

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die hier vorliegende Dissertation befasst sich mit der tomografischen Untersuchung von dreidimensionalen (3D) Erregungswellen in einem Gel-Medium. In diesem Gel-Medium läuft die chemische Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (BZ-Reaktion) ab, bei der es in räumlich ausgedehnten Systemen zur Musterbildung kommen kann. Diese 3D-Muster sind komplexer und dynamisch vielfältiger als Muster im zweidimensionalen (2D) Medium. Bei den untersuchten Erregungswellen handelt es sich um Scrollwellen, die das dreidimensionale Analogon der zweidimensionalen Spiralwellen sind. Scrollwellen besitzen ein Organisationszentrum, das Filament, um das sie rotieren. Die Entwicklung des Filaments ist verantwortlich für die Dynamik der Scrollwellen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente dieser Arbeit sind in drei Abschnitte unterteilt. Im ersten Teil werden sowohl einzelne Spiralwellen im 2D-BZ-Medium und einzelne gerade Scrollwellen (d.h. Scrollwellen mit geraden Filamenten und geraden Isokonzentrationsflächen) im 3D-BZ-Medium studiert. Die Scrollwellen werden dabei hinsichtlich ihrer Filamentdynamik (mäandrierende oder starre, kreisförmige Trajektorie) und der An- bzw. Abwesenheit eines Erregbarkeitsgradienten parallel zu den Filamenten unterschieden. Durch diese Unterscheidungen kann genau bestimmt werden, ob es sich bei einer möglichen Destabilisierung der Scrollwelle um die 3D-Mäander Instabilität, die negative Linienspannungs-Instabilität oder die Twist-induzierte Instabilität handelt. Bei den durchgeführten Untersuchungen hat sich unter anderem herausgestellt, dass gerade Scrollwellen in Gegenwart eines Erregbarkeitsgradienten verdrillen. Sobald ein kritischer Grenzwert für die Verdrillung überschritten wird, setzt die sogenannte „Sproing-Instabilität“ (eine Twist-induzierte Instabilität) ein und die ursprünglich geraden Filamente nehmen eine helikale Form an.

Der zweite Teil behandelt die Untersuchung der Wechselwirkungen von zueinander parallelen Scrollwellen-Paaren. Diese Scrollwellen-Paare wurden hinsichtlich der Filamentdynamik, der Rotationsrichtungen der Scrollwellen zueinander und der An- bzw. Abwesenheit eines Erregbarkeitsgradienten studiert. Neben dem Auftreten der Sproing-Instabilität bei Experimenten mit einem Erregbarkeitsgradienten, konnten zwei verschiedene Wechselwirkungen zwischen den Scrollwellen-Paaren dokumentiert werden. Bei dem ersten Phänomen vergrößert sich der Abstand zwischen den Filamenten, wenn die Distanz zwischen den Filamenten kleiner ist als die Wellenlänge der Scrollwellen. Dabei vergrößert sich die Distanz zwischen den Filamenten solange, bis der Abstand zwischen den Filamenten der Wellenlänge der Scrollwellen entspricht. Sobald der Abstand mindestens eine Wellenlänge beträgt, rotieren beide Scrollwellen ungestört voneinander. Bei dem zweiten Phänomen vergrößert sich der Abstand zwischen den Filamenten, obwohl die Distanz zwischen den Filamenten größer ist als die Wellenlänge der Scrollwellen. Dieses Phänomen entspricht der Verdrängung und entsteht durch Fluktuationen der Erregbarkeit des BZ-Mediums. Durch diese Fluktuationen kommt es zur spontanen Symmetriebrechung der Rotationsfrequenzen und die Scrollwelle mit der geringeren Rotationsfrequenz wird durch die Scrollwelle mit der größeren Rotationsfrequenz verdrängt.

Im letzten Teil werden gekreuzte Scrollwellen-Paare mit zueinander verkippten Filamenten untersucht. In diesen Experimenten können die Filamente lokal beliebig dicht zusammengeführt werden. Die durchgeführten Versuche konnten zeigen, dass es die Möglichkeit der Trennung und anschließender Neu-Verbindung der Filamente gibt. Nach der Neu-Verknüpfung der Filamente sind die Scrollwellen nicht mehr überkreuzt. Die Bedingungen, die für die Trennung und Neu-Verbindung der Filamente erfüllt sein müssen (Abstand zwischen den Filamenten, Winkel der Verkipfung der Filamente, lokaler Rotationsinn der Scrollwellen am Ort der Trennung), wurden ausführlich studiert und werden vorgestellt.

Am Ende der Dissertation werden die Ergebnisse diskutiert und zusammengefasst.

Abstract

The present thesis reports on a tomographic study of three-dimensional (3D) excitation waves in a gel medium. This gel medium contains the chemical Belousov-Zhabotinsky reaction (BZ reaction), which may lead to pattern formation in spatially extended systems. These 3D patterns are more complex as patterns in two-dimensional (2D) media. The investigated excitation waves are scroll waves, which are the 3D counterparts of the 2D spiral waves. The organizing center of a scroll wave is called filament. Scroll waves rotate around their filaments and the filaments determine the dynamics of the scroll waves.

The studies presented in this thesis are divided into three main sections. In the first part single spiral waves in 2D BZ media and single scroll waves (and their filaments) in 3D BZ media are studied. Here, the scroll waves are distinguished by the dynamics of their filaments (meandering or showing a rigid circular trajectory) and the presence or absence of an excitation gradient oriented parallel to the filaments. By these distinctions can be accurately determined, whether a possible destabilization of the scroll wave is due to the 3D meander instability, the negative linetension instability, or the twist-induced instability. In these investigations, it has been found, inter alia, that originally straight scroll waves twist in the presence of an excitation gradient. Once a critical threshold for the twist is exceeded, the so-called “sproing-instability” (a twist-induced instability) arises and the originally straight filaments adopt a helical shape.

The second part deals with the interactions of pairs of parallel scroll waves. Pairs of scroll waves were studied in terms of filament dynamics, sense of rotation of the scroll waves and the presence or absence of an excitation gradient. In addition to the occurrence of the sproing-instability in experiments with an excitation gradient, two different interactions of two scroll waves were observed. The first phenomenon is the increase of the distance of the filaments, when the distance is smaller than the wavelength of the scroll waves. Here, the distance between the filaments increased until the distance between the filaments corresponded to the wavelength of the scroll waves. When this distance was reached both scroll waves rotate without being affected by each other. The second phenomenon is the increase of the distance of the filaments, even when the distance is greater than the wavelength of the scroll waves. This phenomenon corresponds to the displacement and is caused by fluctuations in the excitability of the BZ medium. These fluctuations lead to spontaneous symmetry breaking of the frequencies of the scroll waves and the scroll wave with the smaller frequency is displaced by the scroll wave with the greater frequency.

In the last part pairs of crossed scroll waves with tilted filaments were examined. In these experiments, the filaments are locally very close together. These experiments showed the possibility of breaking and subsequent reconnection of the filaments. After the reconnection of the filaments, the scroll waves are no longer crossed. The conditions for the separation and reconnection of the filaments which have to be satisfied (distance between the filaments, tilting angle of the filaments, local sense of rotation of the scroll waves at the location of separation) were extensively studied and presented.

At the end of the dissertation, the results are discussed and summarized.