

Lehrerfortbildung, 17. Februar 2006

**Kosmische Magnetfelder
in Theorie und Experiment**

Frank Stefani



Fahrplan

- Von Thales bis Gilbert
- Magnetfelder im Kosmos
- Wie Magnetfelder entstehen: Der Dynamoeffekt
 - Theorie
 - Experimente
- Was Magnetfelder bewirken: Die Magneto-Rotations-Instabilität
 - Theorie
 - Experimente

Von Thales bis Gilbert

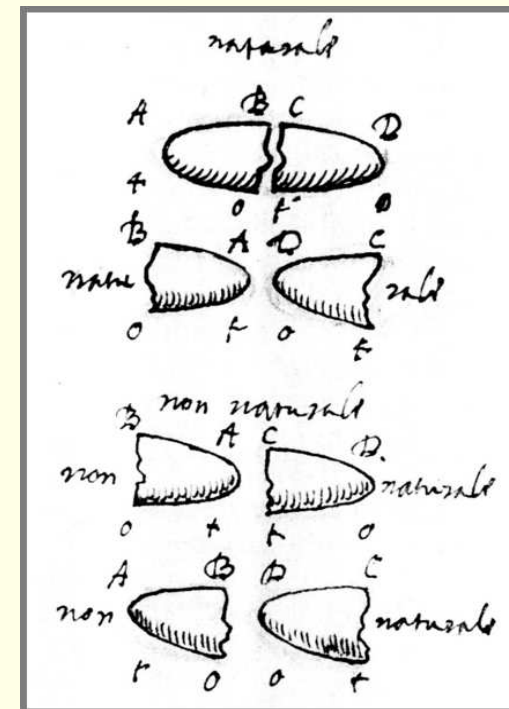
Magnetismus ist seit fast 3000 Jahren bekannt!

- Aristoteles, Über die Seele: " Auch Thales (ca. 640 - 546 v.u.Z.) scheint, nach dem, was man berichtet, die Seele für etwas Bewegungsfähiges aufzufassen, wenn er sagte, der Magneteisenstein habe eine Seele, weil er das Eisen bewege..."
- Chinesen hatten Kompass in Form eines Löffels aus Magneteisenstein (frei drehbar auf einer glatten Fläche)
- Vielleicht stammt aber der erste Kompass aus Veracruz in Mexico (Olmeken, etwa 1000 v.d.Z. !!!)

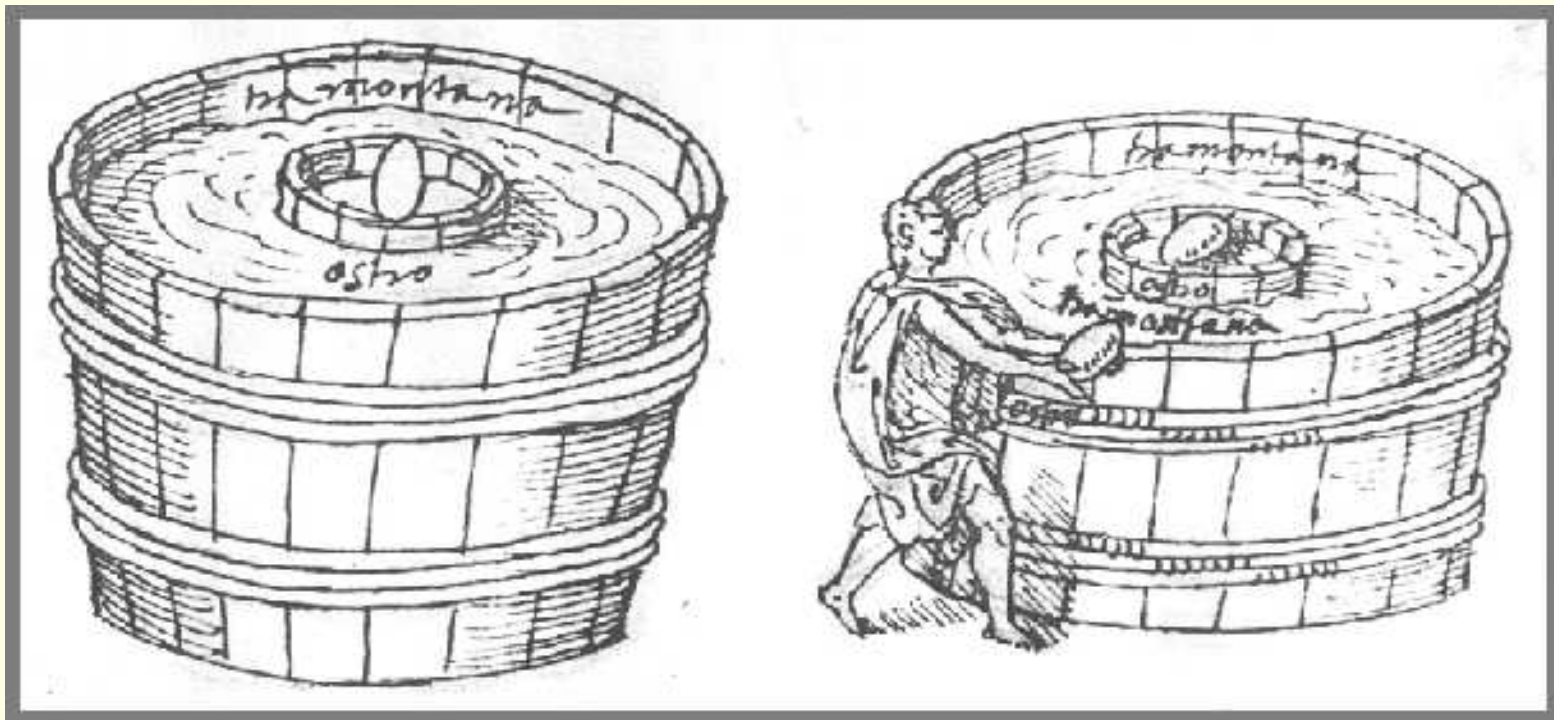
Von Thales bis Gilbert

Petrus Perigrinus (1267 !) beschreibt Experimente mit Magneteisenstein

- "Epistola de Magnete" - Vielleicht das erste "paper" der Experimentalphysik
- Führt den Begriff der "Pole" in die Wissenschaft ein
- Erkennt Anziehung und Abstoßung von ungleichnamigen bzw. gleichnamigen Polen
- Schlägt - ganz nebenbei - ein magnetisches perpetuum mobile vor



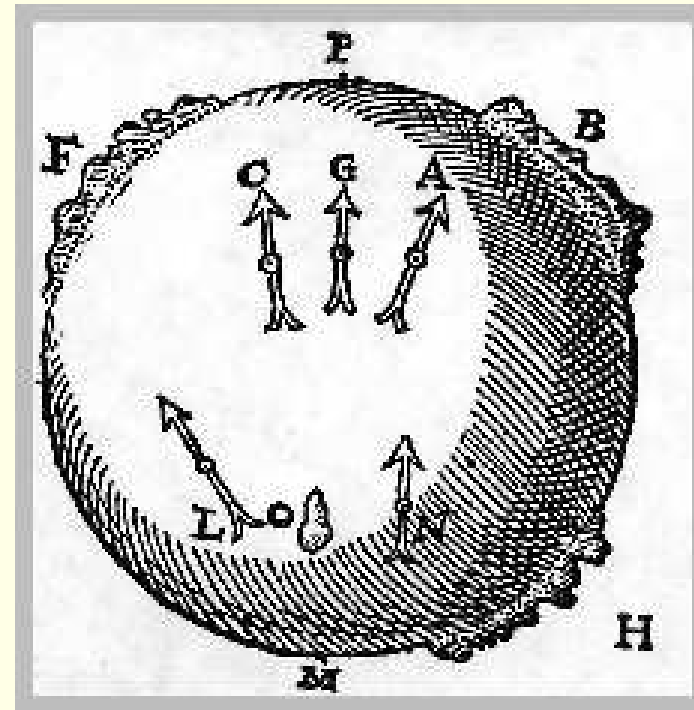
Von Thales bis Gilbert



Von Thales bis Gilbert

William Gilbert: "De Magnete" (1600)

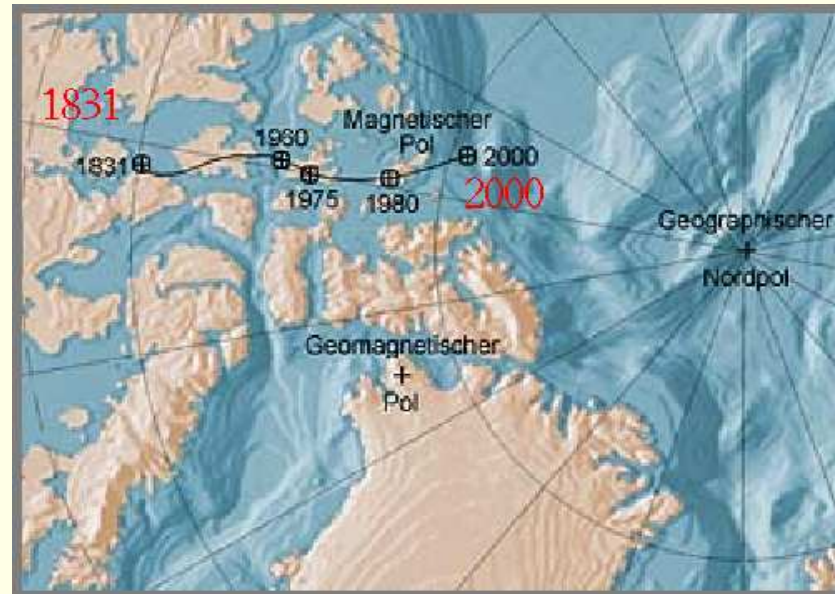
- Experimente an Magnetkugeln
- Erklärt z.B. Deklination durch Kontinentverteilung
- Schlussfolgert messerscharf:
"Die Erde ist eine große Kugel aus Magneteisenstein."



Magnetfelder im Kosmos: Erde

Gilberts Theorie ist genial, plausibel, experimentell gestützt und FALSCH

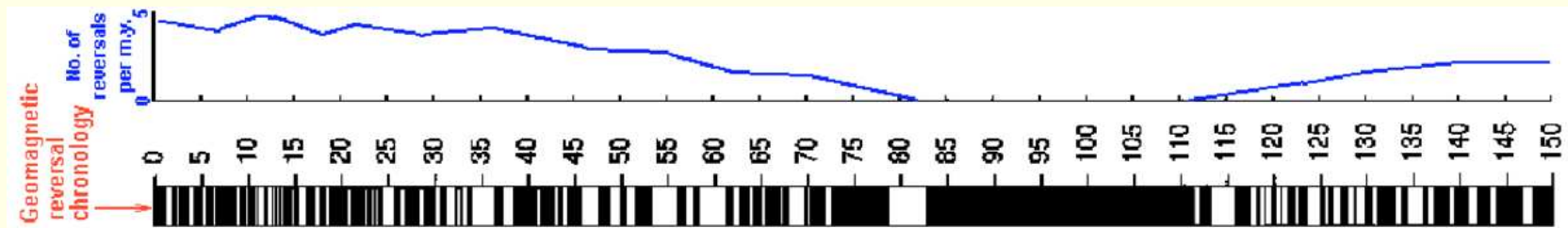
- Gellibrand entdeckte 1635 die zeitliche Änderung der Deklination
- Halley (1692) versuchte noch, die Theorie zu retten, indem er gegeneinander rotierende magnetische Schalen innerhalb der Erde annahm.



Magnetfelder im Kosmos: Erde

Feldumpolungen während der letzten 150 Millionen Jahre

Mittlere Anzahl der Umpolungen pro Millionen Jahre

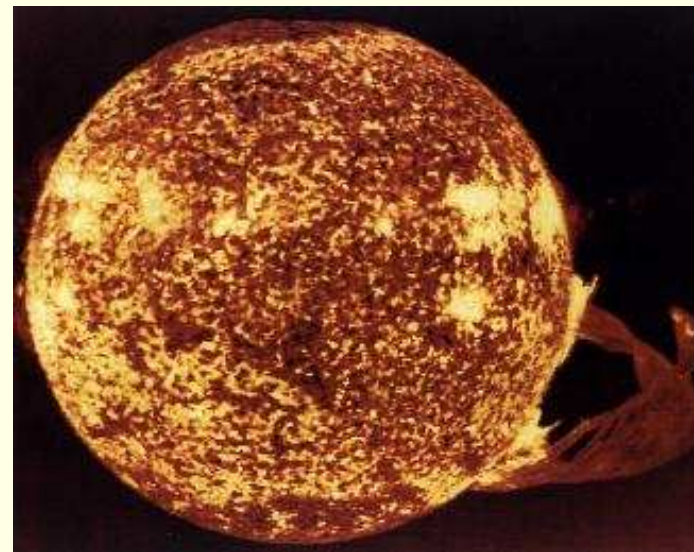


Abfolge normaler (schwarz) und umgedrehter (weiß) Polarität

Magnetfelder im Kosmos: Sonne

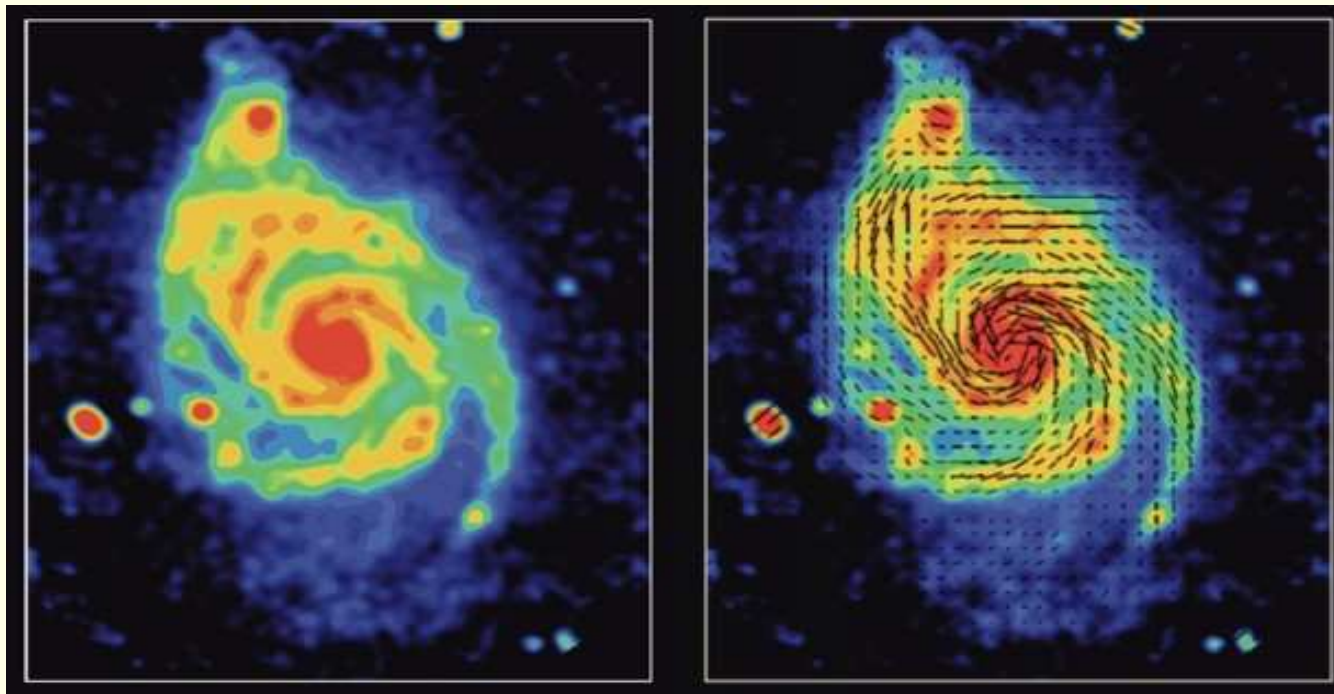
Auch die Sonne produziert Magnetfelder

- Entdeckung des Magnetfeldes in Sonnenflecken durch Hale (1908) war auch Todesstoß für Magneteisenstein-Theorie des Erdmagnetismus
- Larmor (1919) erklärt Existenz des Sonnenmagnetfeldes mit selbsterregtem Dynamo nach Siemens (1867)



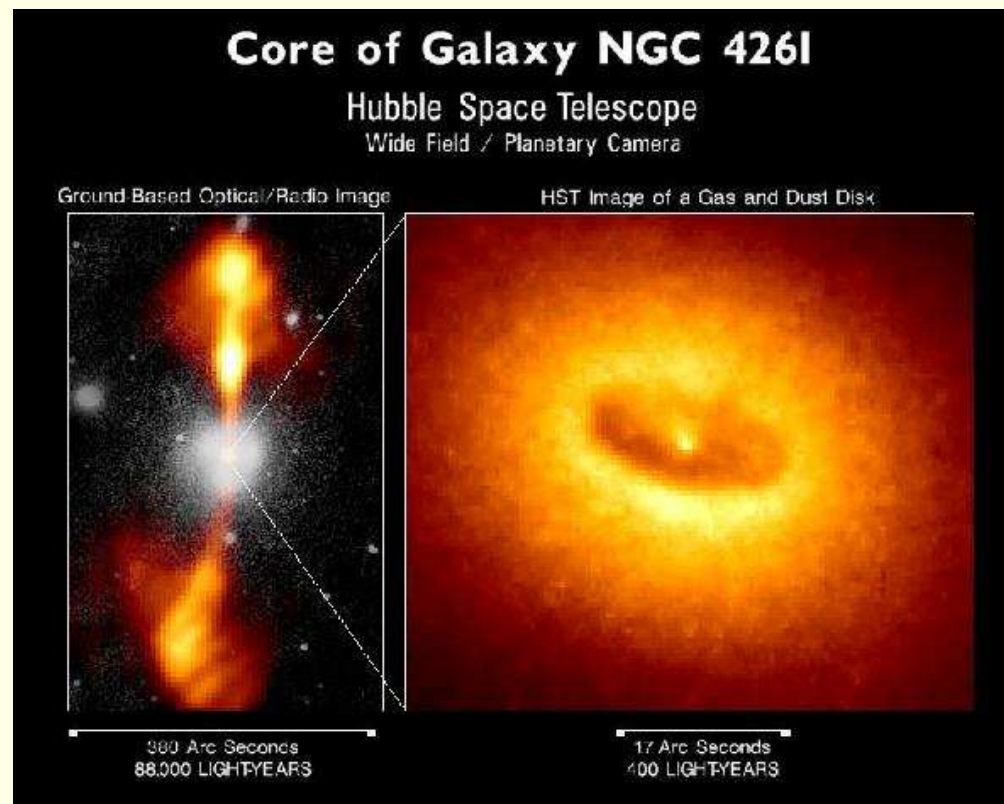
Magnetfelder im Kosmos: Galaxien

Magnetfelder in Galaxien sind meist mit Spiralarmen korreliert



Magnetfelder im Kosmos: "Jets and radio lobes"

- Aktive Galaxienkerne (AGN) emittieren hochenergetische "Jets", die in riesigen "radio lobes" mit gewaltiger magnetischer Feldenergie enden.



Magnetfelder im Kosmos: Größenordnungen

Typische Werte der Magnetfelder im Kosmos

Galaxien	10^{-9} Tesla
Erde	10^{-4} Tesla
Sonnenflecken	0.2 Tesla
Guter Permanentmagnet	1 Tesla
Weiße Zwerge	100 Tesla
Magnetare	10^{11} Tesla !!!

Wie Magnetfelder entstehen: Der Dynamoeffekt

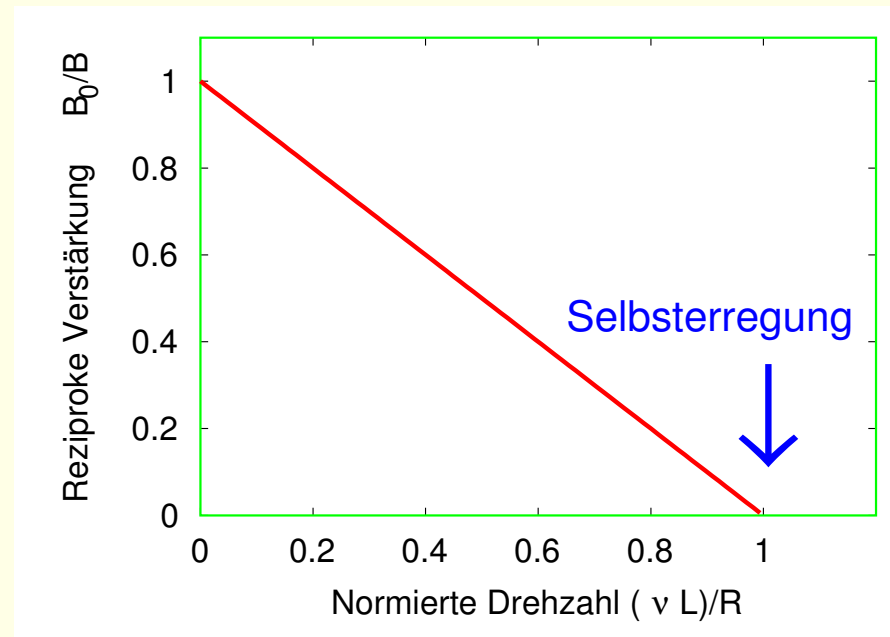
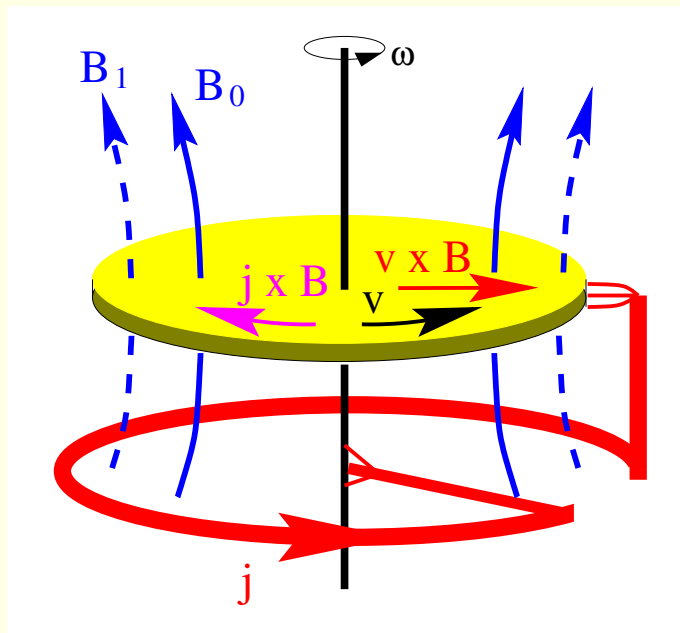
Frage: Wie kann eine Strömung ein Magnetfeld erzeugen?

Antwort: Homogener Dynamoeffekt (Selbsterregung)

in elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten

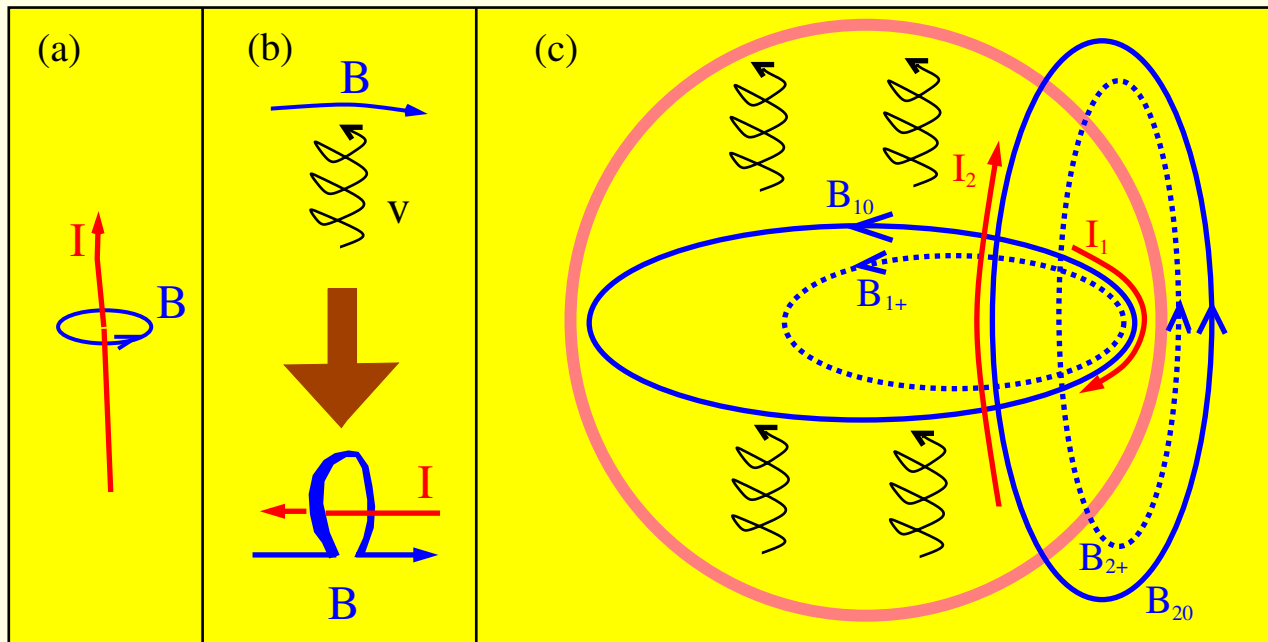
Der Dynamoeffekt: Theorie

Selbsterregung am einfachsten Beispiel: Der Scheibendynamo



Der Dynamoeffekt: Theorie

Rechte-Hand-Regel (a). α -Effekt (b). α^2 -Dynamo (c)



Der Dynamoeffekt: Theorie

\mathbf{j} : elektrische Stromdichte; \mathbf{B} : magnetische Induktion (Magnetfeld)
 \mathbf{E} : elektrisches Feld; \mathbf{v} : Geschwindigkeit des Mediums
 σ : elektrische Leitfähigkeit; μ_0 : magnetische Permeabilität

Ampèresches Gesetz (ohne Verschiebungsstrom): $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{j} + \dot{\mathbf{D}})$

Faradaysches Induktionsgesetz: $\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}}$

Quellenfreiheit des Magnetfelds: $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Ohmsches Gesetz in bewegten Leitern: $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

\Rightarrow Induktionsgleichung: $\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \Delta \mathbf{B} / (\mu_0 \sigma)$

Der Dynamoefekt: Theorie

- Induktionsgleichung beschreibt zwei konkurrierende Effekte:
 - Diffusion (Zerfall) des Magnetfeldes: $\dot{\mathbf{B}} \sim \Delta \mathbf{B} / (\mu_0 \sigma)$
 - Dehnen, Drehen, Falten (Produktion): $\dot{\mathbf{B}} \sim \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$
- Verhältnis von Produktion zu Zerfall \sim magnetische Reynoldszahl

$$Rm := \mu \sigma v L$$

- Rm muss groß genug sein ($Rm > 10$), damit Magnetfeldzerfall durch Magnetfeldproduktion kompensiert werden kann.
Beispiel: $Rm = 10$ heißt für flüssiges Natrium: $vL = 1 \text{ m}^2/\text{s}$

Der Dynamoeffekt: Theorie

- **Kinematisches Regime:** Geschwindigkeit \mathbf{v} wird "eingefroren". Exponentielles Zerfallen oder Anwachsen des Magnetfeldes wird allein durch Induktionsgleichung beschrieben.

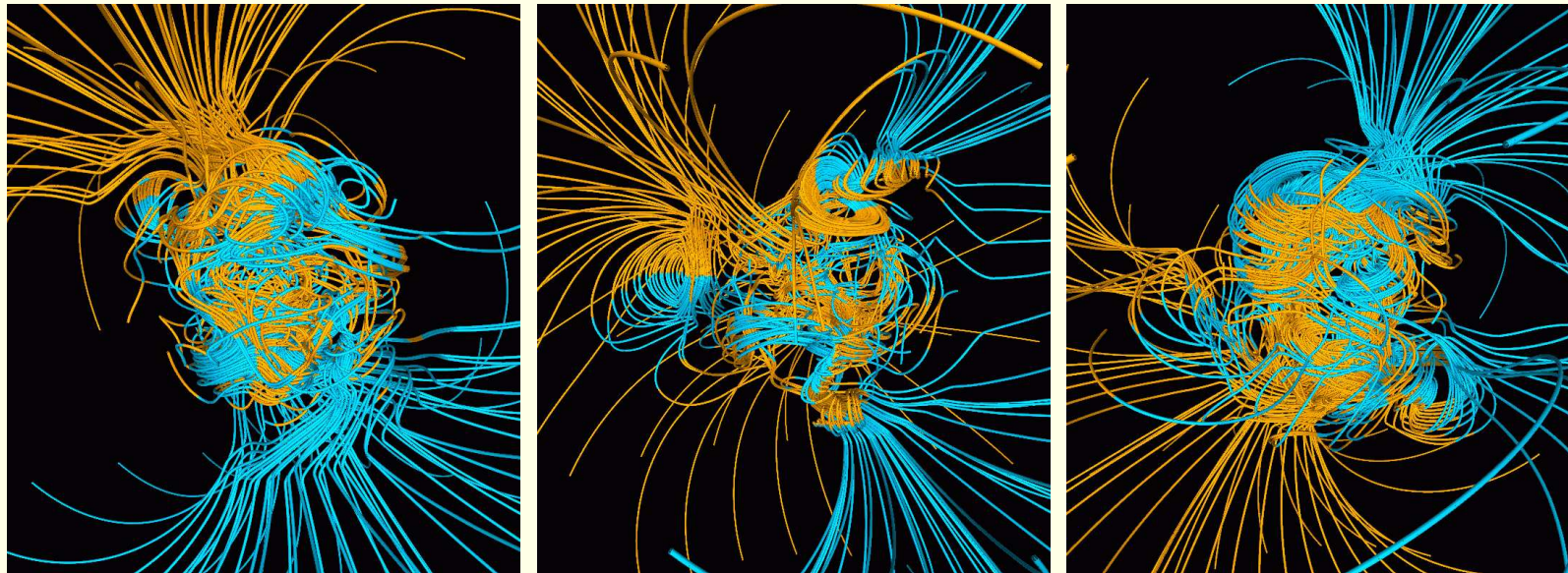
$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \Delta \mathbf{B}$$

- **Sättigungsregime:** Exponentielles Anwachsen wird begrenzt durch Rückwirkung des selbsterregten Magnetfeldes auf die Geschwindigkeit (Lenzsche Regel). Navier-Stokes-Gleichung muss simultan gelöst werden.

$$\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{1}{\mu_0 \rho} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{f}_{extern}$$

Der Dynamoeffekt: Theorie

- Roberts and Glatzmaier (1995): Erstmalige Simulation einer Feldumkehr



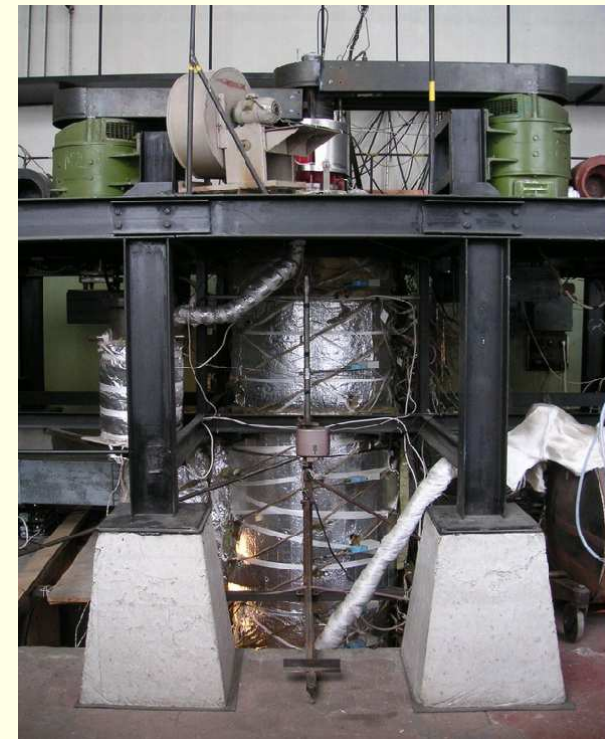
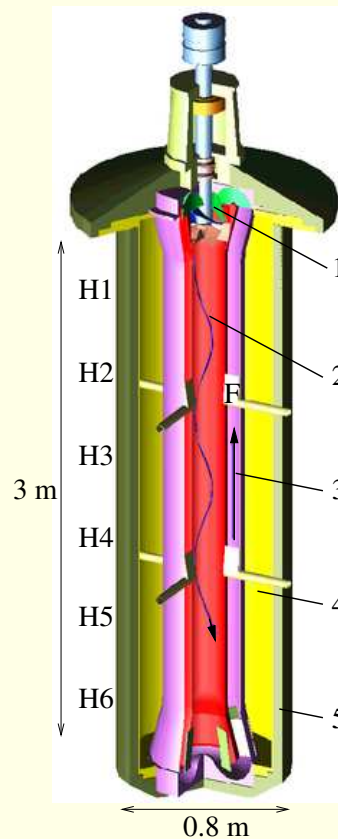
Der Dynamoeffekt: Theorie

Simulationen sind eindrucksvoll, aber...

- Verschiedene Parameter der wirklichen Erde werden bei weitem nicht erreicht.
- Turbulente Strukturen werden nur unzureichend aufgelöst.
- Experimente sind nötig, insbesondere um magnetohydrodynamische Turbulenz zu verstehen.

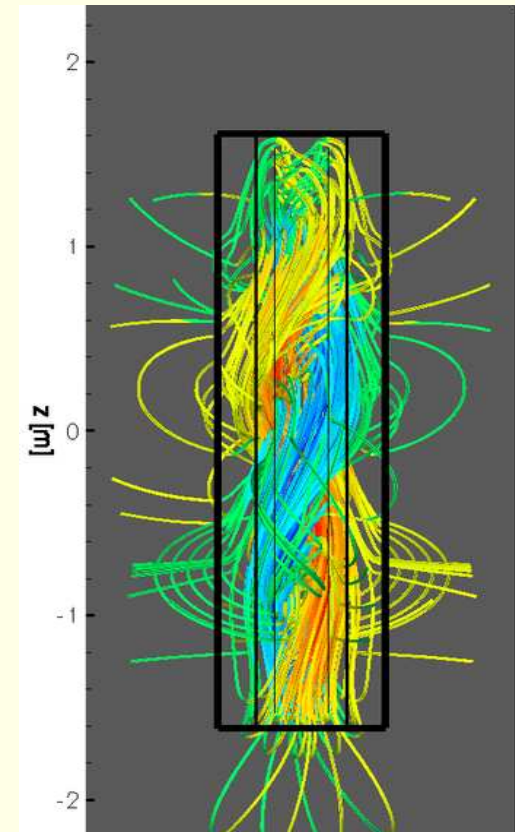
Der Dynamoefekt: Experimente

- Rigaer Dynamoexperiment: 2 m^3 Natrium
- Propeller (1). Spiralförmige Strömung (2). Rückströmung (3). Stehendes Natrium (4).
- Zwei E-Motoren (bis 200 kW) erzeugen Strömung bis 20 m/s.



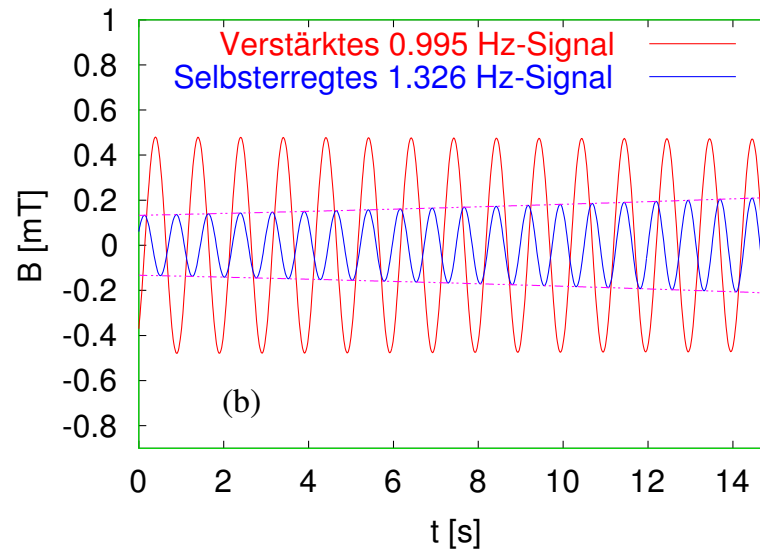
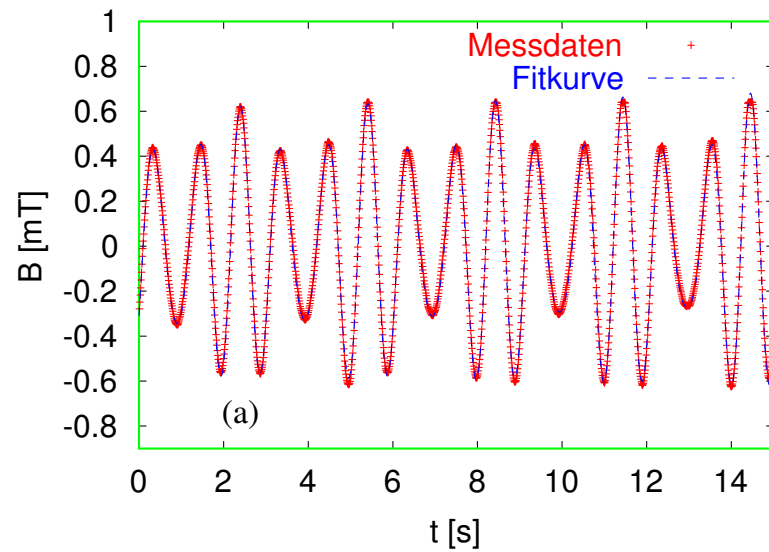
Der Dynamoefekt: Experimente

- **Rigaer Dynamoexperiment: Magnetfeldstruktur.**
- Bei etwa 1900 Umdrehung pro Minute entsteht Magnetfeld
- Magnetfeld rotiert langsam (1-2 Hz) um die Achse.
- Felder bis etwa 200 mT



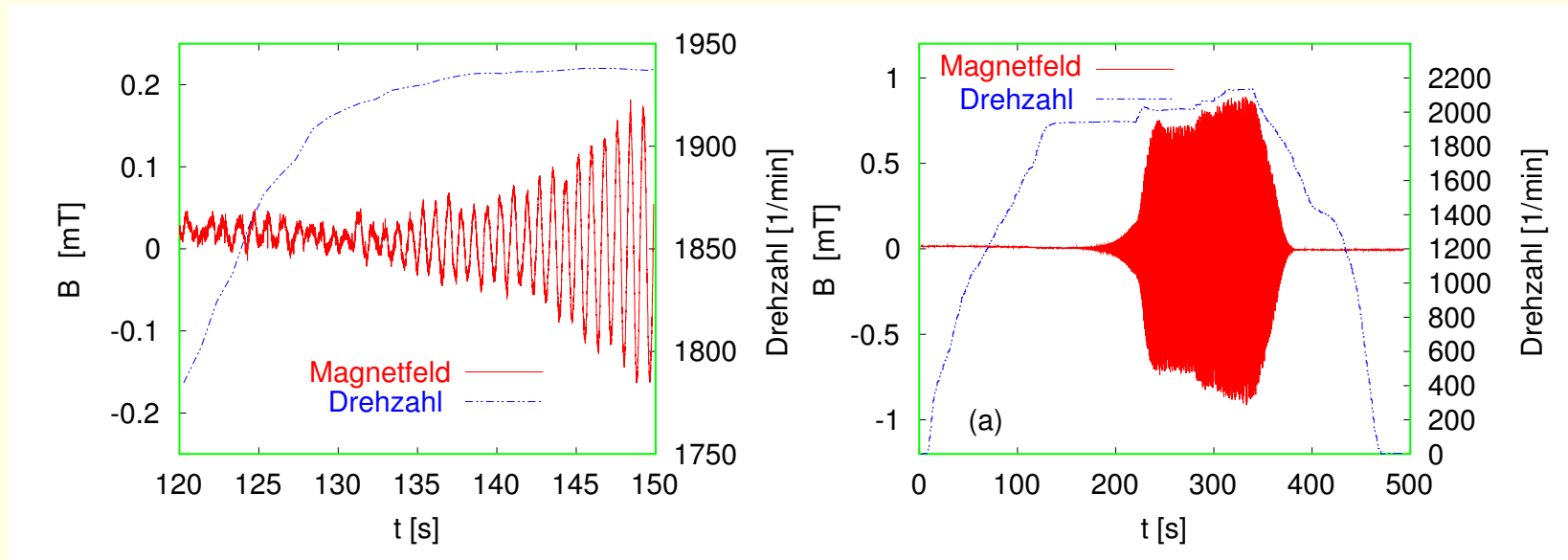
Der Dynamoefekt: Experimente

11. November 1999. Erstmals Selbsterregung nachgewiesen.



Der Dynamoeffekt: Experimente

Sieben weitere Messkampagnen von 2000 bis 2005. Typischer Lauf:



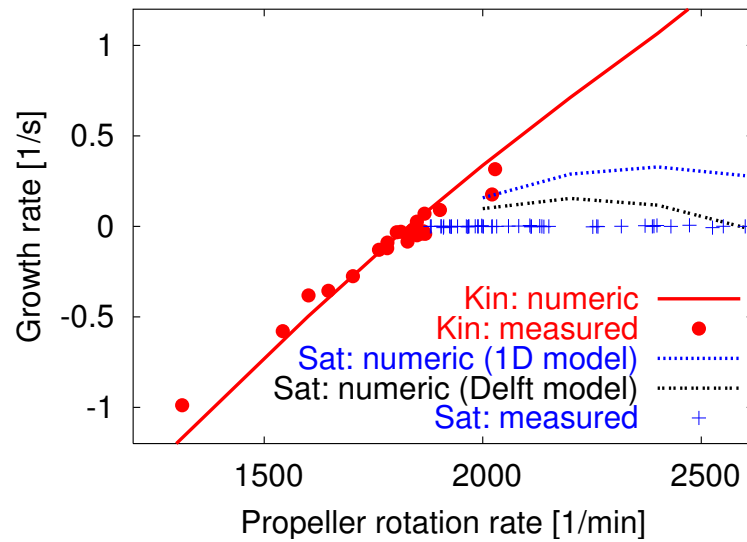
Der Dynamoeffekt: Experimente

Thomas Gundrum beim Installieren einer "Lanze" mit Hallsensoren

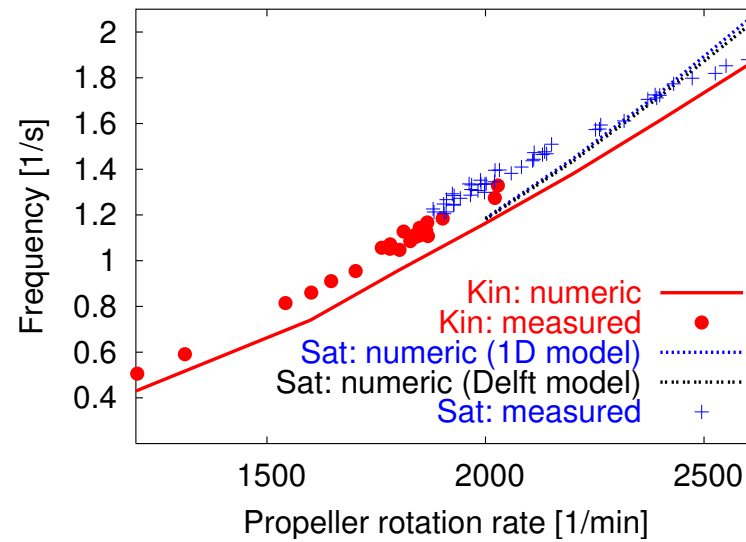


Der Dynamoeffekt: Experimente

Gute Übereinstimmung mit numerischen Vorhersagen.



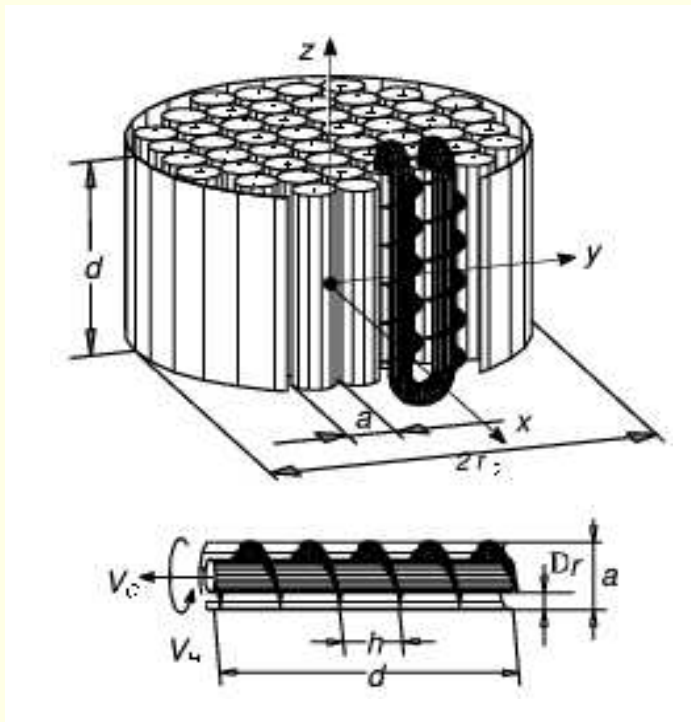
Anwachsrate



Frequenz

Der Dynamoefekt: Experimente

Karlsruher Dynamoexperiment: α^2 -Dynamo mit 52 Spingeneratoren



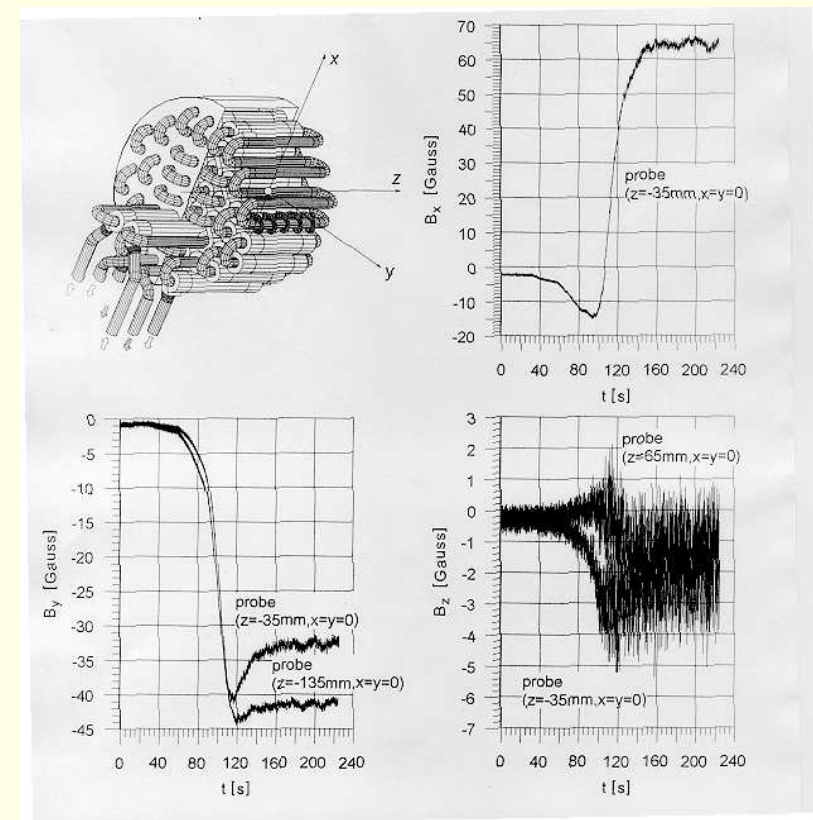
Der Dynamoefekt: Experimente

Karlsruher Dynamoexperiment: Anlage



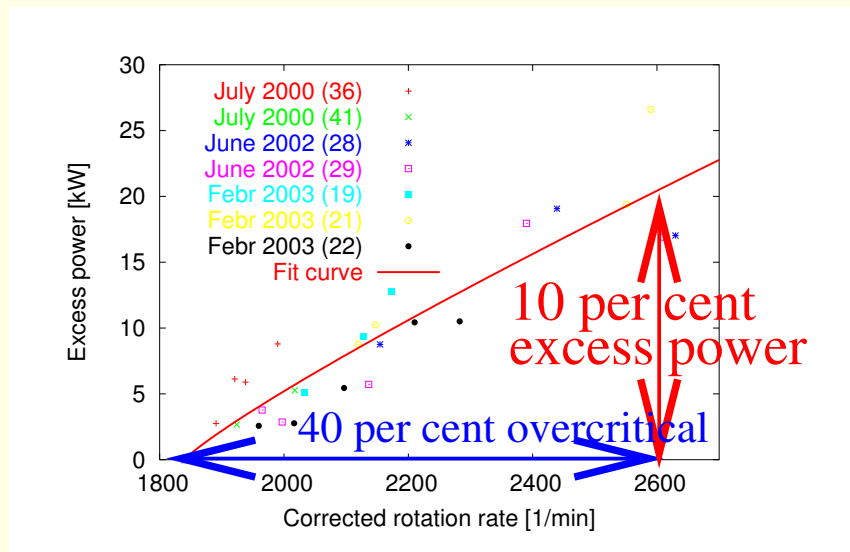
Der Dynamoeffekt: Experimente

- 16. Dezember 1999. Erstmals wird das Sättigungsregime eines homogenen Dynamos erreicht.
- Weitere Messkampagnen bis 2003
- Inzwischen (leider!) abgebaut.

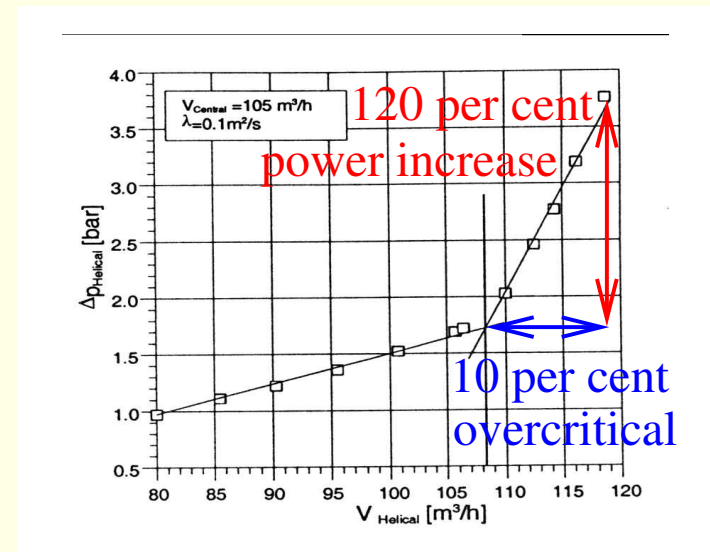


Der Dynamoeffekt: Experimente

Unterschied zwischen Riga und Karlsruhe



Riga: Sättigung beruht hauptsächlich auf Deformation der Strömung (**Flexibler Dynamo**)



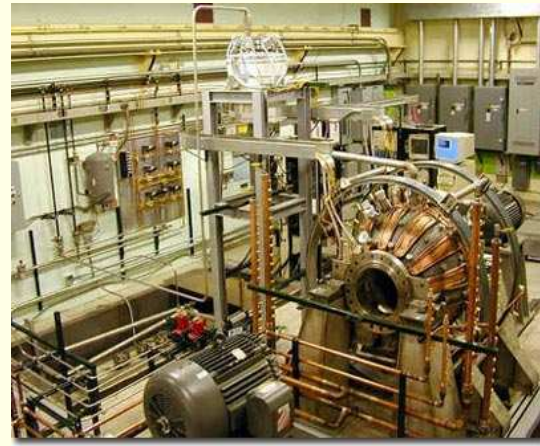
Karlsruhe: Sättigung beruht hauptsächlich auf globalem Druckanstieg (**Starrer Dynamo**)

Der Dynamoeffekt: Experimente

- Geplant (im Bau): verschiedene propellergetriebene Strömungen in Kugeln oder Zylindern (Cadarache, Madison, Grenoble, Maryland, Perm...)



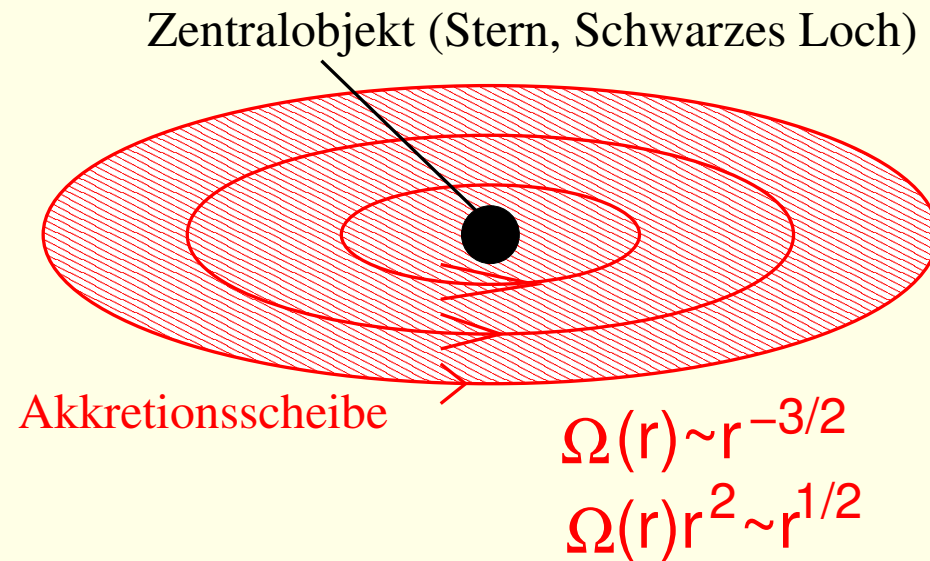
Zylinderexperiment in Cadarache



Kugelexperiment in Madison

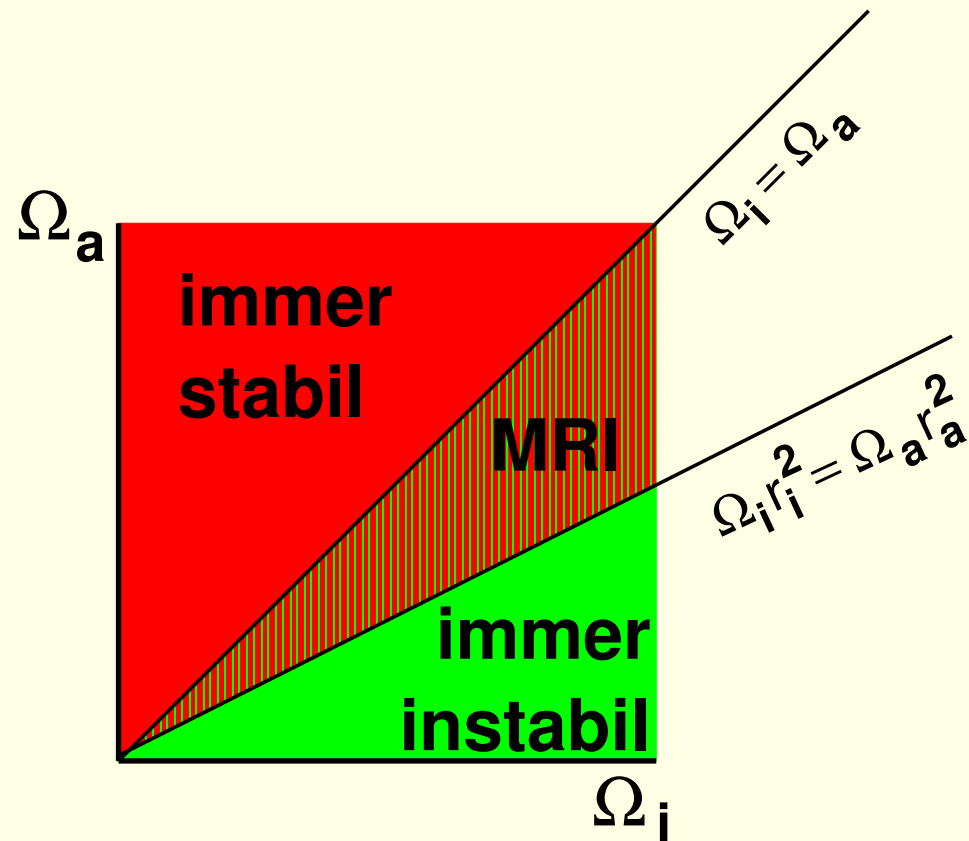
Was Magnetfelder bewirken: Die Magneto-Rotations-Instabilität

- Problem: Wie funktionieren Akkretionsscheiben?
- Erforderlicher Drehimpuls-transport nach außen ist durch molekulare Viskosität nicht erklärbar.
- Turbulenz könnte Drehimpuls-transport erklären.
Aber: Kepler-Rotation ist hydrodynamisch stabil!



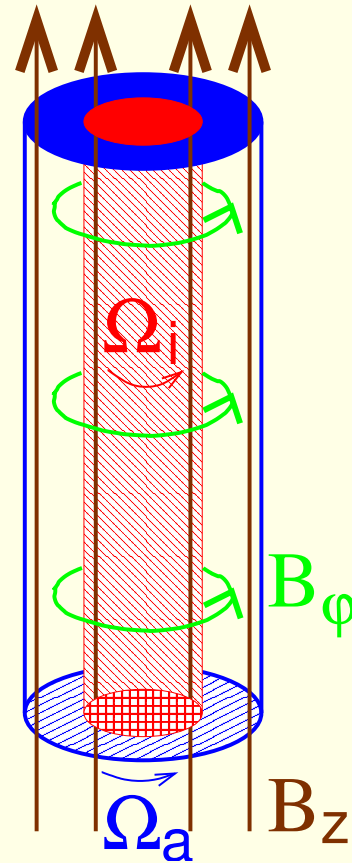
Die Magneto-Rotations-Instabilität

- Velikhov 1959: MRI
Erstmals für Couette-
Strömung gezeigt.
- Strömung zwischen ko-
axialen Innen- und Außen-
zylinder mit Radien r_i und
 r_a und Winkelgeschwin-
digkeiten Ω_i und Ω_a .
- Balbus/Hawley 1991:
Astrophysikalische Rele-
vanz erkannt.



Die Magneto-Rotations-Instabilität: Experimente

- Aufwändige Experimente mit B_z (Maryland, Princeton)
- Potsdam/Rosendorf: B_z wird durch $B_z + B_\varphi$ ersetzt. Nötige Strömungsgeschwindigkeit sinkt um Faktor 1000 !.
- Einziges Problem: Axialer Strom von 5000 A.



Zusammenfassung

- Kosmische Magnetfelder entstehen durch homogenen Dynamoeffekt in strömenden elektrisch leitfähigen Fluiden
- Grundlegendes Verständnis durch Theorie und numerische Simulationen in den letzten Jahrzehnten erreicht
- Erste erfolgreiche Dynamoexperimente mit flüssigem Natrium seit 1999
- Magneto-Rotations-Instabilität erklärt Drehimpulstransport in Akkretionsscheiben: Extrem wichtig für Sternentstehung und Galaxien.
- Erste Experimente mit Natrium (Maryland), Gallium (Princeton) and Gallium-Indium-Zinn (Rossendorf).

Literatur

- Rüdiger G., Hollerbach R. (2004): The magnetic universe. Wiley, Weinheim
- Gailitis A., Lielausis, O., Platacis, E., Gerbeth, G., Stefani, F. (2002): Colloquium: Laboratory experiments on hydromagnetic dynamos, Rev. Mod. Phys. 74: 973-990
- Balbus S.A., Hawley J.F. (1998): Instability, turbulence, and enhanced transport in accretion disks, Rev. Mod. Phys. 70: 1-53
- www.wikipedia.de, Einträge "Erdmagnetfeld", "Magnetorotationsinstabilität" u.a.