Lehrerfortbildung am HZDR, 17.02 2012

Laborexperimente zur Entstehung und Wirkung kosmischer Magnetfelder

Frank Stefani

mit Dank an G. Gerbeth, A. Giesecke, Th. Gundrum (Dresden), A. Gailitis (Riga), K.-H. Rädler, G. Rüdiger (Potsdam), R. Hollerbach (Leeds), ...





Fahrplan

- Von Thales bis Gilbert
- Magnetfelder im Kosmos
- Wie Magnetfelder entstehen: Dynamoeffekt
- Was Magnetfelder bewirken: Magneto-Rotations-Instabilität etc.
- Ausblick: DRESDYN

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...**"

- Erste Kompass stammt wahrscheinlich aus Veracruz in Mexico (Olmeken, etwa 1000 v.d.Z. !!!)

- Chinesen hatten Kompass in Form eines Löffels aus Magneteisenstein (frei drehbar auf einer glatten Fläche)

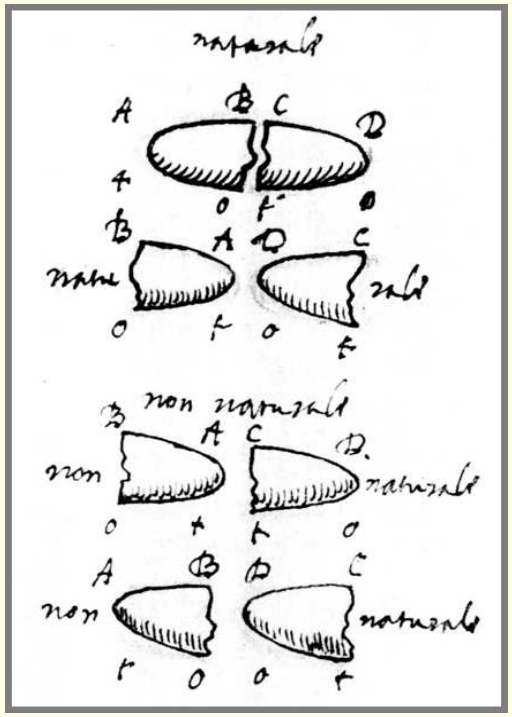
Von Thales bis Gilbert: Der chinesische "Süd-Zeiger"



Von Thales bis Gilbert

Petrus Peregrinus (1269 !) beschreibt Experimente mit Magneteisenstein

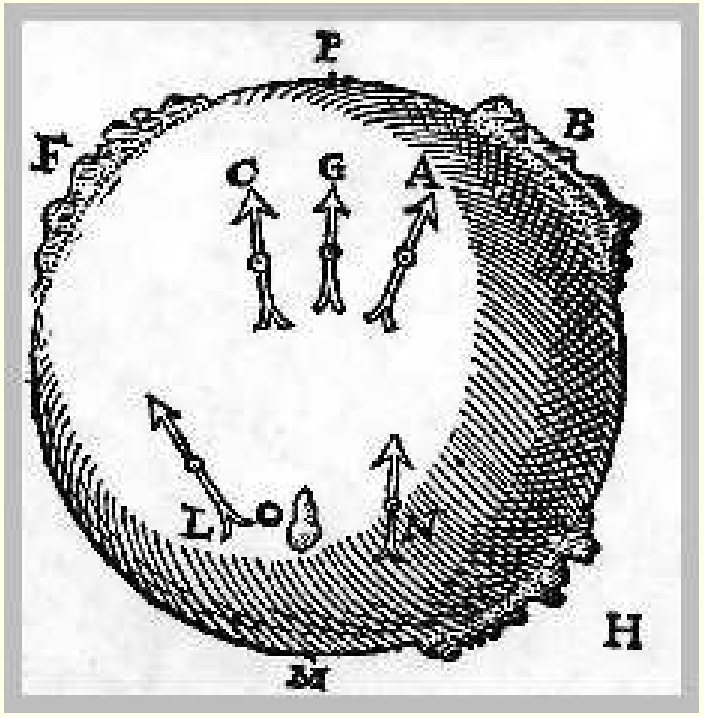
- ... schreibt "Epistola de Magnete" - Vielleicht das erste "paper" der Physik
- ...führt den Begriff der "Pole" in die Wissenschaft ein
- ...erkennt Anziehung und Abstoßung ungleichnamiger bzw. gleichnamiger Pole
- ...schlägt - ganz nebenbei - ein magnetisches perpetuum mobile vor



Von Thales bis Gilbert

William Gilbert: "De Magnete" (1600)

- ...experimentiert mit Magneteisenkugeln
- ...erklärt z.B. Deklination durch Kontinentverteilung
- ...schlussfolgert messerscharf: "Die Erde ist eine große Kugel aus Magneteisenstein."

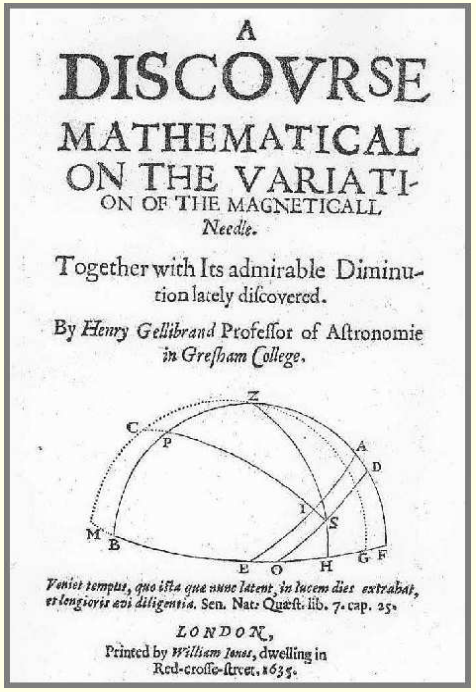


Magnetfelder im Kosmos: Erde

Gilberts Theorie war 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.



A
DISCOVRSE
MATHEMATICAL
ON THE VARIATI-
ON OF THE MAGNETICALL
Needle.

Together with Its admirable Diminution lately discovered.

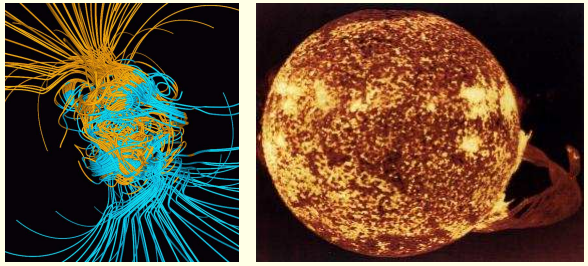
By *Henry Gellibrand* Professor of Astronomie *in Gresham College.*

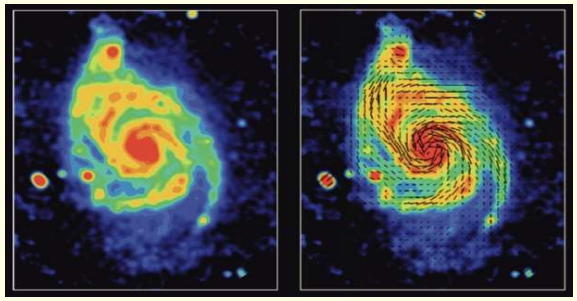
Veniet tempus, quo ista quæ nunc latent, in lucem dies extrahat, et longioris ævi diligentia. Sen. Nat. Quæst. lib. 7. cap. 25.

LONDON,
Printed by *William Iones*, dwelling in Red-crosse-street, 1635.

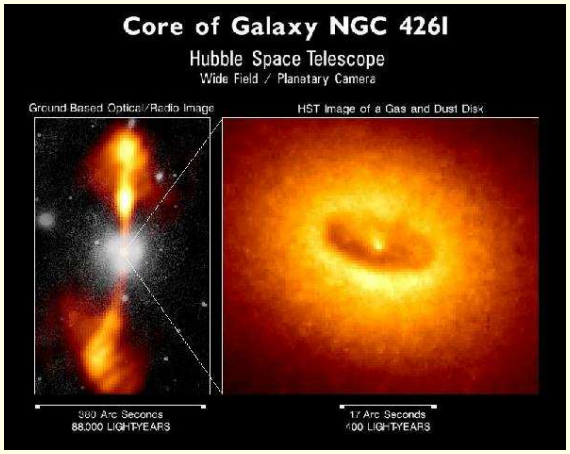
Magnetfelder im Kosmos

...enstehen durch den hydromagnetischen Dynamoeffekt (Selbsterregung)





...beschleunigen die kosmische Strukturbildung (Sonnensysteme, schwarze Löcher) vermittels der Magneto-Rotationsinstabilität (MRI) in Akkretionsscheiben



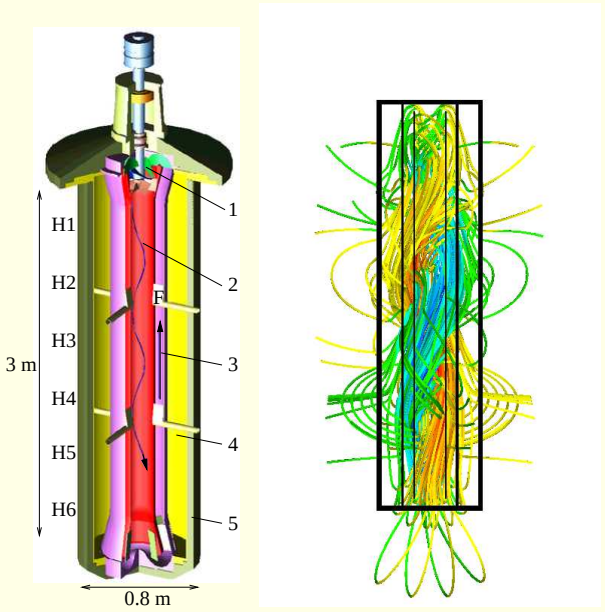
Magnetfelder im Kosmos: Größenordnungen

Typische Werte der Magnetfelder im Kosmos

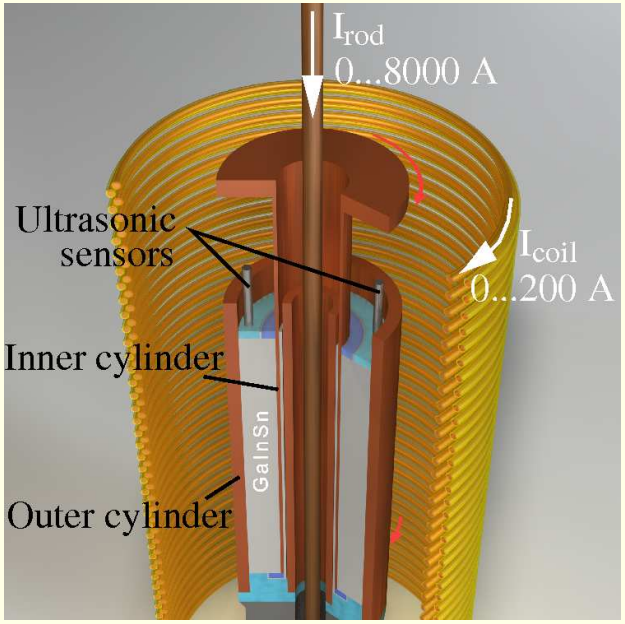
Galaxien	10^{-9} Tesla
Erde	10^{-4} Tesla
Sonnenflecken	0.2 Tesla
Guter Permanentmagnet	1 Tesla
Dresdner Hochfeldlabor	87 Tesla
Weiße Zwerge	100 Tesla
Magnetare	10^{11} Tesla !!!

Kosmische Magnetfelder im Flüssigmetall-Labor

Dynamoexperimente: **Riga, Karlsruhe, Cadarache**, Madison, Maryland, Perm...



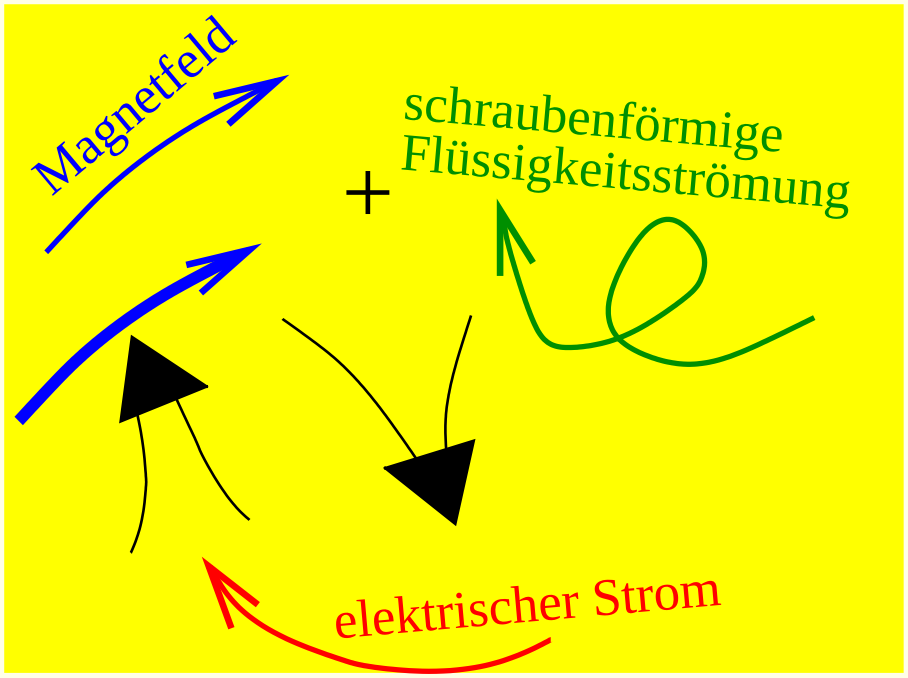
MRI-Experimente: Maryland, Princeton, Socorro, Grenoble, **Dresden-Rossendorf**



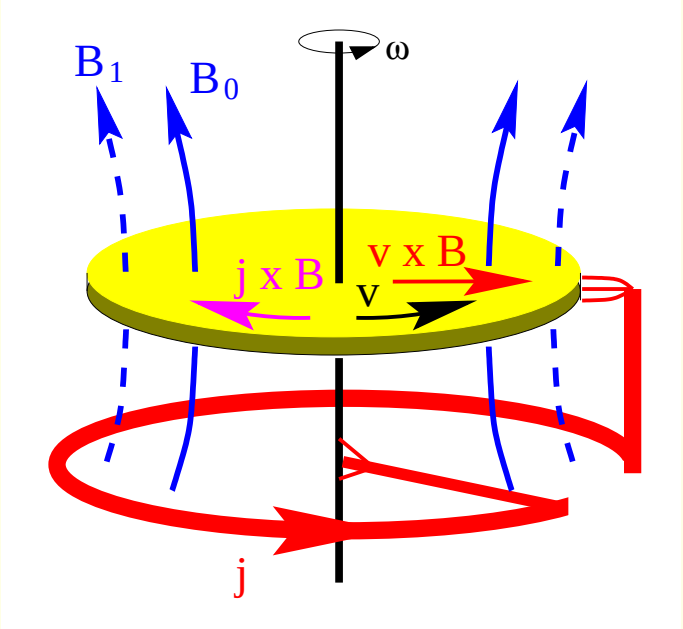
Wie Magnetfelder entstehen: Dynamoeffekt

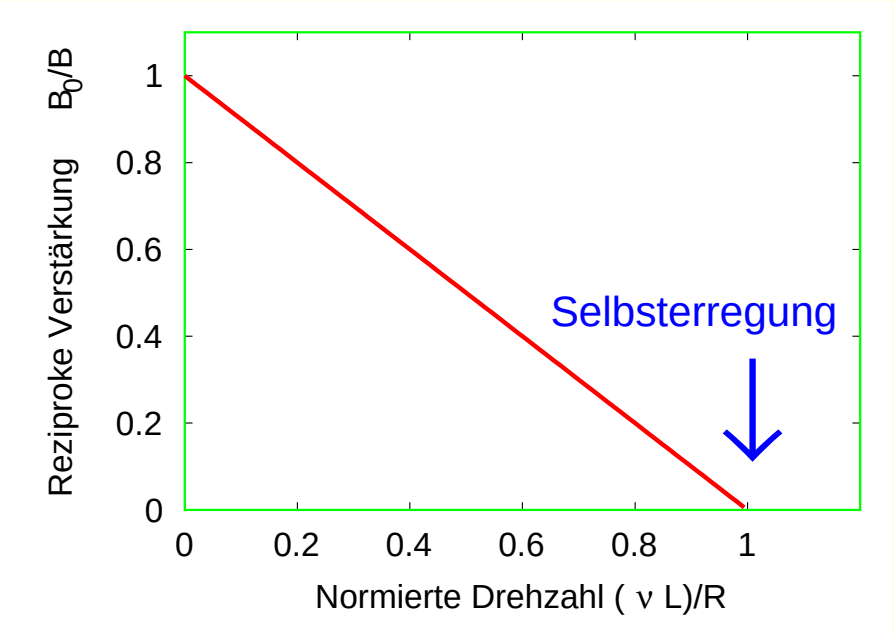
Frage: Wie kann eine Strömung ein Magnetfeld erzeugen?

Antwort: Homogener Dynamoeffekt (Selbsterregung) in elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten



Dynamoeffekt: Der Scheibendynamo



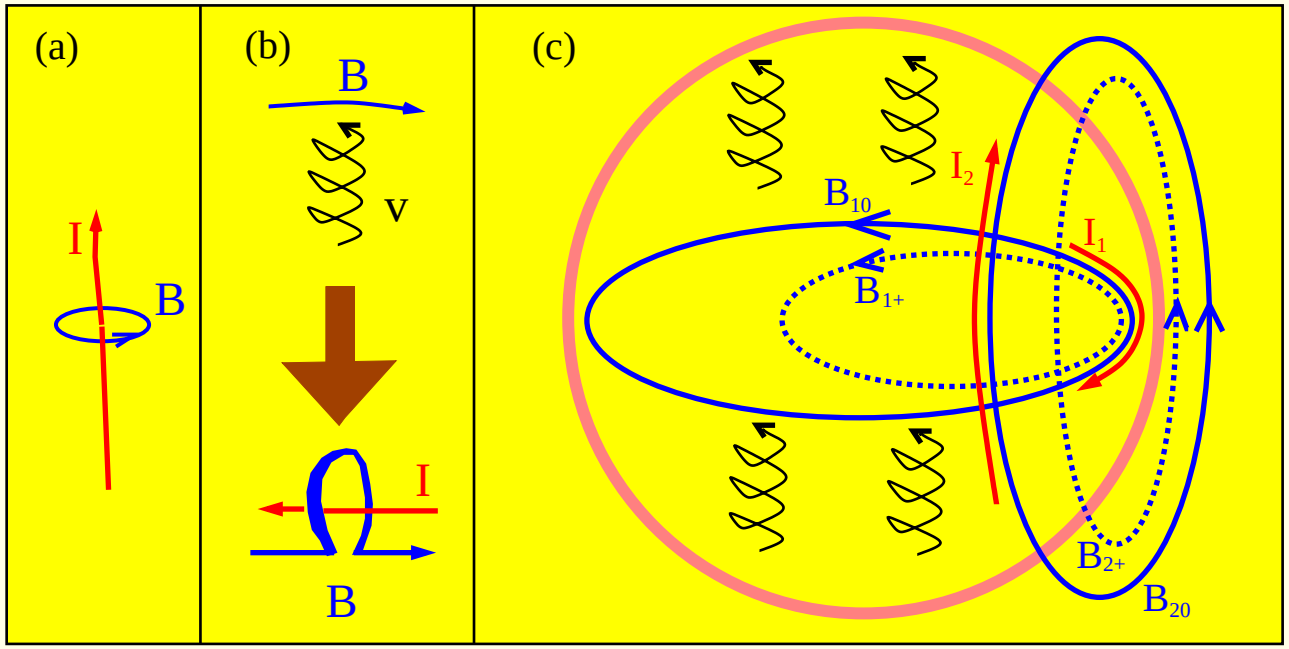


$\mathbf{v} \times \mathbf{B}$...Elektromotorische Kraft (EMK)

$\mathbf{j} \times \mathbf{B}$...Lorentzkraft ("Bremse")

Der Dynamoeffekt: Theorie

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



Dynamoeffekt: Theorie

$\mathbf{j}$:	Elektrische Stromdichte;	$\mathbf{B}$:	Magnetfeld
$\mathbf{E}$:	Elektrisches Feld;	$\mathbf{v}$:	Geschwindigkeit des Fluids
σ:	Elektrische Leitfähigkeit;	μ_0:	Magnetische Permeabilität

Ampèresches Gesetz	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{j} + \cancel{\dot{\mathbf{D}}})$
Faradaysches Gesetz:	$\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}}$
Quellenfreiheit des Magnetfeldes:	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Ohmsches Gesetz:	$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

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

Dynamoeffekt: Theorie

Induktionsgleichung für das Magnetfeld $\mathbf{B}$

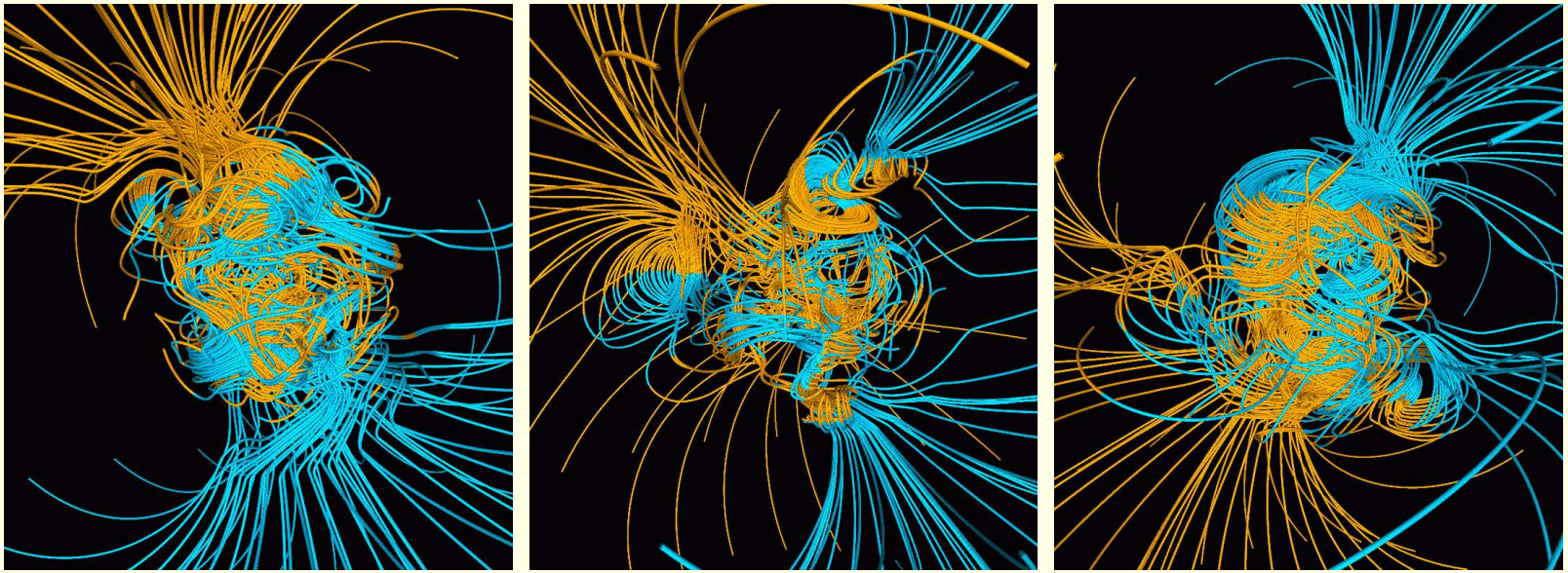
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \Delta \mathbf{B}$$

Navier-Stokes-Gleichung für die Geschwindigkeit $\mathbf{v}$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{1}{\mu_0 \rho}(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{f}_d$$

Dynamoeffekt: Theorie

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



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 und numerische Modelle zu testen.

Dynamoeffekt: Experimente - Bedingung

- Magnetfeldproduktion muss stärker sein als Magnetfelddissipation
- Dieses Verhältnis wird ausgedrückt durch magnetische Reynoldszahl Rm

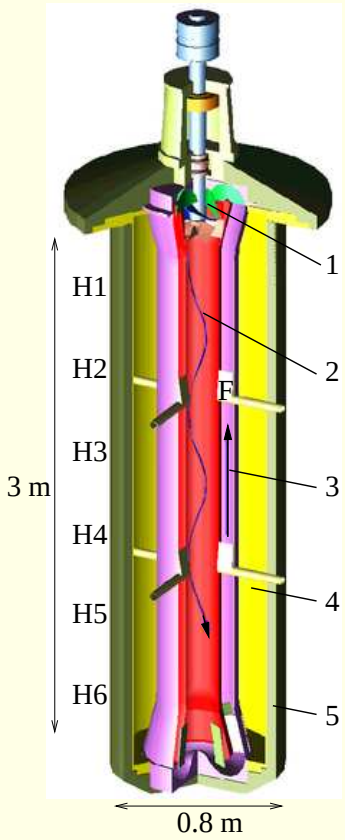
$$Rm := \mu\sigma LV \geq 10$$

μ...magnetische Permeabilität, σ...elektrische Leitfähigkeit,
L...Typische Länge, V...Typische Geschwindigkeit

- Für Natrium gilt: $\mu\sigma = 10$ s/m^2. Also brauchen wir: $LV \geq 1$ m^2/s

Dynamoeffekt: Experimente - Riga

- 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.





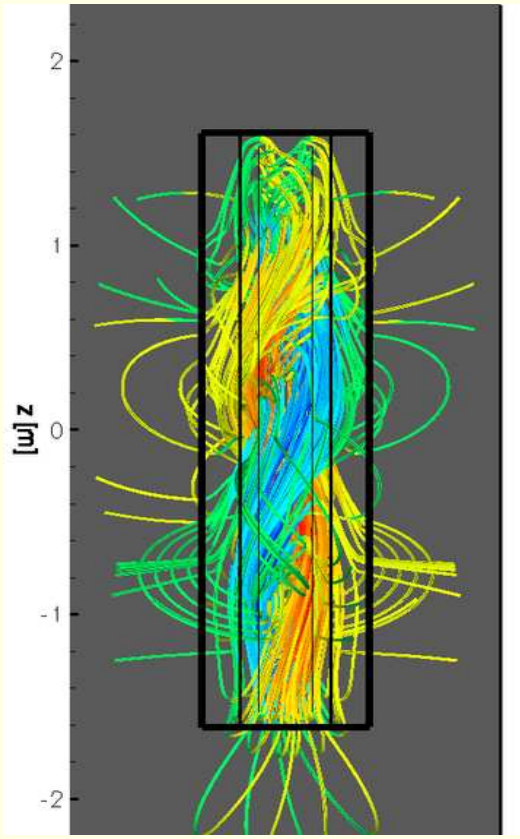
Dynamoeffekt: Experimente - Riga

Thomas Gundrum beim Installieren einer "Lanze" mit Hallsensoren



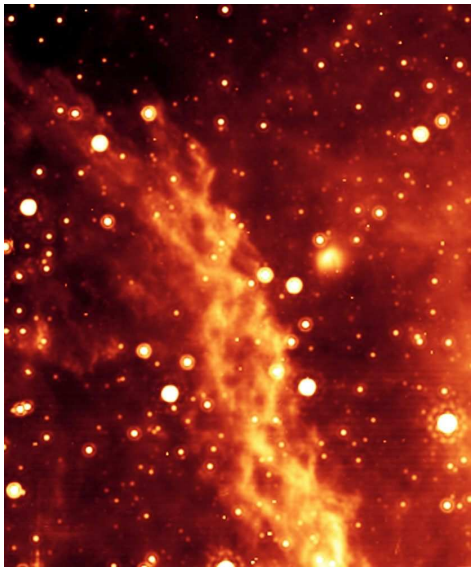
Dynamoeffekt: Experimente - Riga

- Optimierte Strömung mit maximaler Helizität (Bessel-Funktionen für v_z und v_φ))
- Bei etwa 1900 Umdrehung pro Minute entsteht Magnetfeld
- Magnetfeld rotiert langsam (1-2 Hz) um die Achse.
- Felder bis etwa 200 mT

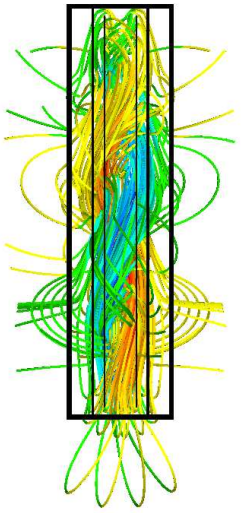


Dynamoeffekt: Experimente - Riga

Gibt es ähnliche Dynamos in der Natur? Vielleicht...



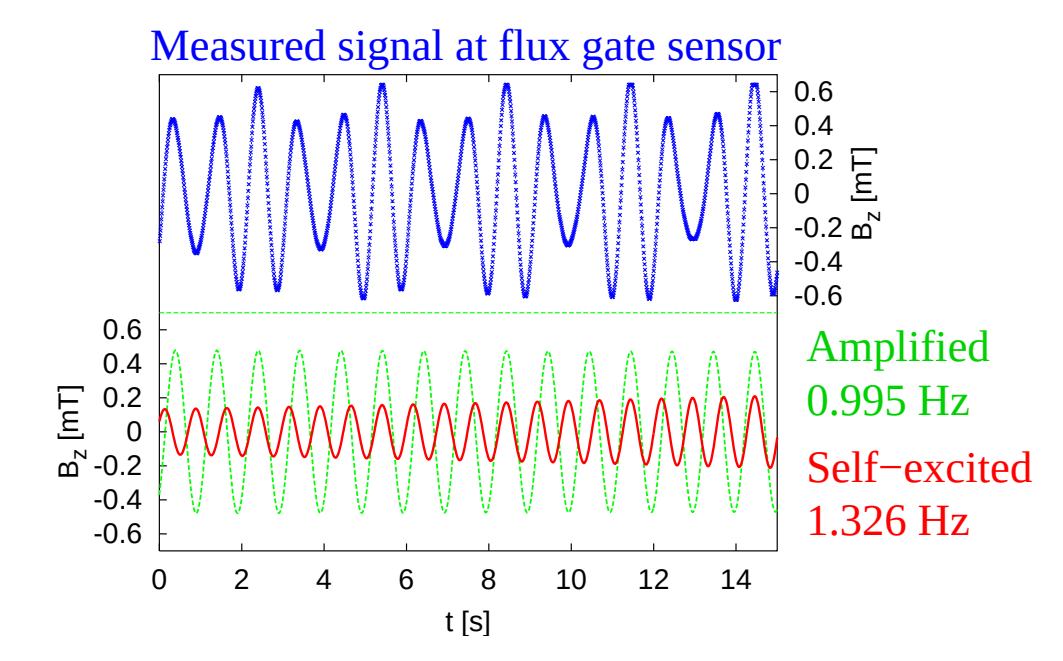
"Double helix nebula" (Morris et al., Nature, 2006)



Dynamoeffekt: Experimente - Riga

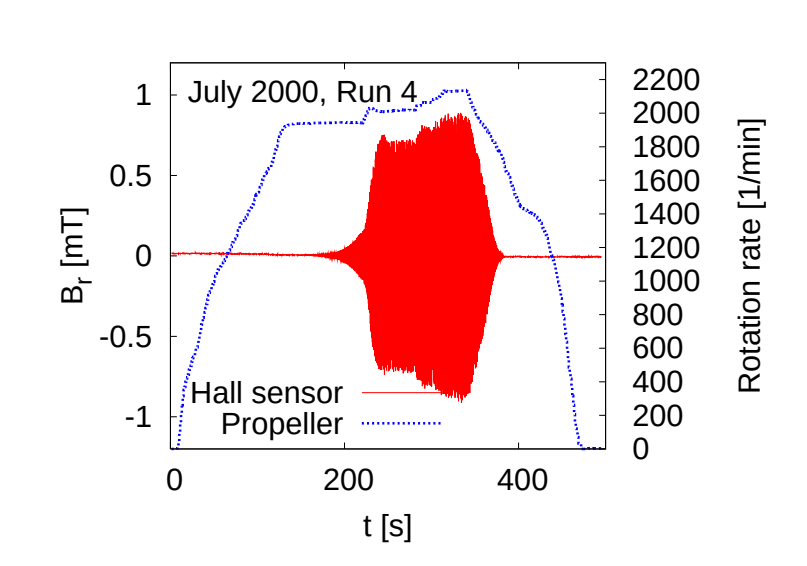
- 11. November 1999: Erstmaliger Nachweis eines selbsterregten magnetischen Eigenfeldes für 15 Sekunden (auf dem Hintergrund eines verstärkten angelegten Feldes)

- Leider Abbruch wegen technischer Probleme...

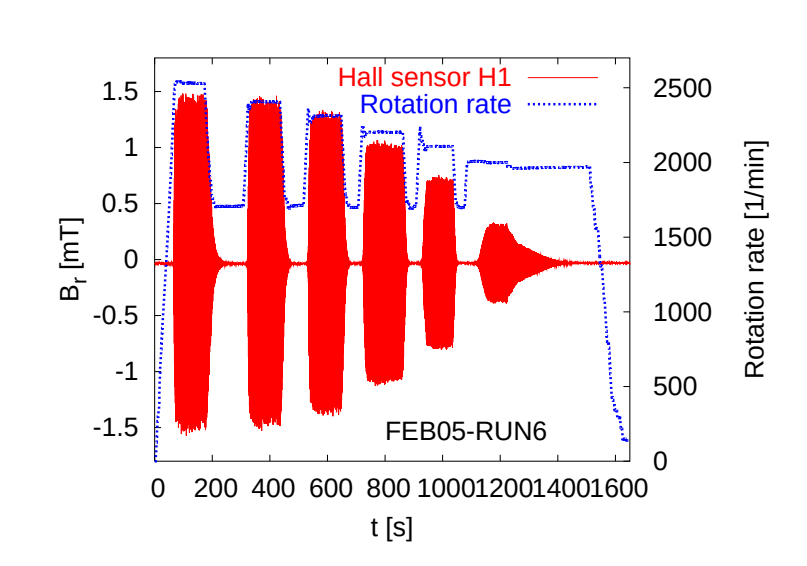


Dynamoeffekt: Experimente - Riga

1999-2007: 8 Messkampagnen mit weitgehend reproduzierbaren Ergebnissen: Gailitis et al. Phys. Rev. Lett. 2000, 2001, Rev. Mod. Phys. 2002, Phys. Plasmas 2004, 2006, Compt. Rend. Phys. 2008



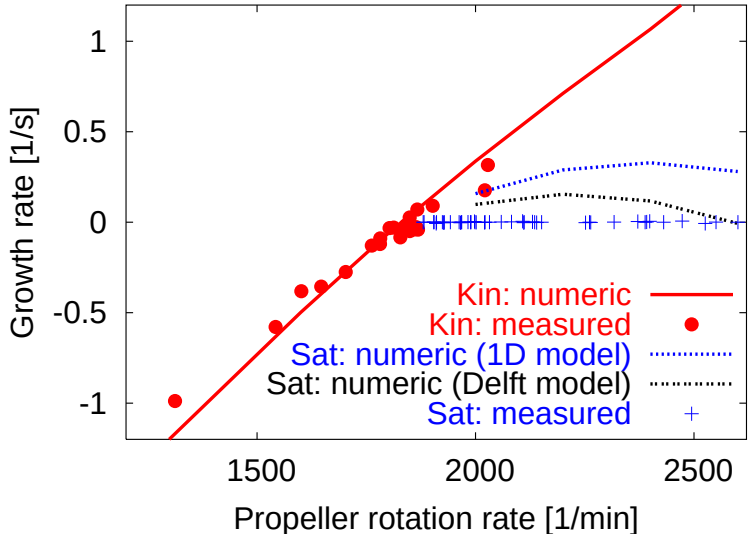
Juli 2000



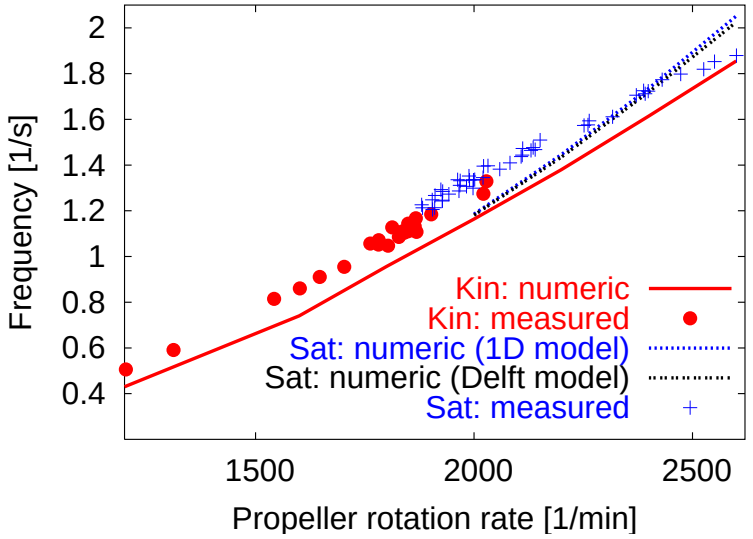
Februar 2005

Dynamoeffekt: Experimente - Riga

Gute Übereinstimmung mit numerischen Vorhersagen.



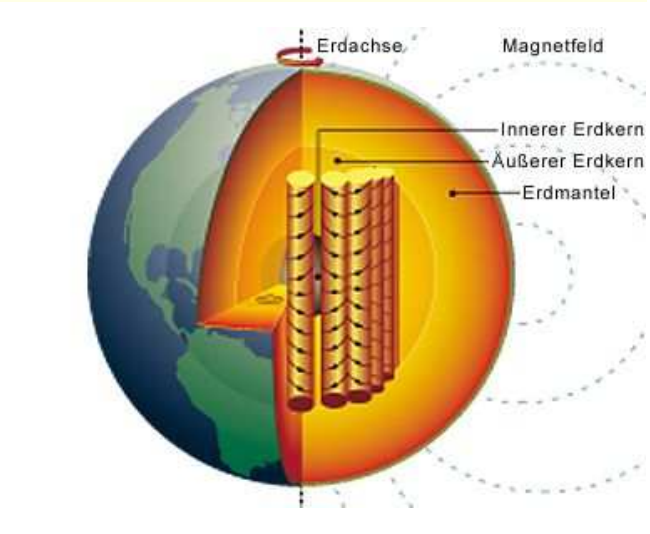
Anwachsrate

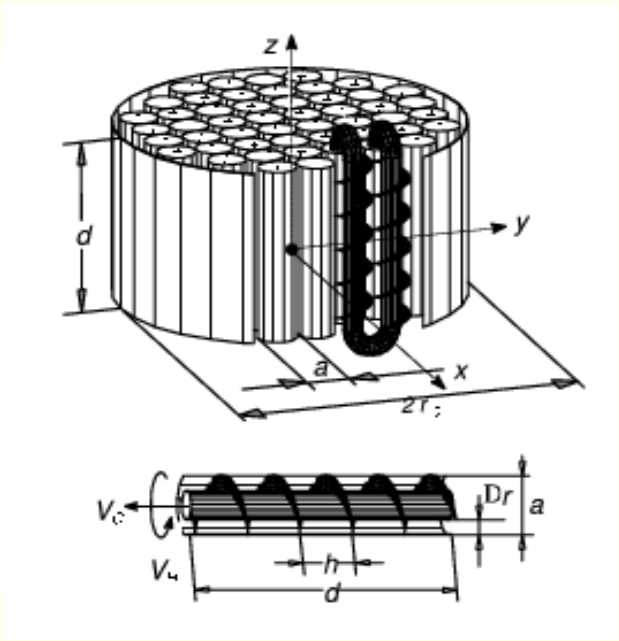


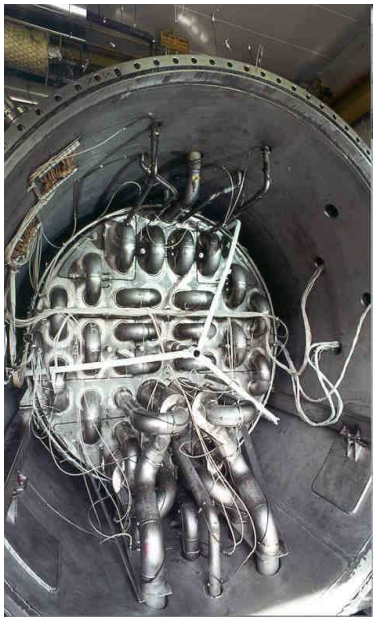
Frequenz

Dynamoeffekt: Experimente - Karlsruhe

Karlsruher Dynamoexperiment: α^2-Dynamo mit 52 Spingeneratoren

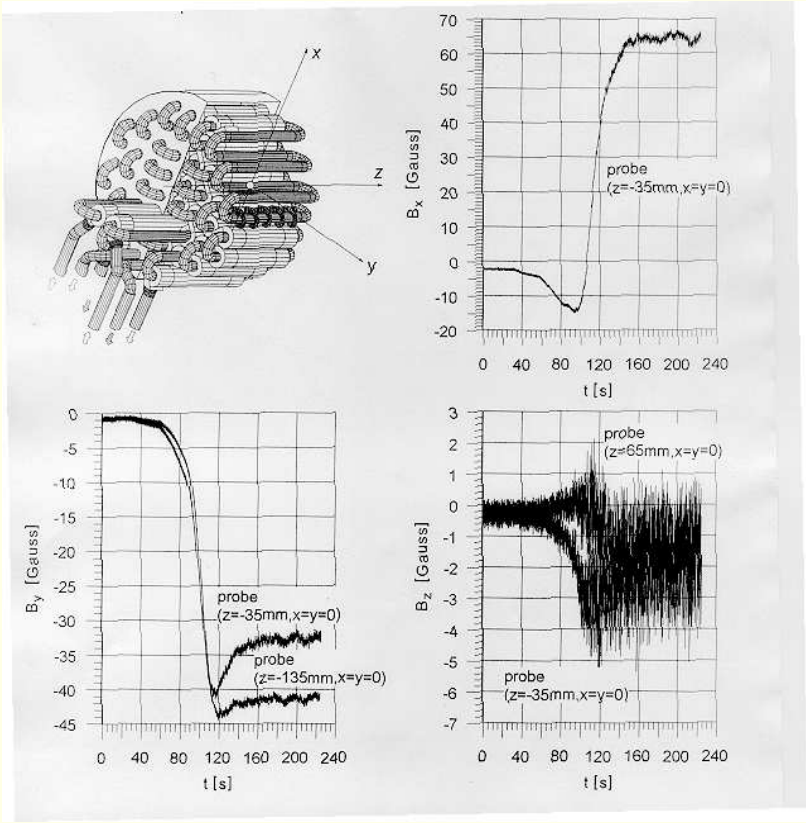






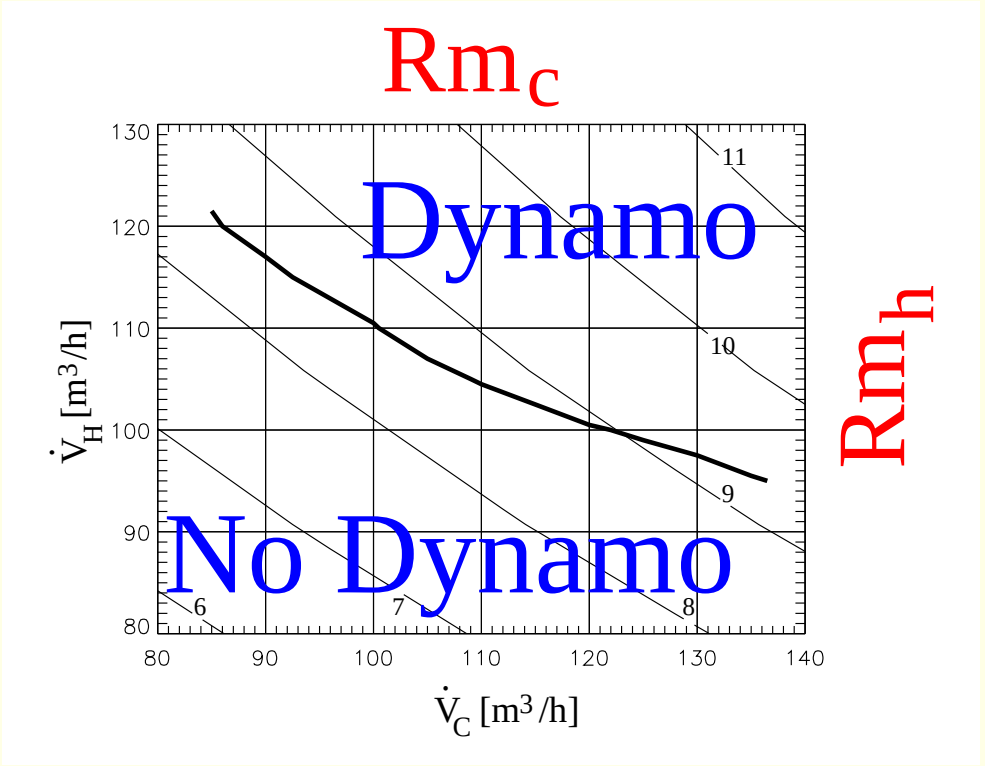
Dynamoeffekt: Experimente - Karlsruhe

- 16. Dezember 1999: Erstmalig wird das Sättigungsregime eines homogenen Dynamos erreicht.
- Weitere Messkampagnen bis 2003



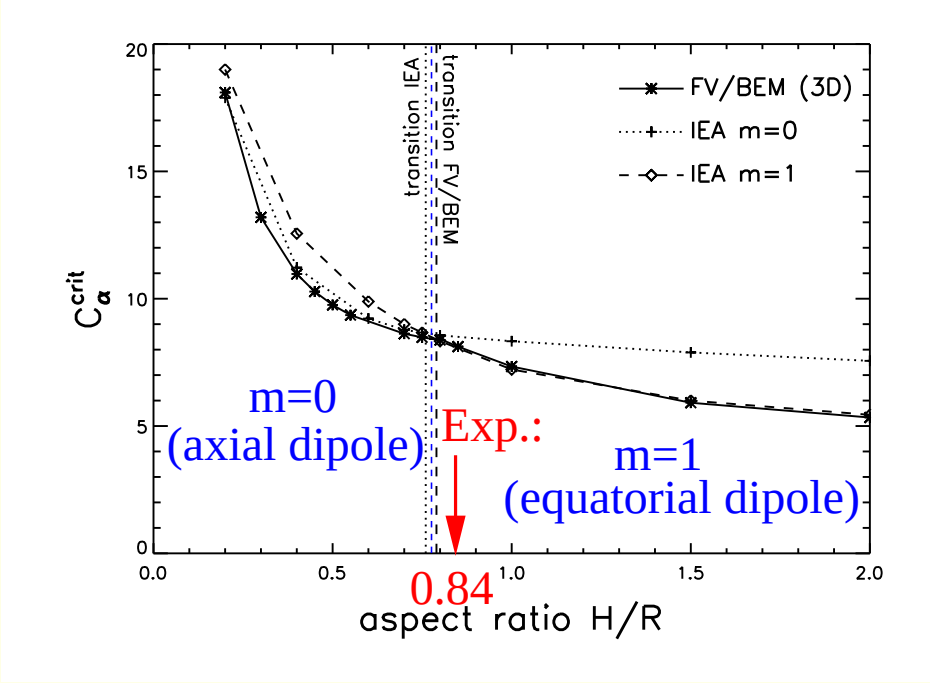
Dynamoeffekt: Experimente - Karlsruhe

- Ergebnis: Stabilitätskarte in Abhängigkeit von den magnetischen Reynoldszahlen im zentralen und im helikalen Kanal
- Anlage 2004 LEIDER abgebaut



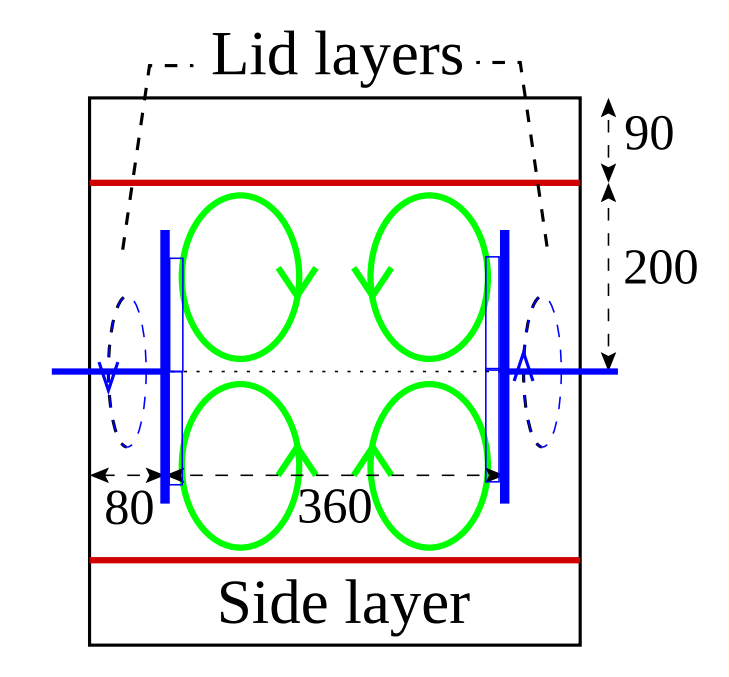
Dynamoeffekt: Experimente - Karlsruhe

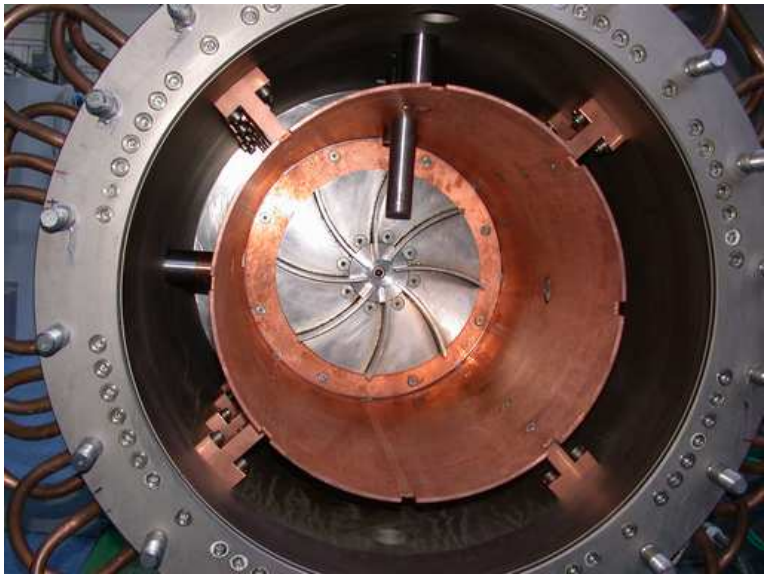
Eine geringfügige Änderung des Aspektverhältnisses ($H/R < 0.78$) hätte Übergänge von äquatorialen zu axialen Dipol gestattet, vielleicht auch Umpolungen! MERKE: Verschrotte niemals einen funktionierenden Dynamo!



Dynamoeffekt: Experimente - VKS (Cadarache)

VKS-Experiment (Von Karman sodium): Gegenläufige Propeller treiben helikale Strömung mit zwei poloidalen und zwei toroidalen Wirbeln

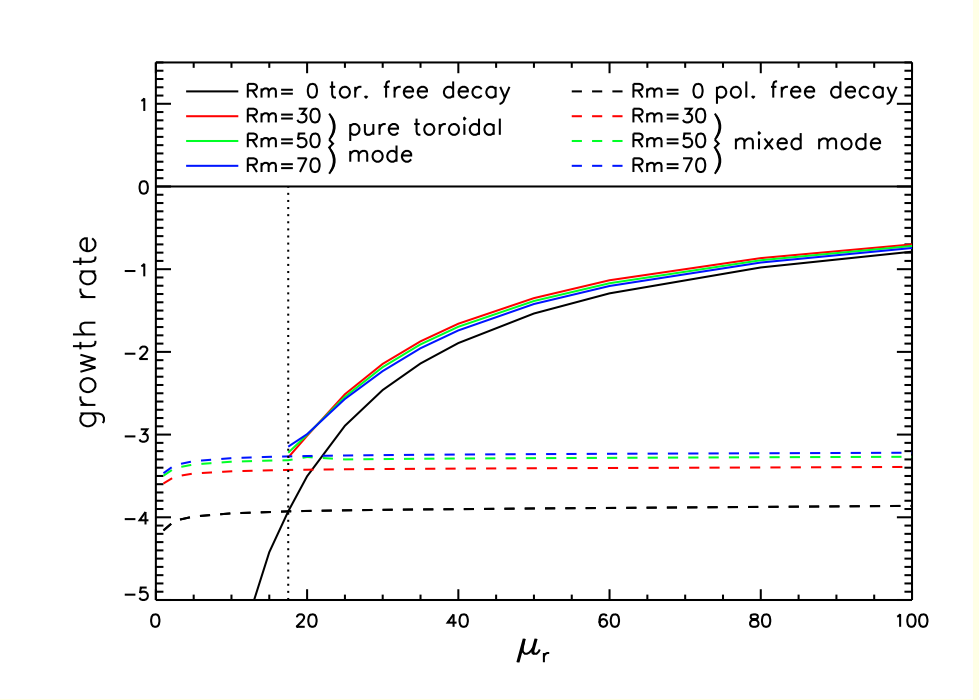




Dynamoeffekt: Experimente - VKS

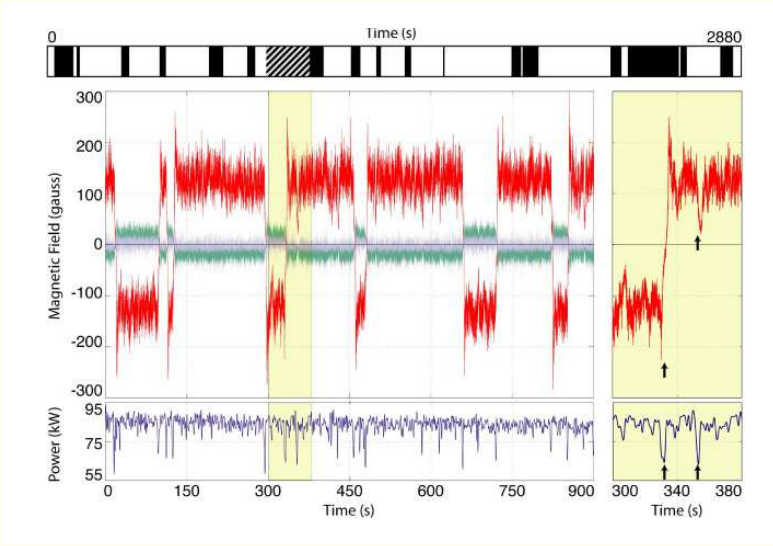
- Weicheisen-Propeller bewirken eine starke Bevorzugung der axialsymmetrischen Eigenmode

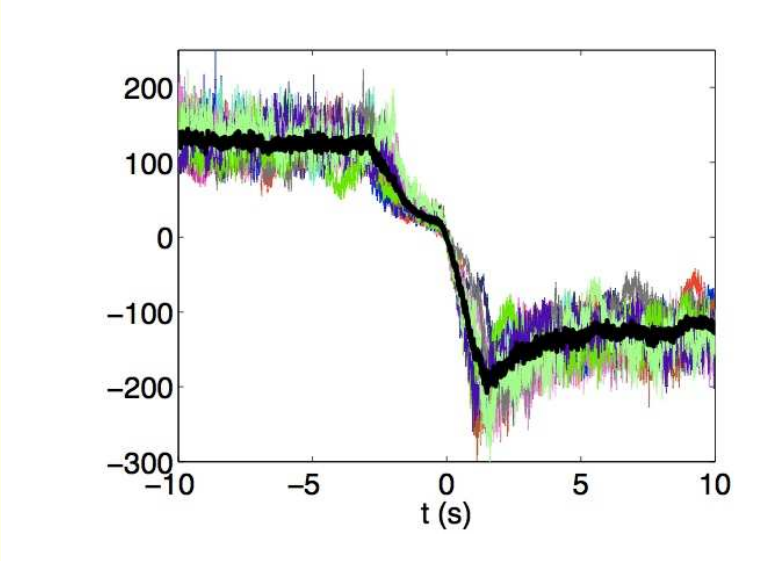
- Etwas helikale Turbulenz (α-Effekt) ist trotzdem noch nötig, damit der Dynamo "zündet"



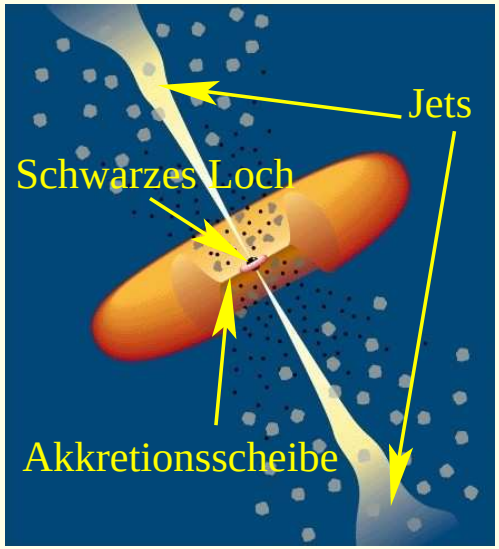
Dynamoeffekt: Experimente - VKS

Sehr schöne Umpolungen (Berhanu et al. 2007) und extrem reiche Dynamik

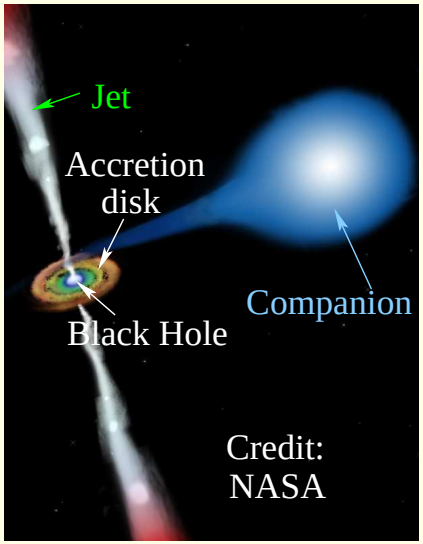




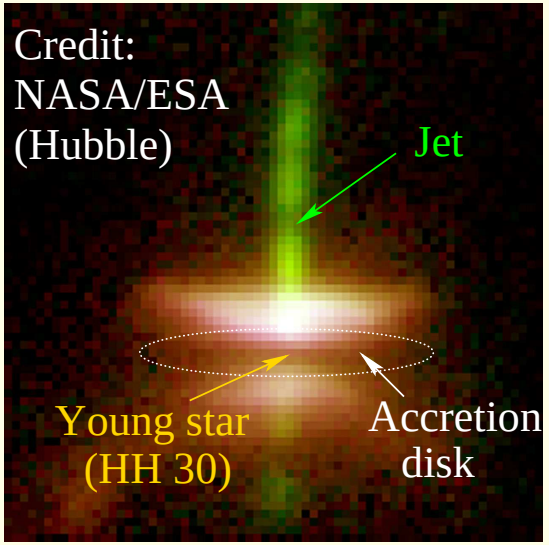
Was Magnetfelder bewirken:
Die Magneto-Rotations-Instabilität (MRI)



Supermassive
Schwarze Löcher



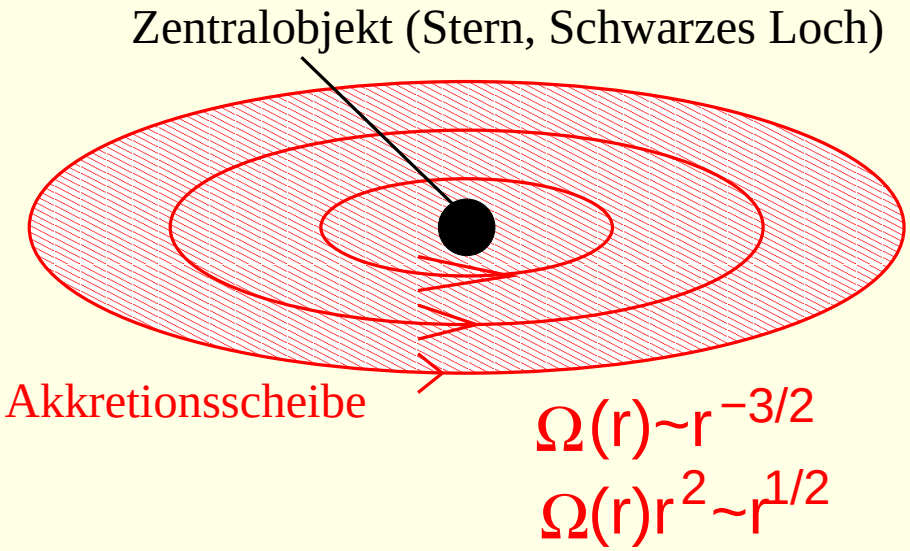
Röntgen-
Doppelsternsysteme



Junge Sterne

MRI: Theorie

- Wie stillen Schwarze Löcher ihren Hunger? Wie funktionieren Akkretionsscheiben?
- Drehimpulstransport nach außen ist durch Viskosität nicht erklärbar.
- Turbulenz könnte helfen. Aber: Kepler-Rotation ist hydrodynamisch stabil!

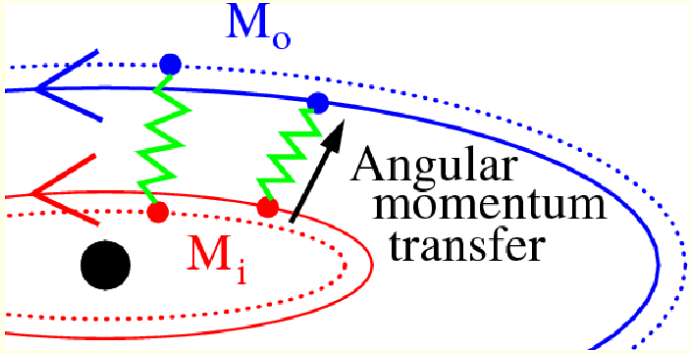


MRI: Theorie

- Rotierende Strömungen, die hydrodynamisch stabil sind, können durch externe Magnetfelder destabilisiert werden.
- Dadurch wird Drehimpulstransport in Akkretionsscheiben gewährleistet.
- Sterne und schwarze Löcher können rotierende Materie ansaugen und wachsen.

MRI: Theorie

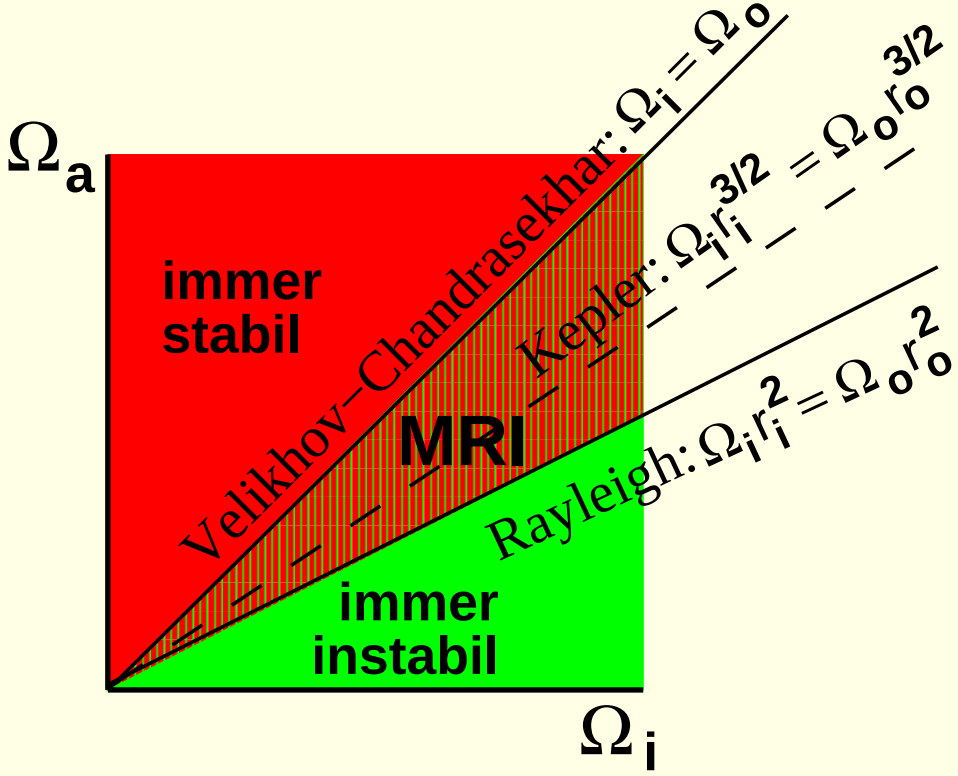
Magnetische Felder in Akkretionsscheiben wirken ähnlich wie Federn



- In Kepler-Scheiben rotieren äußere Massen langsamer als innere
- Innere Massen werden gebremst $\Longrightarrow$ verlieren Drehimpuls $\Longrightarrow$ sinken auf tieferen Orbit
- Äußere Massen werden beschleunigt $\Longrightarrow$ erhalten Drehimpuls $\Longrightarrow$ steigen auf höheren Orbit
- Federpannung steigt $\Longrightarrow$ Instabilität und Drehimpulstransport

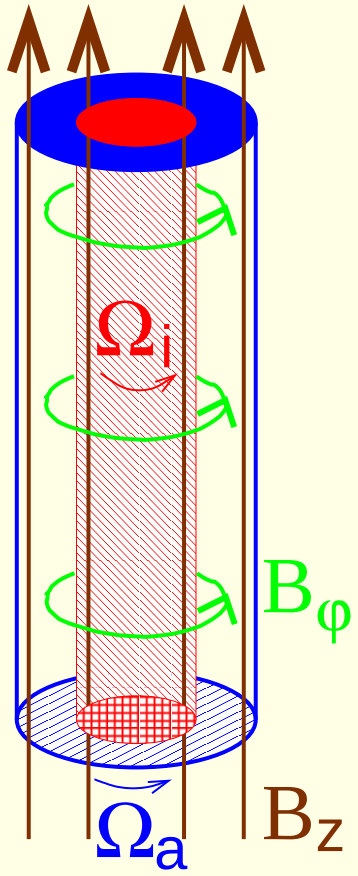
MRI: Theorie

- Velikhov 1959: MRI Erstmals für Taylor-Couette-Strömung gezeigt.
- Strömung zwischen koaxialen Innen- und Außenzylinder mit Radien r_i und r_a und Winkelgeschwindigkeiten Ω_i und Ω_a.
- Balbus/Hawley 1991: Astrophysikalische Relevanz erkannt.



MRI: Experimente

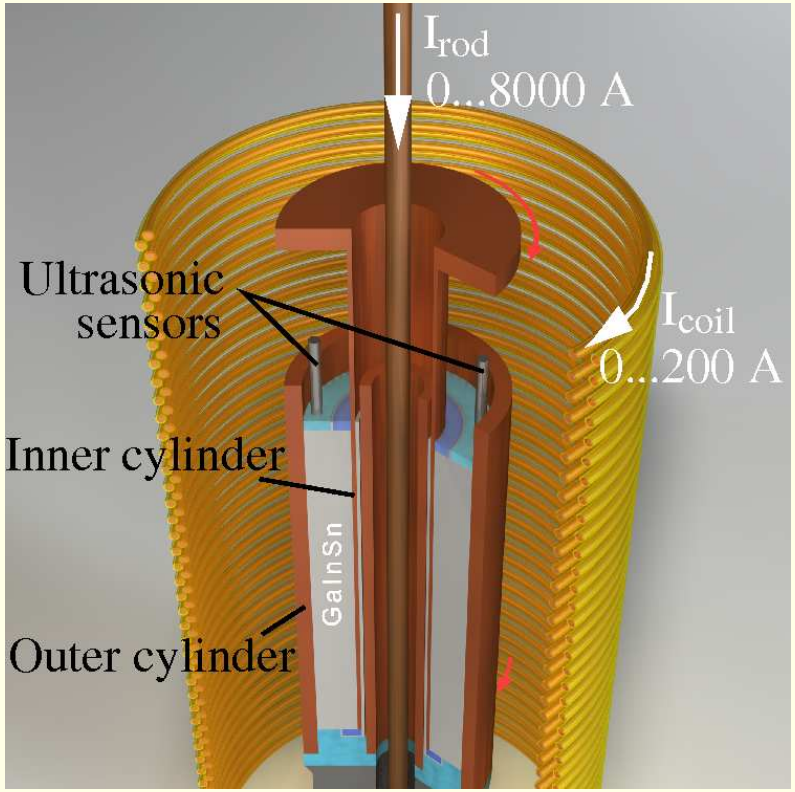
- Aufwändige Experimente mit B_z (Maryland, Princeton, Moskau)
- Potsdam Rossendorf Magnetic InStability Experiment (PROMISE): B_z wird durch $B_z + B_\varphi$ ersetzt. Nötige Strömungsgeschwindigkeit sinkt um Faktor 1000 !.
- Einziges Problem: Axialer Strom von etwa 5000 Ampere notwendig.



MRI: PROMISE-Experiment

- Taylor-Couette-Strömung mit flüssigem GaInSn zwischen differentiell rotierenden Kupferzylindern

- Messung der Axialgeschwindigkeit mit Ultraschallsensoren.



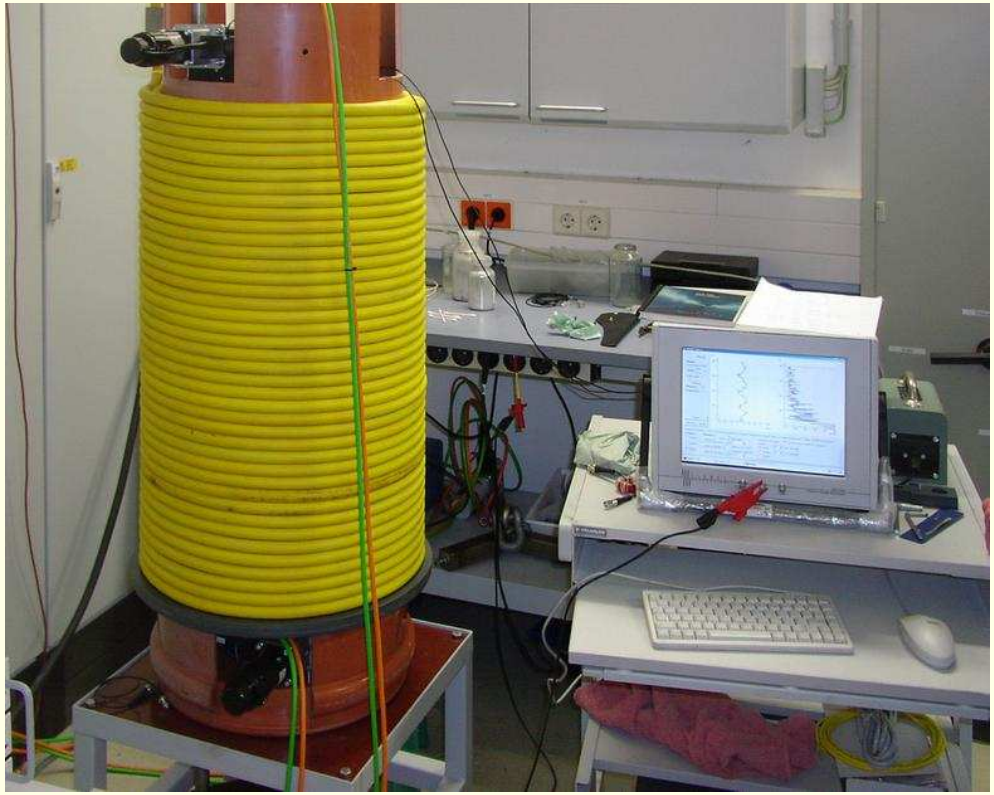
MRI: PROMISE-Experiment - Kupferzylinder





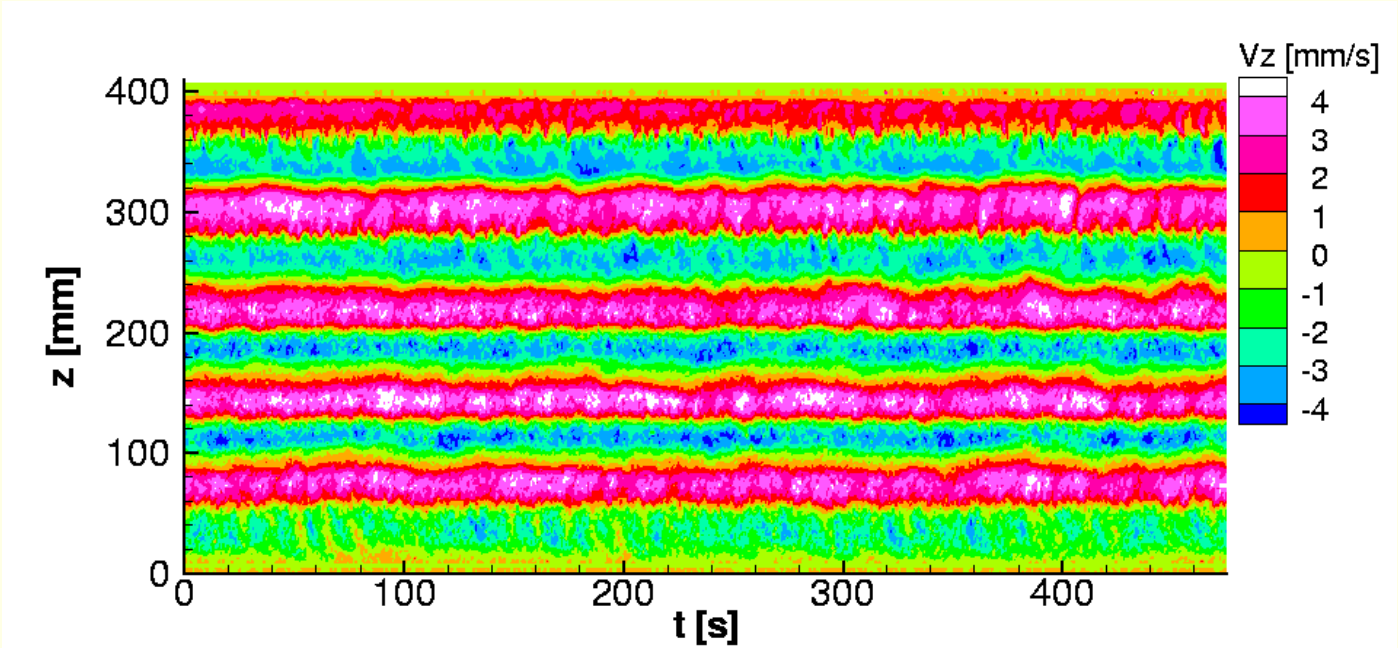
MRI: PROMISE - Installation der Spule, Endzustand

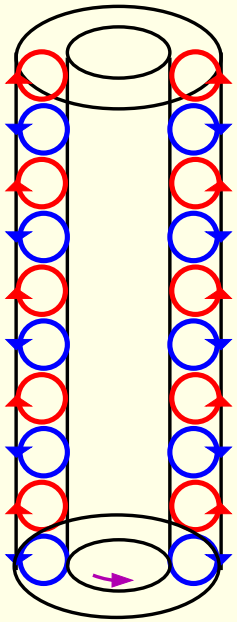




MRI: PROMISE - Experimente

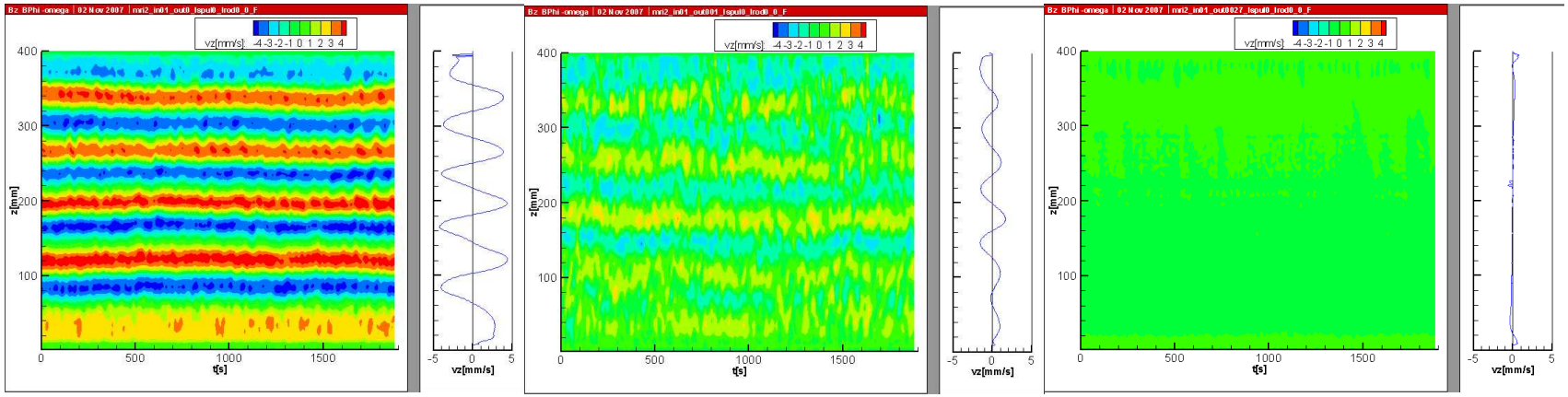
Ohne Magnetfeld: Taylor-Wirbel bei stehendem Aussenzylinder





MRI: Wachsendes $\mu = f_{out}/f_{in}$ ohne Magnetfeld

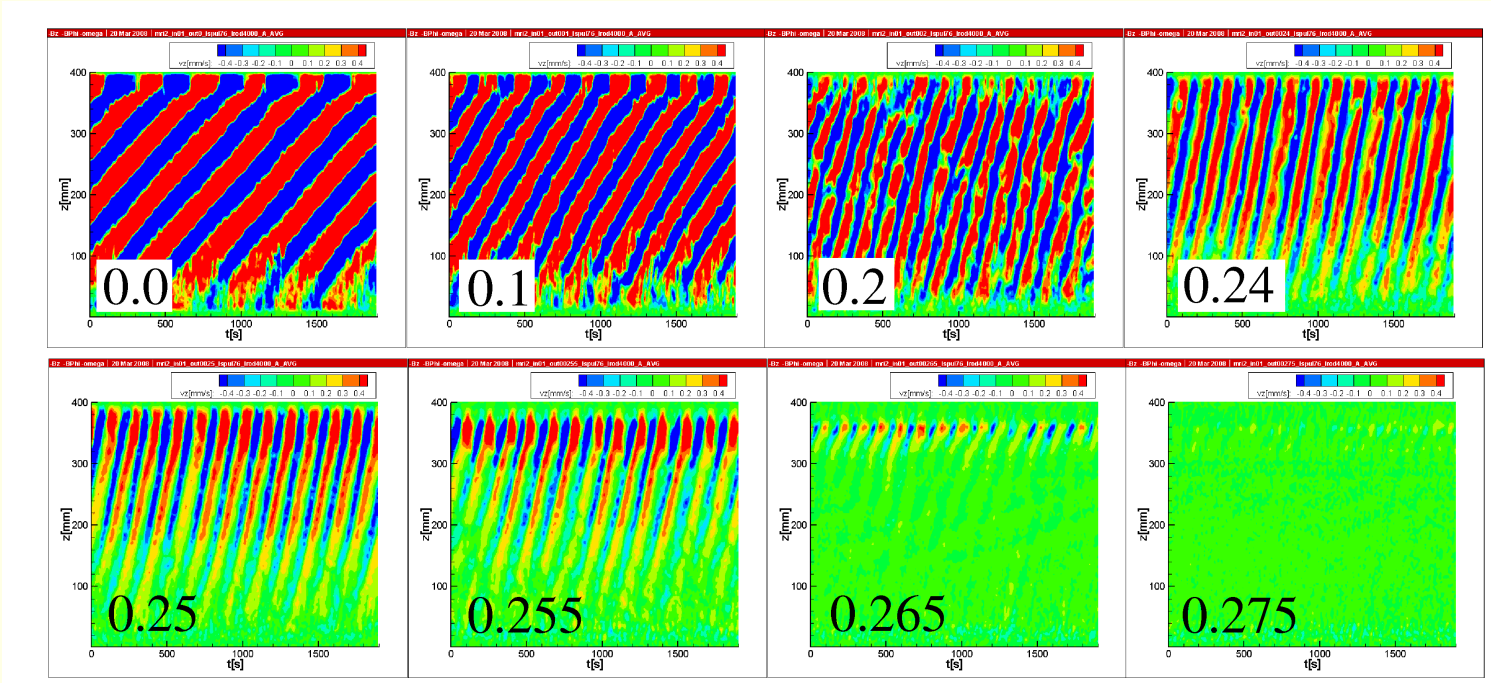
$f_{in} = 0.1$ Hz. $I_{coil} = 0$ Amp. $I_{rod} = 0$ Amp



μ=0 μ=0.1 μ=0.27

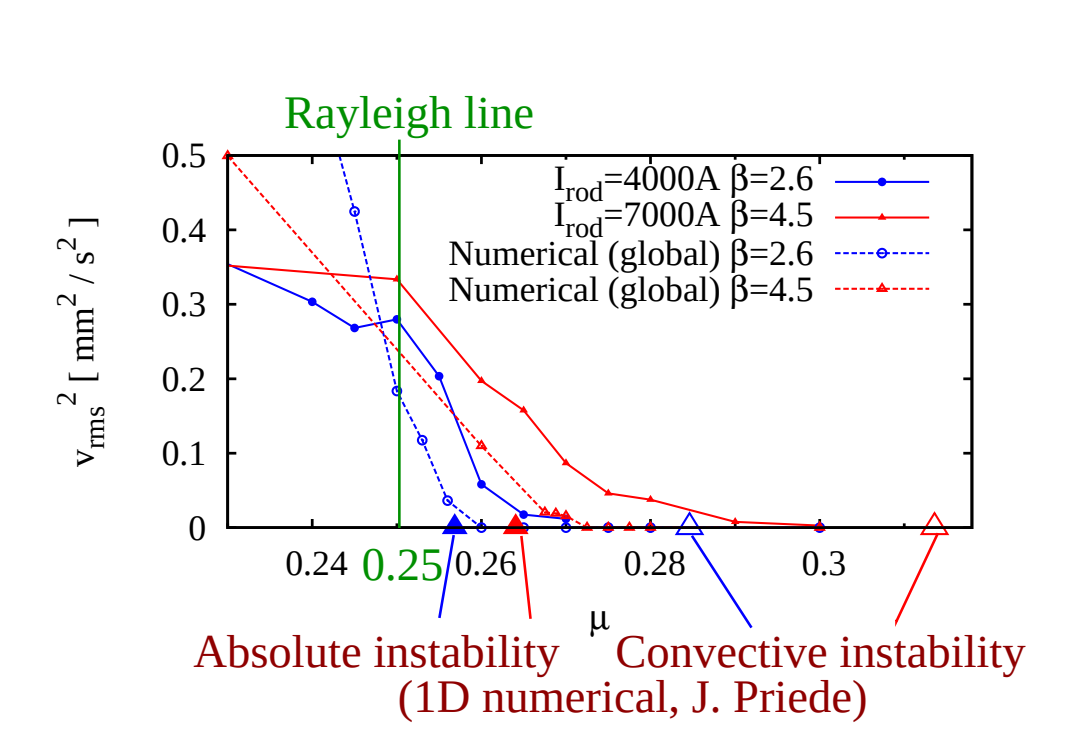
MRI: Wachsendes $\mu = f_{out}/f_{in}$ mit Magnetfeld

$I_{coil} = 76$ Amp. $I_{rod} = 4000$ Amp



Wandernde Welle bis knapp hinter Rayleigh-Linie (bis $\mu \sim 0.26$)

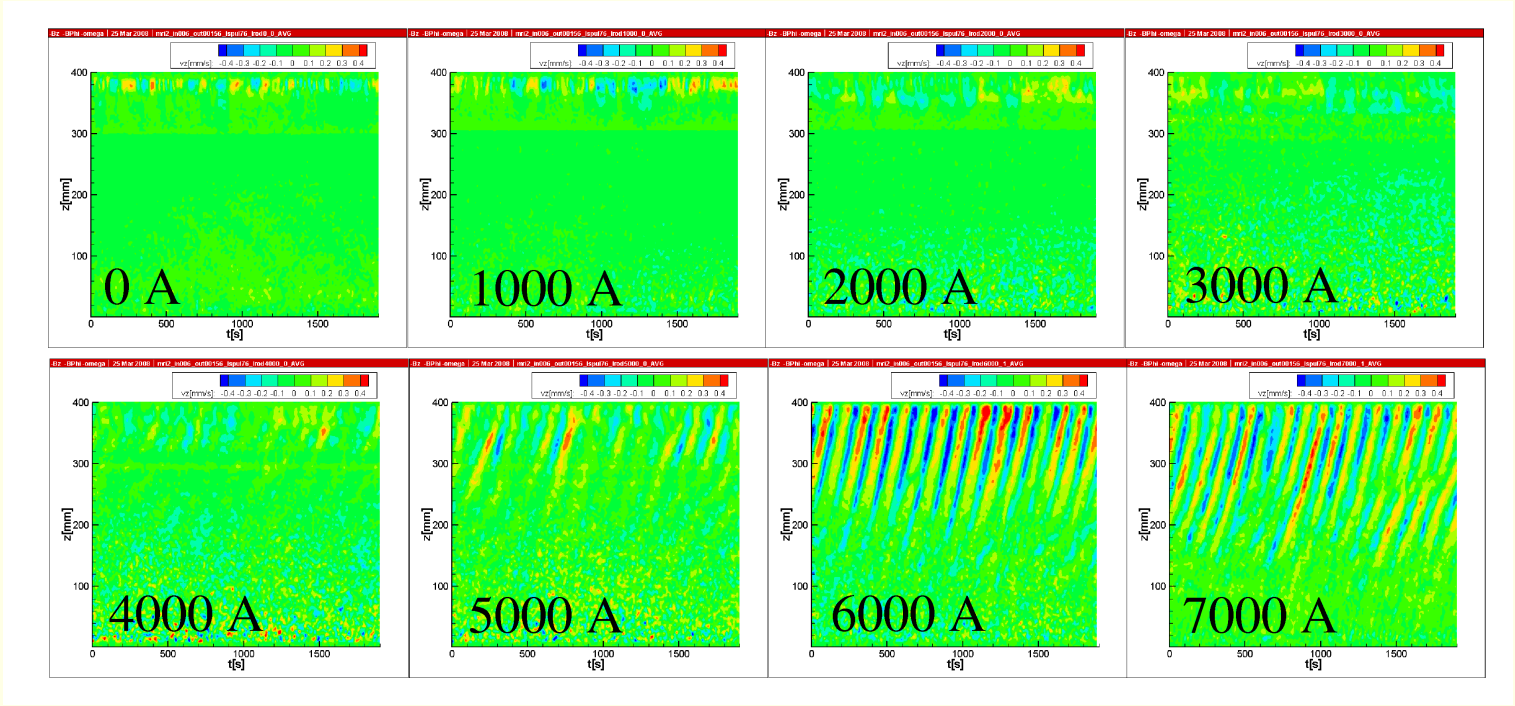
MRI: Wachsendes $\mu := f_{out}/f_{in}$ mit Magnetfeld



Beobachtete Mode ist eine globale und keine rauschinduzierte konvektive Instabilität (Stefani et al., PRE 2009)

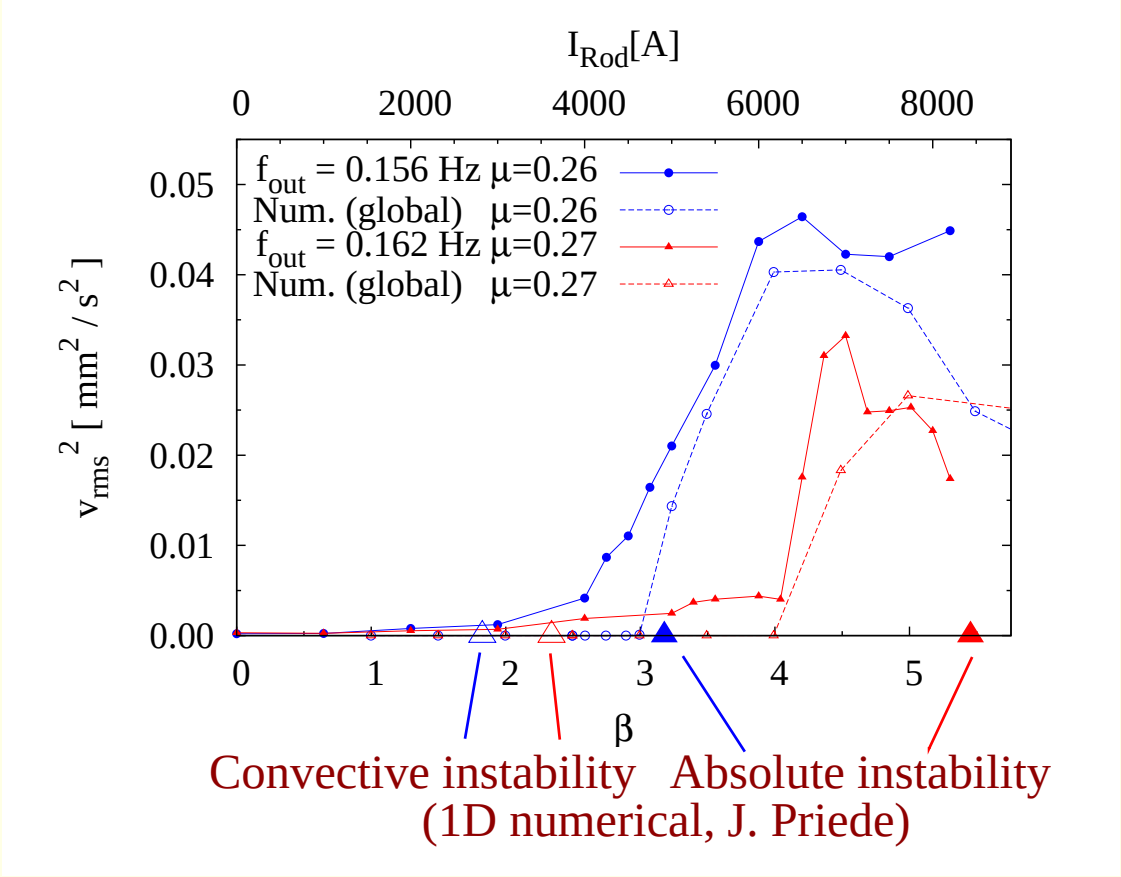
MRI: Wachsendes I_{rod} (β)

$f_{in} = 0.06$ Hz. $\mu = 0.26$, $I_{coil} = 76$ A



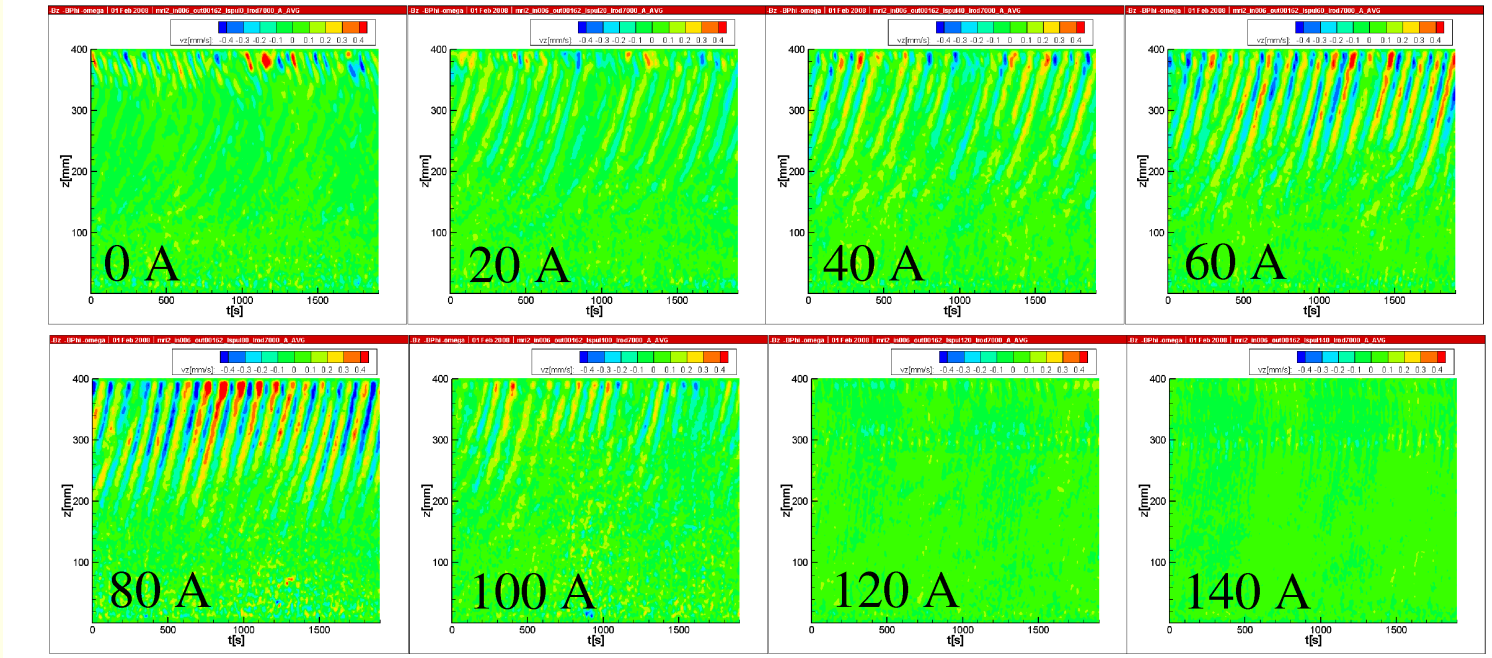
MRI nur jenseits eines kritischen I_{rod}

MRI: Wachsendes I_{rod} (β)



MRI: Wachsendes I_{coil} (d.h. Ha)

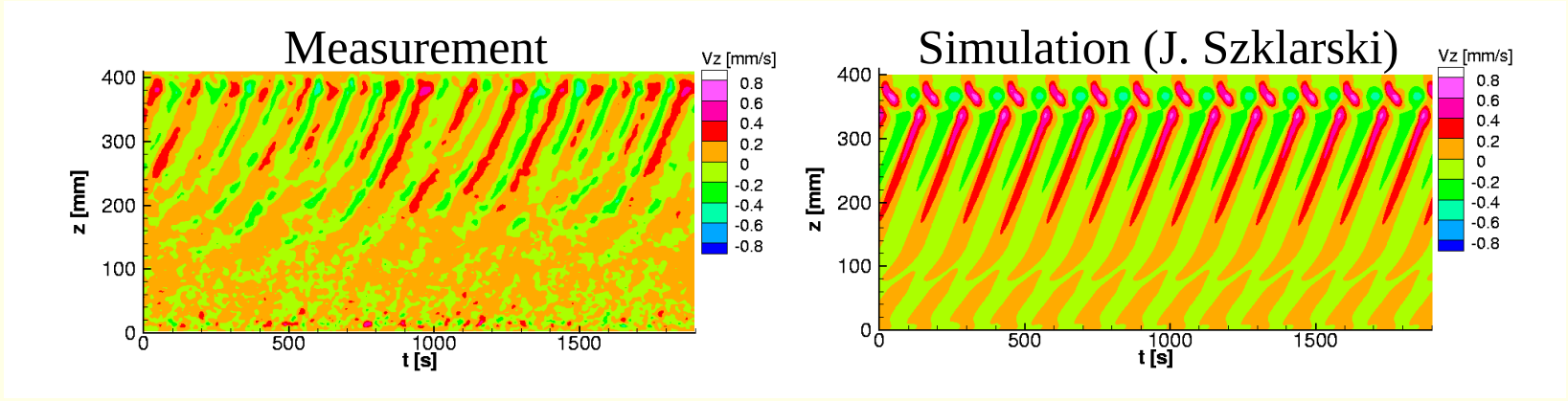
$$f_{in} = 0.06 \text{ Hz},\ \mu = 0.27,\ I_{rod} = 7000 \text{ A}$$



MRI nur in endlichen Intervall von I_{coil}

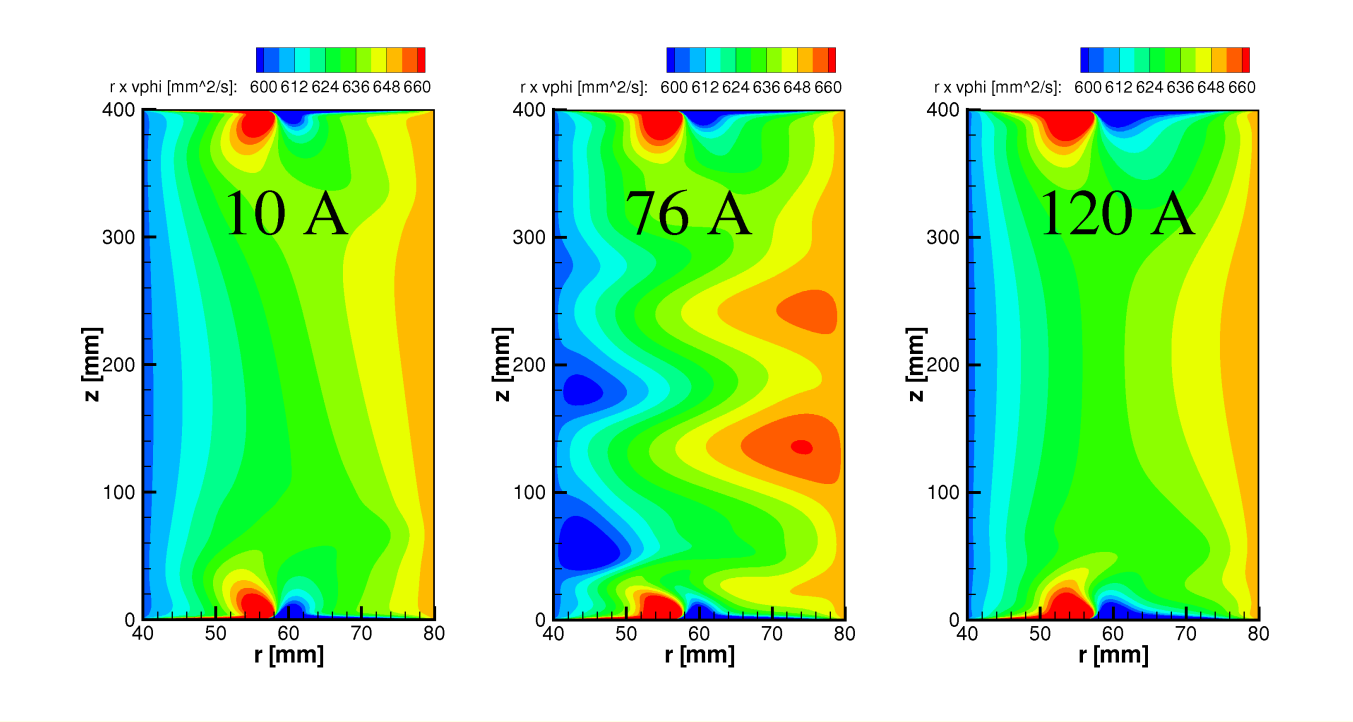
MRI: Vergleich mit Numerik (J. Szklarski)

$f_{in} = 0.06$ Hz, $f_{out} = 0.0156$ Hz, $\mu = 0.26$, $I_{coil} = 60$ A. $I_{rod} = 6000$ A



MRI: Drehimpulstransport

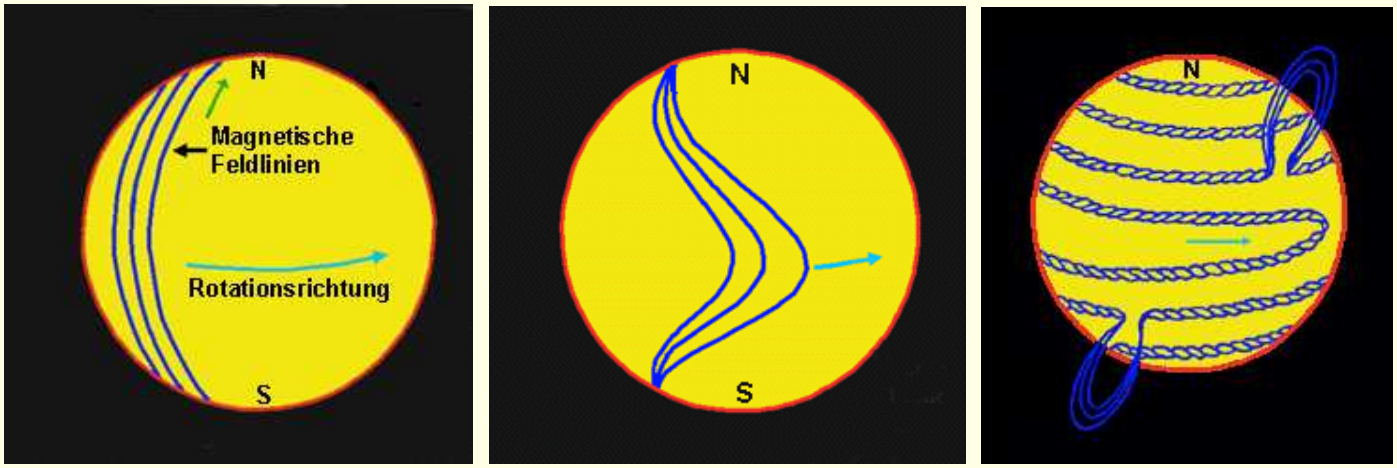
$f_{in} = 0.06$ Hz. $\mu = 0.27$, $I_{rod} = 8000$ A



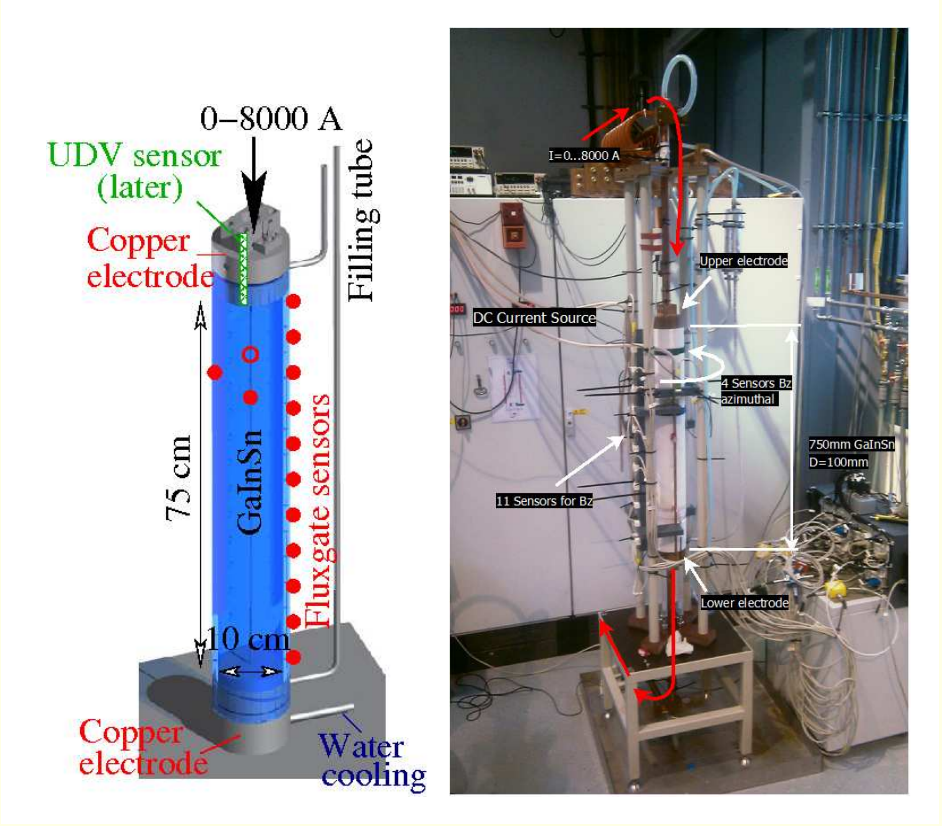
Simulation: Drehimpuls bildet "Finger" und wandert nach aussen

Tayler-Instabilität: Alternatives Modell des Sonnendynamos

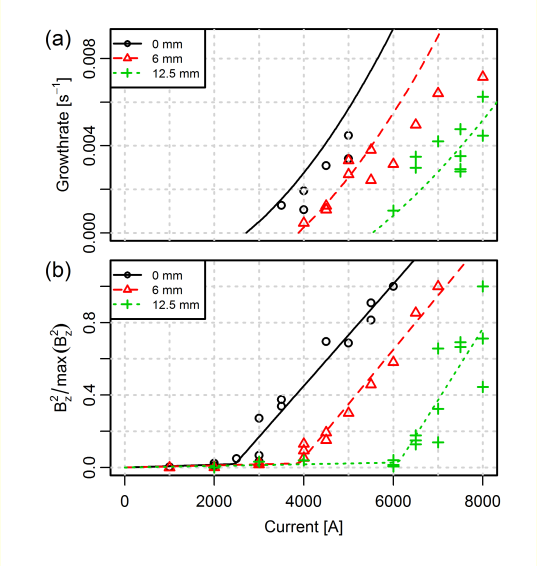
"Aufwickeln" des Magnetfeldes durch differentielle Rotation, Toroidales Feld wird instabil und produziert poloidales Feld $\Longrightarrow$ Tayler-Spruit-Dynamo



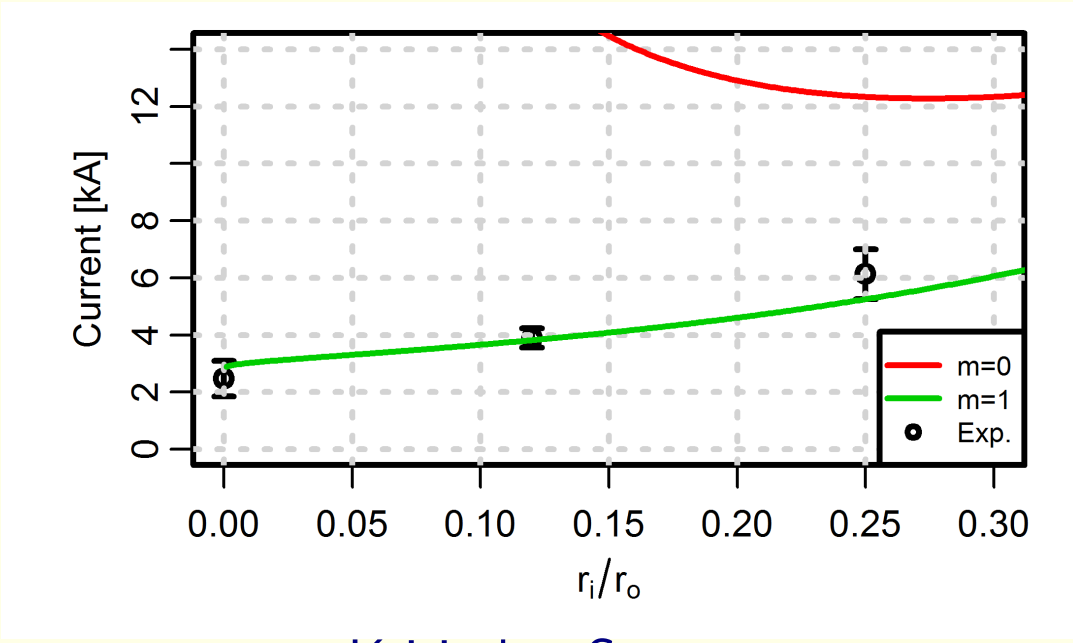
Tayler-Instabilität (TI)



Tayler-Instabilität: Gute Übereinstimmung mit Theorie



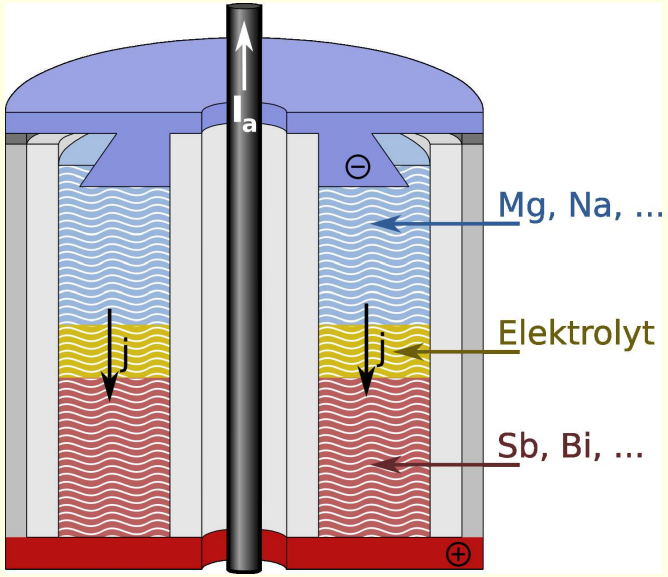
Wachstumsraten und Magnetfeld-Stärke



Kritischer Strom

TI: Anwendung für Flüssigmetall-Batterien

- D. Sadoway (MIT): Selbstschichtende Batterie (Halbmetall, Elektrolyt, Metal)
- Vorteil: Hohe Ströme, geringer Preis
- Problem: Tayler-Instabilität
- Lösung: Strom durch die Mitte zurückführen



Ausblick: DRESDYN

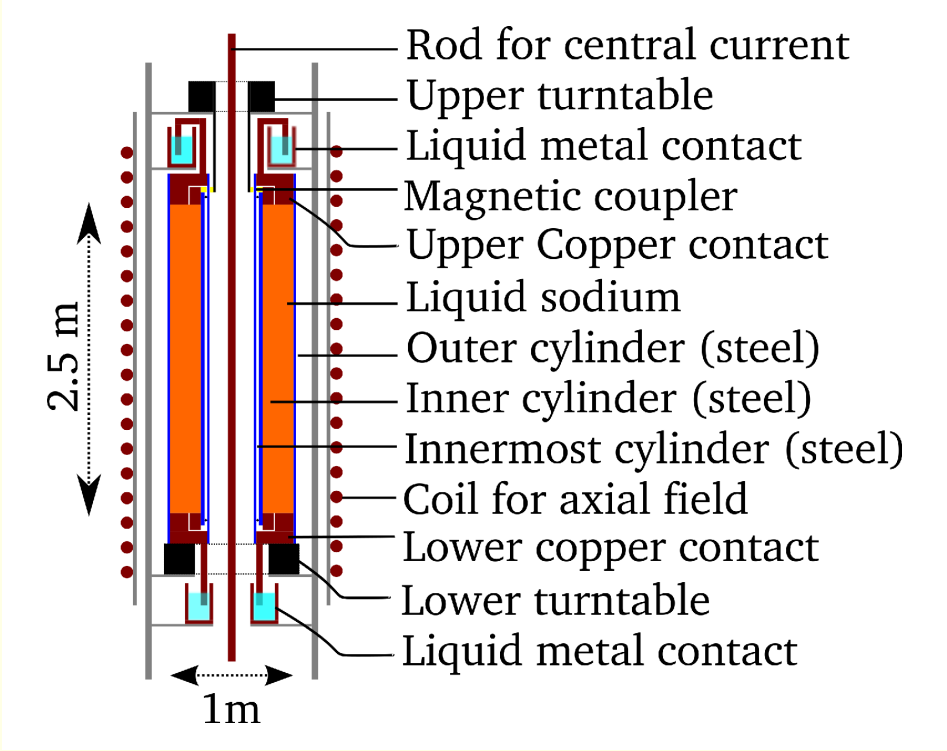
DREsden Sodium facility for DYNamo and thermohydraulic studies

- Finanzierung 2013-2015 im Rahmen der Infrastrukturmaßnahmen des Freistaates Sachsen beim Übergang des HZDR von der WGL in die HGF

- DRESDYN versteht sich als europäische Plattform für Flüssigmetallexperimente zu kosmischen Magnetfeldern, zur Thermohydraulik von Füssigmetallströmungen, und zur Untersuchung von Füssigmetallbatterien

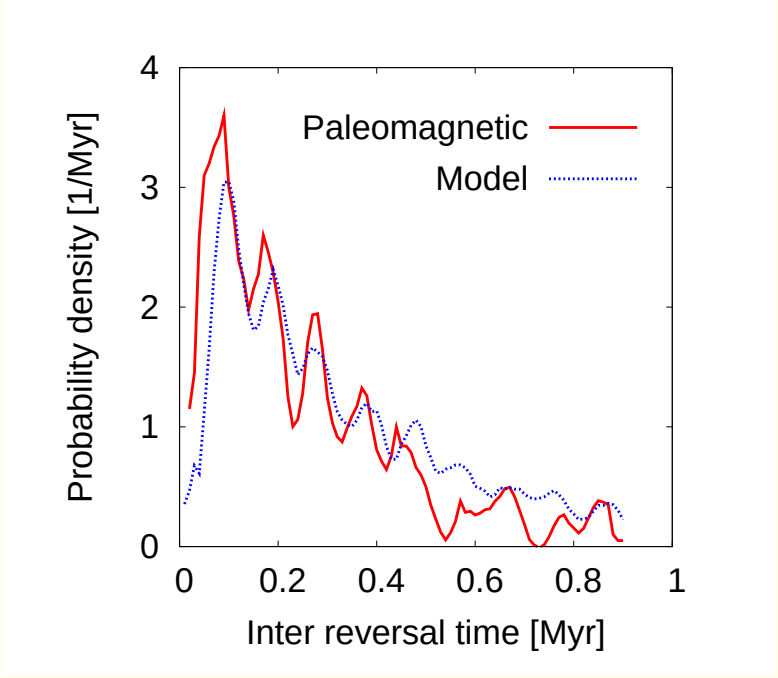
- Gebäude mit etwa 500 m^2, Natrium-Inventar etwa 15 m^3

Ausblick: DRESDYN - MRI+TI-Experimente mit flüssigem Natrium



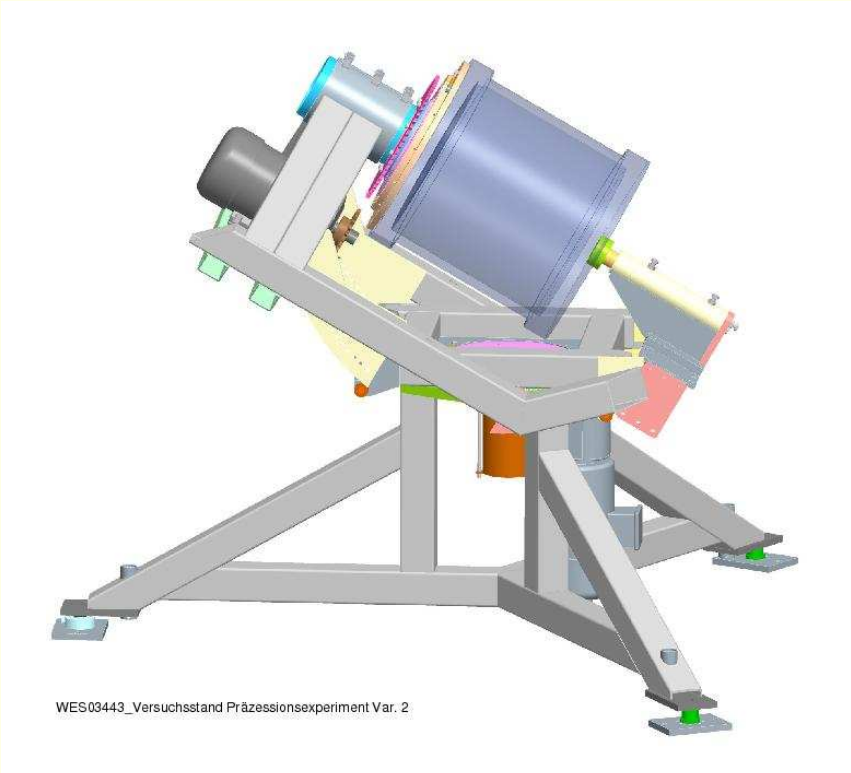
DRESDYN: Präzessionsexperiment mit Na

- Präzession (Rotation um zwei Achsen) wird als Energiequelle des Geodynamos diskutiert
- Einfluß von Variationen der Erdbahn auf Umpolungen des Erdmagnetfeldes ist nachgewiesen
- Präzessionsdynamo wäre ein homogener Dynamo par excellence

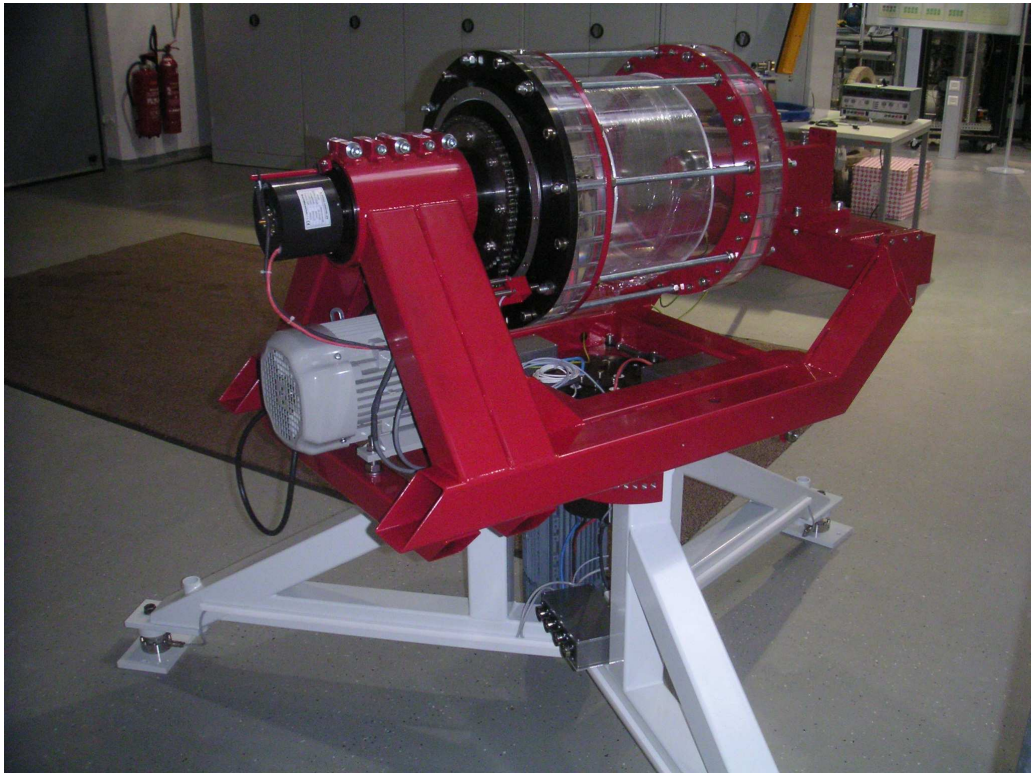


DRESDYN - Wasser-Vorexperiment

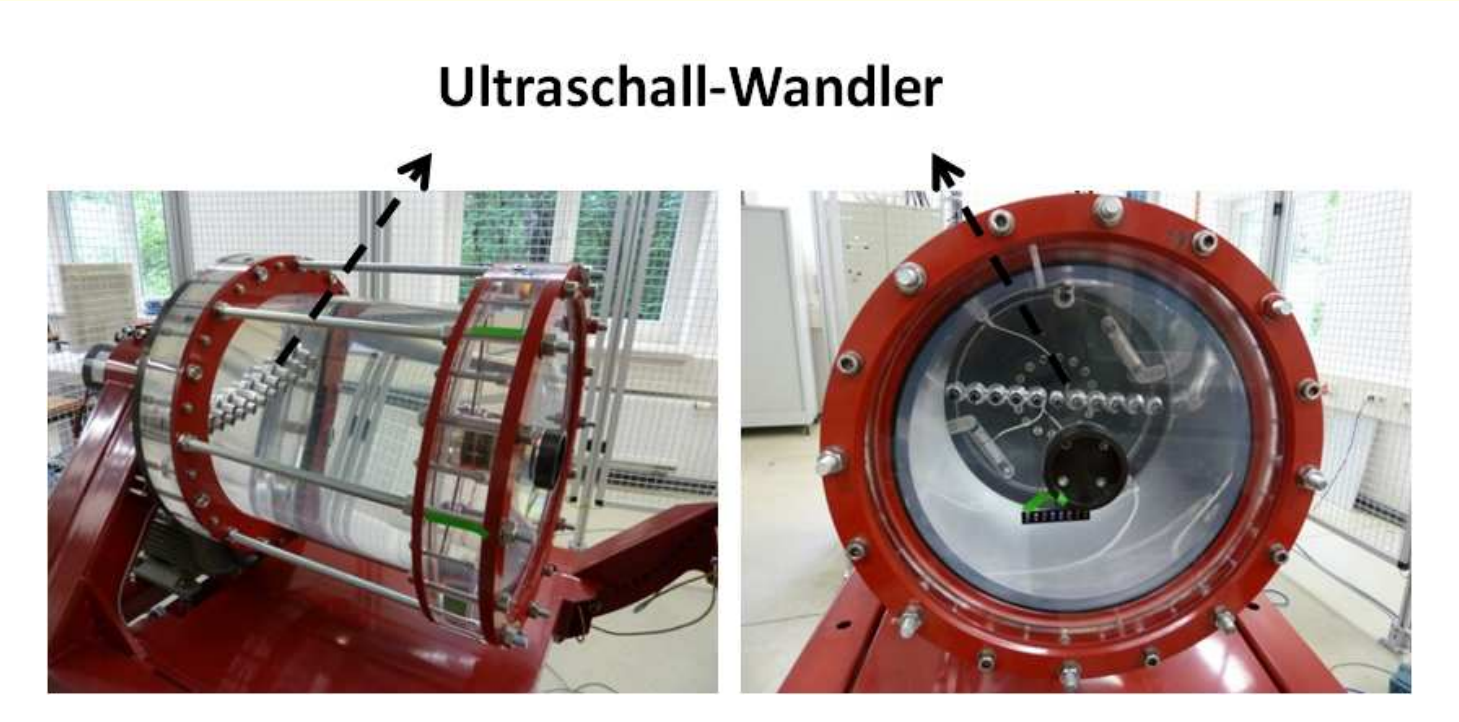
- $H = D = 0.32$ m, d.h. 1:6
- Rotation bis 10 Hz, Präzession bis 1 Hz
- Gemessen werden: Gyroskopisches Moment, Drehmomente, Motorleistungen, Strömungsstruktur



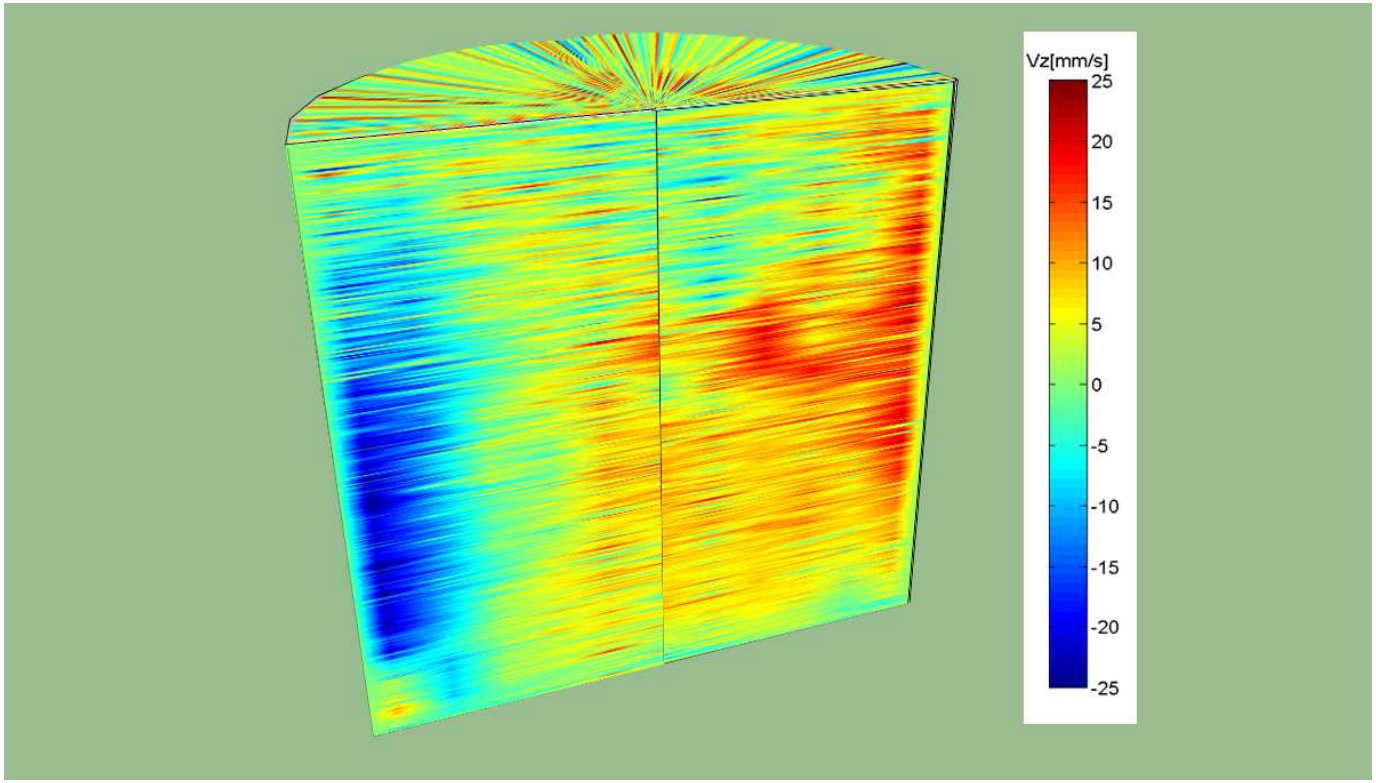
DRESDYN - Wasser-Vorexperiment



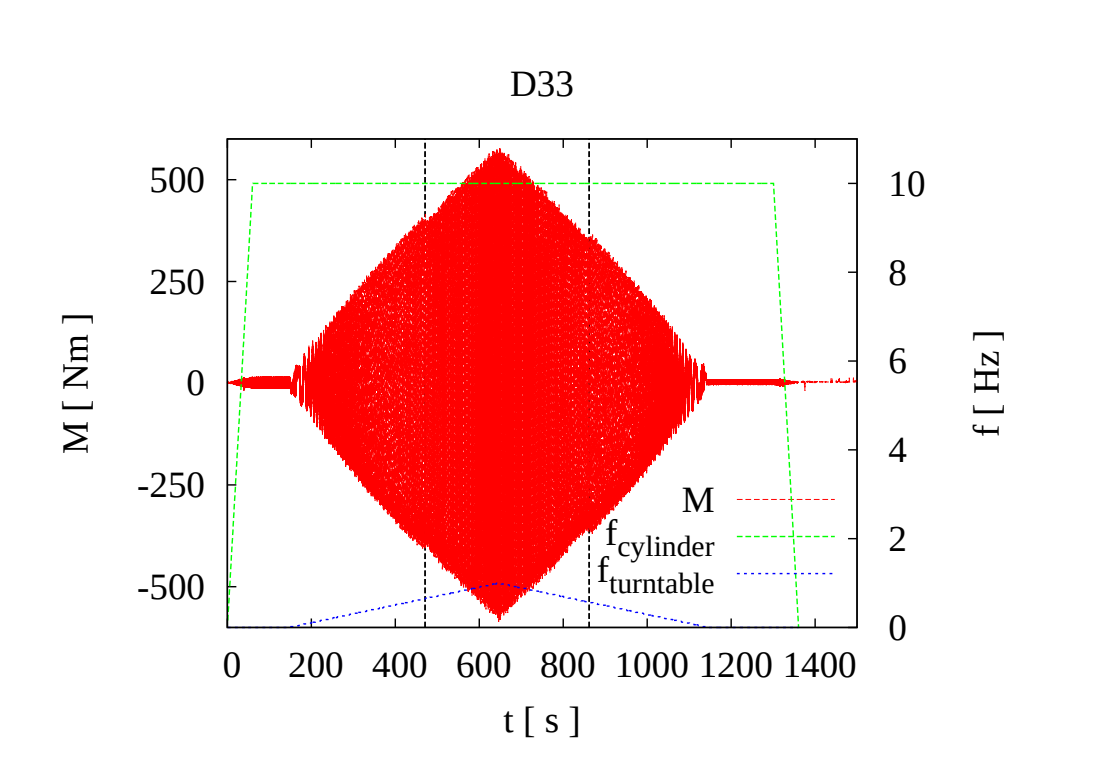
DRESDYN: Ultraschallmessungen der Geschwindigkeit



DRESDYN: Ultraschallmessungen der Geschwindigkeit

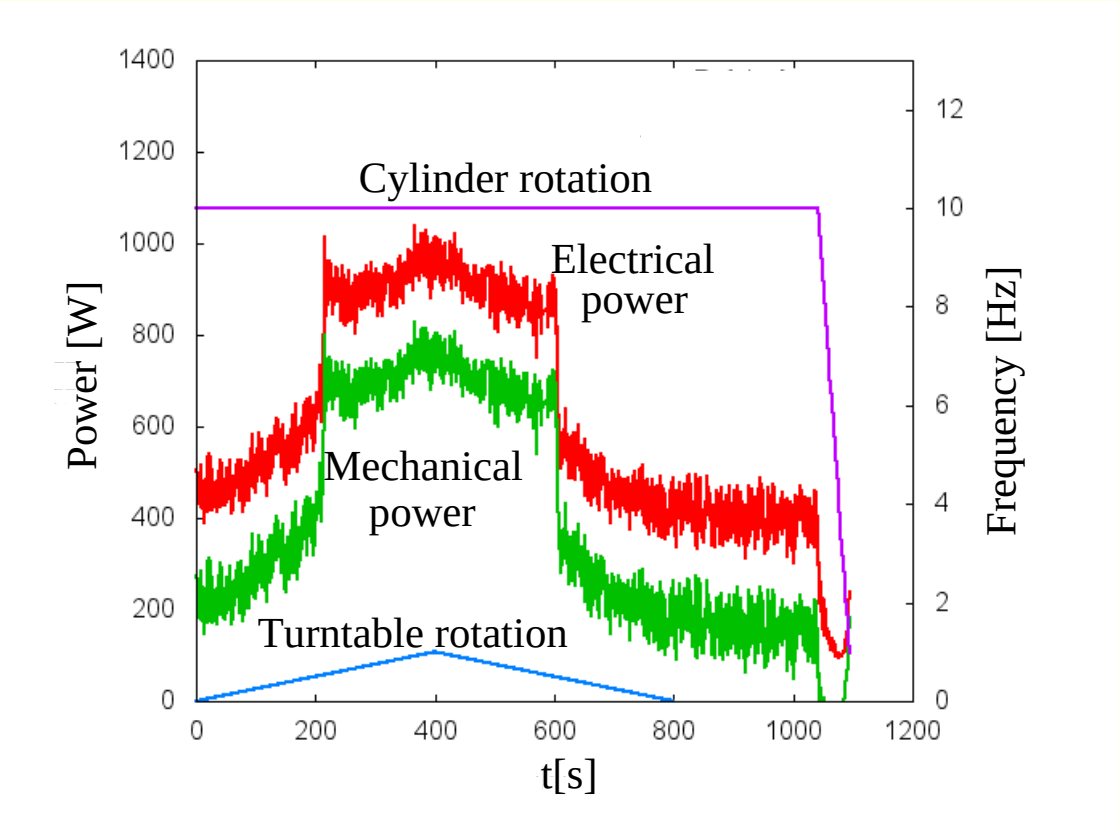


DRESDYN - Gyroskopisches Moment auf Fundament

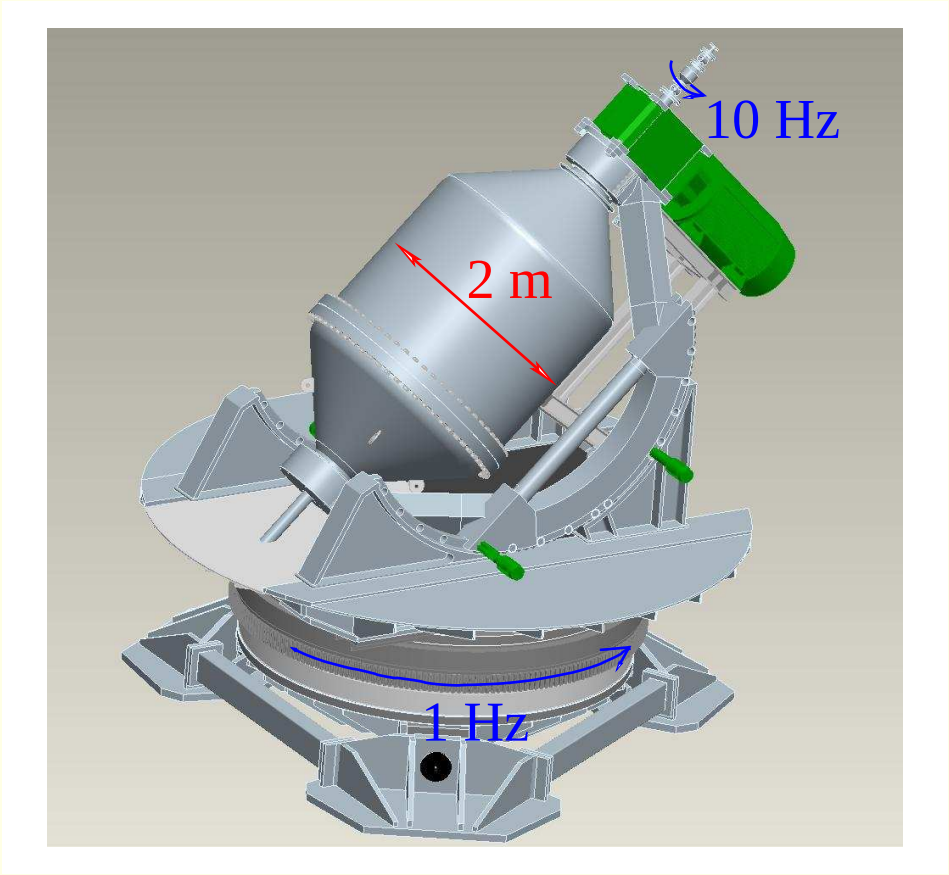


$T_{small} \sim 500$ Nm; skaliert mit $6^5 \Longrightarrow T_{large} \sim 4 \times 10^6$ Nm

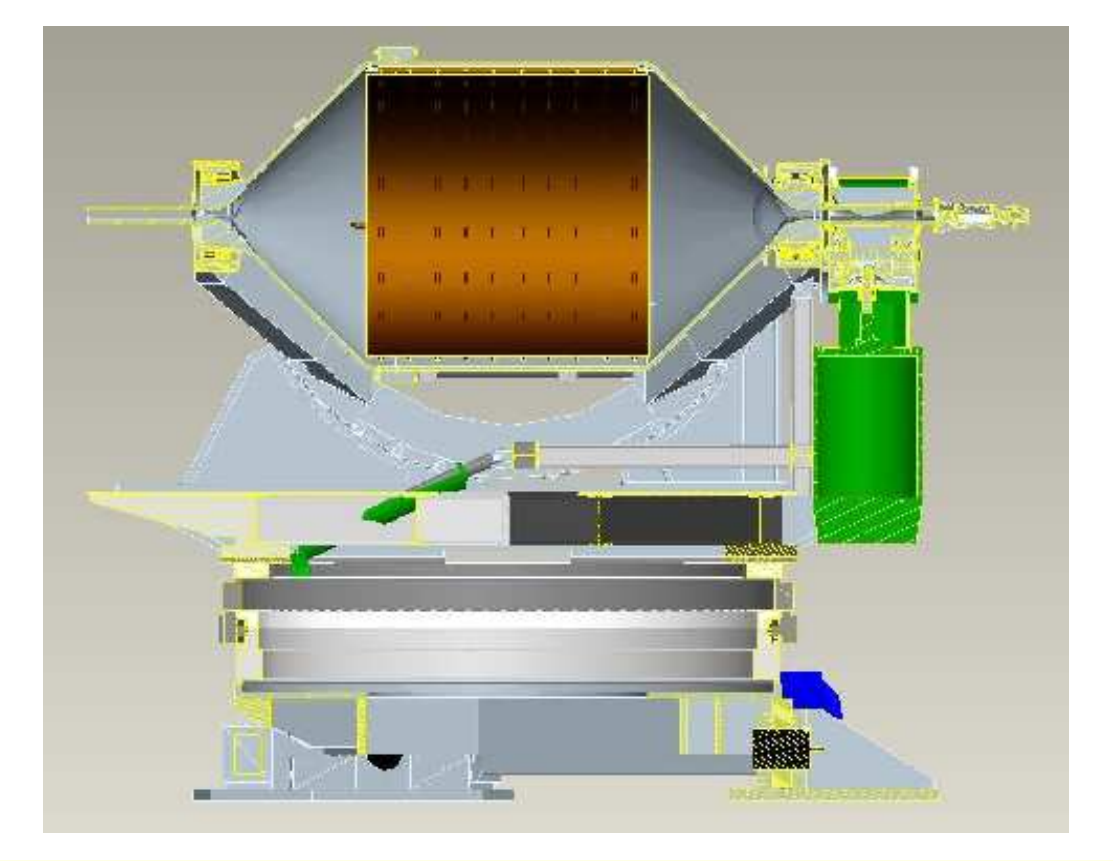
DRESDYN: Übergang zur Turbulenz bei $\Omega_p/\Omega_r \sim 0.06$



DRESDYN: Der große Präzessionsdynamo



Präzessionsdynamo: Innerer Kupferzylinder



Zusammenfassung

- Das Erdmagnetfeld und andere kosmische Magnetfelder entstehen durch homogenen Dynamoeffekt in strömenden elektrisch leitfähigen Fluiden.
- Erste erfolgreiche Dynamoexperimente mit flüssigem Natrium: Riga 1999, Karlsruhe 1999, Cadarache 2006
- Magneto-Rotations-Instabilität (MRI) erklärt Drehimpulstransport in Akkretionsscheiben. Extrem wichtig für Wachstum von Sternen und Schwarzen Löchern.
- Erste erfolgreiche Experimente zum Nachweis der helikalen MRI (2006) und der Tayler-Instabilität (2011) am HZDR

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Literatur

F. Stefani, A. Gailitis, G. Gerbeth: "Magnetohydrodynamic experiments on cosmic magnetic fields", Zeitschr. Angew. Math. Mech. 88 (2008) 930-954, http://arxiv.org/abs/0807.0299