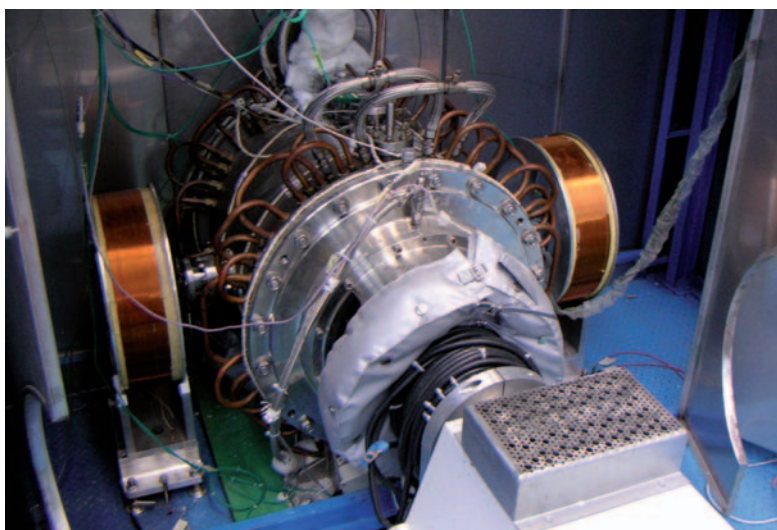


■ Viel Wirbel im Natrium

Ein französisches Experiment zeigt, wie eine turbulente Strömung in flüssigem Natrium ein Magnetfeld erzeugen kann.

Nicht nur die Erde, sondern auch die meisten anderen Planeten, die Sonne sowie Sterne verschiedener Sternklassen erzeugen ihr eigenes Magnetfeld. Wie diese Felder entstehen, ist in vielerlei Hinsicht noch nicht verstanden. Der heutigen Überzeugung zufolge ist dafür ein „Dynamo“ verantwortlich, der kinetische Energie eines sich bewegenden, elektrisch leitfähigen, aber auch elektrisch neutralen Fluids in magnetische Energie umwandelt [1]. Bei der Erde ist dieses Fluid der flüssige, eisenhaltige Erdkern. Insbesondere Konvektion treibt die Bewegung an, wobei die Dichteunterschiede im Fluid durch Variationen in der Temperatur oder der chemischen Zusammensetzung entstehen können.

Zahlreiche numerische Simulationen wurden durchgeführt, um diese Vorstellungen zu bestätigen. Da die Bewegung in den Himmelskörpern jedoch viel zu turbulent ist, als dass man jeden einzelnen Wirbel in einer Simulation auflösen könnte, sind diese nur für Parameter möglich, die weit entfernt sind von ihren tatsächlichen Werten in der Erde oder gar der Sonne. Grundsätzlich sind daher in den Simulationen Rotationsrate und Viskosität zu klein, die elektrische Leitfähigkeit hingegen zu groß



A. Tilgner

Rund 60 Zentimeter beträgt der Durchmesser des Dynamoexperiments, bei dem flüssiges Natrium vom Turbinenschaufeln angetrieben wird.

gewählt, sodass Experimente die Simulationen ergänzen müssen.

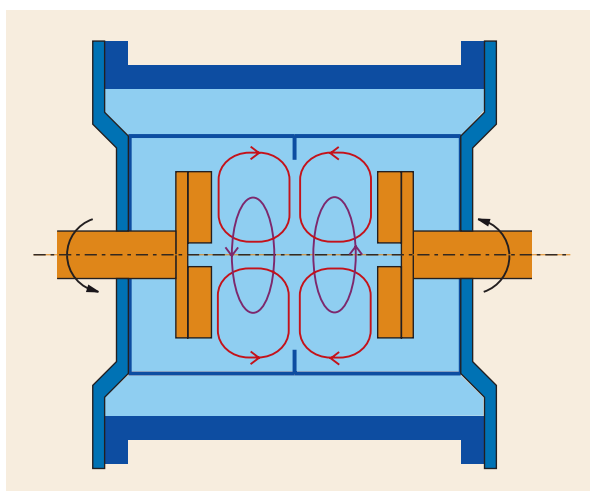
Natrium eignet sich dafür besonders, da es sehr gut elektrisch leitet und daher ein Magnetfeld leichter entstehen kann als etwa mit Quecksilber oder Gallium. Generell induziert ein Magnetfeld in einem bewegten Leiter Ströme, die ihrerseits ein Magnetfeld erzeugen. Andererseits tritt aufgrund des Ohmschen Widerstandes des Leiters Dissipation auf. Die magnetische Reynolds-Zahl Rm beschreibt das Verhältnis von Induktion zu Dissipation und muss einen kritischen Wert überschreiten, damit ein Magnetfeld entstehen kann. Leider ist es nicht möglich, die Experimente so zu entwerfen, dass sich damit Rm -Werte erreichen lassen, die um Größenordnungen über dem kritischen Wert liegen. Tatsächlich sind die Experimente knapp bemessen, weil ihr technischer Aufwand groß ist. Da die Rechnungen in der Planungsphase notwendigerweise mit Näherungen behaftet sind, ist der Bau dieser Experimente immer eine Zitterpartie.

Mehr Freiheit für das Natrium

Erst Ende 1999 ist es in zwei Experimenten in Karlsruhe [2] bzw. Riga [3] unabhängig voneinander gelungen, den Dynamoeffekt nachzuwei-

sen. Da das Natrium in beiden Experimenten mechanisch getrieben wurde und aufgrund der Geometrie der Experimente ist ihr Zusammenhang mit einem Planetenkern nicht offensichtlich. Trotzdem sind die Ergebnisse für die Geophysik nützlich [4]. Jenseits der Geo- oder Astrophysik ist der Dynamoeffekt auch von grundsätzlichem Interesse, da er mit nichtlinearer Dynamik, Strukturbildung oder Selbstorganisation zusammenhängt. Bei den für den Dynamoeffekt erforderlichen Rm ist die Strömung des Natriums nämlich immer sehr turbulent (bei hydrodynamischen Reynolds-Zahlen von etwa 10^6 oder 10^7). Welchen Beitrag die vielen ungeordneten Wirbel zur Bildung des Magnetfeldes leisten, und wie sie sich neu organisieren, wenn dieses entsteht, ist eine zentrale Frage der Dynamoforschung.

Zu dieser Frage haben die Experimente in Karlsruhe und Riga nur wenig beigetragen, weil in ihnen das Natrium durch ein oder mehrere Rohre gepumpt wurde, deren Durchmesser klein war gegenüber der Gesamtgröße des Experiments, sodass nur Wirbel entstehen konnten, die in diese Rohre hinein passten. Dies vereinfachte zwar die Auslegung der Experimente, beschnitt aber eben auch die Dy-



Gegenläufige Turbinenschaufeln treiben das flüssige Natrium in dem französischen Dynamoexperiment an, bei dem ein Magnetfeld erzeugt wurde (nach [5]).

namik des Systems und hielt die Turbulenz klein. Etwa zu dem Zeitpunkt, zu dem die Experimente in Karlsruhe und Riga erfolgreich waren, begann die Arbeit an neuen Apparaturen, in denen das Natrium mehr Freiheit haben sollte. Sobald ein Magnetfeld entsteht und Ströme durch das Natrium fließen, wirkt die Lorentz-Kraft auf das Natrium und verändert die Strömung. Interne Wände, die es ja in einem Himmelskörper auch nicht gibt, sollten diese Veränderung möglichst wenig eingeschränken. Drei ähnliche Aufbauten sind dabei entstanden: in Madison (Wisconsin), College Park (Maryland) und in Cadarache (Frankreich). Nach etwa acht Jahren Arbeit ist es der französischen Gruppe jetzt gelungen, ihr Experiment so weit zu verfeinern, dass es ein eigenes Magnetfeld erregt [5]. Das Natrium befindet sich dabei in einem Zylinder, in dem ein innerer, koaxialer Zylinder eingefügt ist. An den Seiten des Innenzylinders rotieren zwei mit Turbinenschaufeln versehene Scheiben im Gegensinn (Abb. links unten), angetrieben durch Motoren mit einer Gesamtleistung von 300 kW. Diese Rotation erzeugt eine Scherschicht im Natrium in der Äquatorialebene des Zylinders. Zusätzlich bewegt sich das Natrium aufgrund der Zentrifugalkraft entlang der Scheiben radial nach außen, strömt an den Zylinderwänden zur Äquatorialebene und längs der Zylinderachse wieder zurück zu den Scheiben. Der Innenzylinder ist also der eigentliche Dynamo. Das ruhende Natrium im Außenzylinder wirkt lediglich als elektrisch leitfähige Schicht, sodass die elektrischen Ströme nicht im Innenzylinder gefangen sind. Diese Geometrie senkt das kritische Rm ab.

Die beobachteten Magnetfelder übertreffen die Stärke des lokalen Erdmagnetfeldes um mehr als den Faktor 100. Die Autoren geben sich Mühe, einem offensichtlichen Kritikpunkt zu begegnen: Die beiden Rotoren bestehen aus Eisen, während alle anderen Teile aus Kupfer oder rostfreiem Stahl gebaut sind. Eisen möchte man wegen seiner magnetischen Eigenschaften eigentlich in keinem Dynamo-

experiment sehen. Die Autoren begründen, dass Remanenz und permanente Magnetisierung der Rotoren keine Rolle spielen. Sinn und Zweck des Materials mit hoher Permeabilität besteht darin, die Randbedingungen für das Magnetfeld zu ändern, sodass es eine Form annimmt, die den Dynamoprozess erleichtert (ähnlich wie das ruhende Natrium im Außenzylinder).

Wie zu erwarten unterscheidet sich das neue Experiment von den beiden ersten durch die reichhaltige zeitliche Dynamik des Magnetfeldes. Nun steht einige Arbeit an, um das Verhalten des Dynamos bei verschiedenen Parametern zu erkunden. In einer ersten Nachfolgearbeit [6] berichtet dieselbe Gruppe über zufällige Polumkehrungen des Magnetfeldes, die auftreten können, wenn die beiden Rotoren sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten drehen. Auch das Erdmagnetfeld hat sich in der Vergangenheit in unregelmäßigen Zeitabständen umgepolt.

Der Erfolg in Cadarache wird ein Ansporn zu neuen Experimenten sein, die wie Sterne und Planeten rotieren. Die Corioliskraft hat entscheidende, häufig der Intuition widersprechende Effekte auf die Bewegung eines Fluids. Trotz der erforderlichen technischen Anstrengungen und der langen Zeiten, die von Planung bis Durchführung der Experimente vergehen, ist kein Ende der experimentellen Arbeiten zum Dynamoeffekt abzusehen. Dafür ist die Palette an dynamischen Phänomenen, die es zu entdecken gilt, einfach zu reichhaltig.

Andreas Tilgner

- [1] U. Christensen und A. Tilgner, Physik Journal Oktober 2002, S. 41
- [2] R. Stieglitz und U. Müller, Phys. Fluids **13**, 561 (2001)
- [3] A. Gailitis et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 4365 (2000)
- [4] U. R. Christensen und A. Tilgner, Nature **429**, 169 (2004)
- [5] R. Monchaux et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 044502 (2007)
- [6] M. Berhanu et al., Europhys. Lett. **77**, 59001 (2007)

Prof. Dr. Andreas Tilgner, Institut für Geophysik, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen