

Experiment zur Hydrodynamik unter Schwerelosigkeit

Gießener Forschung im Weltraum / Von Arthur Scharmann und Dietrich Schwabe

Space Shuttle „challenger“ startete am 18. Juni 1983 zu einer erfolgreichen Mission in eine Erdumlaufbahn. An Bord befanden sich auch Experimentkammern, die im I. Physikalischen Institut der Universität Gießen entwickelt und gebaut worden waren. Mit dem Experiment sollen spezielle thermische Konvektionserscheinungen in Flüssigkeiten unter Schwerelosigkeit untersucht werden. Nach den ersten Daten, die jetzt vorliegen, war das Experiment in jeder Beziehung erfolgreich. Alle Teile funktionierten einwandfrei und die gewünschten Meßdaten wurden aufgezeichnet. Der Zustand der oszillatorischen Marangoni-Konvektion wurde in einem Flüssigkeitsvolumen unter Schwerelosigkeit hergestellt und beobachtet. Der Übergang von laminarer zu oszillatorischer Strömung wurde gemessen.

Die Motivation und einige Erklärungen zu diesem Experiment sollen im Folgenden gegeben werden. Thermische Konvektion heißt die Bewegung in Flüssigkeiten oder Gasen, die durch Beheizung zustande kommt. Beispiele aus dem Alltagsleben sind die Bewegung des Wassers im von unten beheizten Kochtopf, das Aufsteigen der heißen Luft über einem Heizkörper, die flimmernd aufsteigende heiße Luft über einer von der Sonne aufgeheizten Straßendecke oder ein kalter Fallwind an einem Berghang. Das Gas oder die Flüssigkeit bewegen sich in den genannten Fällen, weil die heißen Teile leichter sind (sie dehnen sich bei Erwärmung aus) als die kalten. Die heiße, leichte Luft steigt auf, die kalte schwere Luft fällt nach unten.

Bei dieser Erklärung werden die Begriffe schwer und leicht benutzt: Wenn wir Menschen aus Erfahrung sagen können, daß ein Stein von der Größe eines Fußballs schwerer ist als ein Fußball, dann liegt das vor allem an unserer Erde, die alle Körper anzieht. Wir können mit den Nerven in unseren Muskeln fühlen „wie schwer ein Körper ist“, wenn wir versuchen, ihn hochzuheben, und wir können auf der Waage Gewichte von Körpern vergleichen. Stellen wir uns in einem Gedankenexperiment vor, die Erdanziehung sei abgeschaltet. Ein solches Gedankenexperiment macht klar, daß die Auswirkungen der Erdanziehung auf Gewichte und auf die Konvektion unübersehbar wären: jedes Kind könnte einen Bagger hochheben, aber niemand könnte durch Hochheben einen echten Bagger von einer Pappmaché-Atrappe unterscheiden. Viele vertraute und nützliche Konvektionserscheinungen würden unter Schwerelosigkeit nicht stattfinden: Winde und Meeresströmungen gäbe es nicht, die Raumheizung würde nicht funktionieren, weil die warme Luft von der Heizung nicht mehr zum Sitzplatz zirkulieren würde. Feuer würde nur noch schwelen und jede Suppe total anbrennen. Thermische Konvektion durch Auftrieb ist ohne Erdschwere nicht möglich.

Der Space Shuttle ist kein Gedankenexperiment. Wenn die Raumfähre in einer mittlere

ren Höhe von 300 km um die Erde kreist, herrscht in ihr fast Schwerelosigkeit. Wir alle haben Fernsehbilder von schwebenden Astronauten und Gegenständen in Raumfahrzeugen gesehen. Die Astronauten können das Gefühl der Schwerelosigkeit genießen, weil sich auf einer solchen Kreisbahn um die Erde die Erdanziehungskräfte und die Fliehkräfte gegenseitig aufheben.

Es ist in diesem Zusammenhang wichtig, sich Gedanken über fehlende Konvektion zu machen. So ist es in frühen Experimenten unter Schwerelosigkeit passiert, daß Filmaufnahmen überbelichtet wurden, denn die zur Beleuchtung benutzte Glühbirne war im Raumfahrzeug viel heller als auf der Erde, weil der Glühdraht wegen fehlender Konvektion heißer wurde.

Im Zusammenhang mit den Möglichkeiten, unter Schwerelosigkeit zu experimentieren, ist bei vielen Forschern und Ingenieuren der Blick für das Wesen und die Bedeutung der thermischen Konvektion geschärft worden. Bei Experimenten unter Schwerelosigkeit ist die thermische Konvektion „ausgeschaltet“, und das gibt die Möglichkeit, feinere Vorgänge zu untersuchen, die sonst durch Konvektion verdeckt werden. Das Gießener Experiment zielt genau in diese Richtung.

Es gibt neben der thermischen Konvektion durch Auftrieb noch thermische Konvektion durch Oberflächenspannungsdifferenzen. Die Oberflächenspannung ist eine Eigenschaft von Flüssigkeitsoberflächen, die wie eine dünne Haut wirkt. Die Oberflächenspannung bewirkt zum Beispiel bei Wassertropfen die Kugelform und sie erlaubt es den Wasserkäfern, auf der Wasseroberfläche zu laufen, obwohl die Käfer schwerer als Wasser sind. Wird die Oberfläche einer Flüssigkeit an einer Stelle geheizt und damit heißer als an anderen Stellen, dann gerät die Oberflächenspannung aus dem Gleichgewicht. Die Flüssigkeitshaut wird dadurch von der heißen Stelle zur kalten Stelle gezogen und darunter liegende Flüssigkeitsschichten bewegen sich durch die „Reibung“ mit. Damit entsteht Konvektion in der Flüssigkeit, die so lange anhält, wie die Temperatur in der Flüssigkeitsober-

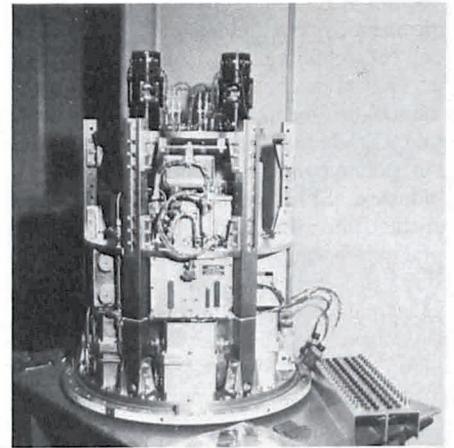


Bild 1: Der geöffnete MAUS-Container mit den zwei Gießener Experimentkammern auf der obersten Plattform.

fläche ungleichmäßig ist. In der Technik gibt es viele Beispiele für Flüssigkeiten mit freier Oberfläche und inhomogener Temperatur. Als Beispiel sei das durch einen Lichtbogen beim Schweißen erzeugte flüssige Metall in der Schweißnaht genannt.

Auf unserer Erde kann man den soeben beschriebenen Mechanismus der Konvektion durch Oberflächenspannungsinhomogenitäten nicht von Konvektion durch Auftrieb trennen, denn beide treten gekoppelt auf. Unter Schwerelosigkeit fällt der Auftrieb weg und der Oberflächenspannungsmechanismus wirkt allein. Man kann die Konvektion durch Oberflächenspannungsinhomogenität (die nach einem italienischen Forscher Marangoni-Konvektion genannt wird) zwar auch auf der Erde untersuchen, denn bei Flüssigkeitshöhen von 1 bis 10 mm ist der Oberflächenspannungseffekt größer als der Auftriebseffekt. Aber bei Experimenten auf der Erde spielt der Auftrieb immer eine Rolle und kompliziert das Experiment und die Interpretation.

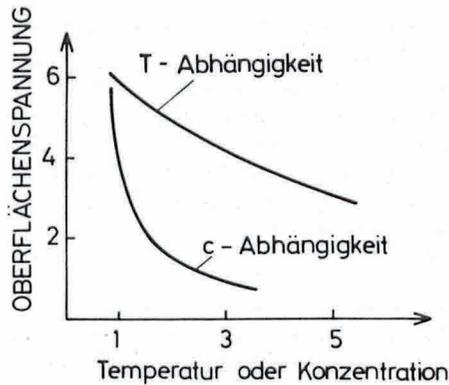
Im I. Physikalischen Institut wurde 1976 eine interessante Eigenschaft der thermischen Marangoni-Konvektion entdeckt: Erhöht man die Temperaturdifferenz entlang der freien Flüssigkeitsoberfläche, so wird die Marangoni-Strömung nicht nur schneller, sondern ab einer kritischen Temperaturdifferenz auch unregelmäßig. Solche Unregelmäßigkeiten sind bei vielen Strömungsvorgängen bekannt, wenn die Strömung zu schnell ist: Wirbel bilden sich, Flugzeugflügel flattern, usw. Bei der Marangoni-Strö-

mung haben wir eine Vorstufe der völlig unregelmäßigen (turbulenten) Strömung gefunden, die sich in regelmäßigen Änderungen (Schwingungen) äußert.

Die Untersuchungen der Marangoni-Konvektion wurden im I. Physikalischen Institut an einem System durchgeführt, das als Modell für technologisch wichtige Prozesse bei der Kristallzüchtung von Silizium dienen kann. Siliziumeinkristalle höchster Reinheit und Gleichmäßigkeit sind die Grundlage der technologisch so wichtigen Elektronikindustrie. Siliziumeinkristalle werden gezüchtet, indem man das Silizium schmilzt und gezielt wieder erstarren läßt. Der Kristall wird gleichmäßig wachsen, wenn er gleichmäßige Wachstumsbedingungen hat. Im allgemeinen herrscht in der Schmelze heftige unregelmäßige Konvektion und der Kristall wächst gleichmäßig. So wie ein Baum Jahresringe aufweist, weil er wegen der ungleichmäßigen Jahreszeiten ungleichmäßig wächst, kann man in allen Siliziumkristallen streifenförmige Inhomogenitäten entdecken, die bei der Verwendung stören. Um die Kristallinhomogenitäten zu beseitigen, müßte man die unregelmäßige Konvektion vermeiden. Dies scheint für eine Schmelze, die auf der einen Seite beheizt und auf der anderen gekühlt wird, schier unmöglich. Es gibt jedoch die Möglichkeit, Kristalle im Weltraumlabor zu züchten. Dort ist die Auftriebskonvektion nicht wirksam und damit auch jede ihrer Unregelmäßigkeiten verschwunden. Die Idee, perfekte Kristalle im Weltraumlabor zu züchten, liegt im Zeitalter der Raumfahrt in der Luft und wird von vielen Forschern verfolgt. Sie erscheint zunächst bestechend. Solche Experimente sind aber erstens teuer und viel komplizierter als zunächst angenommen wird. Zweitens gibt es ja die Marangoni-Konvektion, die ein gravitationsunabhängiger Konvektionsmechanismus ist, da sie durch Oberflächenspannungskräfte ausgelöst wird. Und die Gießener Forschungen haben nachgewiesen, daß auch die Marangoni-Konvektion zeitabhängig werden kann und somit das erwünschte gleichmäßige Kristallwachstum stören würde. Mit dem Gießener Experiment „Kritische Marangoni-Zahl“ wird die Temperaturdifferenz gemessen, nach deren Überschreitung die Marangoni-Konvektion zeitabhängig wird. Dem Gießener Experiment kommt für laufende und zukünftige Experimente Schlüsselfunktion zu. Andere Experimentatoren können aus den Ergebnissen abschätzen, welche „Temperaturschwelle“ sie nicht überschreiten dürfen, wenn sie die zeitabhängige Marangoni-Konvektion vermeiden wollen.

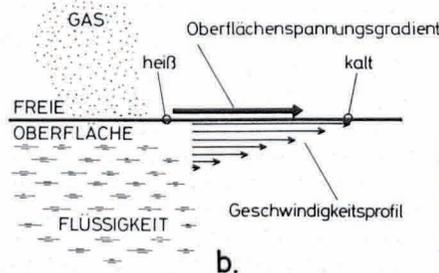
Das Herzstück des Experiments, die Versuchskammer, wurde in Gießen entwickelt und in der feinmechanischen Werkstatt des I. Physikalischen Instituts gebaut. Sie ent-

hält zwei Heizer, die einen Temperaturgradienten entlang einer freien Oberfläche eine Natriumnitratschmelze erzeugen sowie ein-



a.

Bild 2: Zur Erklärung der Marangoni-Effekte: (2a) Die Oberflächenspannung einer normalen Flüssigkeit (oder Schmelze) nimmt mit der Temperatur ab. Die Oberflächenspannung wird außerdem durch Verunreinigungen meistens stark erniedrigt (Beispiel: Wasser mit Waschmittel). Die Konzentrationsabhängigkeit der Oberflächenspannung ist oft stärker als die Temperaturabhängigkeit (Beispiel: Alkohol erniedrigt die Oberflächenspannung von Wasser stark).



b.

Bild 2b: Zum Prinzip der thermischen Marangoni-Konvektion stellen wir uns die freie Oberfläche einer Schmelze vor, bei der durch die Heizbedingungen ein Bereich der Oberfläche heißer ist als der andere. Weil die Oberflächenspannung temperaturabhängig ist, bewirkt der Temperaturunterschied einen Oberflächenspannungsunterschied (Oberflächenspannungsgradienten). Dieser Oberflächenspannungsgradient treibt die Oberfläche vom Gebiet kleiner Spannung (heiß) zum Gebiet größerer Spannung (kalt), so wie sich beim Spannen einer Trommel deren Fell bewegt. Wegen der Viskosität der Schmelze wird die Bewegung der Oberfläche auf tiefer liegende Schichten übertragen und es entsteht Konvektion. Solange der Temperaturunterschied aufrechterhalten wird, hält auch die Strömung an.

Ein wesentliches Merkmal der Marangoni-Konvektion ist der steile Abfall der Strömungsgeschwindigkeit zum Volumen hin, weil der Antrieb nur in der freien Oberfläche sitzt.

ge Regel- und Meßthermoelemente. Das wesentliche Problem eines solchen Experiments mit Flüssigkeiten mit freier Oberfläche unter Schwerelosigkeit ist die Formgebung der Flüssigkeit. In den meisten Fällen kriecht die Flüssigkeit „kapillar“ in alle Ritzen und Spalten. Im Gießener Experiment wurde durch Kontrolle der Benetzungseigenschaften der Schmelze eine zylindrische Flüssigkeitssäule mit freier Mantel-Oberfläche verwirklicht.

Ein Weltraumexperiment ist wegen der langen Vorbereitungszeit und der großen Anzahl beteiligter Institutionen sehr kompliziert. Bezahlt wird das Experiment einerseits vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), das seine Kontrolle über den Projektträger Deutsche Forschung- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) ausübt. Da es andererseits an der Universität Gießen durchgeführt wird, hat auch das Hessische Kultusministerium über die Verwaltung der Universität Gießen mitzureden. Die Flugmöglichkeit im Space Shuttle wird von der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA geboten und vom BMFT gekauft. Die Koordination zwischen deutschem Experimentator und der Raumfahrtfirma ERN die die weiteren elektronischen und mechanischen Komponenten des Experiments baut hat, sowie NASA übernimmt DFVLR. Somit ist nicht nur das Experiment, sondern auch das Management sehr anspruchsvoll. Das Gesamtprojekt heißt „Materialwissenschaftliche autonome Experimente unter Schwerelosigkeit (MAUS). Dabei werden in tonnenförmigen Behältern autonome Experimente (eigene Batterie und Steuerung) ohne Mitwirkung des Astronauten durchgeführt.

Das Gießener Experiment, das am 18. Juli 1983 mit Challenger gestartet wurde, hat noch eine Besonderheit. Es saß auf dem ersten wieder verwendbaren Satelliten SPAS-01, der von Messerschmitt-Bölkow-Blombach (MBB) in Ottobrunn bei München gebaut wurde. Der Satellit SPAS-01 wurde von Space Shuttle ausgesetzt und flog etwa 10 Stunden frei neben dem Space Shuttle. Durch kleine Störbeschleunigungen, z. B. durch Bewegungen der Astronauten, ausgeschlossen und eine besonders ruhige Flugphase garantiert. Während dieser Zeit wurde das Gießener Experiment eingeschaltet, um automatisch abzulaufen. Es war sehr günstig, daß das Gießener Experiment autonom war, d. h. über eine eigene Batterie und Steuereinheit verfügte, denn der Bordcomputer des Satelliten mußte wegen Überhitzung zeitweise ausgeschaltet werden. Das Gießener Experiment lief jedoch ungestört weiter. Die zwei Experimentenkammern lieferten ihre Meßdaten auf ein Bandgerät, dessen Auswertung jetzt vorliegt.