

## Die Wellen verstehen

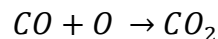
Peter Möller und Harry Drewes

7.6.21

Je mehr man sich mit „Wellen“ beschäftigt, desto besser versteht man sie. Es gibt Wellen auf ganz unterschiedlichen Gebieten, auch auf solchen, in denen man sie gar nicht erwarten würde. Zum Beispiel ist unser Herzschlag auf eine Wellenausbreitung zurückzuführen. Auch die Weiterleitung von Nervenimpulsen hat damit zu tun und Laserlicht ist nichts anderes als eine Welle bestehend aus Photonen. Selbst chemische Reaktionen können Wellen erzeugen.

### Chemische Wellen

Die bekannteste Reaktion, die chemische Wellen erzeugt, ist die sogenannte Belousov-Zhabotinsky-Reaktion. Diese Reaktion ist allerdings sehr komplex. Die einfachste Reaktion, die eine chemische Welle erzeugt, ist die Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid auf einem Platinkatalysator [1].



Es ist kaum zu glauben, dass in einem so einfachen System eine Wellenausbreitung überhaupt möglich ist. Eine chemische Welle kann sich nur ausbreiten, weil die Katalysatoroberfläche in zwei verschiedenen Zuständen existieren kann. In dem einen Zustand kann die Oberfläche die Welle weiterleiten und in dem anderen nicht. Analog hierzu kann ein Gebiet mit einem R-Wert größer als eins eine Corona-Welle weiterleiten, ein Gebiet mit R kleiner eins aber nicht.

Ähnliches gilt auch für die Nervenreizleitung und das „Aktionspotential“ am Herzen [2]. Die Gesetzmäßigkeiten der Selbstorganisation in komplexen dynamischen Systemen sind universell. In allen Fällen handelt es sich um erregbare Systeme, in denen sich die Wellen ausbreiten können.

## **Chemische Uhr, Herzschlag und Corona-Wellen**

Die Ausbreitung einer chemischen Welle ist verbunden mit oszillatorischen Verhalten (chemische Uhr) [1]. Dieses Phänomen kann man auch beim Herzschlag [2] und bei der Ausbreitung von Corona-Wellen beobachten. Wenn die Gegenmaßnahmen zu stark gelockert und die Menschen unvorsichtiger werden, steigt der R-Wert über eins an. Falls man dann nicht in der Lage ist, durch geeignete Maßnahmen den R-Wert wieder unter eins zu drücken, wird sich erneut eine Welle ausbreiten.

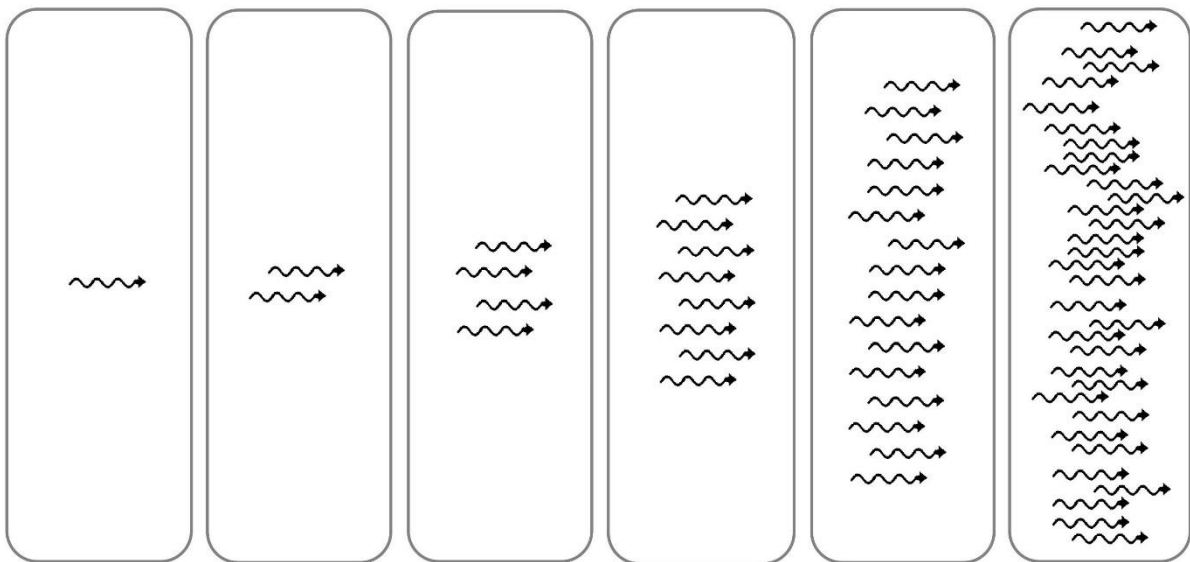
In einem erregbaren Medium (R-Wert über eins) breitet sich eine Welle aus. Das System geht in einen nichterregbaren Zustand über, weil durch Gegenmaßnahmen der R-Wert wieder unter eins fällt. Wenn die Maßnahmen dann zu weit gelockert werden (R-Wert über eins) beginnt das Spiel von neuem.

## **Synergetik**

Die Gesetzmäßigkeiten der Selbstorganisation in komplexen dynamischen Systemen gelten sowohl in der belebten als auch in der unbelebten Natur. Hat man ein System besonders gut verstanden, dann kann man diese Erkenntnisse auch auf andere Systeme übertragen. Die Wissenschaft, die sich mit dieser Aufgabenstellung beschäftigt heißt Synergetik, die Lehre vom Zusammenwirken. Sie wurde in den 1970er Jahren vom deutschen Physiker Hermann Haken gegründet [3]. Ein Versuch, diese Erkenntnisse auf das menschliche Denken zu übertragen, ist in [4] beschrieben.

## Laserlicht

Hermann Haken hat sich auch sehr intensiv mit dem Laser beschäftigt [3], einem Musterbeispiel in der Synergetik. Auch ein Laser erzeugt eine Welle, nämlich eine Welle aus Photonen (Lichtteilchen). Voraussetzung ist auch hier ein erregbares Medium (angeregte Atome). Wenn ein angeregtes Atom in den Grundzustand übergeht (siehe Abbildung 1), wird ein Photon erzeugt (spontane Emission). Trifft dieses Photon auf ein weiteres angeregtes Atom, sendet dieses Atom auch ein Photon aus (stimulierte Emission). Jetzt sind es schon zwei Photonen. Treffen die beiden Photonen auf weitere angeregte Atome, entstehen 4 Photonen, dann 8, 16, 32, usw.



*Abbildung 1. Entstehung von Laserlicht*

Sind alle Atome im Grundzustand angekommen, dann werden durch äußere Energiezufuhr die Atome wieder angeregt und das Spiel beginnt von neuem. Sind die Methoden der Synergetik auch auf Corona-Wellen anwendbar?

## Corona-Wellen aus der Sicht der Synergetik

Betrachten wir zunächst ein Beispiel, das wir alle kennen. Das Herz schlägt beispielsweise 60-mal in der Minute. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Herzschlägen ist dann genau eine Sekunde. In jeder Sekunde breitet sich eine Welle (Aktionspotential) aus, die den Herzmuskel aktiviert. Bei einem epileptischen Anfall, bei der chemischen Welle und im Laser ist es ähnlich. Hinter all diesen Beispielen steckt der gleiche Rückkopplungsmechanismus, der die Welle und die „Oszillation“ erst ermöglicht.

Der Rückkopplungsmechanismus lässt sich am einfachsten am Räuber-Beute-Modell [6] erklären (siehe Abbildung 2). Die Beute- und die Räuber-Population oszillieren um einen Mittelwert herum. Gibt es sehr viele Beutetiere (Pfeil 1), dann können sich die Räuber gut vermehren und dezimieren deswegen die Beutepopulation (Pfeil 2). Jetzt finden die Räuber nicht mehr genügend Beute und vermehren sich deswegen weniger (Pfeil 3). Da es nun weniger Räuber gibt, können sich die Beutetiere wieder vermehren (Pfeil 4) und das Spiel beginnt von neuem (Pfeil 5). Das System oszilliert. Dieses Verhalten tritt tatsächlich in der Natur auf, beispielsweise beim Luchs (Räuber) und dem Schneeschuhhasen (Beutetier).

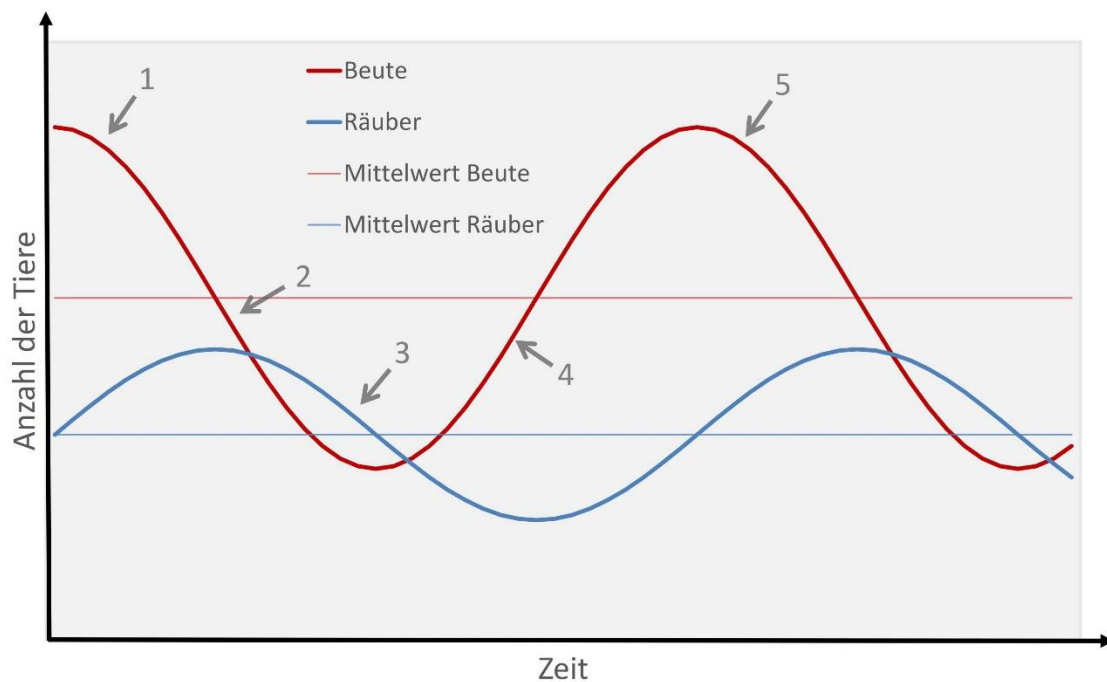


Abbildung 2. Räuber-Beute-Modell

Falls unsere Überlegungen richtig sind, ist das Auftreten von weiteren Wellen ein „natürlicher Prozess“, der auf den oben angesprochenen Rückkopplungsprozess zurückzuführen ist. Dieser Rückkopplungsprozess wurde in [2] und [6] ausführlich untersucht und lässt sich mathematisch durch zwei gekoppelte Differentialgleichungen beschreiben. Das Wesentliche kann man aber auch ganz ohne Mathematik verstehen und mit verständlichen Worten erklären.

Zu Beginn gibt es keine Maßnahmen ( $R > 1$ , Pfeil 1 in Abbildung 3) und die Zahl der Neuinfizierten steigt sehr stark an (Pfeil 2). Man ergreift Maßnahmen und verschärft sie so lange bis die Anzahl der Neuinfizierten wieder zurückgeht ( $R < 1$ , Pfeil 3). Wenn es nur noch wenige Neuinfizierte gibt (Pfeil 4), werden die Maßnahmen wieder gelockert und viele Menschen werden unvorsichtig ( $R > 1$ ) und das Spiel beginnt von neuem (Pfeil 5).

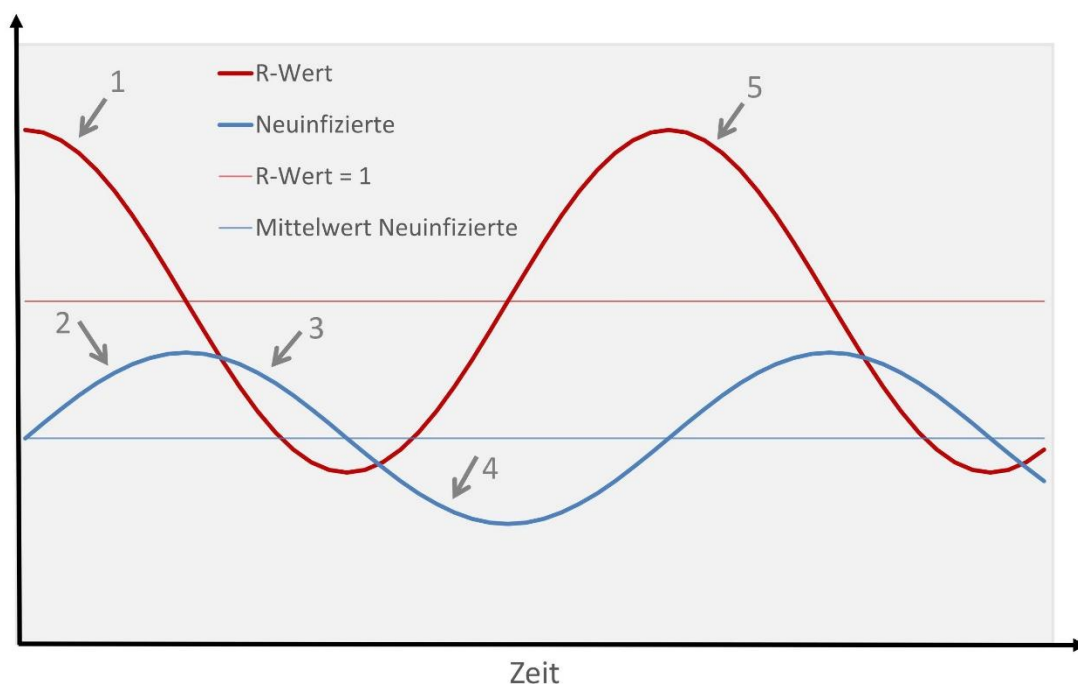


Abbildung 3. Oszillatorisches Corona-Modell

Der zugrunde liegende Rückkopplungsprozess ist im Corona-Modell völlig identisch zum Räuber-Beute-Modell. Zusammenfassend kann man sagen: Die „Beute“ entspricht dem „R-Wert“ und die „Räuber“ entsprechen den „Neuinfizierten“ (siehe Tabelle 1). Das ist übrigens das einfachste System mit zwei Variablen und tritt in der Natur sehr häufig auf.

| Modell       | Variable 1 | Variable 2    |
|--------------|------------|---------------|
| Räuber-Beute | Beute      | Räuber        |
| Corona       | R-Wert     | Neuinfizierte |

*Tabelle 1. Oszillationen mit zwei Variablen. Analogie zwischen dem Räuber-Beute-Modell und dem oszillatorischen Corona-Modell.*

## Alles nur graue Theorie?

Ist das alles nur graue Theorie oder lassen sich die Vermutungen von oben beweisen? Wir haben den beschriebenen Rückkopplungsprozess in unser Modell für die Berechnung des R-Wertes eingebaut und tatsächlich oszillatorisches Verhalten erhalten. Der R-Wert und die Neuinfizierten pro Tag zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf wie in der Abbildung 3. In Abhängigkeit der Parameter findet man ähnlich zum „Feigenbaum“ einen Übergang zu chaotischen Verhalten.

## Zusammenfassung

Die Gesetzmäßigkeiten der Selbstorganisation in komplexen dynamischen Systemen sind universell. Sie gelten sowohl in der belebten Natur (Nervenreizleitung, Herzschlag, Pandemien), als auch in der unbelebten Natur (chemische Wellen, Laserlicht). In allen Fällen handelt es sich um erregbare Systeme, in denen sich Wellen ausbreiten können. Diese Gesetzmäßigkeiten werden von der „Synergetik“ untersucht, der Lehre vom Zusammenwirken [5]. Hat man ein System besonders gut verstanden, dann kann man diese Erkenntnisse auch auf andere Systeme übertragen. Mit dem von uns entwickelten Modell [7] kann man die Entstehung und Ausbreitung einer Corona-Welle besser verstehen. Je besser man die Welle versteht, desto effektiver kann man auch gegen sie vorgehen.

## Literatur

- [1] P. Möller, K. Wetzl, M. Eiswirth, G. Ertl, J. Chem. Phys. 85, 5328 (1986)
- [2] P. Möller: Computersimulation von Simulationen der Selbstorganisation: Katalytische Oxidation von CO und Nervenreizleitung, Dissertation der LMU München, 1987
- [3] H. Haken, Synergetik, Springer Verlag, Berlin 1990
- [4] P. Möller, Das katalytische Gehirn – Ziele erreichen – Entscheidungen treffen – effektiver lernen, BoD, 2010
- [5] H. Haken, Erfolgsgeheimnisse der Natur – Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken, DVA 1994
- [6] P. Möller: Kinetische Oszillationen bei der CO-Oxidation an Pt(100): Oszillationsformen, räumliche Selbstorganisation, Strukturbildung, Modelle Analogien, Diplomarbeit der LMU München, 1985
- [7] H. Drewes, G. Fläschner, P. Möller, in Vorbereitung