilitätsverhalten von Ferrofluiden. nach: <http://www.uni-saarland.de/fak7/luecke/SFB/index.html> (entnommen 2006).
- Maini, P.K., Painter, K.J. & Phong Chau, H.N. (1997):** Spatial pattern formation in chemical and biological systems. *Chemical Society of Faraday Transaction*, Vol. 93: 3602-3610.
- Manz, N. (2002):** Untersuchung chemischer Wellen in der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion – räumlich modulierte Systeme und anormale Dispersion. Dissertation.
- Meissner, K. & Hanke, W. (2005):** Action potential properties are gravity dependent. in: *Microgravity Science & Technology*, XVII-2: 38 – 43.
- Miyakawa, K. & Mizoguchi, M. (1998):** Response of an immobilized-catalyst Belousov-Zhabotinsky reaction system to electric fields. in: *Journal of Chemical Physics*, Vol. 109, No. 17: 7462 – 7467.
- Møller, A.C. & Olsen, L.F. (1999):** The effect of magnetic field of an oscillating enzyme reaction. in: *Journal American Chemical Society*, 121: 6351 – 6354.

- Müller, H.W. (a):** Faraday waves – waves in Newtonian and viscoelastic fluids. nach: <http://www.mpip-mainz.mpg.de/~pleiner/hwmfaraday.html> (entnommen 2006).
- Müller, H.W. (b):** Flow behavior of ferrofluids. nach: <http://www.mpip-mainz.mpg.de/~pleiner/hwmferro.html> (entnommen 2006).
- Pojman, J., Khan, A.M. & Mathias, L.J. (1997):** Frontal polymerization in microgravity: Results from the *Conquest I* sounding rocket flight. in: *Microgravity in Science Technology*, X: 36 – 40)
- Prigonine, I. & Lefever, R. (1968):** Symmetry breaking instabilities in dissipative systems. in: *Journal Physical Chemistry*, 48: 1665 – 1700.
- Pornprompanya, M. (2004/05):** Instability of excitation waves induced by electrical fields. Dissertation.
- Rinaldi Ramos, C.M.:** Synthesis and characterization of ‘smart’ complex fluids. nach: http://www.atomo.uprm.edu/faculty/rinaldi/complex_fluids.htm(entnommen 2004)
- Ross, J., Müller, S.C. & Vidal, C. (1988):** Chemical waves, in: *Spektrum*, Vol. 240: 460 – 465.
- Ruoff, P. (1983):** Action potential propagation and facilitation-like phenomena in the closed stirred excitable Belousov-Zhabotinsky reaction. in: *Naturwissenschaften*, Vol. 70, No. 6: 306-307.
- Sagués, F. & Epstein, I.R. (2003):** Nonlinear chemical dynamics. *Dalton Transactions* : 1201 – 1217.
- Schmidt, B. & Müller, S.C. (1997):** Forced parallel drift of spiral waves in the Belousov-Zhabotinsky reaction. in: *Physical Review*, Vol. 55, No. 4: 4390 – 4393.
- Scott, S.K. (1992):** Chemical reactions as nonlinear systems. in: *Nonlinear Science Today*. Vol. 2, No. 3: 2-13.
- Ševčíková, H., Kosek, J. & Marek, M. (1996):** Splitting of 2D waves of excitation in a direct current electric field. in: *Journal of Physical Chemistry*, 100: 1666 – 1675.
- Ševčíková, H., Schreiber, I. & Marek, M. (1996):** Dynamics of oxidation Belousov-Zhabotinsky waves in an electric field. in: *Journal of Physical Chemistry*, 100: 19153 – 19164.
- Sherdown, M.J. (1993):** The pharmacology of the triggering of spreading depression. in: *Lehmkuhler, A., Grottemeyer, K.-H. & Tegtmeier, F. (Eds.): Migraine – Basic mechanisms and treatment*. München/ Wien/ Baltimore: Urban & Schwarzberg: 419 – 429.

- Sinz, R. (1980):** Chronopsychophysiologie – Chronobiologie und Chronomedizin. Berlin: Akademie-Verlag.
- Steinbock, O., Schütz, J. & Müller, C.S. (1992):** Electric-field-induced drift and deformation of spiral waves in an excitable medium. in: Physical Review Letters, Vol. 68, No. 2: 248 – 251.
- Tyson, J.J. (1973):** Some further studies on nonlinear oscillations in chemical systems. in: Journal of Physical Chemistry, 58: 3919 – 3930.
- Toth, A., Gaspar, V. & Showalter, K. (1994):** Signal transmission in chemical systems: Propagation of chemical waves through capillary tubes. in: Journal of Physical Chemistry, 98: 522 – 531.
- Venkatanarayanan, J., Balasubramanian, N. & Ramaswamy, R. (1997):** Study of self oscillatory Belousov-Zhabotinsky systems under the perturbation of external EMF. in Collection oft the Czech Chemistry Community, Vol. 62:1863 – 1870.
- Wang, J. et.al. (2005):** Coexistence of two bifurcation regimes in a closed ferroin-catalyzed Belousov-Zhabotinsky reaction. in: Journal of Physical Chemistry, 109: 1374 – 1381.
- Weiss, T.F. (1997):** Cellular Biophysics – Vol.2: Electrical Properties. 2nd printing. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Wiedemann, M. & Hanke, W. (2002):** Gravity sensing in the central nerveous system. in: Proceedings of Life in Space to Life on Earth. 8th European Symposium of Life Sciences Research in Space. 23rd Annual international Gravitational Physiology Meeting. Stockholm: 261.
- Wiedemann, M., Fernandes de Lima V.M. & Hanke, W. (2002):** Gravity dependance of waves in the retinal spreading depression and in gel type Belousov-Zhabotinsky system. in: Physical Chemistry Chemical Physics, 4: 1370 – 1373.
- Weimer, M. (2003):** Untersuchungen zur Auslösbarkeit und Ausbreitung der retinalen Spreading Depression unter besonderer Berücksichtigung der Refraktärzeit und des Temperatureinflusses. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften. Stuttgart.
- Weimer, M. & Hanke, W. (2005 a):** Propagation velocity and triggering threthold of retinal spreading depression are not correlated. in: Experimental Brain Research, 161 (2): 185 – 193.

- Weimer, M. & Hanke, W. (2005 b):** Correlation between duration of refractory period and intrinsic optical signal of retinal spreading depression during temperature variations. in: *Experimental Brain Research*, 161 (2): 201 – 208.
- Wolfram, S. (2002):** A new kind of science. Wolfram Media Inc.
- Yamaguchi, T. et.al. (1991):** Gel systems for the Belousov-Zhabotinskii reaction. in: *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 95: 5831 – 5837.
- Zaitkin A.N. & Zhabotinsky, A.M. (1970):** Concentration wave propagation in two-dimensional liquid-phase self-oscillating system. in *Nature*, 225: 535-537.

9. Anhang

9.1. Erregbare Medien und Musterbildung in der Schule

Mit der Einführung des 8-jährigen Gymnasium wurde in Baden-Württemberg ein neues Fach in der Stundentafel etabliert. Naturwissenschaft und Technik (NWT) wird in den Klassen 8 bis 10 des naturwissenschaftlichen Zugs mit dem Stellenwert eines Hauptfachs unterrichtet. Das neue Fach steht unter dem Leitgedanken, den Schülern eine Orientierungshilfe in unserer durch Naturwissenschaft und Technik geprägten Welt zu geben, um sie so zur Übernahme eine „verantwortungsvollen Rolle“ zu erziehen. Dabei kommt der Fähigkeit Fragestellungen interdisziplinär zu bearbeiten ein großer Stellenwert zu. Fachkenntnisse aus verschiedenen Wissenschaften sollen unter ganzheitlicher Sicht zusammengeführt und angewendet werden¹¹. „Die Fähigkeit Fragestellungen interdisziplinär zu bearbeiten gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die in den Fachdisziplinen erworbenen Kenntnisse und Fertigkeiten müssen zu einer ganzheitlichen Sicht zusammengeführt werden.“

Zu den Grundlagen, die den Schülern im Fach NWT vermittelt werden sollen, gehört auch das Prinzip von Systemen. In dieser Lehrplaneinheit des Bildungsplans geht um das Kennenlernen des Systemgedanken im Allgemeinen und die Auseinandersetzung mit offenen und geschlossenen Systemen im Speziellen, wobei Modellbildung und Simulation berücksichtigt werden sollen.

Die beiden in der Arbeit untersuchten Systeme – BZR und Ferrofluide – kommen aus zwei verschiedenen Bereichen der Naturwissenschaften. Mit der Übertragung der Ergebnisse z.B. auf die Neurophysiologie, kann den Schüler Interdisziplinarität vermittelt werden: Wie helfen Erkenntnisse aus der Chemie biologische Vorgänge zu erklären. Dabei sind die fachlichen Hintergründe der Versuche nicht zu komplex, als dass sie von Schülern der Mittel- und insbesondere der Oberstufe nicht erarbeitet und verstanden werden könnten. Auch gehören die Versuche dem „low-Tech field“ (Sagués & Epstein, 2003) und können mit relativ günstigem Material- und Geräteaufwand durchgeführt werden – optimal bei der momentanen Finanzlage der meisten Schulen.

¹¹ Bildungsplan für das Gymnasium in Baden-Württemberg S. 398.

9.2. Liste der Abkürzungen

A	Ampère
Abs.	Absatz
AC	Wechselspannung
AP	Aktionspotential
BZR	Belousov-Zhabotinsky-Reaktion
ca.	circa
d.h.	das heißt
DC	Gleichspannung
EEG	Elektroencephalogramm
g	Gramm
h	Stunden
Hz	Hertz
IOS	intrinsisches optisches Signal
kHz	Kilohertz
M	Mol
MF	Magnetfeld
mg	Milligramm
min.	Minuten
ml	Milliliter
mM	Millimol
mT	Millitesla
NWT	Naturwissenschaft und Technik
s.	siehe
S.	Seite
SD	spreading depression
sec.	Sekunden
u.a.	unter anderem
V	Volt
vergl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Danksagung

Mein Dank gilt

- ... Herrn Prof. Dr. Hanke für die Betreuung der Arbeit, die durch meine „Zweigleisigkeit“ nicht immer ganz einfach war.
- ... Herrn J. Schwertner, ohne den diese Arbeit nie entstanden wäre.
- ... Frau E. Gebershagen für ihre Einführung in die Feinheiten der Laborarbeit.
- ... den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Membranphysiologie, die mich bei meinen „Besuchen“ immer herzlich aufgenommen und unterstützt haben.
- ... Stefan, der hervorragende Arbeit geleistet hat.
- ... Herrn Amann und den Kollegen des Maria-von-Linden-Gymnasiums für das Ermöglichen eines zweiten Arbeitsbereichs.
- ... der Robert-Bosch-Stiftung, die Teile der Arbeit über das Nat-Working-Programm finanziell unterstützt hat.
- ... meiner Familie, die mich immer unterstützt hat, egal wie gestresst ich auch war.