

Über die zeitliche Ausbildung von Ringzellen

Von M. WIESEMANN, Deutsche Forschungsanstalt für Segelflug, München

Vortrag am 8. OSTIV-Kongreß, Köln, Deutschland, Juni 1960

Die Torus- oder Ringzellenströmung ist eine spezielle Art der Konvektionsströmung, die bei punktförmiger Störung des labilen Gleichgewichtes einer Flüssigkeits- oder Gas-schicht entsteht. Ihre Existenz sowie das Übereinstimmen ihrer geometrischen Anordnung und ihrer Strömungseigen-schaften mit den Vorhersagen der Zierepschen Theorie wurde erstmals von H. v. Tippelskirch nachgewiesen. Von mir wurde dann auf Anregung von Prof. Koschmieder die in-stationäre Ringzellenströmung untersucht.

Es wurde mit einer 1 cm dicken Paraffinölschicht, die mit Aluminiumpulver als Strömungsanzeiger versetzt war, experi-mentiert. In diese Schicht ragte in der Mitte vom Boden bis zur halben Höhe eine Metalldrahtspirale als Störzentrum hinein. Diese Drahtspirale wurde in unseren Versuchen nicht geheizt, sondern wirkte allein auf Grund ihrer von ihrer Umgebung abweichenden Wärmeleitfähigkeit als Störquelle.

Diese Flüssigkeitsschicht wurde nun gleichmäßig und lang-sam von unten erwärmt, während die Temperatur an ihrer Oberseite festgehalten wurde. Es bildete sich eine Ringzelle nach der anderen um die Störquelle aus; die erste Ringzelle erschien bereits bei etwa $1,5^\circ\text{C}$ vertikaler Temperaturdiffe-renz, während bei etwa $1,8^\circ\text{C}$ bis 2°C das ganze Flüssig-keitsvolumen mit konzentrisch um die Störquelle verlaufenden Ringzellen erfüllt war. (Bild 1. Hier ist die Anzahl der nacheinander auftretenden Ringzellen als Funktion der lang-sam gesteigerten vertikalen Temperaturdifferenz dargestellt.) Bei diesem Versuch ergab sich also, daß die Ringzellen im Experiment nicht gleichzeitig im ganzen Volumen auftreten.

Um die Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Ausbildung von Ringzellen von einer bestimmten vertikalen Temperatur-differenz zu untersuchen, wurde eine Reihe von Versuchen unternommen, bei denen plötzlich eine bestimmte vertikale Temperaturdifferenz an die Flüssigkeitsschicht angelegt wurde. Bei diesen Versuchen ergab sich, daß eine vertikale Temperaturdifferenz von etwa 2°C unter unseren Versuchs-bedingungen etwa die kritische Differenz darstellte, bei der erstmals die gesamte Schicht fähig war, Konvektionsströ-mung auszubilden. Durch das Vorhandensein der Störquelle, wodurch Kreissymmetrie vorgegeben wurde, wurde lediglich bewirkt, daß die entstehende Zellströmung Ringzellen bil-dete. Aber bereits bei Versuchen, bei denen die plötzlich angelegte vertikale Temperaturdifferenz geringer als 2°C war, bildeten sich Ringzellen aus. Es entstanden jedoch jetzt nur wenige Zellen in der Nähe der Störquelle, während das übrige Volumen noch strömungsfrei blieb; so bildete sich zum Beispiel bei einer Temperaturdifferenz von 1°C ein ganz schwacher Ring und bei einer Temperaturdifferenz von $1,5^\circ\text{C}$ ein stärkerer erster Ring und noch ein sehr schwacher zweiter Ring konzentrisch um die Störquelle aus. Bei einer plötzlich angelegten vertikalen Differenz von 2°C bildete sich erstmals Ringzellenströmung im ganzen Flüssigkeits-volumen aus, und zwar entstanden etwa sieben bis neun Ringe, das heißt Ringzellen bis fast zum Rand des Gefäßes. (Bild 2, 3, 4. Bei diesen drei Bildern war die plötzlich angelegte vertikale Temperaturdifferenz 2°C ; die mittlere Tem-peratur der gesamten Schicht war 23°C . Bild 2 wurde nach 20 Minuten Versuchsdauer, Bild 3 nach etwa 33 Minuten

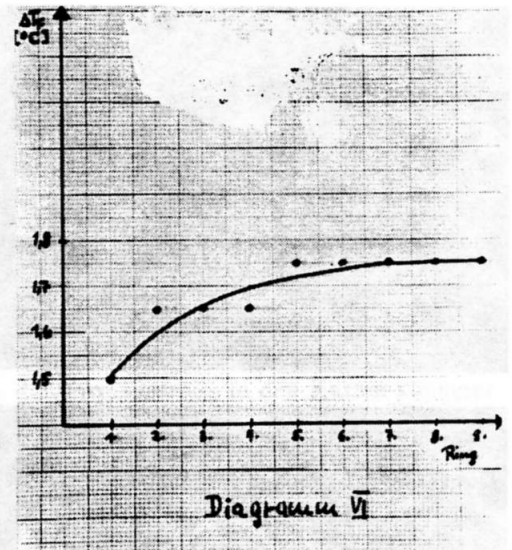


Bild 1

Versuchsdauer und Bild 4 nach etwa 40 Minuten Versuchsdauer im Endzustand aufgenommen.) Bei einer vertikalen Temperaturdifferenz, die größer als 2°C war, das heißt bei einer überkritischen Temperaturdifferenz, bildeten sich eben-falls Ringzellen um die Störquelle aus, jedoch nur in un-mittelbarer Nähe der Störquelle, während das weiter außen gelegene Flüssigkeitsvolumen Bénardzellen bildete. Je größer die plötzlich angelegte vertikale Temperaturdifferenz war, um so weniger Ringzellen und um so mehr Bénardzellen ent-standen. (Bild 5. Hier ist die vertikale Temperaturdifferenz 3°C ; das Bild wurde nach fünf Minuten Versuchsdauer etwa im Endzustand aufgenommen. Bild 6. Hier ist die vertikale Temperaturdifferenz 5°C ; das Bild wurde nach etwa drei Minuten Versuchsdauer im ungefähren Endzustand aufge-nommen.) Das Abnehmen der Anzahl der sich ausbildenden Ringzellen bei größeren plötzlich angelegten vertikalen Tem-peraturdifferenzen zugunsten der Ausbildung von Bénard-zellen ist bedingt durch die Größe des Verhältnisses der flächenhaften zur punktförmigen und radial wirkenden In-stabilität.

Die Ausbildung der Ringzellen verlief bei allen Versuchen so, daß sich stets zuerst die innerste Ringzelle konzentrisch um die Störquelle ausbildete, dann um diese nach einer ge-wissen Zeit die zweite, dann nach einer weiteren Zeit nun konzentrisch um die zweite die dritte usw., bis das ganze Flüssigkeitsvolumen mit Strömung erfüllt war. Die Ausbil-dungsgeschwindigkeit der einzelnen Ringzellen und die Ge-schwindigkeit ihrer Folge nahm nun mit der Vergrößerung der plötzlich an die Flüssigkeitsschicht angelegten vertikalen Temperaturdifferenz erheblich zu (Bild 7). Während bei einer vertikalen Differenz von 2°C die Zeit, die bis zur Ausbil-dung von fünf Ringen verging, noch 33 Minuten betrug, er-reichte bei einer vertikalen Differenz von 5°C die entspre-chende Zeit nur noch zwei Minuten.

Nach einer Theorie von Zierep sollte sich jedoch in einer Flüssigkeitsschicht, die sich im kritischen Temperaturzustand befindet, bei punktförmiger und energieloser Störung die Strömung schlagartig und gleichzeitig in der ganzen Schicht ausbilden. Die Beobachtung der experimentellen Strömungs-ausbildung ergab nun, daß die durch die Störquelle stets er-zeugten horizontalen Temperaturgradienten, die in der Theo-rie nicht enthalten sind, zusammen mit der Anregung, die eine bereits vorhandene Ringzelle auf noch strömungsfrees Volumen ausübt, für das Nacheinanderentstehen der einzel-

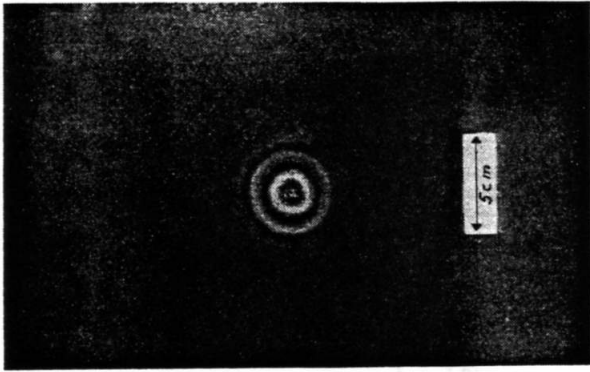


Bild 2

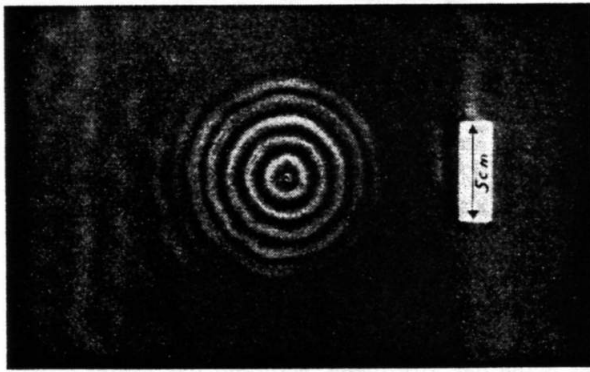


Bild 3

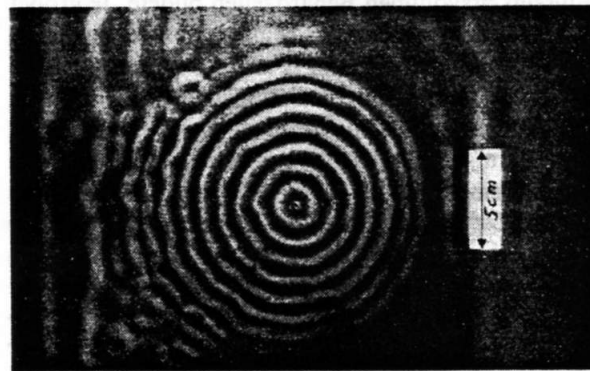


Bild 4

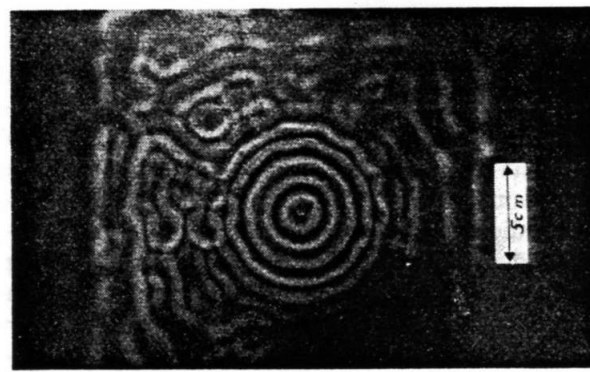


Bild 5

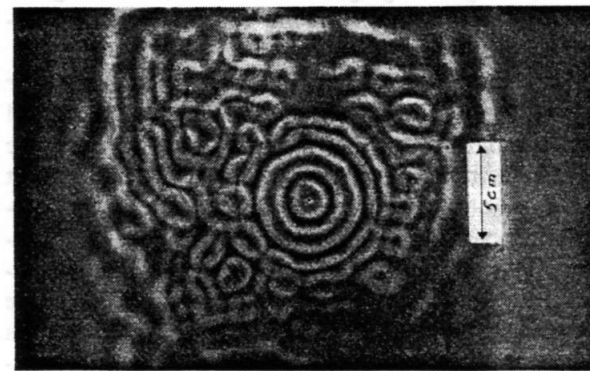


Bild 6

nen Ringzellen verantwortlich sind. Diese horizontalen Gradienten sind in der Nähe der Störquelle am größten und nehmen radial nach außen ab. Ihr Wirkungsbereich dehnt sich mit der Zunahme der Versuchsdauer weiter nach außen aus. Außerdem setzt die Theorie während eines Versuches konstante vertikale Temperaturgradienten voraus. In unseren Versuchen, bei denen eine bestimmte vertikale Temperaturdifferenz an die Flüssigkeitsschicht angelegt wurde, konnte

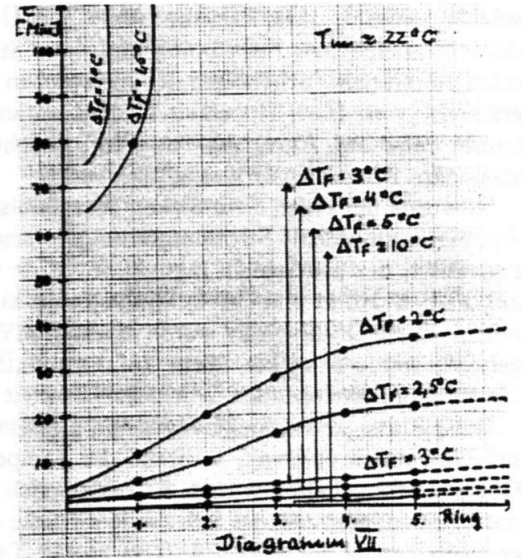


Bild 7

sich aber erst nach einer gewissen Zeit, die bei reiner molekularer Wärmeleitung in der Größenordnung von 20 Minuten liegt und mit zunehmender konvektiver Wärmeleitung entsprechend geringer wird, ein stationärer Temperaturzustand über der Vertikalen ausbilden. Die Strömung kann aber erst dann völlig stationär oder wenigstens quasi-stationär werden, wenn die Temperaturverhältnisse wenigstens in erster Näherung stationär geworden sind.

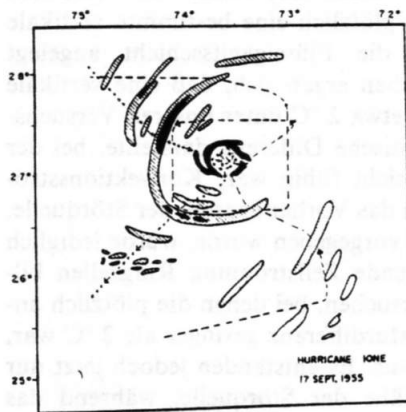


Bild 8

Um einen Zusammenhang dieser speziellen, im Labor untersuchten Strömung mit meteorologischen Erscheinungen herzustellen, möchte ich nur kurz erwähnen, daß diese Ringzellenströmung gewisse Analogien mit der Strömung in Hurricanes aufweist. Um das klar zu machen, möchte ich ein Bild aus der 1960 von

Dr. Joachim Kuettner in «Tellus» veröffentlichten Arbeit über «Bandstruktur der Atmosphäre» zeigen (Bild 8). Es handelt sich hier um die Zeichnung nach einem Radarbild von konzentrischen Regenstraßen in einem Hurricane. Vergleiche von Strömungen im Labor und Strömungen in der Atmosphäre sind jedoch immer nur bei größter Vorsicht halbwegs zulässig, da in der Atmosphäre im allgemeinen mit dem örtlichen Auftreten von Temperaturgradienten das Auftreten von Druckgradienten und dadurch bedingt, das Auftreten von horizontalen Windkomponenten gekoppelt ist, was im kleinformatigen Laborversuch nicht der Fall ist.