

Experimente zur Strömung in einer flüssigkeitsgefüllten Kugel

Alfred Schymalla

1. Problemstellung

Rotierende fluide Systeme kommen in der Natur häufig vor. Fast alle Himmelskörper und Galaxien möglicherweise das gesamte All können als rotierende fluide Systeme aufgefaßt werden. Auch in der Technik sind rotierende fluide Systeme häufig. Der Fall, daß das Fluid sich längst gekrümmter, feststehender Wände bewegt, ist ziemlich gründlich erforscht. Unter bestimmten Bedingungen kann man dabei gleichmäßige Wirbelmuster (Instabilitäten) beobachten, die Görtlerwirbel (1) oder Taylorwirbel genannt werden.

Nach der Ansicht von Taylor (2) bilden sich die nach ihm benannten Wirbel aus, wenn in einem feststehenden Zylinder ein zweiter Zylinder rotiert oder sich beide Zylinder mit einer unterschiedlichen Drehzahl oder unterschiedlichen Drehrichtung bewegen.

Der Autor hat Instabilitäten in einem Hohlzylinder beobachtet, in dem eine Flüssigkeit rotierte und die wahrscheinlich als Görtlerwirbel eingeordnet werden können. Wirbel entstehen in fluiden Medien häufig; das entscheidende für Taylor- und Görtlerwirbel ist aber, daß diese Instabilitäten unter bestimmten Bedingungen sehr stabil sein können und sehr gleichmäßige, gut reproduzierbare Wirbelmuster und Wirbelgeometrien aufweisen können. Aus der Kenntnis dieser Umstände ergibt sich die Frage, welchen Einfluß eine doppelte Krümmung der Wand auf das Entstehen von Wirbeln haben könnte.

2. Versuche

2.1 Versuchsaufbau

Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau. Ein zweifach gelagerter runder Glaskolben wurde über eine Riemenscheibe, die am Hals des Kolbens befestigt war, angetrieben. Die Welle

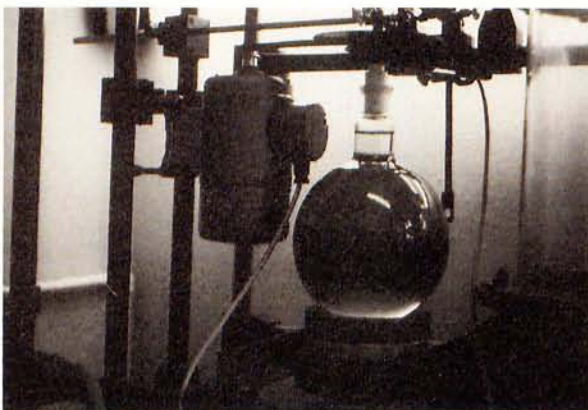


Bild 1

war hohl ausgeführt, um während des Versuches Farbstoff in die Flüssigkeit injizieren zu können. Für die meisten Versuche wurde Wasser verwendet, dem geringe Mengen suspendierbarer Feststoffe beigemischt wurde.

2.1 Äußere Strukturen

Versetzt man den Kolben in Drehung, werden die Feststoffteilchen suspendiert und sammeln sich oberhalb einer bestimmten Drehzahl in Form von ein bis zwei scharf abgegrenzten Bänder **unterhalb** des Äquators (Bild 2). Die Bänder verändern sich bei Erhöhung der Drehzahl nicht. Die Verminderung der Drehzahl unter einen bestimmten Betrag führt zu einer Verlagerung der Bänder polwärts (Bild 3). Steigert man die Drehzahl auf den ursprünglichen Betrag, wandern die Bänder nicht in ihre ursprüngliche Lage zurück. Das zeigt, daß die Zentripedalkraft nicht die alleinige Ursache der Bänderbildung sein kann.



Bild 2



Bild 3

Vermindert man die Drehzahl weiter, wandern die Bänder weiter polwärts, wobei sich häufig senkrechte oder leicht schräge Strukturausbilden (Bild 4, 5). Auf die-

se Weise werden nacheinander mehrere Bänder sichtbar. Es ist dem Autor aber nicht gelungen, alle Bänder gleichzeitig sichtbar zu machen.



Bild 4



Bild 5

Mißt man die Breite der Bänder, findet man eine $d/24$ -Teilung (d = Kugeldurchmesser). Es scheint bevorzugte Bandbreiten zu geben, die ein ganzzahliges Vielfaches von $d/24$ betragen.

Bremst man die Kugel bei hoher Drehzahl plötzlich ab, zerfallen die Bänder sofort und die Feststoffteilchen werden im gesamten Kugelinhalt suspendiert, solange die Flüssigkeit noch rotiert. Die Strömung in der Kugel hat dann regellose Wirbel; sie ist turbulent geworden. Erhöht man danach die Drehzahl wieder, zeigen sich auch in der oberen Kugelhälfte Bänder, sofern sich dort noch suspendierte Teilchen aufhalten. Beginnt man den Versuch mit ruhender Flüssigkeit, gelingt es aber nie, Bänder in der oberen Kugelhälfte sichtbar zu machen. Die suspendierten Feststoffteilchen verbleiben immer in der unteren Kugelhälfte; der Äquator ist immer als scharfe obere Trennlinie abgebildet.

Es liegt nahe, daß beide Kugelhälften unabhängig voneinander eine Strömung ausbilden und zwischen beiden Kugelhälften keine Austauschvorgänge ablaufen. Diese Feststellung ist wichtig weil zumindest die Strömung in der oberen Hälfte vom Hals des Glaskolbens beeinflusst sein könnte.

Die Dicke der Bänder in radialer Richtung konnte nur bei einem Versuch kurzzeitig gemessen werden und

scheint $d/24$ zu betragen. Nach geringer Versuchszeit – wenige Sekunden – ist keine Ausdehnung der Bänder in radialer Richtung mehr zu sehen. Auch läßt sich keine Eigenbewegung der Feststoffteilchen, wie sie bei Taylorwirbeln typisch ist, feststellen.

2.2 Innere Strukturen

Injiziert man in die rotierende Kugel axial eine Farbstofflösung (Bild 6, 7, 8), zeigen sich stabile Strömungsstrukturen im Inneren der Kugel:

- ein axialer, zylindrischer Hauptwirbel
- umgeben von acht zylindrischen Nebenwirbeln.

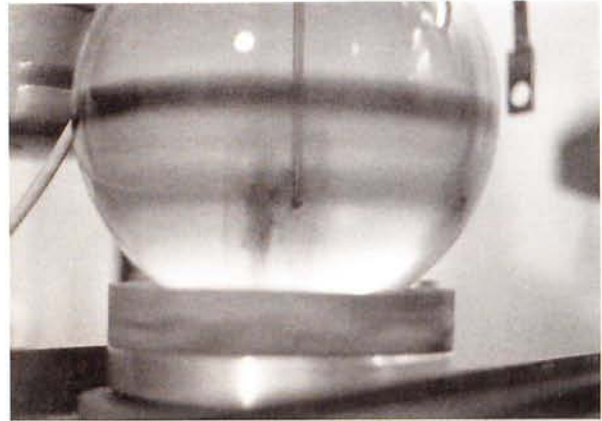


Bild 6

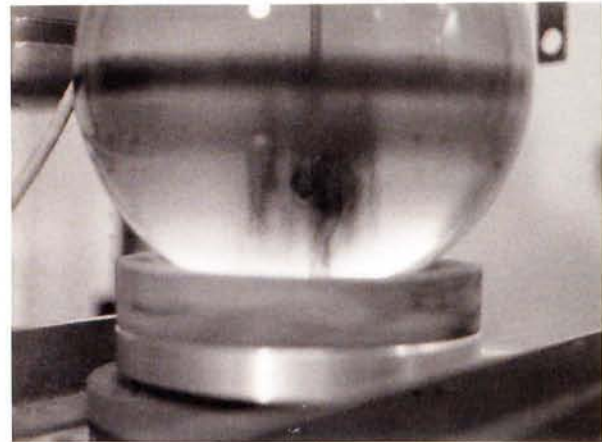


Bild 7



Bild 8

Auch hier scheinen beide Kugelhälften eine voneinander wenig abhängige Strömung zu entwickeln. In weiteren Versuchen wurde eine heiße Agarlösung anstelle von Wasser verwendet. Auch hier konnte eine



Bänderteilung von mindestens $d/12$ und zylindrische Innenwirbel beobachtet werden. Die Breite der Bänder änderte sich beim langsamen Erkalten der Agarlösung in der rotierenden Kugel nicht. Die Grenzen der Bänder waren aber im Vergleich zu Wasser weniger scharf ausgeprägt.

Man kann Innenwirbel auch sehen, wenn man die Drehzahl einer rotierenden Kugel solange absenkt, bis der suspendierte Feststoff weitgehend zum Boden abgesunken ist. Wenn man dann die Drehzahl wieder langsam steigert, zeigt sich in der unteren Hälfte ein kegelähnlicher Wirbel, der sich mit steigender Drehzahl in Richtung Äquator ausdehnt und mit vier (später acht) kleineren Nebenwirbeln umgibt (Bild 9). Wenn der Hauptwirbel den Äquator erreicht, werden die suspendierten Teilchen schlagartig in die Bänder transportiert und die Innenwirbel sind nicht mehr sichtbar. Hier deuten sich Ähnlichkeiten zu Potentialwirbeln und zu Strömungen an, die in Luftwirbeln auftreten, welche über heißen Oberflächen entstehen.



Bild 9

3. Oberflächenstrukturen von Planeten

Eine deutliches, zum Äquator parallel verlaufendes Bändermuster findet man auch bei den Planeten Saturn (Bild 10) und Jupiter. Auch beim Neptun sieht man ein Bändermuster, das aber wenig scharf ausgeprägt ist. Die Lage der Hauptstrukturen stimmt mit den in der rotierenden Kugel gefundenen gut überein. Bemerkenswert ist weiterhin, daß bei beiden Planeten die Muster auf beiden Kugelhälften verschieden ist.



Bild 10

Tabelle 1 zeigt die nach dem $d/24$ -Kriterium berechneten Lage und die von Hand von Planetenfotos ausgemessenen Werte für die Wirbelmuster von Saturn und Jupiter.

Bändermuster von Saturn und Jupiter

n	nxd/24	Saturn		Jupiter	
		obere Hälfte	untere Hälfte	obere Hälfte	untere Hälfte
1	0,042	0,44	0,5		0,06
2	0,083	0,9		0,1	0,089
3	0,125		0,12		
4	0,167	0,16			
5	0,208	0,21		0,21	0,23
6	0,250		0,25		
7	0,292	0,284		0,3	0,3
8	0,333	0,34	0,32		
9	0,375	0,37	0,36	0,37	0,39
10	0,417	0,39	0,42		
11	0,458	0,43			

Tabelle 1

Berücksichtigt man die relativ unscharfe Abbildung der Ränder der Bänder, ist die Übereinstimmung zumindest für den Saturn sehr zufriedenstellend.

Im Lichte dieser Befunde ist die Rotation der Planeten die Ursache für die Herausbildung gleichmäßiger Bänderstrukturen auf der Oberfläche von Saturn und Jupiter. Die weitverbreitete Ansicht, das temperaturinduzierte Konvektionsströmungen derartige Bändermuster erzeugen sollten, ist ohnehin nicht haltbar, weil in diesem großen Maßstab eine Wärmekonvektion nur turbulente Strömungen erzeugen kann. Turbulente Gebiete sind möglicherweise der sog. rote Fleck beim Jupiter und die Wirbelstrukturen innerhalb der Bänder.

4. Strukturen auf der Erdoberfläche

Auf der Erdoberfläche ist eine Reihe von Hauptstrukturen festzustellen, die parallel zur Erdachse (Tiefsee-gräben, Grabenbruchsysteme) oder zum Äquator verlaufen. Besonders der Ural und einige Tiefsee-gräben verlaufen fast wie mit dem Lineal gezogen in Nord-Süd-Richtung. Diese Strukturen können sich nicht zufällig in dieser Weise herausgebildet haben. Ist es berechtigt, die im Experiment gefundenen Innenwirbel als Ursache der Kontinentaldrift anzunehmen?

Hinsichtlich der Bänderstruktur ist die bei den Planeten festzustellende strenge Parallelität nicht vorhanden. Zahlreiche Gebirge verlaufen aber annähernd parallel zum Äquator.

Bisher ist die Meinung verbreitet, daß (wie bei den Planeten Saturn und Jupiter) Wärmekonvektionen die Oberflächenstrukturen der Erde verursachen würde. Wärmekonvektion im Maßstab der Erde und bei den angenommenen Temperaturgradienten im Erdinneren können nur Turbulenz erzeugen und nicht großflächige



und stabile Wirbelstrukturen. Es ist wahrscheinlicher, daß die Wärmekonvektion das rotationsbedingte Wirbelmuster stört und zu unscharfen, schwerer abgrenzbaren Wirstrukturen führt. Die Erdkugel hat aber gegenüber den Planeten und den experimentellen Befunden eine wesentliche Besonderheit: die Innenwirbel werden auf der Oberfläche abgebildet!

Das sich langsam abkühlende fluide Medium kann die Ursache nicht sein, denn bei den Versuchen mit heißer Agarlösung traten die Innenwirbel auch bei langsamer Abkühlung und Verfestigung des Agars in mehreren Versuchen auf der Oberfläche nicht in Erscheinung.

Die rotierende Kugel birgt noch viele Geheimnisse!

Literatur

- (1) Witting H., Inst. f. angew. Mathe. und Mech., Freiburg 1958
- (2) Taylor G.I.; Phil. Trans. R. Soc. 1923 A 223, 289-343

Verfasser

Dr. Alfred Schymalla

Technologie- und Gründerzentrum Wildau GmbH
Bahnhofstraße, 15745 Wildau
Tel. (0 33 75) 508-294