

## 8. Zusammenfassung

Es wurde die Strömung einer Flüssigkeit (Ethanol) mit freier Oberfläche in einer rechteckigen Küvette mit Seitenverhältnis  $A=1$  betrachtet. Entlang der x-Achse dieser Küvette wird eine Temperaturdifferenz angelegt, so daß es zu thermokapillaren Strömungsstrukturen in der Flüssigkeit kommt.

Sofern diese Küvette nicht vollständig gefüllt ist, bildet sich an den Thermoden ein Meniskus, dessen Ausdehnung in der gleichen Größenordnung wie eine thermischen Grenzschicht an den Thermoden ist.

In dieser Arbeit wurden erstmals hydrodynamische Instabilitäten in der Meniskusregion an der kalten Thermode (kalte Wand) beobachtet. Sie wurden systematisch charakterisiert bezüglich:

- Wellenlänge,
- Frequenz bei zeitabhängiger Strömung,
- Oszillationsamplitude der räumlichen Ausdehnung und
- Amplitude der Temperaturoszillation.

Das System wurde durch Anlehnung an die bekannten hydrodynamischen Strukturen der Konvektionsrolle, der hydrothermalen Welle und der Oberflächenwelle beschrieben.

Bei Unterfüllungen zwischen einigen  $100\text{ }\mu\text{m}$  und  $1,8\text{ mm}$  (das entspricht einem Kontaktwinkel zwischen Seitenwand und Flüssigkeitsoberfläche von etwa  $45^\circ$ ) werden drei korotierende Konvektionsrollen mit Ausdehnungen zwischen  $30\text{ }\mu\text{m}$  und  $400\text{ }\mu\text{m}$  beobachtet, die bereits bei angelegten Temperaturdifferenzen unterhalb  $\Delta T=1\text{ K}$  auftreten.

Darüber hinaus wurde ein Modell für den Separationsmechanismus der Konvektionsrollen im Meniskusbereich gewonnen. Das Modell macht sehr gute Voraussagen über Lage und Ausdehnung der Konvektionsrollen und Frequenz ihrer Oszillation. Zusammen mit den bisherigen Beschreibungen der hydrothermalen Welle und der Oberflächenwelle erklärt das Modell die Veränderung der Oszillationsamplitude in Abhängigkeit der Meniskusform und den an die Flüssigkeitsoberfläche angelegten Temperaturgradienten.

Dabei wurde gezeigt, daß ein für hydrodynamische Instabilitäten typischer Einsatzpunkt der oszillatorischen Strömung bezüglich des Temperaturgradienten an der Flüssigkeitsoberfläche existiert. Diese kritische Temperaturdifferenz ist von der Meniskusform abhängig, so daß sowohl

eine untere als auch eine obere Grenze für den Kontaktwinkel existiert, außerhalb derer für die beobachteten Instabilitäten keine Zeitabhängigkeiten auftreten.

Die Temperaturoszillationen konnten den beobachteten Konvektionsrollen zugeordnet werden. Frequenzverhalten und kritische Temperaturdifferenzen entsprechen dem Auftreten hydrothormaler Wellen. Daneben wurden zwei weitere Instabilitäten gemessen, deren Einsatzzpunkte und Frequenzverhalten dem Auftreten von Oberflächenwellen entspricht.

Angeregt wurden die Untersuchungen durch das Auftreten von Oszillationen der freien Flüssigkeitsoberfläche mit Oszillationsamplituden von bis zu 0,4 mm, die erstmals von METZGER [Metzger86] beobachtet wurden.

Die Oberflächenoszillationen wurden systematisch beschrieben.

Dazu wurde erstmals eine analytische Näherungslösung für stehende Schwerewellen in einem rechteckigen Flüssigkeitsbehälter mit *edge constraints* (Festlegung der Begrenzungslinien am Übergang zwischen Behälterwand und freier Flüssigkeitsoberfläche) gewonnen. Diese Näherungslösung stimmt sehr gut mit den im Experiment beobachteten Oberflächenoszillationen überein.

Die Oberflächenoszillationen wurden untersucht bezüglich:

- Schwingungsmode,
- Wellenlänge,
- Frequenz und
- Amplitude

bei Variation der angelegten Temperaturdifferenz und der Meniskusform. Insbesondere wurde gezeigt, daß auch für das Auftreten der Oberflächenoszillationen ein Einsatzzpunkt bezüglich der angelegten Temperaturdifferenz und sowohl eine untere als auch eine obere Limitierung bezüglich des Kontaktwinkels zwischen Oberfläche und kalter Thermode existiert.

Durch Vergleich mit den Meßergebnissen zu den hydrodynamischen Instabilitäten im kalten Meniskus, konnte gezeigt werden, daß die Oberflächenoszillationen von diesen durch einen Resonanzmechanismus angeregt werden. Dadurch läßt sich die große Amplitude der Oberflächenoszillationen erklären.

Es kommen mehrere Faktoren zusammen, die das Auftreten der Oberflächenoszillationen ermöglicht:

Die Begrenzung der Oberfläche in der rechteckigen Küvette bewirkt durch Reflexion die Ausbildung von stehenden Wellen, in denen in einem räumlich begrenzten Gebiet Energie gespeichert und so durch Resonanz eine hohe Oszillationsamplitude erreicht werden kann. Bei einer unbegrenzten Flüssigkeitsoberfläche wird eingebrachte Energie von der ausgelösten Welle vom Entstehungsort wegtransportiert; Resonanzeffekte treten nicht auf.

Bei den bisherigen Experimenten in einer Küvetten [z.B. Metzger86, Metzger94] oder im Ringspalt [z.B. Schneider99] besitzen die hydrodynamischen Instabilitäten (Instabilitäten des Hauptstroms des Gefäßes) eine Frequenz von wenigen zehntel-Hertz, während die Oszillationsfrequenz der Oberfläche bei einigen Hz liegt, so daß hier solche Resonanzen nicht auftreten.

Bei den Experimenten in dieser Arbeit wurden hydrodynamische Instabilitäten in einem sehr kleinen Meniskusgebiet an eine Oberfläche mit etwa 10x größerer Längenausdehnung gekoppelt. Dadurch liegt die Frequenz sowohl der hydrodynamischen Instabilitäten als auch der Oberflächenoszillationen in der gleichen Größenordnung von einigen Hz.

Die rechteckige Form der Oberfläche zeigt aufgrund der geringen Symmetrie (z.B. im Gegensatz zu der Oberfläche eines Ringspalts, einer kreisförmigen Oberfläche aber auch einer quadratischen Oberfläche) eine hohe Zahl der möglichen Schwingungsmoden und damit ein breites Spektrum der anregbaren Frequenzen.

Durch die Form des Meniskus besitzen alle auftretenden Konvektionsrollen deutlich unterschiedliche Durchmesser (im Gegensatz zu Konvektionsrollen in den meisten Experimenten zur thermokapillaren Konvektion). Da sowohl thermische Wellen als auch Oberflächenwellen auftreten, bildet sich im Meniskus ebenfalls ein breites Spektrum an Temperaturoszillationen mit unterschiedlichen Frequenzen.

Wellen auf Flüssigkeitsoberflächen zeigen starke nichtlineare Effekte. Dadurch ist die Anregung einer Oberflächenoszillation nicht nur mit der Grundfrequenz der Oszillation sondern auch mit einer harmonischen Frequenz möglich. Im Experiment wird sowohl die Anregung mit der doppelten als auch mit der dreifachen Frequenz der Oberflächenoszillation nachgewiesen. Aus dem gleichen Grund zeigen alle Oberflächenoszillationen im der Fouriertransformierten ein relativ breites Spektrum. Dies führt dazu, daß die anregenden hydrodynamischen Instabilitäten

und die angeregten Oberflächenoszillationen einen relativ großen Frequenzabstand besitzen können.

Im beschriebenen Experiment wurde also auf die bisherigen Vereinfachung meniskusfreier Kontaktlinien zwischen freier Flüssigkeitsoberfläche und Begrenzungswand verzichtet. Durch das Zulassen der Menisken tritt eine hohe Anzahl hydrodynamischer Instabilitäten auf. Gleichzeitig bildet die schwingungsfähige Flüssigkeitsoberfläche ebenfalls ein komplexes System mit großer Modenzahl. Durch die Wechselwirkung beider Systeme ist das Auftreten von Resonanzeffekten sehr wahrscheinlich. . Die in dieser Arbeit verwendete Geometrie eignet sich daher besonders für die Beobachtung der Resonanzen. Bei geschickter Parameterwahl sollte die Kopplung hydrodynamischer Instabilitäten und freier Flüssigkeitsoberfläche auch in anderen Systemen beobachtet werden können.