

DISS. ETH NO. 22231

**Experimental and numerical study of
electrically-driven MHD flow**

A dissertation submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
ZACHARIAS STELZER

Dipl.-Geophys., Karlsruhe Institute of Technology, Germany

born on 28.07.1984

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Andrew Jackson
Jérôme Noir
David Cébron
Thierry Alboussière

2014

Abstract

Flows of electrically conducting fluids interact with magnetic fields in various ways. On the one hand, they are influenced by an imposed magnetic field as exploited in engineering applications, e.g. pumping and flow control in metallurgy. On the other hand, flows of electrically conducting fluids create their own magnetic field which may modify or even generate the main field as in the case of geo- and astrophysical dynamos. These interactions of flow and magnetic fields are studied in the area of magnetohydrodynamics (MHD).

This dissertation is concerned with two topics from the different areas of MHD mentioned above. The first topic is the flow of liquid metal in a modified cylindrical annulus which is driven by the Lorentz force arising from an applied radial electrical current within an imposed axial magnetic field. The feedback of the flow on the magnetic field is negligible. Our ZUCCHINI (ZUrich Cylindrical CHannel INstability Investigation) setup is characterized by an inner electrode that protrudes from the inner cylinder and gives rise to a free Shercliff layer parallel to the magnetic field. We study the flow in a laboratory experiment, as well as by finite element simulations which allow for complementary information. The liquid GaInSn flow in the experiment is probed by ultrasound Doppler velocimetry and potential difference probes. In this way, we gain insight into the dynamics of different flow regimes, namely the steady base flow (Chapter 3), the instability of the free Shercliff layer in the form of traveling vortices which become container-filling at larger forcing, and finally the transition to turbulence in Hartmann layers at walls perpendicular to the magnetic field (Chapter 4). The 2D3C numerical simulations of the base flow and the linear stability analysis largely recover the dynamics observed in the experiment.

The second topic deals with numerical geodynamo simulations. Despite huge differences in the parameter regime, these simulations are able to produce magnetic fields that are largely similar to the one of the Earth. Hence they are used to infer properties and dynamics of the outer core. This inference relies on two assumptions: firstly the relevant dynamical processes have to be the same in the models and the core, and secondly we need to extract scaling laws which contain the relevant parameters. The latter in essence is a model selection problem which we tackle by using the statistical method of cross-validation (Chapter 5). It turns out that more parameters should be regarded in scaling laws than previously suggested. Especially the non-negligibility of diffusivities has important consequences for the application to Earth's core.

Zusammenfassung

Strömungen von elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten wechselwirken mit Magnetfeldern auf verschiedene Weise. Einerseits werden sie von externen Magnetfeldern beeinflusst, was in industriellen Anwendungen wie beim Pumpen und der Strömungskontrolle in der Metallverarbeitung genutzt wird. Andererseits rufen Strömungen von elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten ihrerseits ein Magnetfeld hervor, welches das externe Feld ändern oder wie im Fall von geo- und astrophysikalischen Dynamoprozessen gar erzeugen kann. Die Wechselwirkung von Strömung und Magnetfeld wird im Forschungsgebiet der Magnetohydrodynamik (MHD) untersucht.

Diese Dissertation befasst sich mit zwei Themen aus den verschiedenen genannten Gebieten der MHD. Das erste ist die Strömung von Flüssigmetall in einem modifizierten zylindrischen Ring, welche durch die Lorentzkraft angetrieben wird, die von einem radialen elektrischen Strom in einem axialen Magnetfeld hervorgerufen wird. Die Rückwirkung der Strömung auf das Magnetfeld ist vernachlässigbar. Unser Aufbau von ZUCCHINI (ZUrich Cylindrical CHannel INstability Investigation) ist dadurch gekennzeichnet, dass die innere Elektrode aus dem inneren Zylinder hervorragt, was zu einer freien Shercliffsschicht parallel zum Magnetfeld führt. Wir untersuchen die Strömung sowohl in einem Laborexperiment als auch mit Finite-Elemente-Simulationen, die komplementäre Informationen liefern. Die Strömung von flüssigem GaInSn im Experiment wird durch Ultraschall-Doppler-Verfahren und Potentialdifferenz-Messungen aufgezeichnet. Auf diese Weise erkunden wir die Dynamik in den verschiedenen Parameterbereichen, im Einzelnen die stationäre Grundströmung (Kapitel 3), die Instabilität der freien Shercliffsschicht in Form von wandernden Wirbeln, die bei höherem Strom das gesamte Behältnis ausfüllen, und schliesslich der Übergang zur Turbulenz in den Hartmannschichten an Wänden senkrecht zum Magnetfeld (Kapitel 4). Die 2D3C-Simulationen der Grundströmung und die lineare Stabilitätsanalyse bestätigen die im Experiment beobachtete Dynamik weitgehend.

Das zweite Thema dreht sich um numerische Simulationen des Geodynamo. Trotz riesiger Unterschiede im Parameterbereich sind diese Simulationen in der Lage, Magnetfelder zu erzeugen, die in vielen Punkten mit dem der Erde übereinstimmen. Daher werden sie dazu benutzt, Eigenschaften und Dynamik des äusseren Erdkerns zu erschliessen. Diese Methode beruht auf zwei Annahmen: Erstens müssen die relevanten Prozesse in den Modellen und im Kern übereinstimmen, zweitens müssen wir Skalierungsgesetze extrahieren, welche die relevanten Parameter enthalten. Letzteres ist im Wesentlichen ein

Modellauswahl-Problem, das wir mit dem Verfahren der Kreuzvalidierung lösen (Kapitel 5). Es stellt sich heraus, dass in Skalierungsgesetzen mehr Parameter berücksichtigt werden müssen als bisher gedacht. Besonders die Notwendigkeit von Diffusivitäten hat wichtige Auswirkungen für die Anwendung auf den Erdkern.