

M.Sc. (Physics) Chaiya Luengviriya

Thema:

## **Dynamics of three-dimensional excitation waves**

# **Zusammenfassung**

Gegenstand der vorliegenden Dissertation ist die Untersuchung von grundlegenden Aspekten der Dynamik von dreidimensionalen (3D) Mustern in erregbaren Systemen. Im Gegensatz zur Musterbildung in erregbaren Systemen in zwei Dimensionen (2D) ist die Musterbildung in 3D experimentell kaum untersucht. Dabei ist die Dynamik von räumlich und zeitlich ausgedehnten Systemen in 3D deutlich vielfältiger als in 2D. Neben der dynamischen Vielfalt in 3D kommt 3D-Untersuchungen von erregbaren Systemen eine wichtige physiologische Rolle zu, da 3D Erregungsstrukturen (die sog. Scroll-Wellen) und deren Instabilitäten als Auslöser für gewisse Arten von Herzrhythmusstörungen (wie dem Hauptkammerflattern und Hauptkammerflimmern) gelten, die zu plötzlichem Herztod führen können.

In der Dissertation wird die Dynamik von Scroll-Wellen und Scroll-Ringen untersucht. Eine Scroll-Welle ist eine dreidimensionale Erweiterung einer Spiralwelle, die in 2D ausgiebig untersucht worden ist. Das Organisationszentrum der Scrollwelle ist das Filament, das die Spitzen der einzelnen Spiralen eines Spiralenstapels verbindet. Scroll-Ringe sind Scroll-Wellen, deren Filamente geschlossen sind.

Für gerade Scrollwellen sind aus theoretischen Betrachtungen und numerischen Simulationsrechnungen drei unterschiedliche Instabilitäten vorhergesagt, nämlich die verdrillungsinduzierte Instabilität (twist-induced instability), die 3D-Mäanderinstabilität und eine Instabilität, die durch das Auftreten einer negativen Linienspannung auftritt (negative line tension instability). Von diesen drei Instabilitäten wurde nur die erste bereits experimentell nachgewiesen; der Nachweis der verbleibenden zwei Instabilitäten ist Gegenstand des ersten Teils der vorliegenden Arbeit.

Im ersten Teil der Promotionsarbeit werden die 3D-Mäanderinstabilität und die negative Linienspannungs-Instabilität experimentell nachgewiesen. Als erregbares Modellsystem wird die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion in einem zylinderförmigen Reaktor mittels optischer Tomographie untersucht. Aus den tomographischen Projektionen wird die dreidimensionale Struktur der Scrollwellen rekonstruiert und deren Filamente ermittelt. Während der Reaktion altert die Reaktionslösung, d.h. ihre Erregbarkeit nimmt ständig ab. Nach ca. 3 Stunden beobachtet man, dass das ursprünglich gerade Filament sich zick-zack-förmig verformt während dessen Länge in etwa konstant bleibt. Dies deutet auf das Auftreten der 3D-Mäanderinstabilität hin. Gegen Ende der Experimente (nach ca. 8 Stunden) ist die Erregbarkeit des geschlossenen Reaktionssystems deutlich abgesunken und es kommt zur negative Linienspannungs-Instabilität. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass das Filament sich plötzlich und kontinuierlich ausdehnt und sich dabei verdrillt. Ein ähnliches Szenario wird auch in numerischen Simulationsrechnungen gefunden, die am Barkley-Modell durchgeführt wurden. Dabei wird das Altern der Reaktionslösung als Abnahme der Erregbarkeit des Systems modelliert. Die gute Übereinstimmung von experimentellen und numerischen Ergebnissen unterstreicht das Auftreten der 3D-Mäanderinstabilität und der negativen Linienspannungs-Instabilität in unserem chemischen Modellsystem. Damit konnten diese Instabilitäten unseres Wissens erstmalig experimentell nachgewiesen werden.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird über die Ergebnisse einer experimentellen und numerischen Untersuchung der Dynamik von Scrollringen, die einem externen Strom ausgesetzt sind, berichtet. In Abwesenheit des externen Feldes schrumpfen die Scrollringe und löschen sich schliesslich aus, wobei ihre Lage und Orientierung im Reaktor unverändert bleiben.

Wird ein Gleichstrom an das Reaktionsmedium mit den Scrollringen angelegt, so driften die Scrollringe immer in Richtung Anode. Der angelegte Gleichstrom bewirkt eine Drehung der Scrollringe, wobei sich ihre Einheitsvektoren schliesslich entgegengesetzt zu der Stromflussrichtung anordnen (d.h. der Winkel zwischen dem Einheitsvektor des Scrollrings und dem Vektor des Stromflusses ist  $\theta = 180^\circ$ ). Es wurde gezeigt, dass diese antiparallele Anordnung zum Stromfluss eine stabile

stationäre Orientierung darstellt. Die parallele Anordnung von Stromflussrichtung und Einheitsvektor der Scrollringe ( $\theta = 0^\circ$ ) ist ebenfalls ein stationärer Zustand, der jedoch instabil ist, da kleine Abweichungen von der parallelen Anordnung dazu führen, dass sich die Scrollringe umorientieren und sich letztendlich entgegengesetzt zur Stromflussrichtung anordnen (falls sie sich nicht vorher - wegen ihrer intrinsischen Kontraktion - auf dem Weg dahin selbst auslöschten).

Der angelegte Strom hat ebenfalls einen Einfluss auf die Lebensdauer der Scrollringe, wobei der Effekt von der anfänglichen Orientierung des Scrollrings (d.h. vom Winkel  $\theta_0$ ) abhängt. Für  $90^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$  kommt es zu einer Verlängerung der Lebensdauer der Scrollringe im Vergleich zur ihrer Lebensdauer im ungestörten Fall. Für Anfangswinkel  $0^\circ \leq \theta_0 < 90^\circ$  verkürzt sich hingegen die Lebensdauer der Scrollringe.

Betrachtet man das Schicksal von Scrollringen, die antiparallel zur Stromrichtung angeordnet sind ( $\theta = 180^\circ$ ), bei einer konstanten Stromdichte in Abhängigkeit des Durchmessers der Scrollringe, so stellt man fest, dass kleine Scrollringe schrumpfen während grosse anwachsen. Damit existiert auch ein kritischer Radius  $r_c$ , bei dem sich Scrollringe mit zeitlich unveränderten Filamenten ausbilden. Dieser kritische Radius trennt die Domänen von schrumpfenden ( $r < r_c$ ) und anwachsenden ( $r > r_c$ ) Scrollwellen voneinander.

Es wurde experimentell gezeigt, dass sich die Dynamik von Scrollringen kontrollieren lässt. Dazu wurde ein antiparallel zur Stromrichtung angeordneter Scrollring (d.h.  $\theta = 180^\circ$ ) beobachtet. Bei niedrigen Stromdichten kontrahiert der Ring intrinsisch, während er sich bei ausreichend hohen Stromdichten ausweitet. Neben dem Durchmesser des Rings kann auch seine Lebensdauer extern beeinflusst werden. Diese Experimente zeigen, dass ein externer Stromfluss zur kontrollierten Manipulation von Scrollringen verwendet werden kann. Dies eröffnet weitreichende Möglichkeiten für zukünftige Experimente.

Das experimentell beobachtete Verhalten von Scrollringen im elektrischen Strom stimmt gut mit den durchgeführten Simulationsrechnungen überein. Als Modellsystem für die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion wurde der sog. Oregonator verwendet und das Reaktions-Diffusions-Gleichungssystem mit Advektionstermen verse-

hen, die den Einfluss des Stroms auf die ionischen Komponenten des Reaktionssystems beschreiben. Zusätzlich zur Reproduktion der experimentellen Ergebnisse konnten in den Simulationsrechnungen Scrollwellen mit zeitlich konstantem Radius erhalten werden. In diesem Fall wirkt der Effekt des Stromes der intrinsischen Kontraktion der Scrollwellen genau entgegen. Wie für ein Bifurkationspunkt üblich, ist der kritische Radius  $r_c$  gegenüber Störungen instabil.