

Physik völlig losgelöst!

Impressionen eines Parabellflugs

Ulrike Endesfelder und Elisabeth Krause

Im Juli dieses Jahres fand die achte Parabellflugkampagne der ESA für Studenten in Bordeaux statt. Damit ermöglicht es die ESA (seit 2000 alljährlich) Studententeams aus den ESA-Mitgliedsstaaten, Experimente in der Schwerelosigkeit zu verwirklichen. Im nachfolgenden Artikel berichtet Ulrike Endesfelder stellvertretend für ihr Team von den Erfahrungen mit einem Experiment zur Physik von Ferrofluiden (Red.).

Houston, wir haben ein Problem!“ Dank des Kinofilms „kennt heute fast jeder das Problem der Apollo-13-Crew: Wie lassen sich möglichst schnell und ohne viel Material runde Filter mit eckigen verbinden? Nicht ganz so dramatisch und lebensgefährdend, aber dennoch Stress produzierend, erlebten Elisabeth und ich den Beginn unseres zweiten Experimentierfluges. Nachdem das Flugzeug in der Luft war, arbeiteten wir unsere Checkliste ab, um das Experiment startklar zu machen. Der letzte Punkt dieser Liste besteht darin, die zuvor fixierten Kameras einzuschalten und die Aufnahme zu starten. Plötzlich begann jedoch eine der Kameras, ohne Gnade ihr Band zu fressen. Nach mehreren vergeblichen Versuchen, das Problem zu beheben, machten wir uns auf die Suche nach einer anderen Kamera. Eigentlich gab es davon genug an Bord, nur wurden die meisten an den anderen Experimenten benötigt. Eine der Kameras diente allerdings nur dazu, die Flugerfahrung als solche aufzunehmen. Der Besitzer gab sie zwar bereitwillig her – nur passte sie absolut nicht in unsere Montierung. Nach fieberhaften Versuchen, bei denen uns Mitglieder anderer Teams und Philippe Willekens von der ESA unterstützten, lösten wir das Problem schließlich mit jeder Menge Tape, das wir glücklicherweise reichlich dabei hatten.

Zu diesem Zeitpunkt lag bereits eine monatelange Vorbereitungszeit hinter uns. Am Anfang hatte zunächst nur die Idee gestanden, ein Experiment mit Ferrofluiden für die

Schwerelosigkeit zu entwickeln (s. Infokasten „Die Physik der Ferrofluide“). Aber wie sollte das Experiment konkret aussehen? Und selbst als wir davon eine Vorstellung hatten – wie sollten wir diese verwirklichen? Was ist möglich und was nur Hirngespinnst? Unsere Grundidee bestand darin, ein Ferrofluid in Schwerelosigkeit und unter Einfluss eines homogenen Magnetfeldes zu untersuchen und mit derselben Situation bei Schwerkraft zu vergleichen. Wie würde sich z. B. die Struktur des Ferrofluids als Funktion der Magnetfeldstärke ändern? Nun folgte zunächst eine Phase langer Papierarbeit, die jedoch belohnt wurde: Mitte März kam die Zusage von der ESA, dass unser Experiment ausgewählt worden war. Von da an blieben knapp zwei Monate, um uns mit den umfangreichen Sicherheitsbestimmungen vertraut zu machen und der Idee einen Versuchsaufbau folgen zu lassen. Von dieser Bauphase profitierten unsere handwerklichen Fähigkeiten ungemein. Einfach alles war gefragt: löten, sägen, bohren, schrauben, schleifen, Glasblasen und drechseln ... Dies alles und noch mehr ließ unser Experiment wachsen und bereitete jede Menge Spaß!

Im Wesentlichen besteht der Versuchsaufbau aus einer Ferrofluidprobe (Durchmesser 15 mm), die sich zwischen einem Spulenpaar befindet und mit zwei digitalen Videokameras beobachtet wird. Ein Computer

Das Team 1012 der ESA-Parabellflugkampagne¹⁾

Die vier weiblichen Teammitglieder studieren Physik in Bonn, derzeit unterbrochen durch Auslandssemester.

- ▶ Anne Angsmann (22), Nijmegen
- ▶ Ulrike Endesfelder (22), Stony Brook, New York
- ▶ Elisabeth Krause (21), Harvard/Boston
- ▶ Alice Verwey (22), Edinburgh. Sie hat bereits vor vier Jahren mit einem anderen Experiment an der Kampagne teilgenommen und unterstützte diesmal das Team vom Boden aus.
- ▶ Sebastian Bürgel (20) studiert Elektrotechnik an der ETH Zürich.



Ulrike Endesfelder (links) und Elisabeth Krause schweben während eines Parabellflugs über ihrem Experiment.

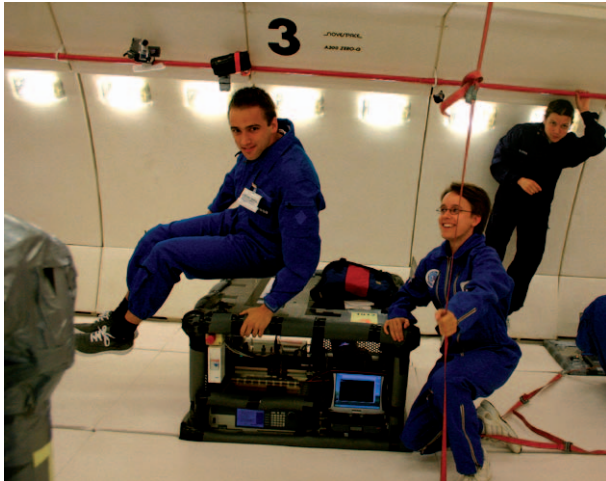
kontrolliert die Stromversorgung, sodass das Magnetfeld während der Messung genau definierte Funktionen der Zeit durchläuft. Zuerst stand das Design der Magnetspulen auf dem Plan. Die Unterstützung der Werkstätten des Helmholtz-Instituts für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn ermöglichte es uns, frei nach unseren Wünschen und vor allem gemäß den Sicherheitsbestimmungen der ESA zu planen. Unser Spulenpaar liefert extrem homogene Felder mit Feldstärken bis zu 2500 Gauß. Wenn man bedenkt, dass auf Passagierflügen sogar Handys ausgeschaltet bleiben müssen, ist verständlich, dass dieses Magnetfeld mit einem Eisenmantel abgeschirmt werden muss. Der Effizienztest des magnetischen Rückflusses beeindruckte auch uns: In nur wenigen Zentimetern Abstand vom 140 mm × 140 mm großen Mantel waren selbst bei maximaler Feldstärke nur noch geringste Restfelder messbar.

Endlose Diskussionen...

Während jedes Parabellflugs ändert sich der Steigwinkel des Flugzeugs periodisch (s. Infokasten „Der Parabellflug“). Diese Rotation um eine Achse durch die Flügel gilt es zu kompensieren, da sie unser mühevoll schwerelos gewordenen Ferrofluid beeinflussen würde, z. B.

1) Mehr Infos zu den ESA-Parabellflugkampagnen finden sich auf www.estec.esa.nl/outreach/parabolic/

durch Scherkräfte, die zwar klein sind, aber die Symmetrie des Experiments brechen. Sicherlich ist der Flug keine glatte Parabel und es gibt einige Translationsbewegungen, aufgrund derer natürlich auch keine hundertprozentige Schwerelosigkeit herrscht, sondern nur Mikrogravitation. Doch alles in allem betrachtet, ist diese Rotation der größte Stör-



Sebastian Bürgel und Anne Angsmann während des ersten Experimentierflugs.

faktor. „Eine Achse für unseren Magneten“ war schnell in die Werkstatt gegeben, aber nun brauchten wir ein Nachführsystem! Aus den Einführungsvorlesungen in die Physik bekannt sind Kreiselsysteme oder auch Stabilisierungssysteme basierend auf Drehimpulserhaltung. Wir überlegten lange. Wie kann man einen Kreisel kräftefrei und trotzdem angetrieben installieren? Und was passiert, wenn er durch Abweichung von der idealen Parabelbahn einen unerwarteten Schlag erhält und präzediert? Dann wäre unsere starre Achse verloren. Vielleicht ein System aus zwei entgegengesetzten Kreiseln? Blicke dann die eigentliche Achse erhalten? Nach endlosen Diskussionen war sich schließlich keiner mehr sicher, die richtige Kreiselmessung aufgestellt und alle relevanten Achsen betrachtet zu haben. So bauten wir schließlich einfach einige lustige Thesen aus Lego nach...

...und eine unerwartete Lösung

Unterwegs in den Tiefen der physikalischen Sammlung auf der Suche nach hilfreichen Anregungen fanden wir schließlich unsere Lösung: ein kleines schwarzes, recht unscheinbares, aber absolut geniales Kästchen mit den einfachen Buchstaben ESP (Electronic Stability Programme). Das von Bosch entwickelte System hindert normaler-

weise Autos daran, aus der Kurve zu schlittern. Das Prinzip ist einfach: Ein Sensor misst die tatsächliche Winkelgeschwindigkeit und vergleicht diese kontinuierlich mit der theoretisch erwarteten. Weichen beide voneinander ab, greift das System ein. Die Firma Bosch war begeistert: Bisher hatte noch keiner versucht, das ESP für etwas anderes als für Autos zu verwenden! Schon bald lag genau so ein Sensor vor uns. Wir maßen die Signale durch und checkten das technische Datenblatt – der Sensor war einfach perfekt. Mit ein bisschen Nachhilfe unserer Elektroniker war schnell eine Motorsteuerung zusammengelötet, die exakt die Winkeldrehung gegendreht – und wir waren ganz schön stolz.

Kommunikation mit Hindernissen

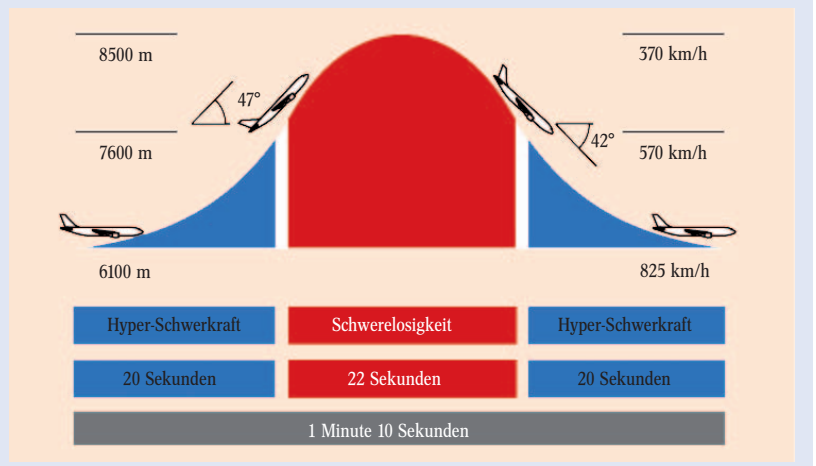
Um den 30 ausgewählten Teams einen guten Start in ihr Projekt geben zu können, hatte die ESA Anfang März je zwei Mitglieder der Teams in das Forschungs- und Technologiezentrum Estec in die Niederlande eingeladen. Die fünf Tage dort dienten vor allem der Informationssammlung und Einstimmung auf die Kampagne. Dazu gab es Vorträge über alles, was den Parabelflug an sich betrifft, und grund-

legende Unterweisungen in die Sicherheitsbestimmungen, die beim Experimentbau zu befolgen sind. Zum Beispiel müssen alle Flüssigkeiten in ein doppelwandiges Gefäß eingeschlossen werden. Zudem gab es Nachmittagsessions, in denen man sich mit vielen Experten und Spezialisten treffen und sämtliche Fragen loswerden konnte. Ein Treffen war obligatorisch: Jedes Team hatte eine erste Sitzung mit seiner Kontaktperson bei Novespace, dem Unternehmen, das den umgebauten Airbus A300 betreibt. Bei uns gestaltete sich das Treffen zunächst als schwierig. Wir bemerkten leider nicht rechtzeitig, dass die Sätze unseres Kontaktmannes Frederic alle mit einem „How“ anfangen, und somit keine Aussagen, sondern Fragen waren. Da er Franzose ist, klang sein englisches „How“ in unseren Ohren wie ein bedeutungsloses Füllwort „ouh“. Das führte sehr schnell zu einem größeren Kommunikationsproblem – er verstand nicht, warum wir seine Fragen à la „Wie wollt ihr das tun?“ immer nur mit einem knappen „Ja“ beantworteten, und wir versuchten verzweifelt herauszufinden, was eigentlich falsch lief. Im Endeffekt mussten wir jedoch sehr darüber lachen, als wir uns endlich verstanden.

Der Parabelflug

Während eines so genannten Parabelflugs ist es möglich, die Schwerkraft für ca. 20 Sekunden auszutricksen und in dieser Zeit kurze Experimente in der Schwerelosigkeit durchzuführen. Dazu zieht der Pilot, von einem stabilen horizontalen Flug ausgehend, allmählich die Nase des Flugzeuges bis zu einem Winkel von ca. 45 Grad hoch. In dieser ersten, ca. 20 Sekunden langen Phase wirkt eine Beschleunigung von ca. 1,8 g. Dann drosselt der Pilot den Motorschub auf ein Minimum, das noch gebraucht wird, um den Luftwiderstand zu kompensieren. Das Flugzeug

folgt nun, wie ein geworfener Stein, einer freien Wurfparabel. Während dieses freien Falls über ca. 1000 Meter gewinnt man 20 Sekunden Schwerelosigkeit. Danach fängt der Pilot das Flugzeug wieder ab, was wiederum ein 20 Sekunden langes und 1,8 g verursachendes Manöver bedeutet. Nach einigen Minuten des Horizontalflugs (meist ca. 2 Min, alle fünf Parabeln sind es jedoch längere Pausen) kann die nächste Parabel eingeleitet werden. Ein Flug beinhaltet insgesamt 31 Parabeln, bevor man nach ca. drei Stunden wieder sicher auf den Boden zurückkehrt.



Darüber hinaus bot der Workshop die Gelegenheit, schon einmal die anderen Teams und deren Projekte kennenzulernen. Wir haben uns in vielen Dingen ausgetauscht und waren beeindruckt davon, woher die anderen kamen (ein Team kam sogar aus Kanada) und wie sie ihre Projekte angingen. Manche waren mit ihrer Konstruktion schon fast fertig, andere suchten noch Sponsoren, um überhaupt weiterbauen zu können, und vor allem gab es Experimente aus jeder Fachrichtung: Viele waren ingenieurtechnisch ausgerichtet (Solar Kite Deployment Methoden etc.), ein paar hatten Medizin (Effekte aufs menschliche Cytoskelett) oder Biologie (z. B. Genexpression von Zebrafischen) als Hintergrund und in einem Projekt ging es sogar um Wahrnehmungspsychologie (Gesichtsfeldänderung durch Mikrogravitation u. a.).

Plan B für ein Gefäß

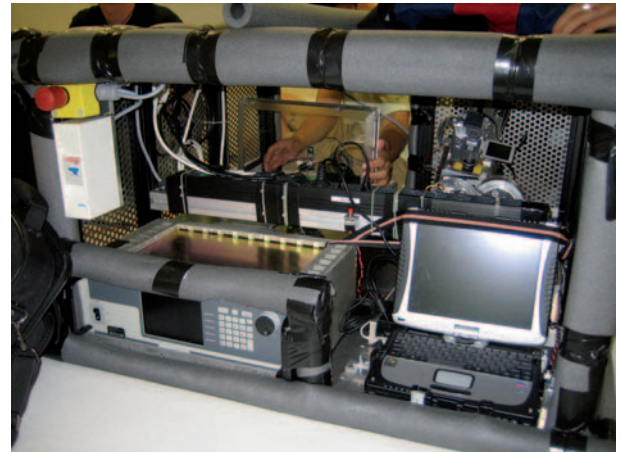
Schwieriger und langwieriger als gedacht und vor allem als eingeplant erwies es sich, ein geeignetes Gefäß für unser Ferrofluid herzustellen. Die Idee bestand darin, zunächst ein möglichst rundes Gefäß zu blasen, sodass das Ferrofluid an keinen Ecken hängen bleiben konnte. Dieses Gefäß wollten wir dann aufgrund von ansonsten auftretender Lichtbrechung in Kunstharz eingießen und daraus einen Würfel ausschneiden und polieren. Wir hatten mehrere kleine Probengefäße aus verschiedenen Gläsern geblasen, um zu sehen, wie sich

das Ferrofluid darin verhält. Die ernüchternde Erkenntnis: Das Ferrofluid bedeckte die Wände als schmierige braune Masse. Unsere Kontaktperson bei Ferrotec gab uns den Tipp, Quarzglas zu benutzen. Das klappte schon besser: Nach einem Tag in Ruhe war immer noch alles in Ordnung, das Ferrofluid schien keine Anstalten zu machen, das neue Gefäß zu benetzen. Wir waren glücklich und gingen zu Schritt zwei über, dem Eingießen in Kunstharz. Und siehe da, zu früh gefreut. Beim Aushärten des Harzes (um die 40 °C) erhitzte sich die Probe so stark, dass sich die Eigenschaften des Ferrofluids anscheinend veränderten. Am Ende sahen wir wieder nur auf braune undurchsichtige Wände. Okay, Plan B? Es gab noch keinen. Schließlich stellten wir ein weiteres kleines Probengefäß her und drechselten dafür einen kleinen Silikondeckel. Nun gossen wir unser Gefäß einfach im leeren Zustand bis zum Rand in das Harz ein. Nachdem das Harz ausgehärtet war, füllten wir das Gefäß mit dem Ferrofluid und benötigten nun nur noch eine dünne Schicht Harz, um den Deckel zu versiegeln – und endlich, eine Woche vor der Abfahrt nach Bordeaux hatten wir eine funktionierende Probe.

Vier Frauen und ein massives Gewichtsproblem

Das Sicherheitshandbuch regelt so ziemlich jedes Detail des Experimentbaus durch eine entsprechende Passage. Unter anderem schreibt Novespace ein Maximalgewicht

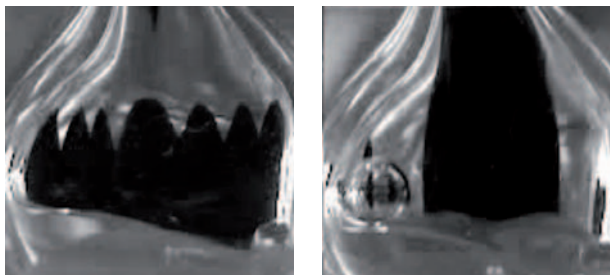
von 100 kg per linearem Meter auf den Fixierungsschienen im Flugzeug vor, auf denen das gesamte Experiment verschraubt werden muss. Diese Vorgabe versetzte uns in Panik, als wir unser Setup nach vorsichtigen Hochrechnungen zum ersten Mal wogen. Noch nicht einmal fertig hatten wir schon um die 115 kg. Nachdem Frederic, unser Kontaktmann bei Novespace, meh-



Nach langen Diskussionen und vielen Stunden in der Werkstatt ist das Experiment startklar. Der Aufbau besteht aus Stromversorgung (vorne linke), Notebook zu Steuerung (rechts) sowie Ferrofluidprobe, Magnet und Videokameras (dahinter).

rere E-Mails diesbezüglich einfach nicht verstand und wir schon darüber nachdachten, wie wir Gewicht reduzieren könnten, löste sich das Kommunikationsproblem gerade noch rechtzeitig. Unser Experiment mit einer Grundfläche von ca. einem Quadratmeter wird auf zwei Schienen befestigt – das bedeutet eine Obergrenze von 200 statt 100 kg. Diese Nachricht erreichte uns keine Minute zu früh: Wir hatten zwar

schon ein paar Löcher in unsere Bodenplatte gesägt, der Eisenmantel unseres Magneten war allerdings noch unberührt. Ein paar Stunden später hätten wir einen verkleinerten Mantel gehabt, der womöglich die exzellenten Eigenschaften unseres Magneten verändert hätte.



Unter Einfluss der Schwerkraft bilden sich im Ferrofluid (schwarz) ab einer kritischen Magnetfeldstärke sog. Rosensweig-Instabilitäten (links), die bei Schwerelosigkeit nicht zu beobachten sind (rechts).

Warten auf grünes Licht

Um im „Zero-g-Airbus“ mitfliegen zu dürfen, müssen alle Beteiligten einen medizinischen Test bei einem Fliegerarzt bestehen. Der an Pilotenanforderungen angelehnte Test erfordert aber keine besonderen Fähigkeiten, außer völlig gesund zu sein. Alles schien einwandfrei zu laufen, wir machten unsere Tests bei der DLR in Köln rechtzeitig, und die Ergebnisse, die uns ein paar Tage später zugeschickt wurden, waren positiv. Trotzdem erschien eine weitere Woche später auf einer Liste von Novespace neben meinem Namen: „Documents to be reviewed by a CEV medical committee“ anstatt eines OK wie bei den anderen. Direkt am nächsten Tag rief mich der Arzt vom DLR an: Die Urin- und Blutwerte müssten ein zweites Mal genommen werden, sie wären nicht 100 % okay gewesen. Aber auch diese zweiten Daten änderten nichts am Status auf der Liste. Und auch nicht nach mehreren Aktualisierungen. Langsam nervös werdend, begann ich E-Mails zu schreiben, um herauszufinden, was das Problem war. Doch als Antwort kam nur die Aufforderung, mich zu gedulden. An meinem Status änderte sich auch weiterhin nichts. Auf der letzten Liste vor dem Flug war ich die einzige Person ohne grünes Licht der Ärzte.

Jetzt wollten wir nicht länger warten und schrieben Frederic noch eine dringliche E-Mail. Des Rätsels Lösung kam ein paar Tage später: Die zweiten Tests wären nie bei Novespace angekommen. Nachdem dies erkannt war, for-

derte Frederic die Daten erneut an – und siehe da, alles war okay und ich durfte fliegen! Diese Nachricht erreichte mich genau an meinem Geburtstag – eine Woche vor der Abfahrt nach Bordeaux!

Endlich schwerelos!

In Bordeaux angekommen, war schließlich alles okay: Wir kamen praktisch problemlos durch die letzten Sicherheitschecks und durften als eines der ersten Teams unser Experiment verladen.

Zunächst stand der Eingewöhnungsflug mit fünf Parabeln an, die wir angeschnallt auf unseren Sitzen erlebten. Zuvor hatten wir den Tipp erhalten, wir sollten morgens normal frühstücken, aber was ist normal? Normale Menge, normales Essen? Im Studentenwohnheim gab es sowieso nur seltsame Sachen zu essen. Alle Teams versuchten krampfhaft, nicht aufgeregt zu sein. Aber das ist genauso lustig wie das altbekannte Spiel: Es ist nicht erlaubt, an rosa Känguruhs zu denken. Na? So stiegen wir mit einem halbwegs flauen Magen in den Flieger ... Sebastian hatte eine unserer

Ersatzproben lose in der Hand dabei. Vielleicht war das keine so gute Idee. Während der Schwerelosigkeit machte er mehrere Aufnahmen mit seiner Kamera, die wir uns später in Ruhe anguckten. Und auf diesen Bildern sahen wir sehr viele kleine Kügelchen aus Ferrofluid, die die ganze Probe trüb durchzogen. Im ersten Moment waren wir schockiert, aber nach einmal tief Luftholen kamen die rationalen Gedanken wieder. Offenbar hatte Sebastian das Gefäß zu sehr in seiner Hand geschüttelt. Dies bestätigte sich in den zwei Experimentierflügen, in denen sich das Ferrofluid wie erwartet verhielt.

Während des Eingewöhnungsflugs mussten wir uns nicht viel Gedanken machen – wir waren ja angeschnallt. Beim ersten Experimentierflug, an dem Anne und Sebastian teilnahmen, kam Anne dann überraschend schnell in den Genuss der Schwerelosigkeit. Konzentriert wartete sie die erste Parabel ab und setzte sich nach dem Pull-up auf. „Ich startete das Programm durch den obligatorischen Knopfdruck und schon schoss ich mit ordentlichem

Die Physik der Ferrofluide

Ferrofluide sind kolloidale Lösungen aus nanometergroßen magnetisierbaren Partikeln und einer Trägerflüssigkeit. Die 5 bis 10 nm großen Teilchen bestehen gewöhnlich aus Eisen, Magnetit oder Kobalt. Eine polymere Oberflächenbeschichtung der Teilchen stabilisiert das Fluid: Selbst in extrem starken Magnetfeldern behält das Fluid nun seine Struktur bei, ohne dass sich z. B. die festen Teilchen aneinander anlagern oder sich von der Flüssigkeit als Phase abscheiden. Dass sich das Fließverhalten von Ferrofluiden durch Magnetfelder variieren lässt und dass sich die Flüssigkeit auf Knopfdruck in eine stabile Masse verwandelt, wird heute z. B. Festplatten, Lautsprechern, Dichtungen und Elektromotoren angewendet.

Unter Einfluss der Schwerkraft wird eine Schicht Ferrofluid in einem konstanten vertikalen Magnetfeld B durch die Energiedichte

$$E[h(x, y)] = \frac{\rho g}{2} h^2 + \sigma \sqrt{1 + (\partial_x h(x, y))^2 + (\partial_y h(x, y))^2} - \int_0^h dz B \frac{\mu_r - 1}{2} H_{FF}(x, y, z)$$

charakterisiert, wobei ρ , μ_r und σ die Dichte, relative Permeabilität und die Oberflächenspannung des Ferrofluids sind, $h(x, y)$ ist die lokale Höhe und $H_{FF}(x, y, z)$ das magnetische Feld in Anwesenheit des Ferrofluids. Die ein-

zelnen Terme entsprechen jeweils der hydrostatischen, der Oberflächen- und der magnetischen Energie. In Anwesenheit eines äußeren Magnetfeldes richten sich die magnetisierbaren Partikel des Ferrofluids aus, und das Oberflächenprofil des Ferrofluids weicht von einer flachen Oberfläche ab; mit zunehmender Krümmung wächst die Oberflächenenergie, der Höhenzuwachs bewirkt einen Anstieg der hydrostatischen Energie und eine Verringerung der magnetischen Energie.

Für Felder größer als eine kritische Feldstärke B_{crit} wachsen Oberflächenstörungen exponentiell [1]. Es bilden sich die sog. Rosensweig-Instabilitäten [2]. In linearer Theorie kann man das kritische Magnetfeld und die Wellenlänge der Störungen eingrenzen [1, 3]:

$$\lambda \propto \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta \rho g}} \quad \text{und} \quad B_{crit}^2 \propto \sqrt{\sigma \Delta \rho g}$$

Zahlreiche Experimente zum Einfluss von externem Magnetfeld, Dichte und Oberflächenspannung auf das Verhalten von Ferrofluiden unter Gravitation stimmen gut mit den Voraussetzungen der linearen Theorie überein. Die Abhängigkeit von der Gravitation ist weit weniger genau untersucht [3].

- [1] C. Flament et al., Phys. Rev. E **53**, 4801 (1996)
- [2] M. D. Cowley und R. E. Rosensweig, J. Fluid Mech. **30**, 671 (1967)
- [3] D. R. Pettit und H. R. Brand, Phys. Lett. A **159**, 55 (1991)

2) Weitere Informationen finden sich auf www.ferrofluids.de

Tempo Richtung Decke“, erinnert sie sich, „ein bißchen hilflos, aber fasziniert von der Situation wurde ich, vollkommen frei wie ich nun war, zum Glück von einem anderen Mitfliegenden wieder auf den Boden zurückgeholt, gerade rechtzeitig vor dem Pull-out.“

Ansonsten lief der Flug, insbesondere für das Experiment, problemlos und wir konnten uns über ein komplettes Datenset von 31 Parabeln freuen. Nach einer ersten Sichtung der Daten am gleichen Abend entschieden wir uns, die Computerprogramme zur Magnetfeldansteuerung zu ändern und dann auf die interessantesten Konfigurationen auszurichten.

Nachdem Elisabeth und ich beim zweiten Flug auch das eingangs geschilderte Problem mit der Kamera gemeistert hatten, gingen die letzten Tage der Kampagne in Bordeaux schneller vorbei als wir uns wünschten. Zurück gekommen sind wir mit reicher Beute: sehr viele Erfahrungen und 15 Stunden Videobänder. Die erste visuelle Analyse der Videos zeigt mehrere interessante Aspekte im Vergleich zu Aufnahmen bei normaler Schwerkraft: Zunächst scheint nur die Stärke des Magnetfeldes für die Form des Ferrofluids verantwortlich zu sein, nicht die Geschwindigkeit seiner Veränderung. Unsere Erwartung, dass das Ferrofluid bereits auf kleinere Feldstärken als bei Schwerkraft reagiert, erwies sich als richtig – und somit hatten wir die richtigen Feldprogramme vorprogrammiert. In unseren 1-g-Tests bildeten sich Rosensweig-Instabilitäten ab ca. 60 Gauß, die bis zum Erreichen einer konstanten Endgröße ab 400–1200 Gauß wachen. Intuitiv erwartet, aber trotzdem angenehm zu sehen, war, dass sich unser Ferrofluid in Schwerelosigkeit ohne Magnetfeld zu einer Kugel zusammenzog. Unter Mikrogravitation können wir keine Rosensweig-Instabilitäten feststellen, stattdessen rufen schon kleinste Feldstärken von ca. 6 Gauß sichtbare Verformungen hervor. (Zum Vergleich: Bei Schwerkraft sind dazu ca. 50 Gauß nötig.) Das Ferrofluid verformt sich zu einem Ellipsoid, dessen Exzentrizität bei wachsender Feldstärke steigt. Die Abwesenheit der Rosensweig-Instabilitäten in unserem Experiment beruht vermutlich auf der um etwa einen Faktor 10 größeren Wellenlänge der Störungen in Mikrogravitation, die sich somit nicht mehr

vollständig in unserem Testgefäß ausbreiten kann.

Im Rahmen der quantitativen Analyse heißt es nun, das Filmmaterial auf wenige Zahlen Physik zu reduzieren. Der erste Schritt ist Fleißarbeit und besteht darin, die zeitabhängigen Koordinaten des Ferrofluids aus dem Film zu gewinnen. Für jedes Magnetfeldprogramm müssen wir hierzu zunächst beide Videoprojektionen vom Flug (0 g) mit den Vergleichssequenzen vom Boden (1 g) synchronisieren und auslesen. Um das Ferrofluid zu identifizieren, haben wir zuerst Lichtreflexe und Kratzer mit einer flat-fielding-Technik maskiert und die Randkurven des Ferrofluids extrahiert. Dies liefert ein 3D-Modell des Ferrofluids, parametrisiert durch 1600 Datenpunkte pro Bild. Da die Ferrofluidausdehnung nur von Magnetfeldstärke und Oberflächenspannung abhängt, lässt sich aus den gemessenen Oberflächen die Magnetisierung des Ferrofluids als Funktion des äußeren Feldes berechnen. Daraus wollen wir als ein Ziel unserer Auswertung eine Hysterese-Kurve ableiten.

Die Koordination der Auswertung muss gut geplant sein, da wir just dieses Semester alle im Ausland sind. Verteilt über den halben Globus in vier verschiedenen Zeitzonen ist dank Internet und geschickter Aufgabenverteilung aber fast alles machbar. Nachdem wir durch unsere primäre Datenreduktion eine Basis geschaffen haben, sind wir sehr gespannt, was wir aus dem Ferrofluid herausholen können!²⁾

*

Danksagung

Unser Dank geht an Prof. Maier und Dr. Peithmann für ihre Unterstützung, endlose Geduld und Begeisterung. Weiterhin danken wir Siegfried Hinderlich, Michael Kortmann, Dr. Mertler, Herrn Moritz, den Mitgliedern der Feinmechanik- und Elektronikwerkstatt des Helmholtz-Instituts für Strahlen- und Kernphysik für die Unterstützung bei unserem Experiment und unseren Sponsoren Bosch, FerroTec, Panasonic, Foto Brell, dem Deutschen Museum Bonn, der Studienstiftung des deutschen Volkes und der Universität Bonn. Nicht zu vergessen sind Elisabeth Celton, Frederic Gai, Philippe Willekens und allen anderen bei Novespace und ESA, die uns das alles erst ermöglicht haben!