

Von taumelnden Planeten und gefräßigen schwarzen Löchern: Experimente zur Entstehung und Wirkung kosmischer Magnetfelder

Lehrerfortbildung 19.02.2016

Frank Stefani

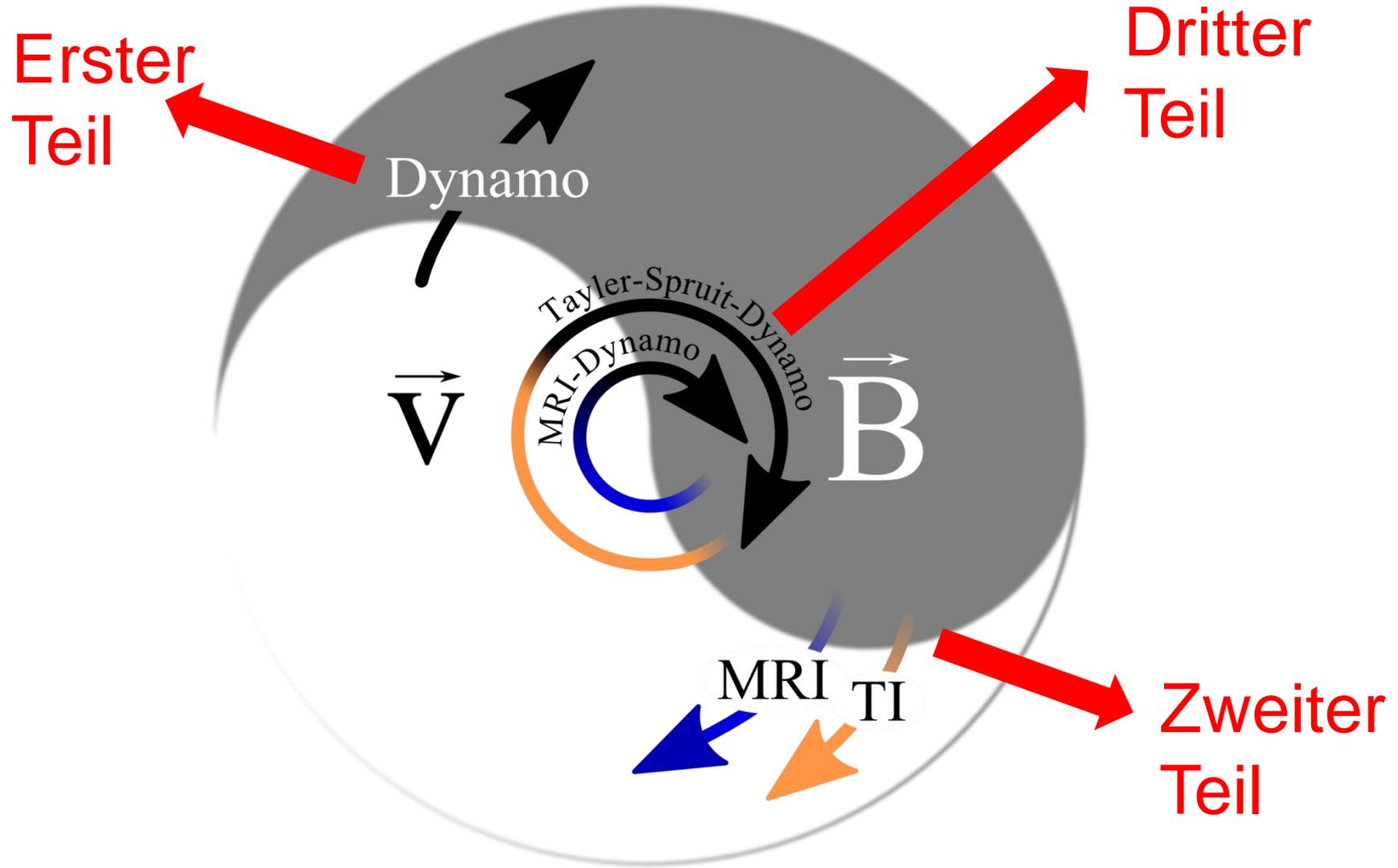
mit Dank an

G. Gerbeth, A. Giesecke,
Th. Gundrum, Ch. Steglich (HZDR)
Agris Gailitis (Riga)
Günther Rüdiger (Potsdam)

HZDR

 HELMHOLTZ
ZENTRUM DRESDEN
ROSSENDORF

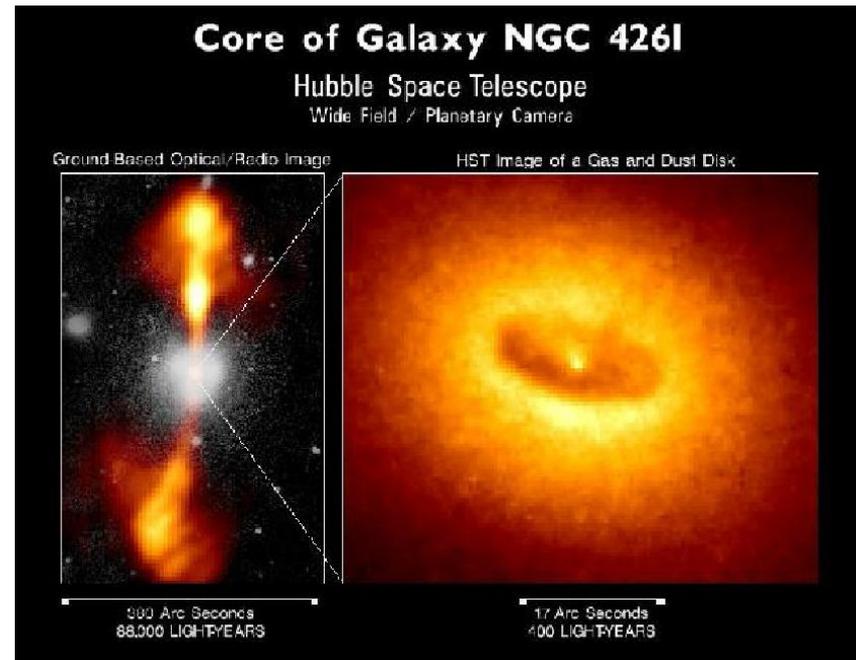
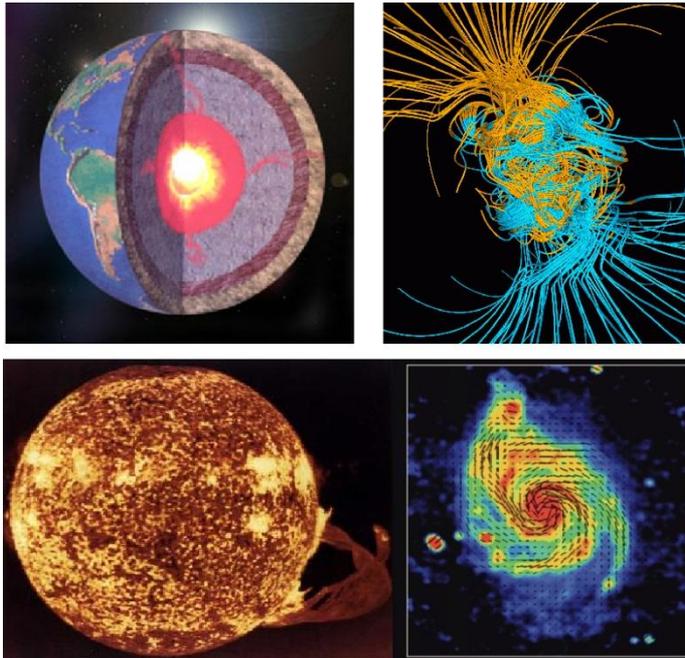
Das Yin-Yang der kosmischen Magnetohydrodynamik



Magnetfelder im Kosmos...

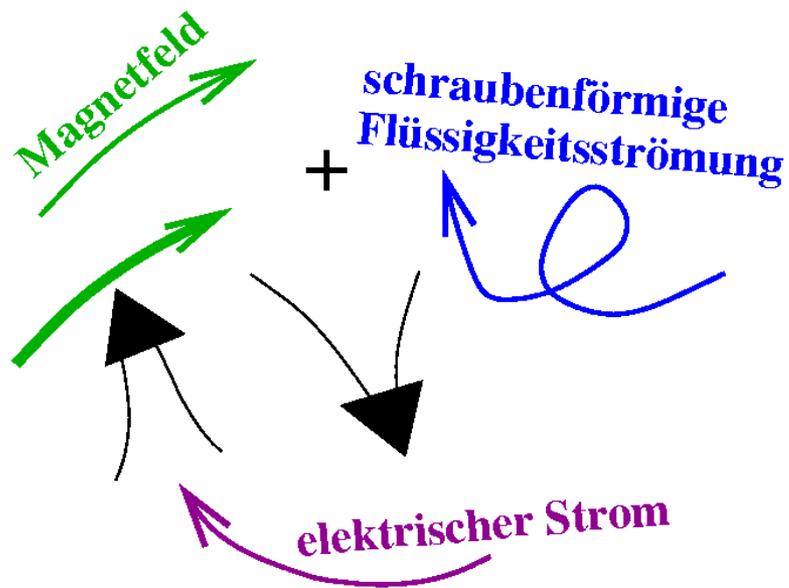
...werden durch den hydro-magnetischen **Dynamo**effekt generiert

...spielen eine entscheidende Rolle bei der **Entstehung von Sternen und Schwarzen Löchern**



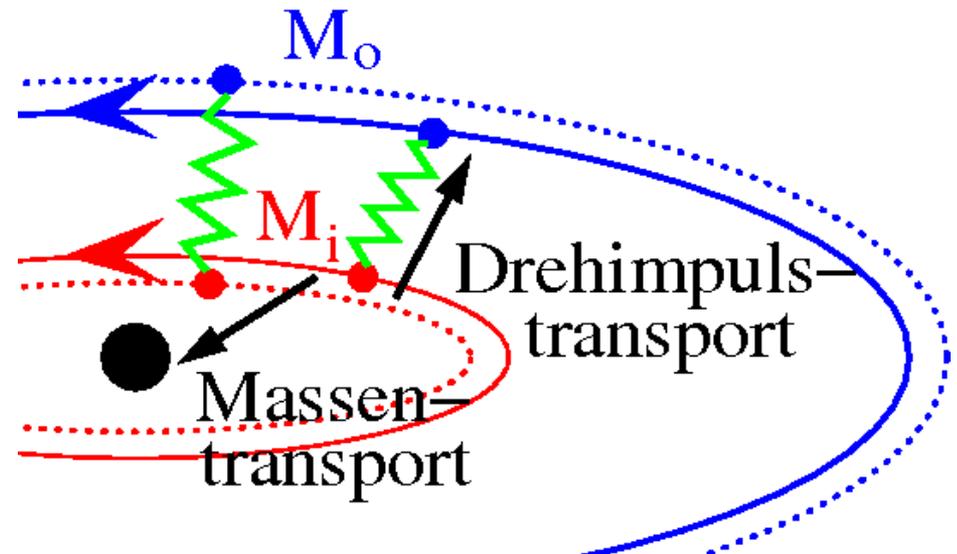
Dynamoeffekt:

Selbsterregung eines Magnetfeldes in genügend starken schraubenförmigen Strömungen leitfähiger Fluide



Magneto-Rotationsinstabilität (MRI):

Magnetfelder wirken wie Federn und bewirken Drehimpuls- und Massentransport in Akkretionsscheiben, aus denen Sterne und Schwarze Löcher gefüttert werden



Seit 16 Jahren: Experimente zu kosmischen Magnetfeldern

Dynamo-Experimente:

Riga, Karlsruhe (1999),

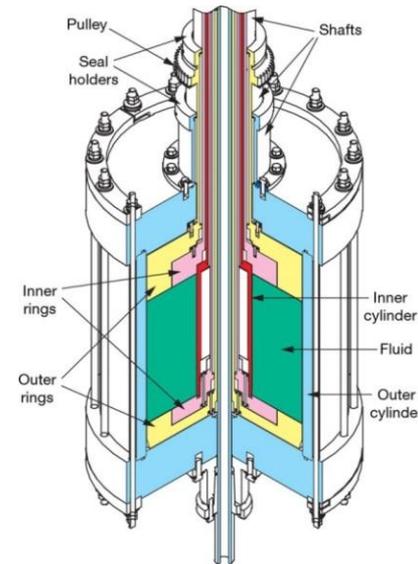
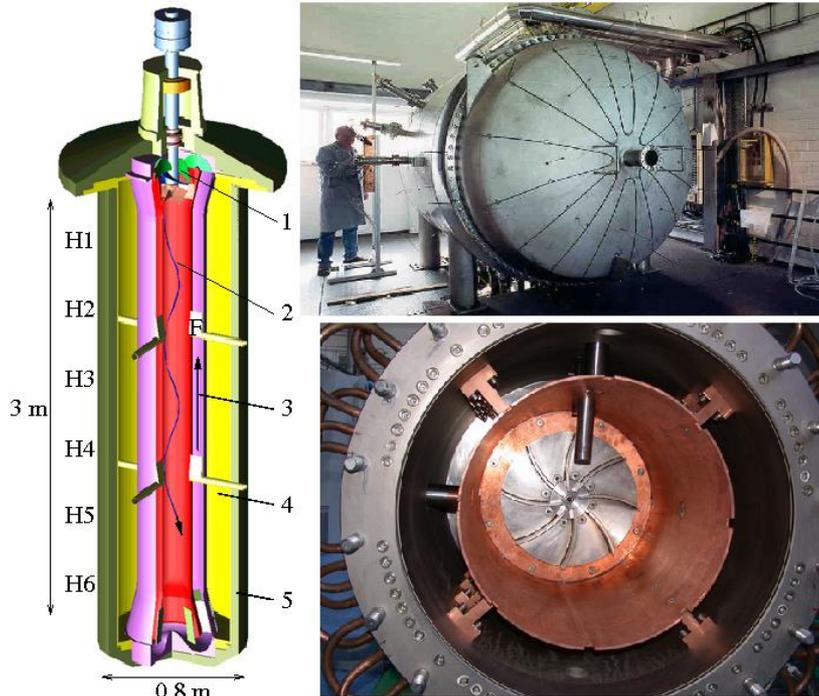
Cadarache (2006),

Maryland, Madison, Perm

Experimente zur **Magneto-Rotationsinstabilität (MRI):**

Dresden-Rossendorf (2006)

Maryland, Princeton



DRESDYN



Plattform für Experimente mit flüssigem Natrium zu...

- ...geo- und astrophysikalischen Prozessen im Zusammenhang mit der **Entstehung und Wirkung kosmischer Magnetfelder**
- ...Untersuchungen großer **Flüssigmetallbatterien zur Zwischenspeicherung erneuerbarer Energien**
- ...Thermohydraulik und Sicherheit von Flüssigmetall-Strömungen in der **Energietechnik** (Solarthermische Kraftwerke, Transmutationsanlagen zur Reduzierung radioaktiver Abfälle)

DRESDYN: Allgemeines

- Neues Gebäude mit ~ 500 m² Experimentierfläche
- Natrium-Inventar: 12 Tonnen
- Große Experimentierhalle für **MRI-Experiment**, Flüssigmetallbatterien, Natrium-Loop, Röntgenanlage usw.
- **Präzessions-Dynamo** mit separatem Fundament and Containment, das mit Argon geflutet werden kann



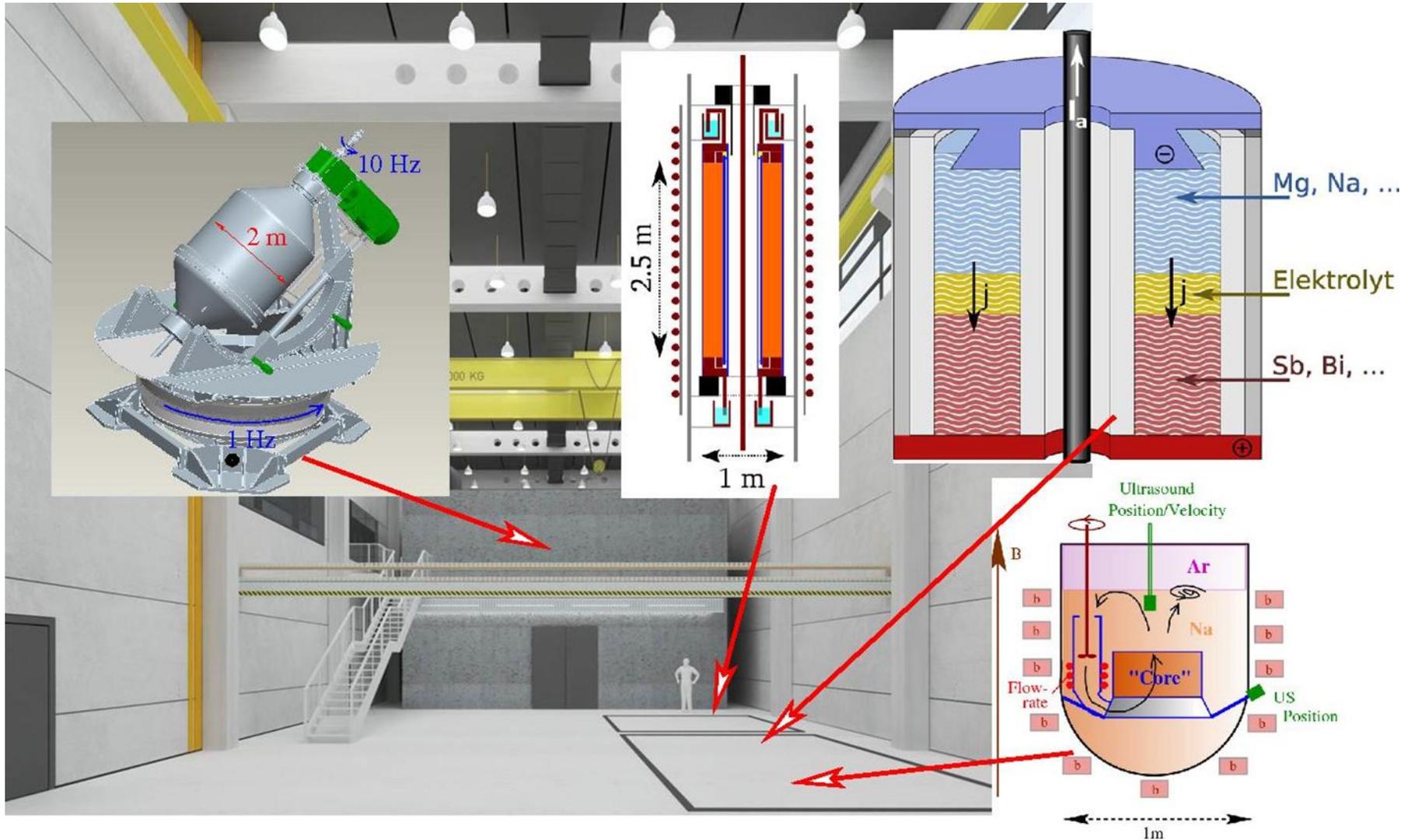
DRESDYN: Allgemeines

- Neues Gebäude mit ~ 500 m² Experimentierfläche
- Natrium-Inventar: 12 Tonnen
- Große Experimentierhalle für **MRI-Experiment**, Flüssigmetallbatterien, Natrium-Loop, Röntgenanlage usw.
- **Präzessions-Dynamo** mit separatem Fundament and Containment, das mit Argon geflutet werden kann



DRESDYN-Baustelle im Oktober 2015

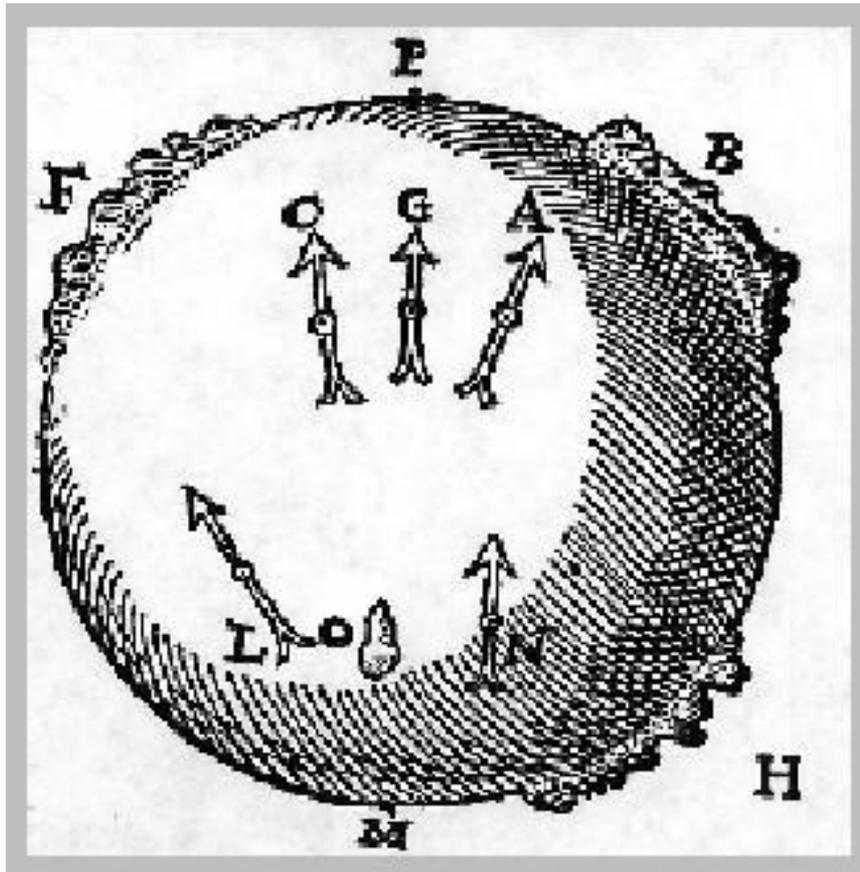
DRESDYN: Gesamtschema



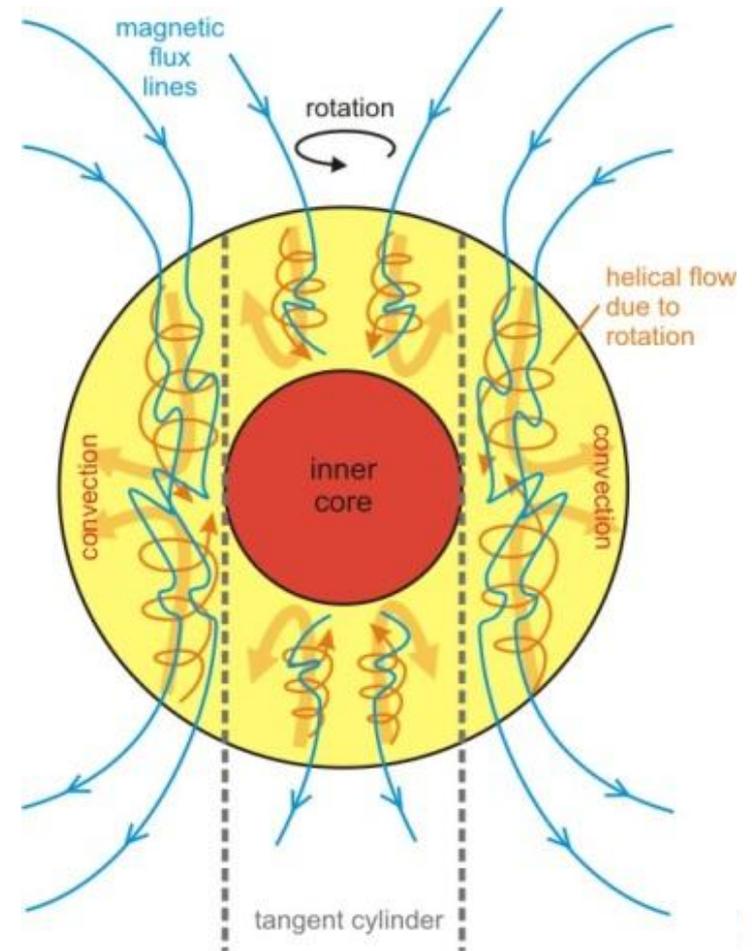
Dynamos

Wie entsteht das Magnetfeld der Erde?

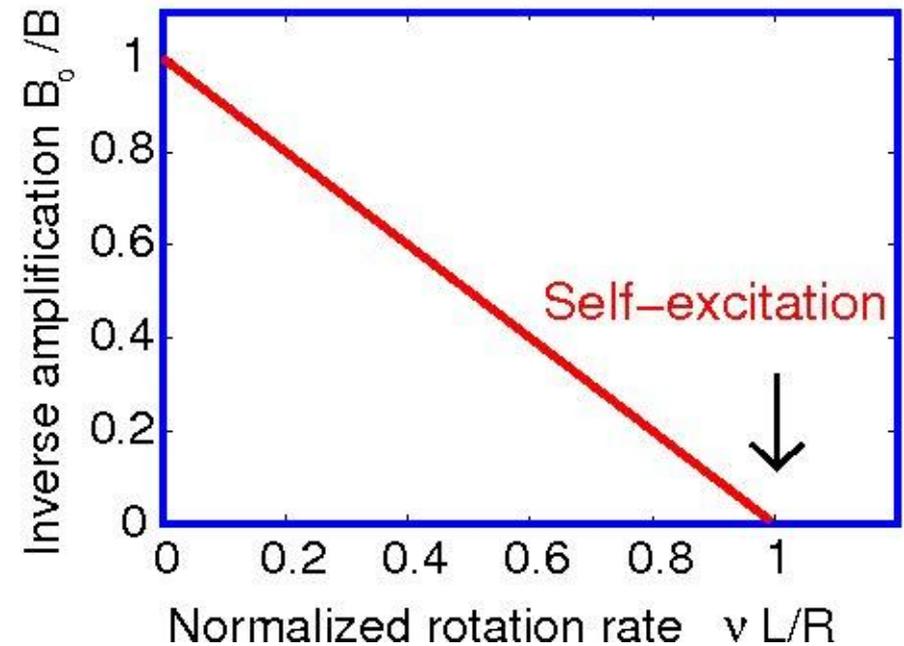
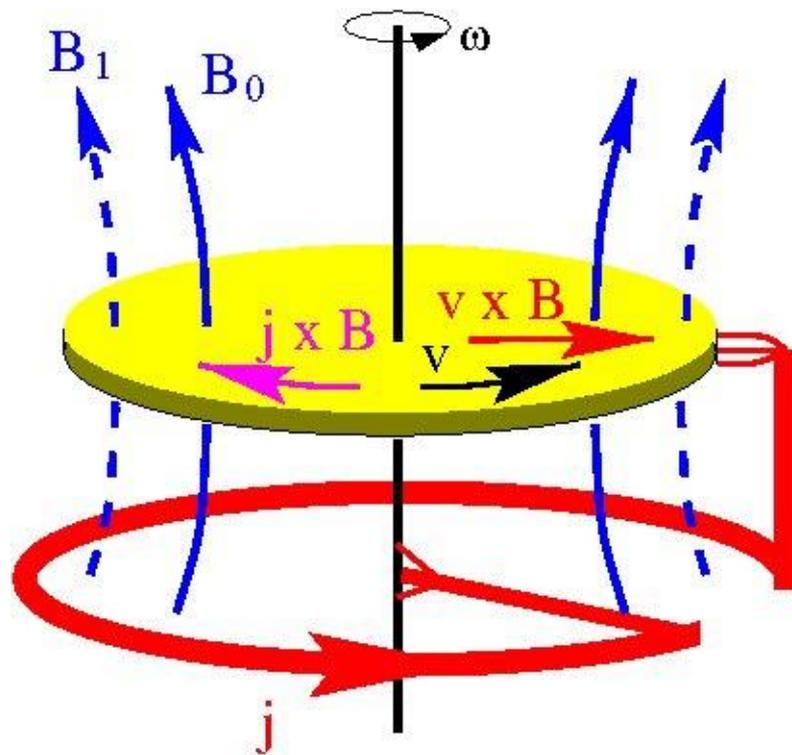
William Gilbert (1600):
“Die Erde ist ein
großer Magneteisenstein”



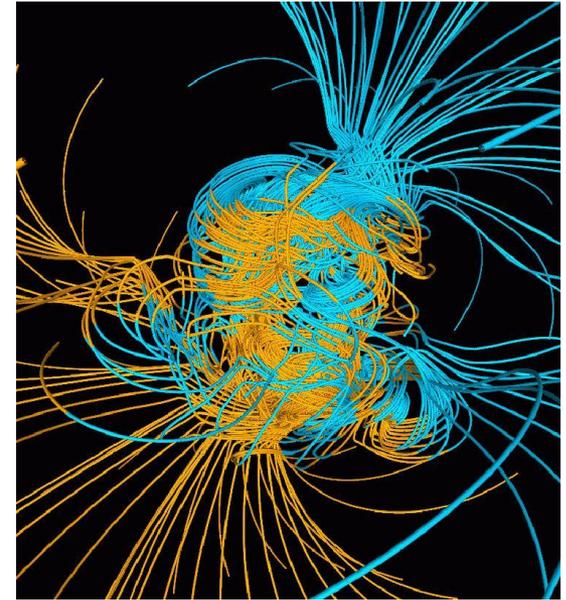
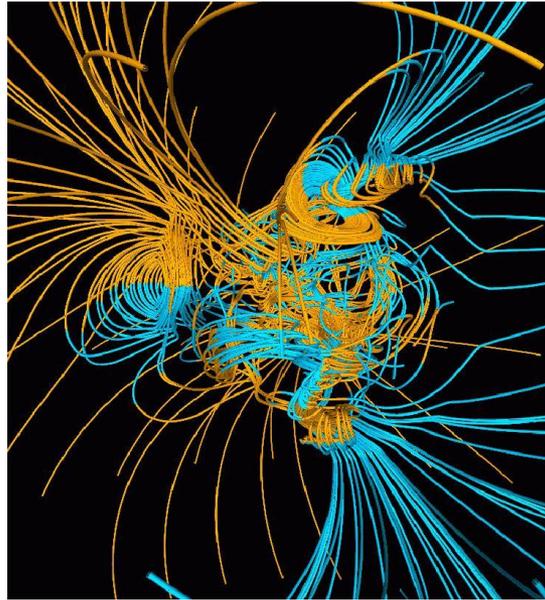
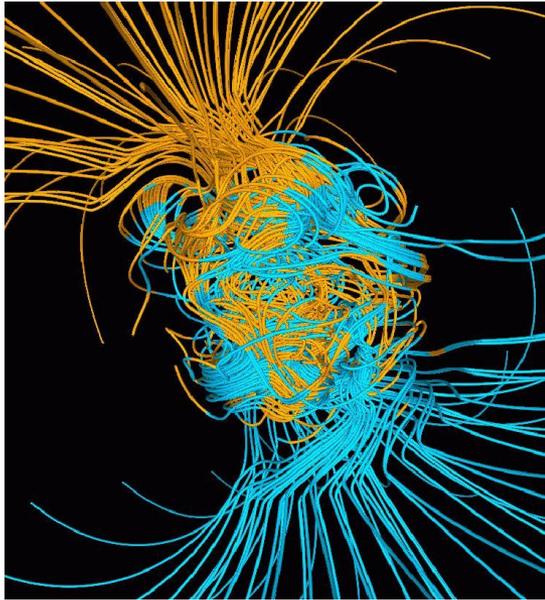
Modernes Bild: Erdmagnetfeld
entsteht durch Selbsterregung
im flüssigen äußeren Erdkern



Einfachstes Modell der Selbsterregung: Scheibendynamo



Numerische Simulationen

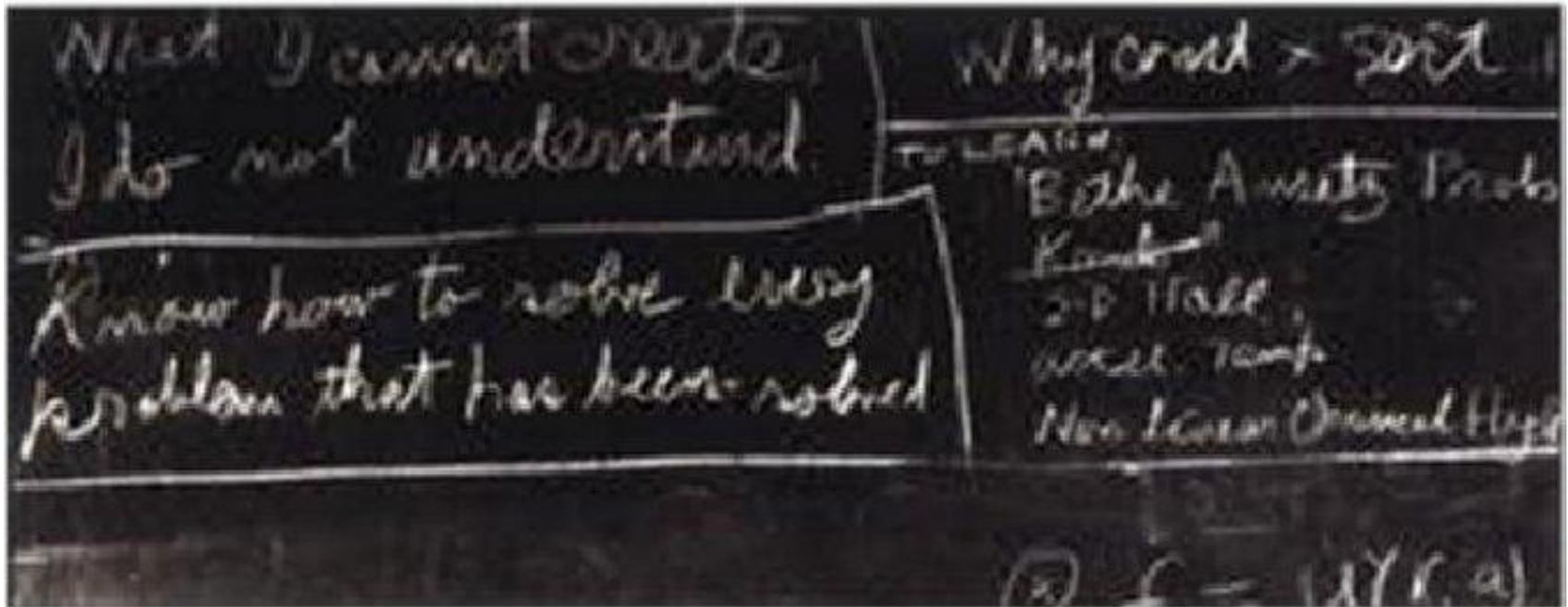


Erstmalige Simulation einer Feldumpolung durch Glatzmeier und Roberts (Nature, 1995) in einem erdähnlichen Dynamo-Modell

Warum Experimente?

Turbulente Strukturen der Strömungen können durch numerische Simulationen auch in absehbarer Zukunft nicht aufgelöst werden

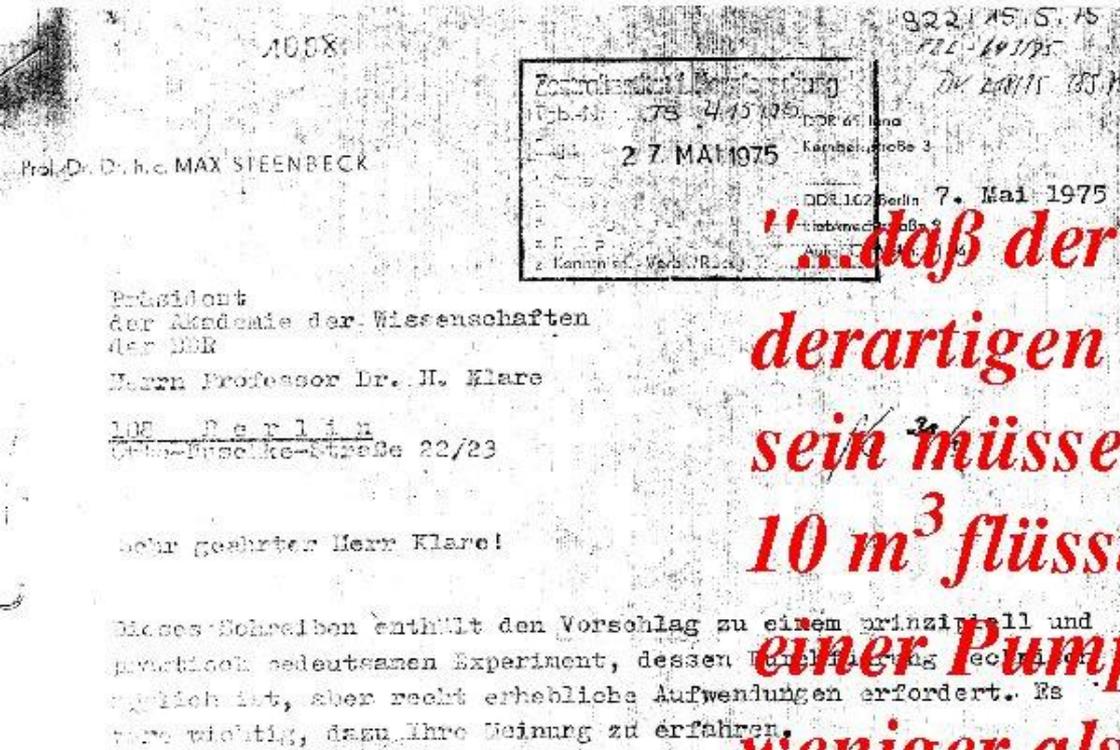
Und: **What I cannot create I do not understand** (Richard Feynman)



Erste Abschätzungen für Dynamoexperimente

Max Steenbeck
an H. Klare 1975:

"...daß der Aufwand für einen derartigen Versuch beträchtlich sein müsse – ein Kessel mit etwa 10 m^3 flüssigem Natrium und einer Pumpenleistung von nicht weniger als $10\text{ m}^3/\text{sec}$."



Warum Natrium?

Bedingung für magnetische Selbsterregung: Magnetische Reynoldszahl muss größer sein als 10:

$$Rm = \mu\sigma UL > Rm_{\text{crit}} \geq 10$$

Natrium ist der beste flüssige elektrische Leiter mit $\sigma \sim 10^7$ S/m

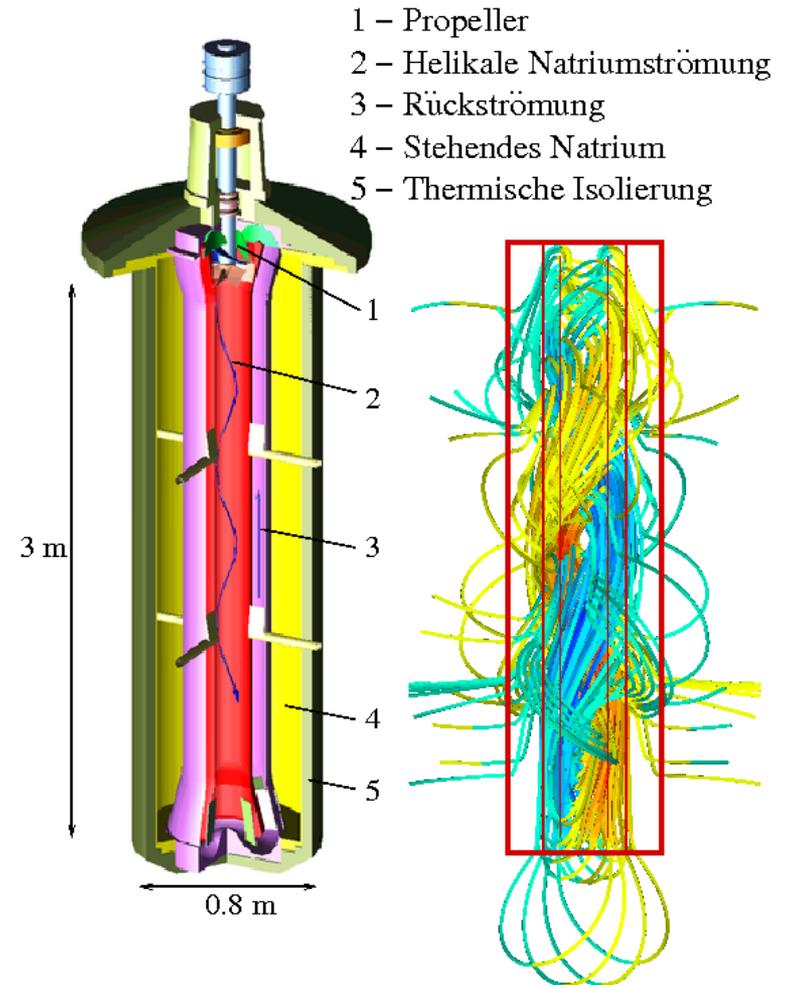
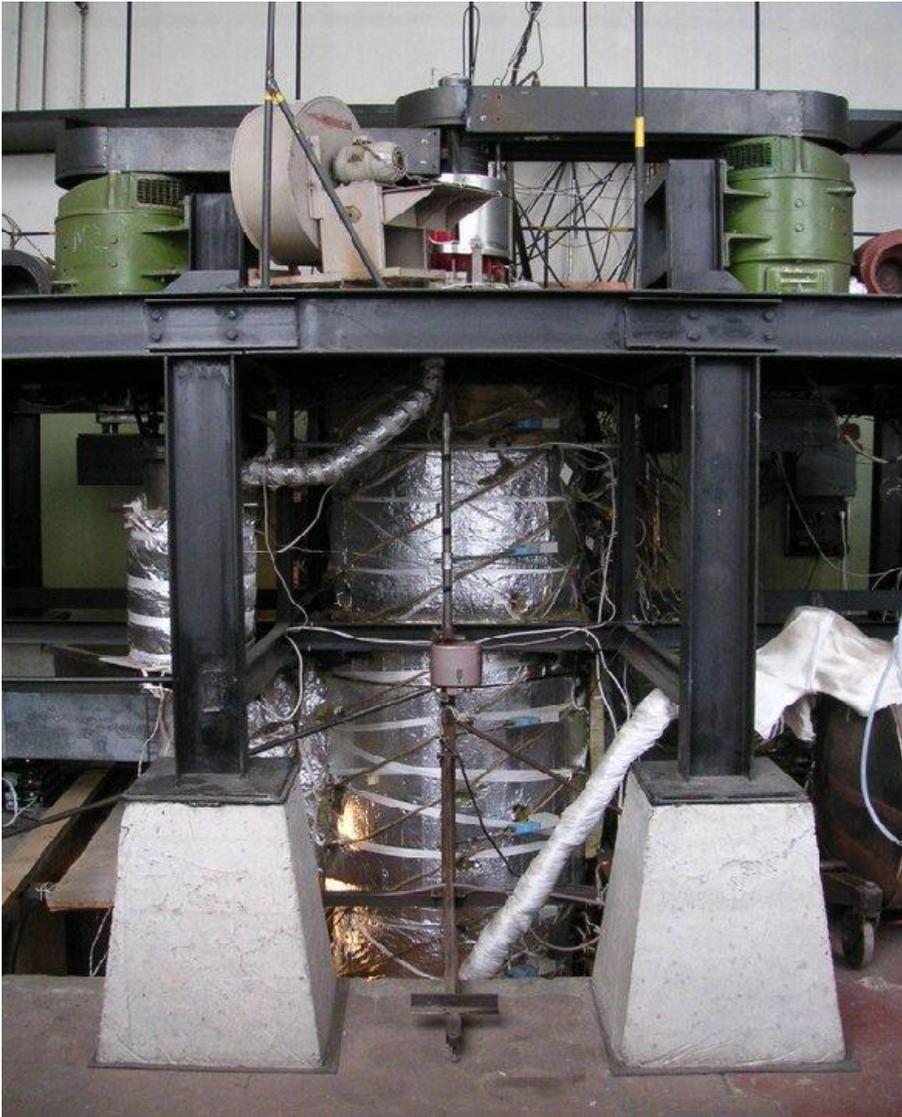
Warum müssen Dynamoexperimente so groß sein?

Notwendige Leistung skaliert reziprok mit der Größe:

$$P \sim Rm^3 / L$$

Vertretbare Leistung (einige 100 kW) nur mit großen Anlagen (~ 1 m) möglich

Rigaer Dynamoexperiment

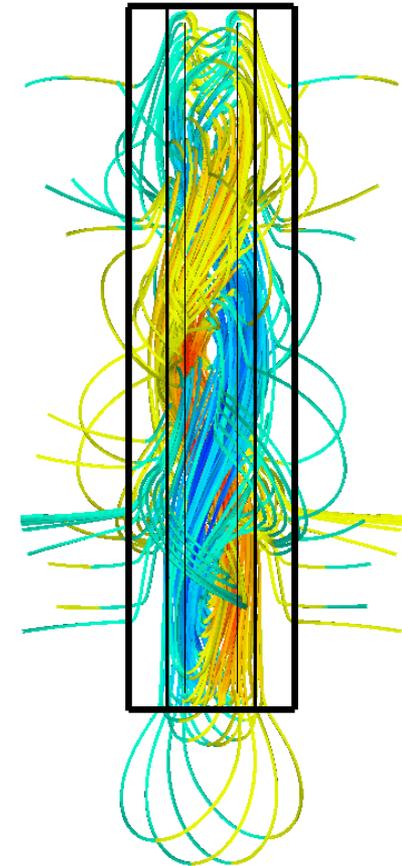
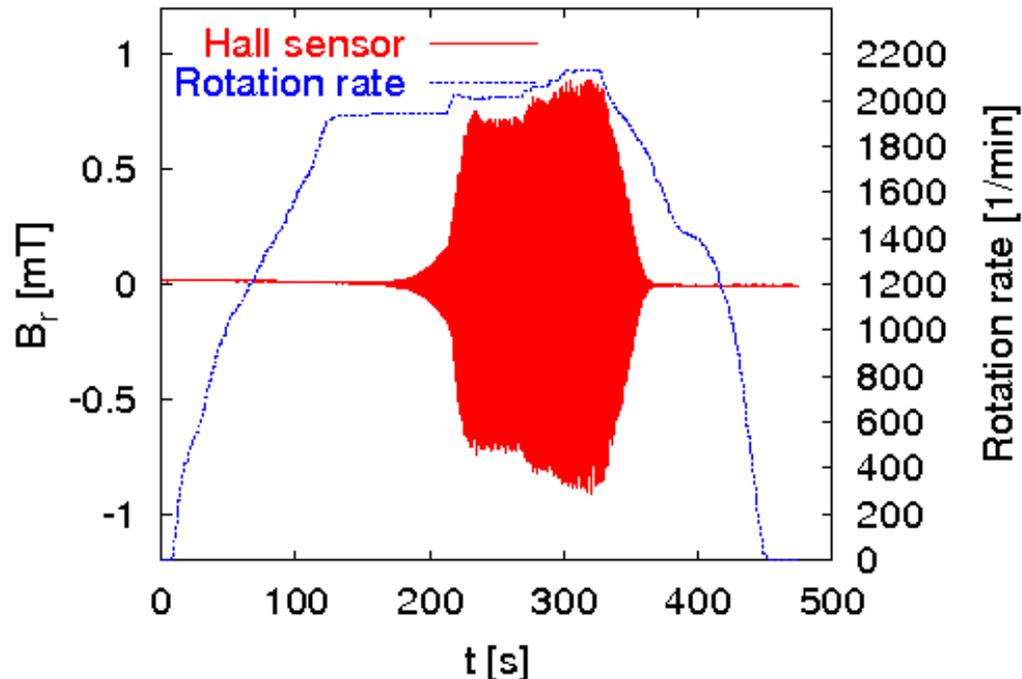


Dynamo-
modul

Berechnetes
Magnetfeld

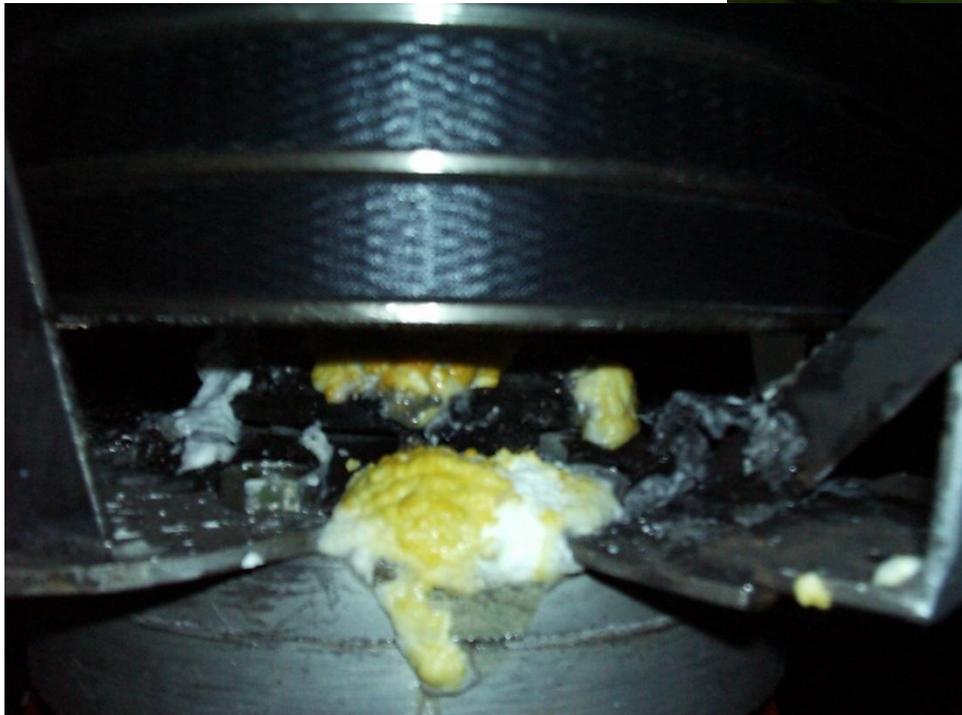
Rigaer Dynamoexperiment

Weltweit erstmaliger experimenteller Nachweis der Selbsterregung eines Magnetfelds in einer Flüssigmetallströmung (11.11.1999)



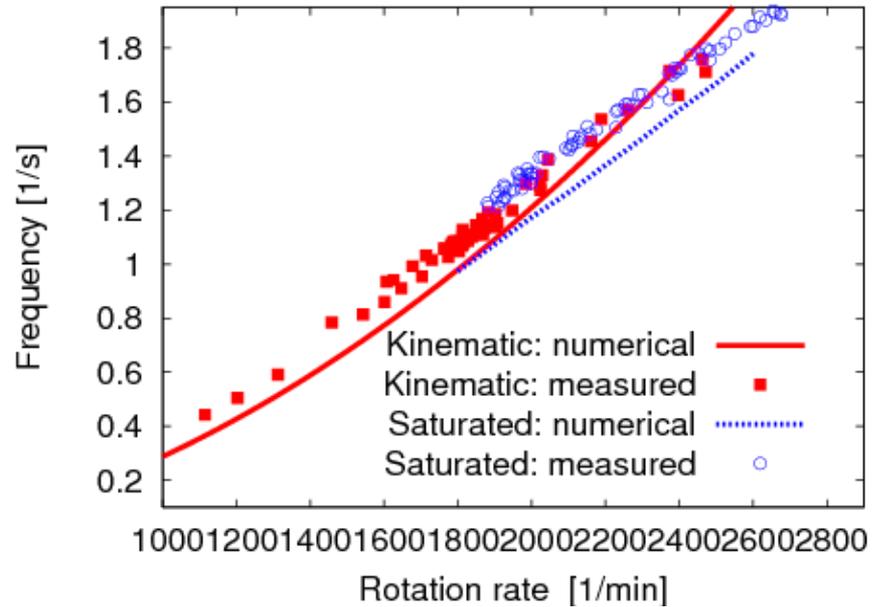
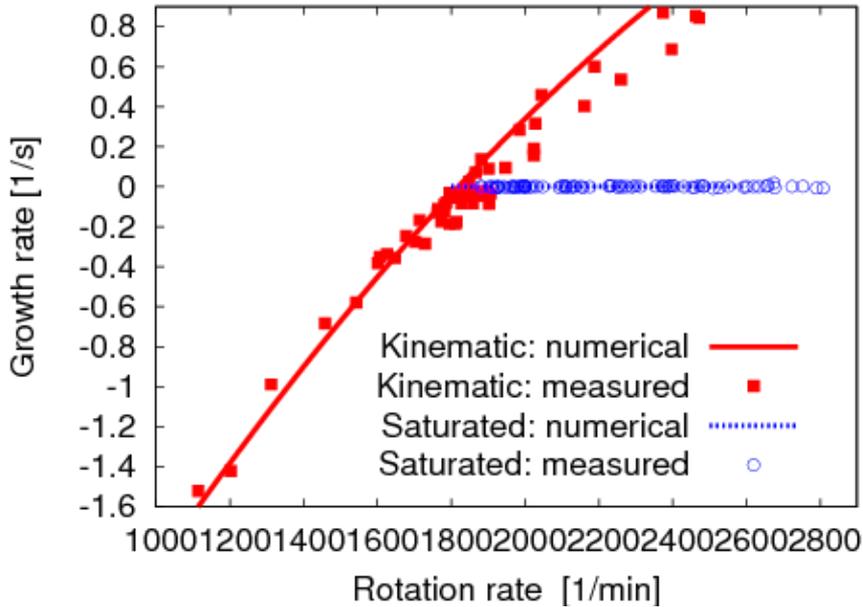
Rigaer Dynamo – Vorsicht: Natrium!

Der Abend des
11.11.1999...



...und der Morgen
danach...

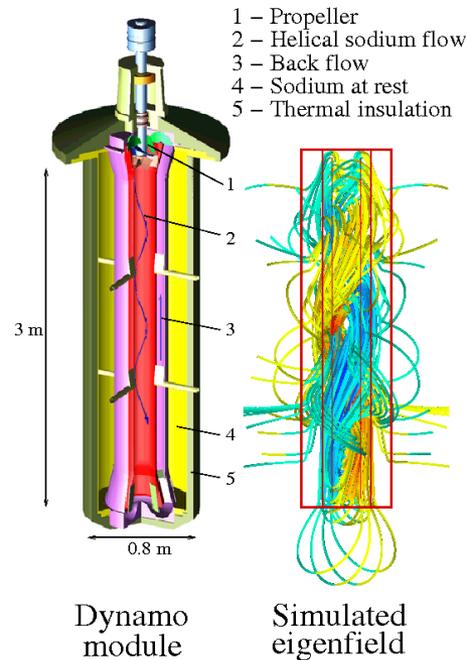
Rigaer Dynamo: Wachstumsraten und Frequenzen des Magnetfeldes



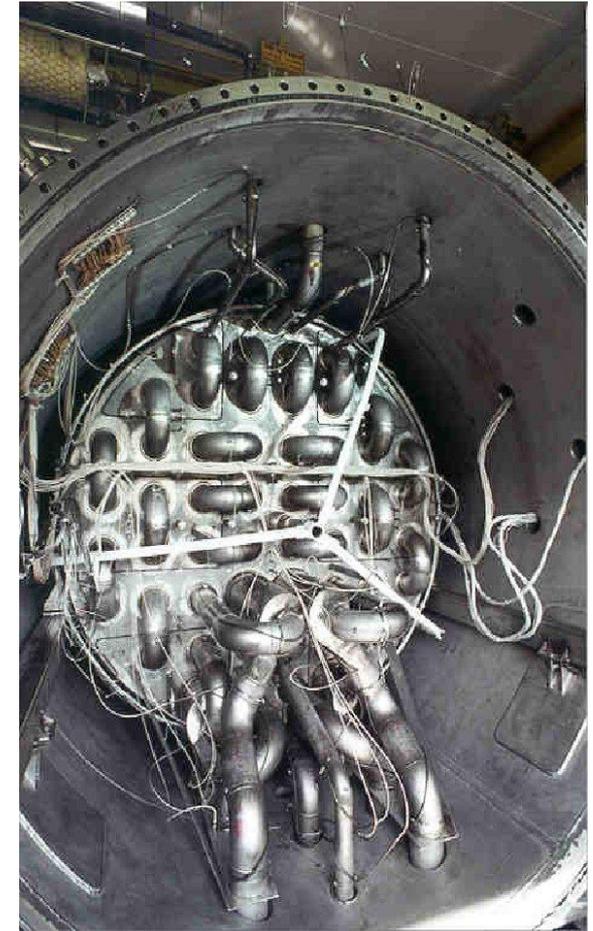
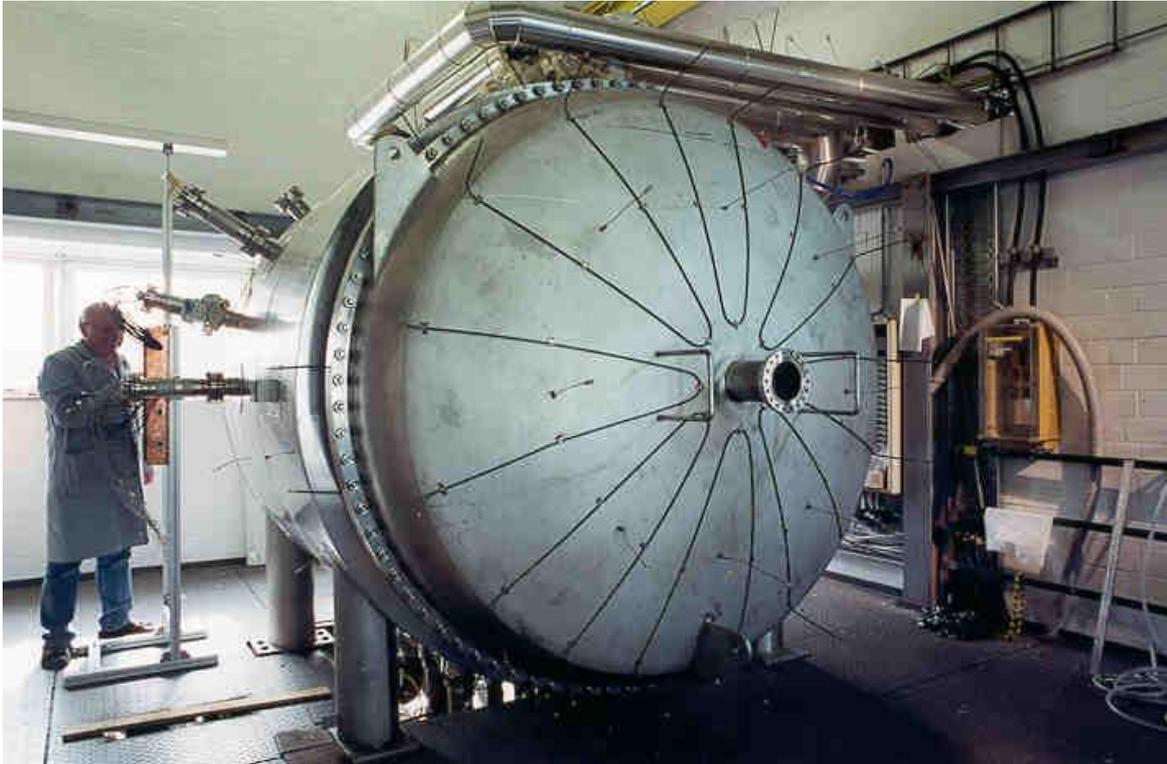
Numerische Vorhersagen waren bis auf 5-10 Prozent genau

Herzlichen Glückwunsch!

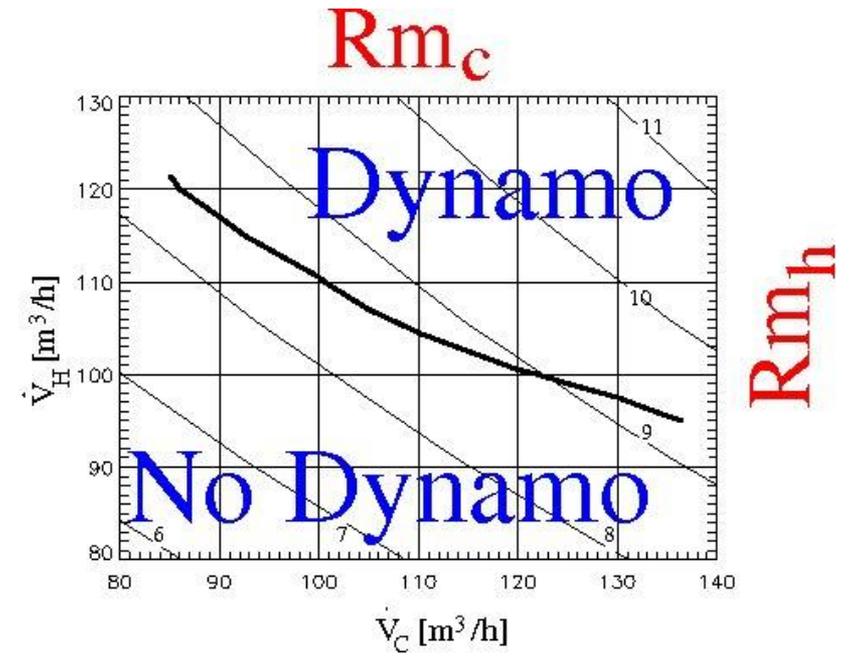
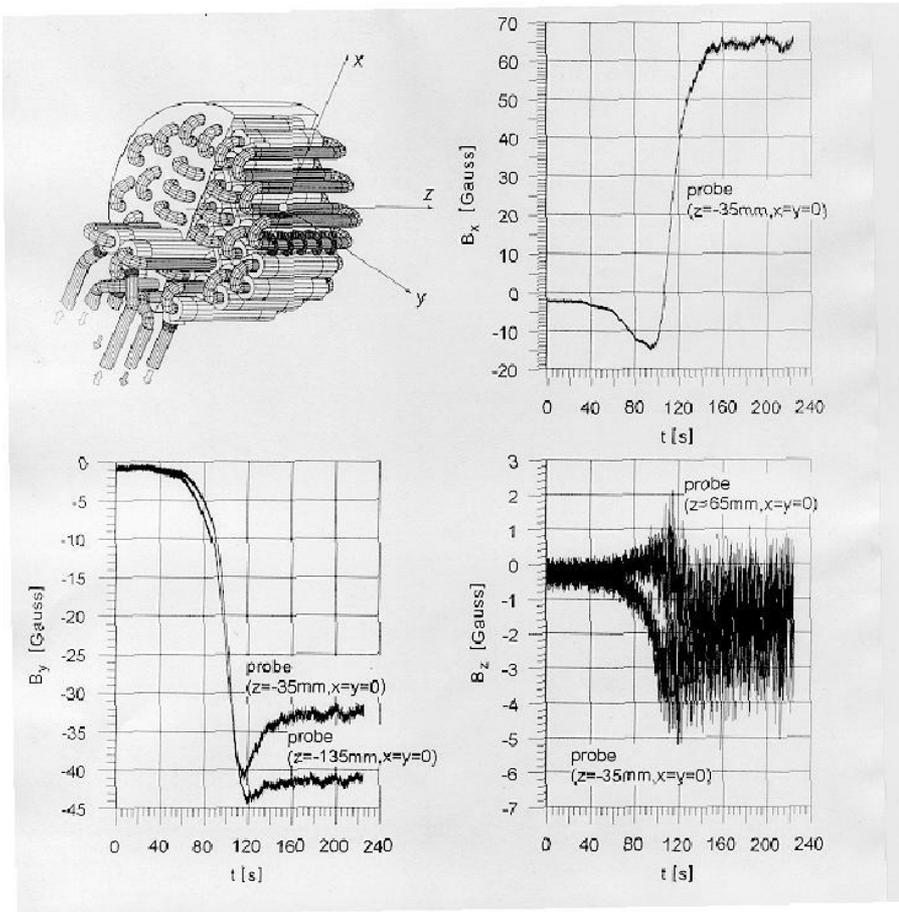
- Erfolgreiche Nominierung von Agris Gailitis für die Petrus Peregrinus Medal 2016 der European Geosciences Union



Karlsruher Dynamoexperiment



Karlsruher Dynamoexperiment



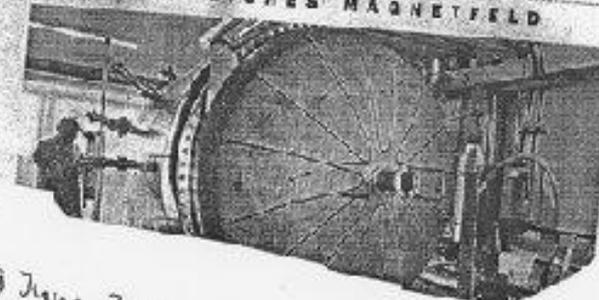
Ebenfalls sehr gute
Übereinstimmung mit
numerischen Vorhersagen

„Geheimes Fax“
vom 19.12.1999

„Dynamo Riga“ gegen „Dynamo Karlsruhe“

BZ 22.10.00 **Zwei Forschergruppen streiten sich um einen ersten Platz**
Der Ursprung des Magnetfelds der Erde war nie nahezu zeitgleich in Riga und Karlsruhe simuliert und jedes Team will das erste ge...

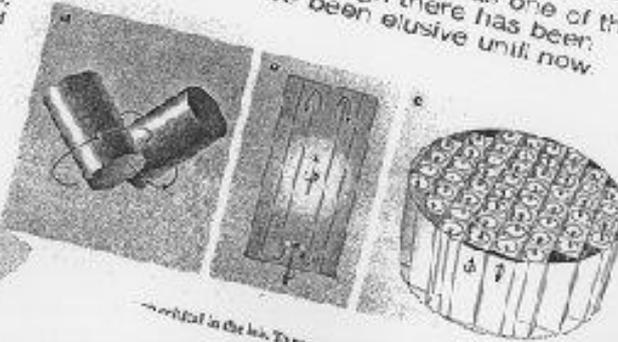
ERDMAGNETFELD
Streit um den Erdkern
Zwei konkurrierende Forschergruppen haben erstmals das Erdmagnetfeld im Labor simuliert. Damit steht fest, dass Erdrotation und der äußere flüssige Erdkern ein stabiles Magnetfeld erzeugen. Jetzt geht es um die Entdeckershre.

KÜNSTLICHES MAGNETFELD


Picture 29 June 2000
Critical time for fluid dynamos
news and views
 Andy Jackson
 Einstein once cited the origin of the Earth's magnetic field as one of the fundamental unsolved problems of physics. Although there has been progress on paper, experimental models have been elusive until now.

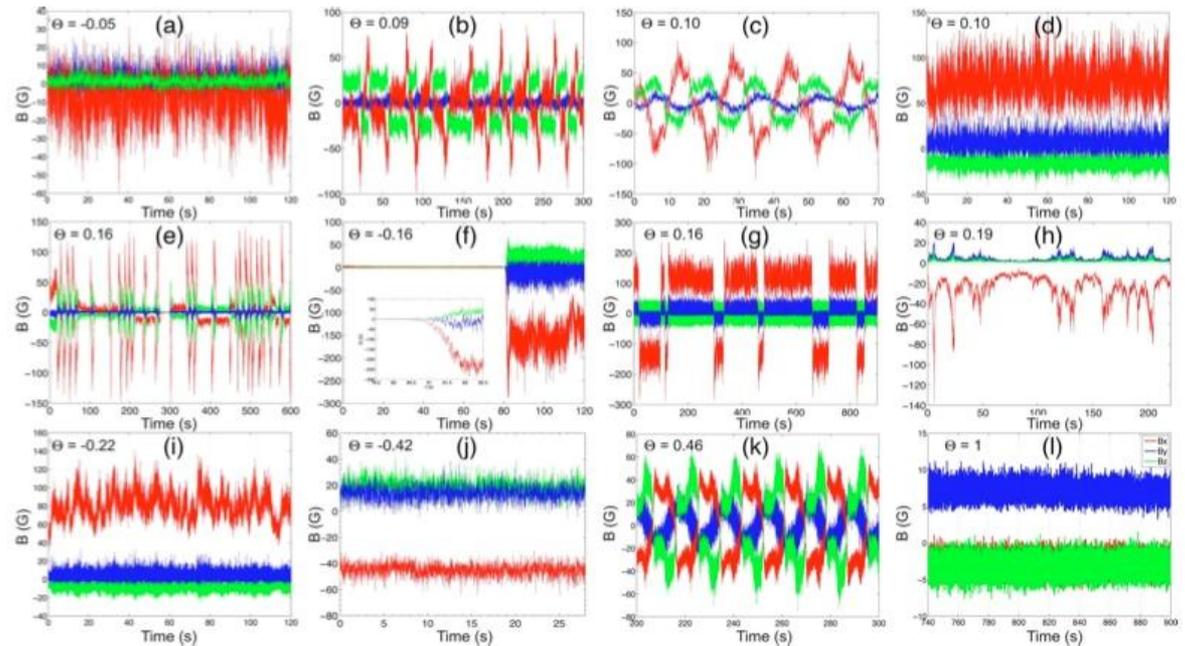
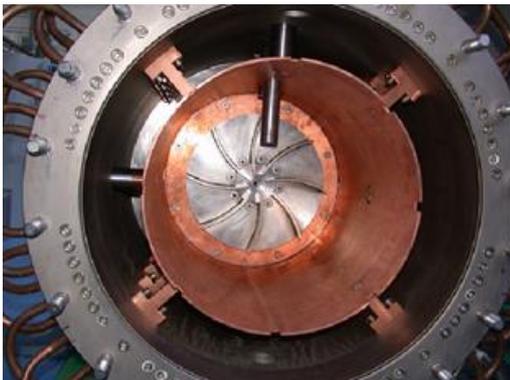
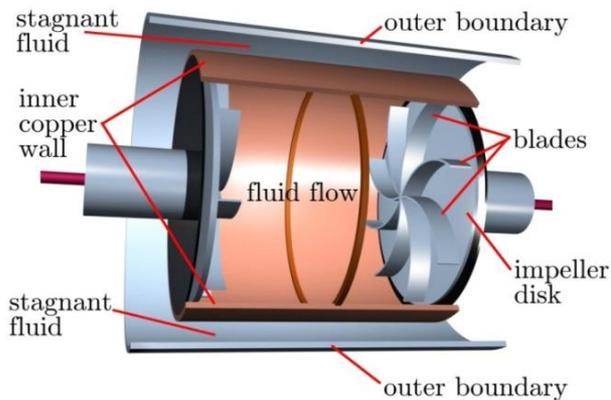
FAZ 22.10.00 **Streit um das Magnetfeld der Erde**
Zwei Forschergruppen beanspruchen die erste Simulation für sich

ERDMAGNETFELD
Streit um den Erdkern
Zwei konkurrierende Forschergruppen haben erstmals das Erdmagnetfeld im Labor simuliert. Damit steht fest, dass Erdrotation und der äußere flüssige Erdkern ein stabiles Magnetfeld erzeugen. Jetzt geht es um die Entdeckershre.

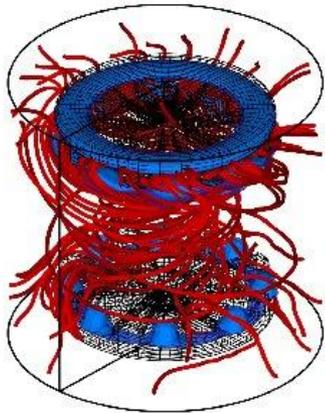
KÜNSTLICHES MAGNETFELD


von-Kármán-Sodium (VKS) Experiment (seit 2006)

VKS hat sowohl Selbsterregung als auch eine Reihe hochinteressanter dynamischer Effekte gezeigt (Oszillationen, Umpolungen, lokalisierte Felder)

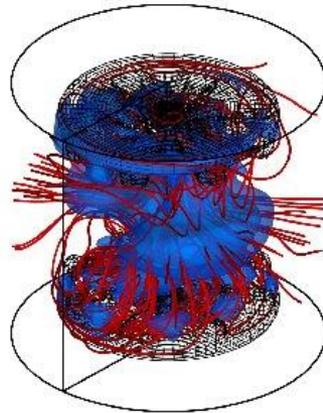


VKS-Dynamo: entscheidende Rolle magnetischer Propeller



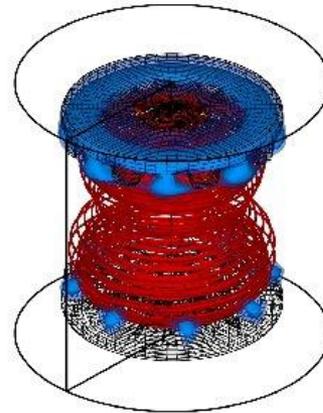
(a)

$Rm=30, \alpha=-1.5$
growing $m=0$



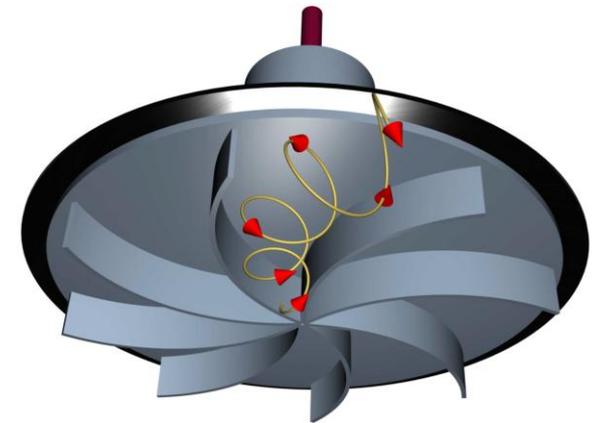
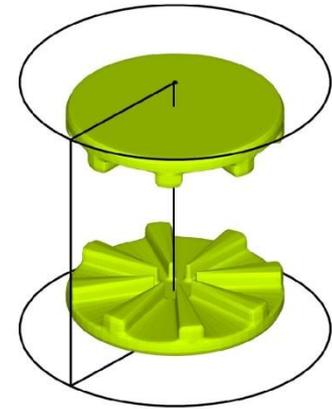
(b)

$Rm=70, \alpha=0$
growing $m=1$



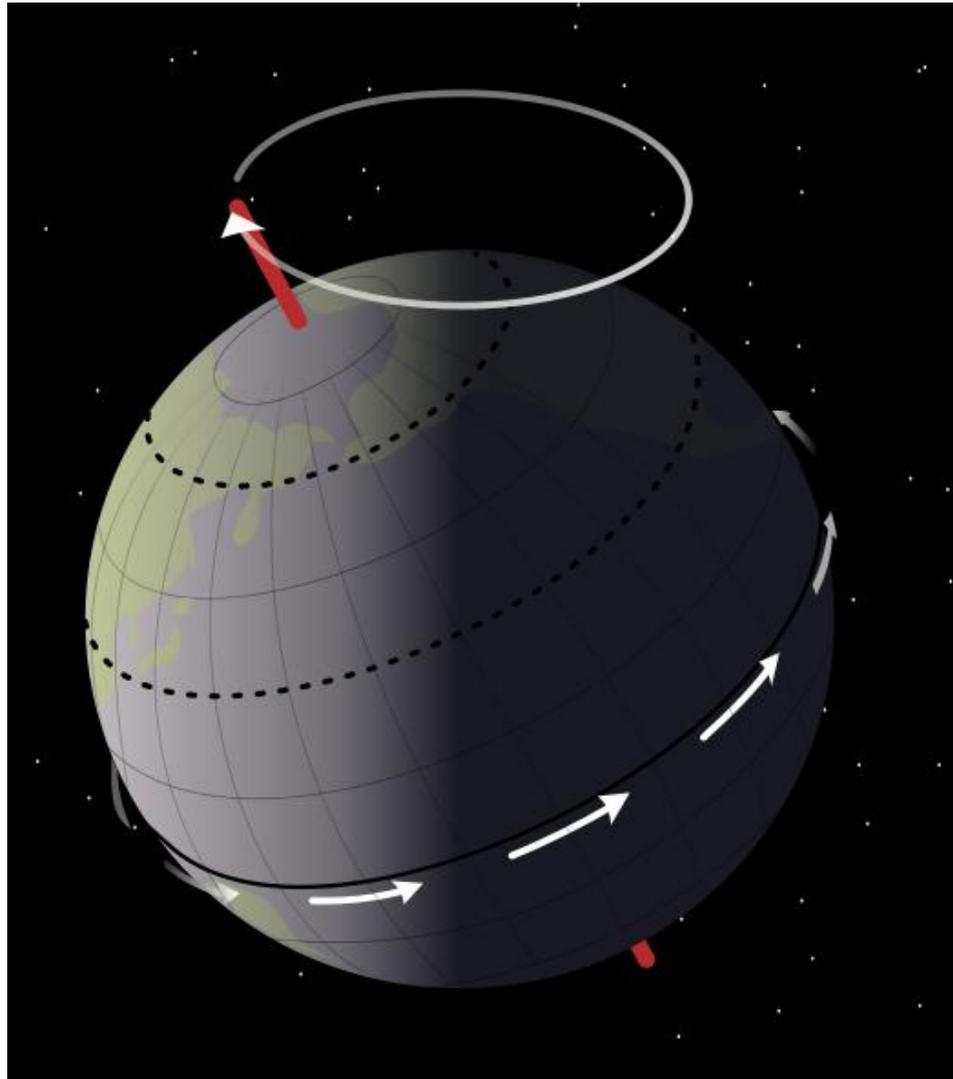
(c)

$Rm=30, \alpha=0$
decaying $m=0$



...auf Basis einer schon dominanten toroidalen Mode reicht etwas Helizität zwischen den Propellerblättern, um den Dynamo zu „zünden“

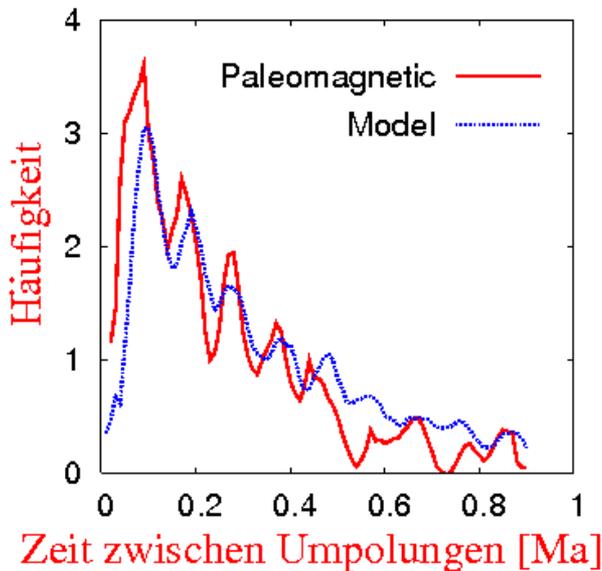
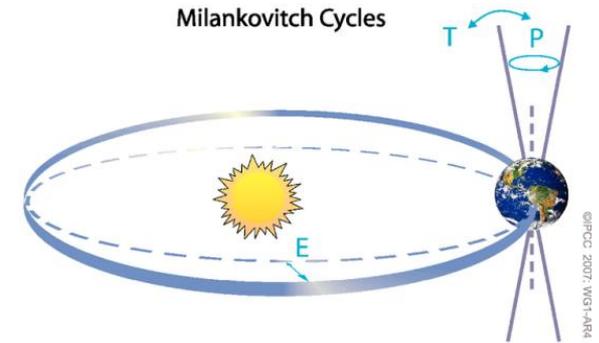
Präzessionsgetriebener Dynamo: Was ist Präzession?



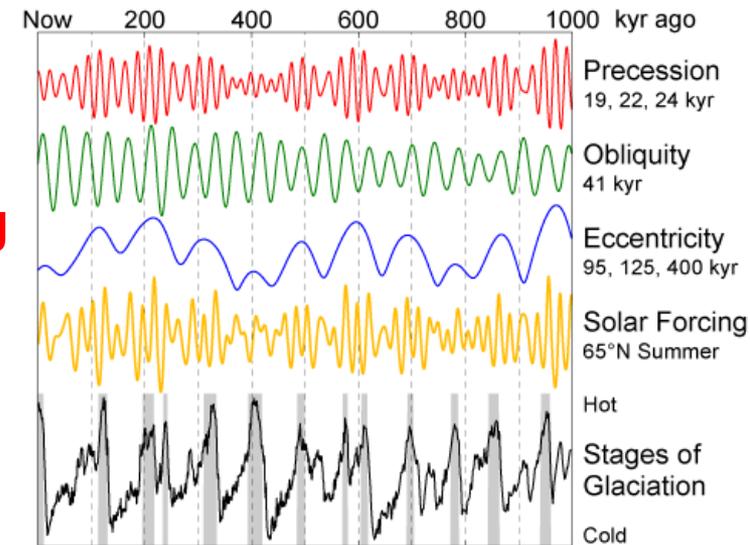
Präzessionsgetriebener Dynamo: Motivation

Häufigkeitsverteilung der Intervalle zwischen Umpolungen des Erdmagnetfeldes zeigt Maxima bei Vielfachen des Milankovich-Zyklus der Erdbahn-Exzentrizität (95 ka)

Indiz für eine wichtige Rolle von Variationen der Erdbahn für den Geodynamo



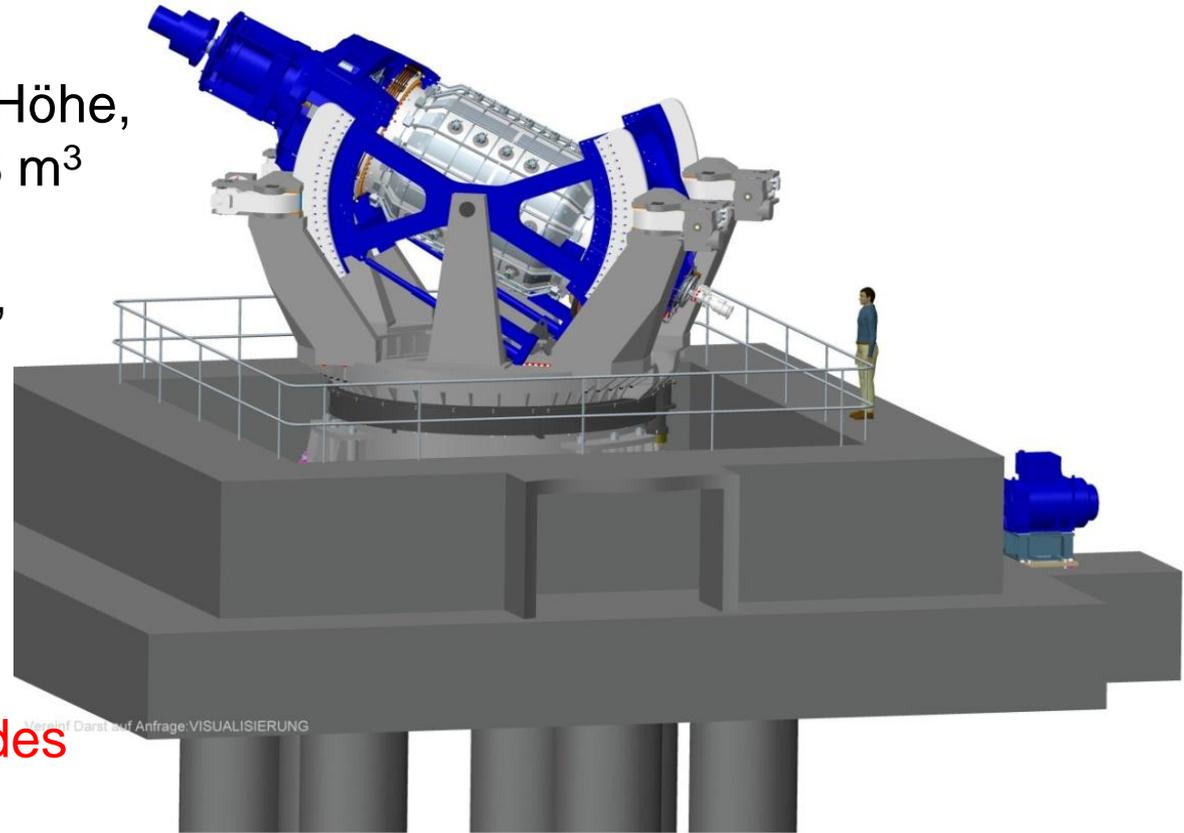
Spannender Zusammenhang zwischen Erdmagnetfeld und Klima (Abfolge der Eiszeiten!)



Präzessionsgetriebener Dynamo im Rahmen von DRESDYN

Parameter:

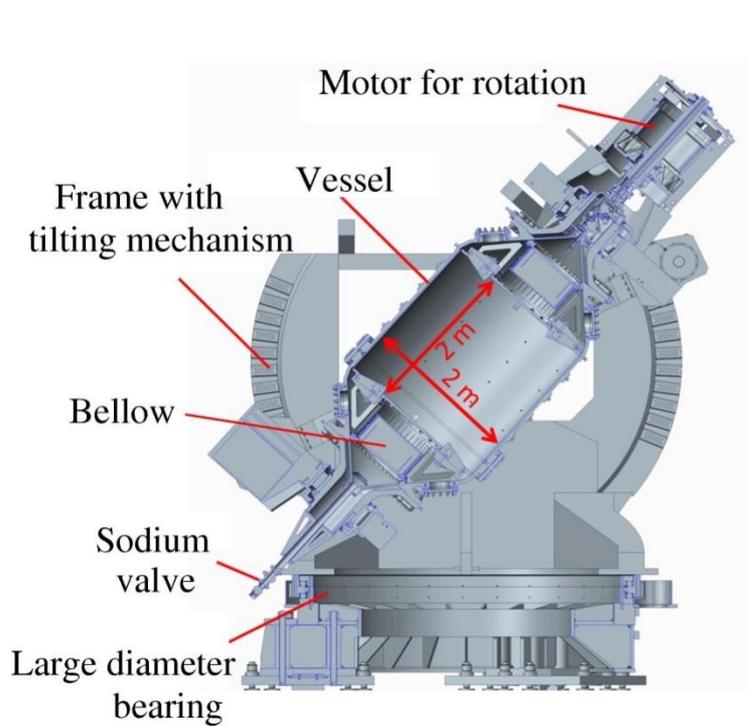
- 2 m Durchmesser, 2 m Höhe, konische Endstücke, $\sim 8 \text{ m}^3$ Natrium
- Ziel: Rotation mit 10 Hz, Präzession mit 1 Hz



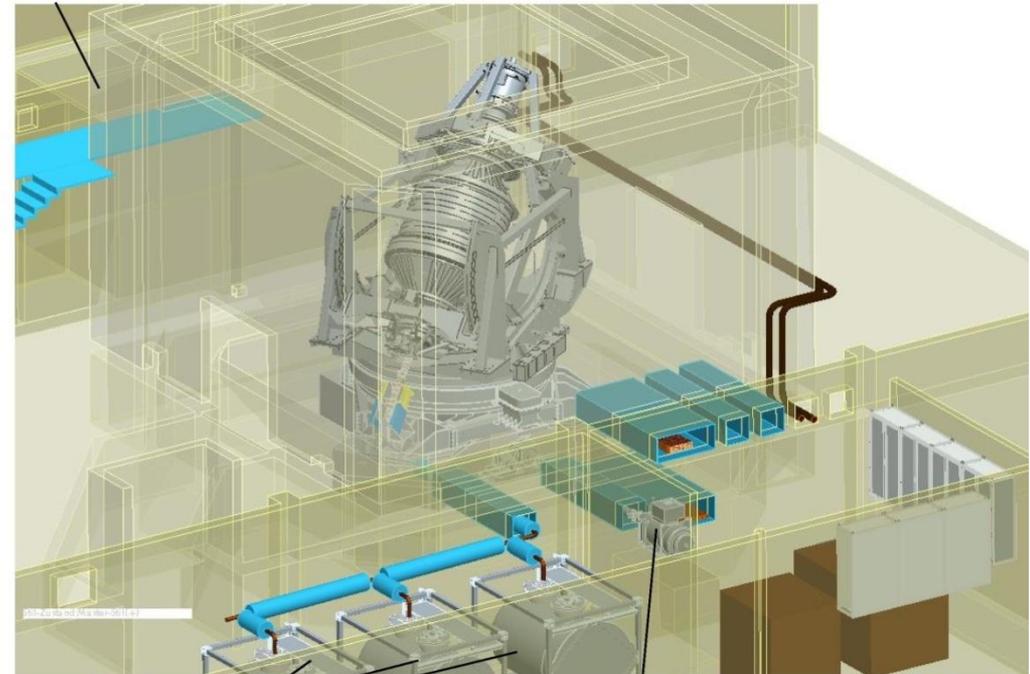
Herausforderungen:

- Sehr großes, umlaufendes Kreismoment (etwa 8 Millionen Nm)!
- Natrium ist im Havariefall nicht ablassbar!

Präzessionsdynamo: Derzeitiger Stand der Konstruktion

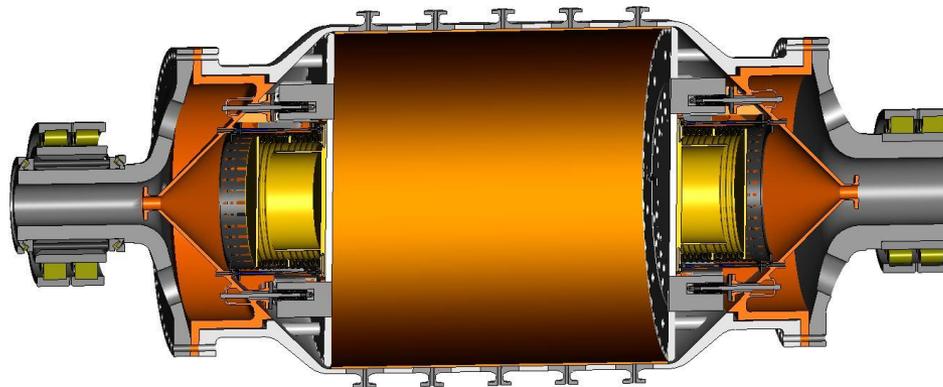


Containment



Sodium tanks

Motor for precession



Rotationsbehälter

“Fundamentale” Probleme auf Grund des gewaltigen Kreiselmoments



April 2013: Bohren der 22 m tiefen Löcher für 7 Säulen

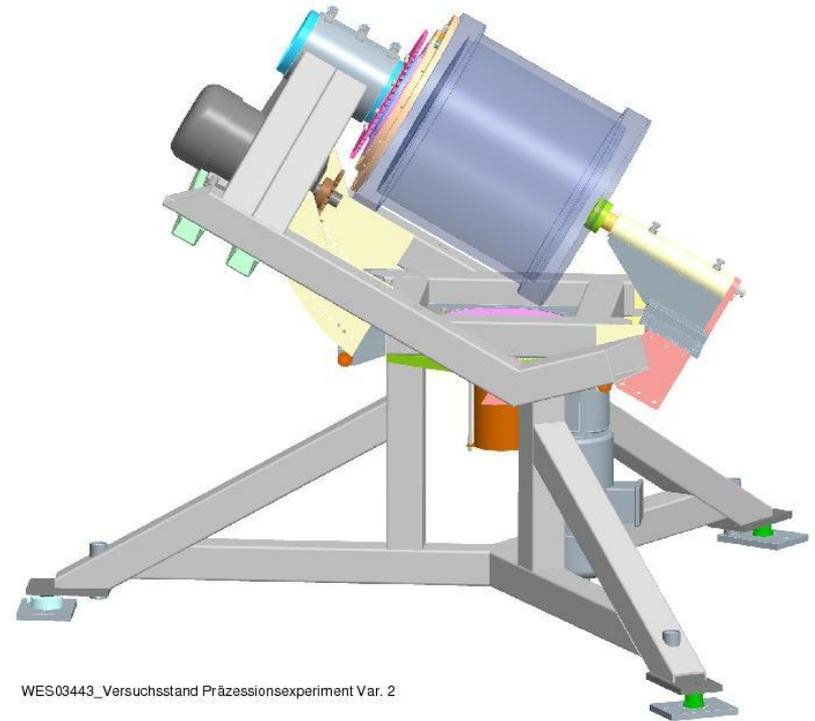
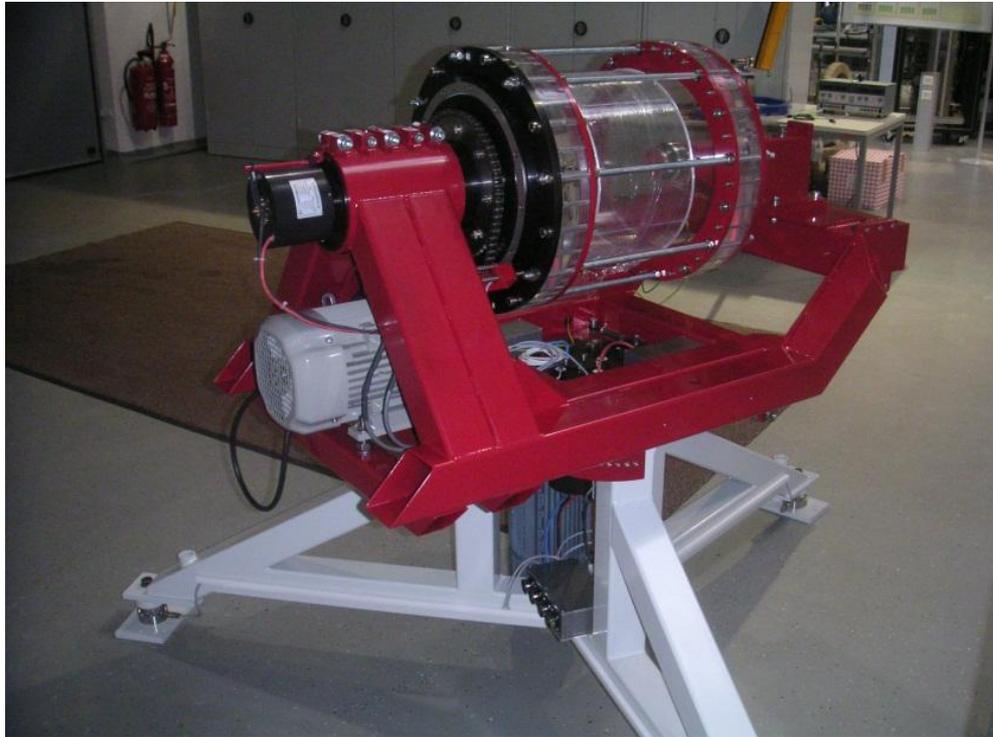


Juli 2013: Konstruktion des Fundaments



November 2014: Dreifuß für das Dynamo-Experiment innerhalb des Containments (mit “Edelstahltapete”)

Wasser-Vorexperimente: Skaliert 1:6



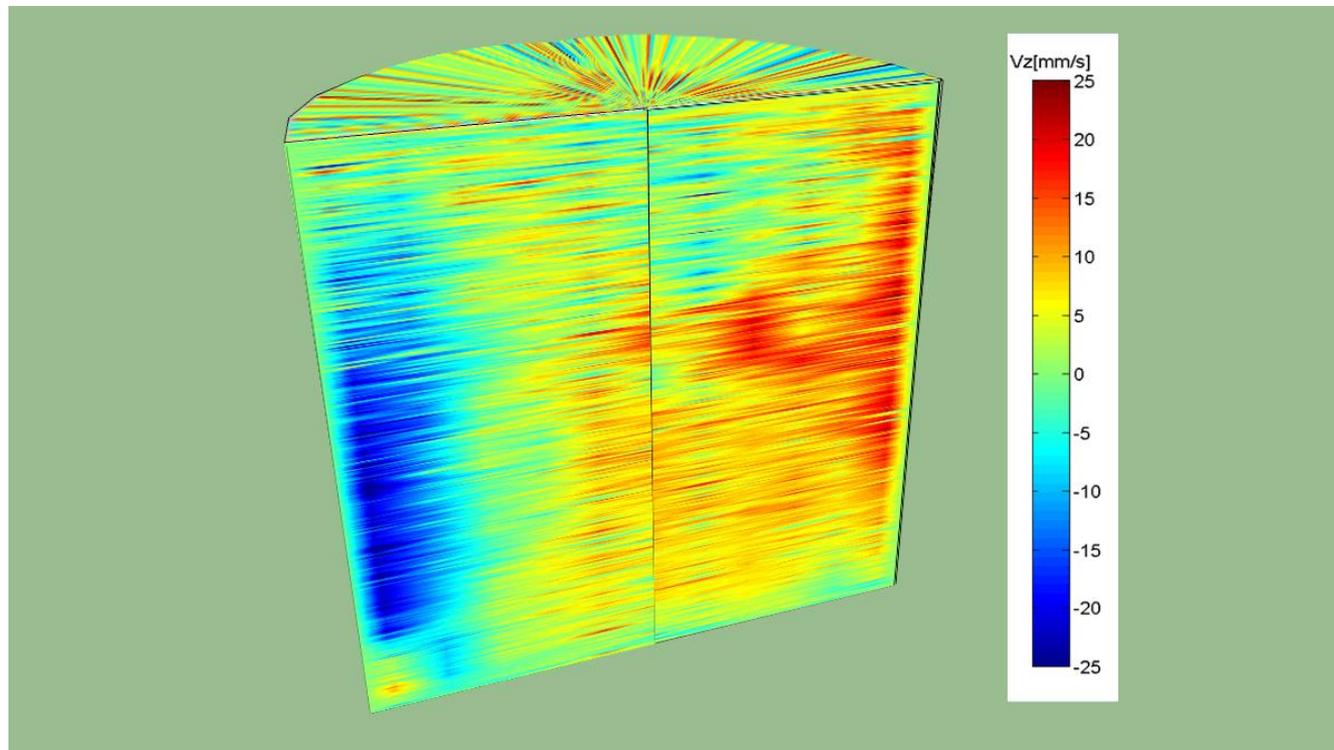
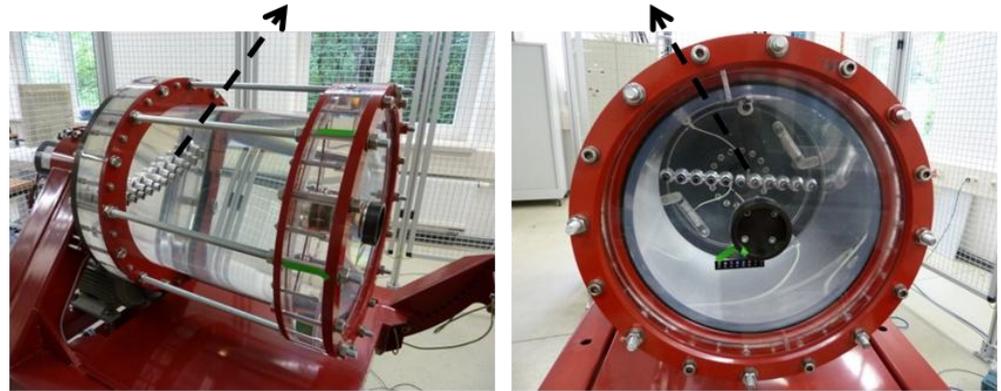
WES03443_Versuchsstand Präzessionsexperiment Var. 2

Wasser-Vorexperimente

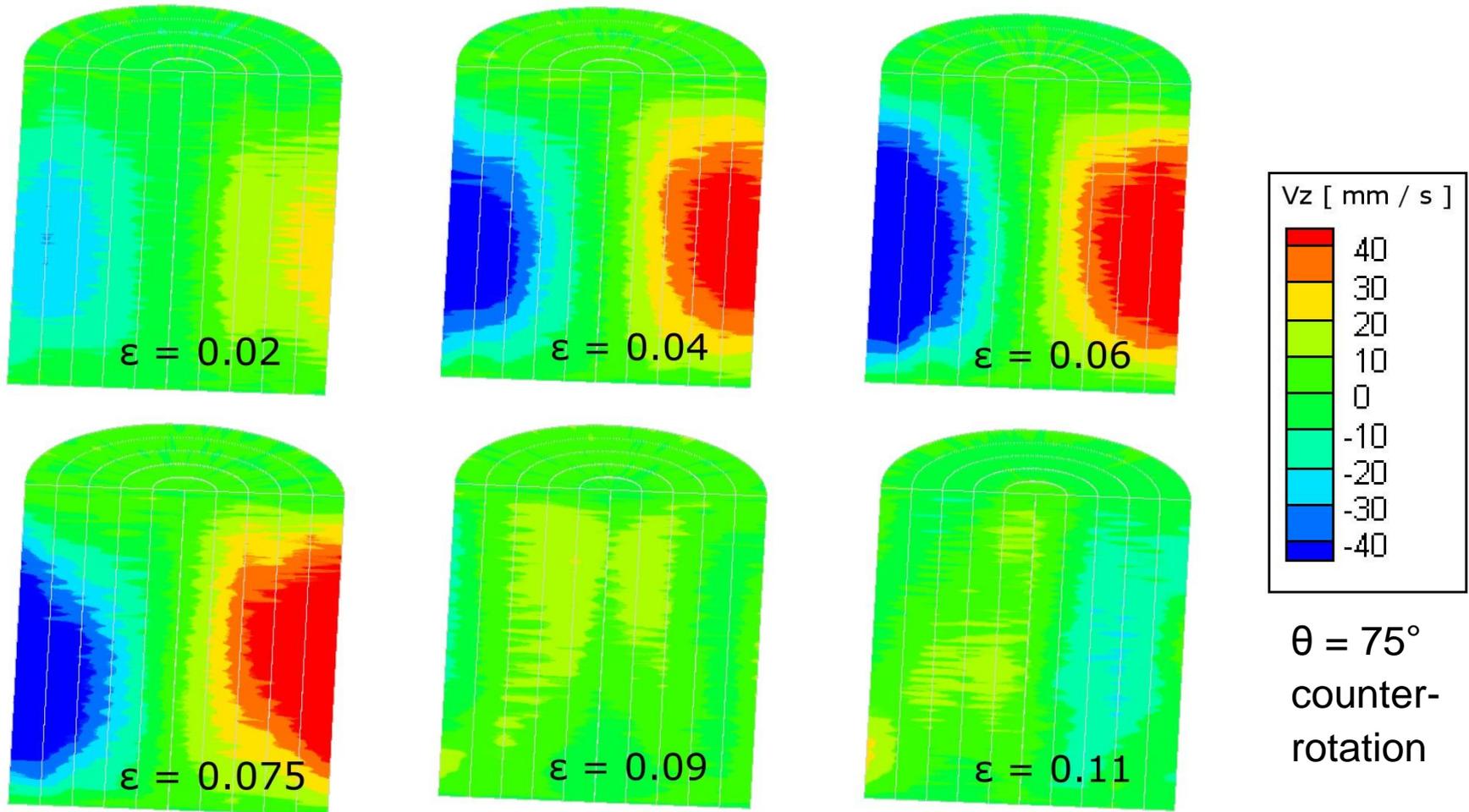
Geschwindigkeitsmessungen mit Ultraschall:

Klare nicht-axialsymmetrische Geschwindigkeitsmode

Ultraschall-Wandler

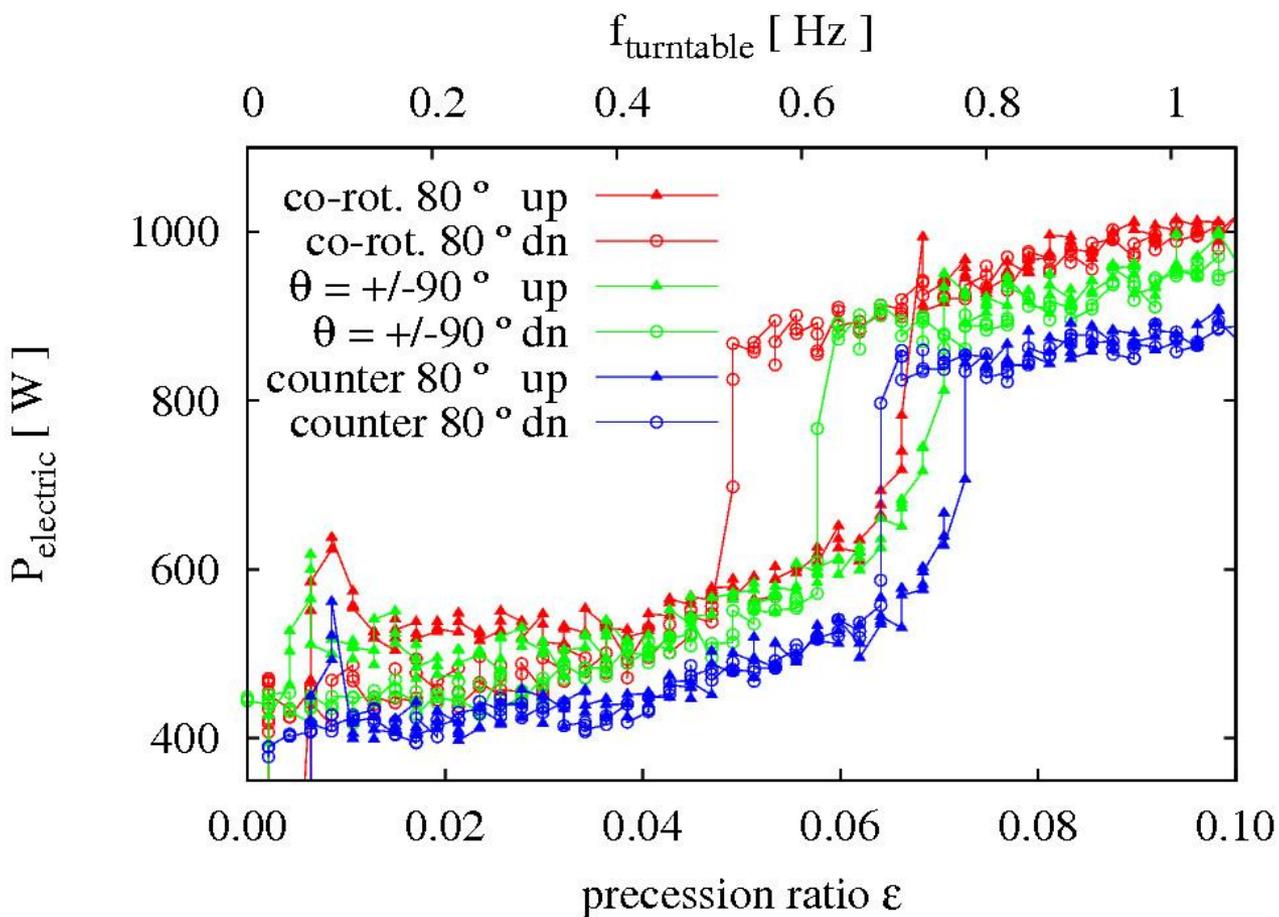


Ultraschall-Geschwindigkeitsmessungen



Oberhalb einer kritischen Präzessionsrate von ~ 0.08 sinkt die mittlere axiale Geschwindigkeit stark ab \rightarrow Turbulentes Regime

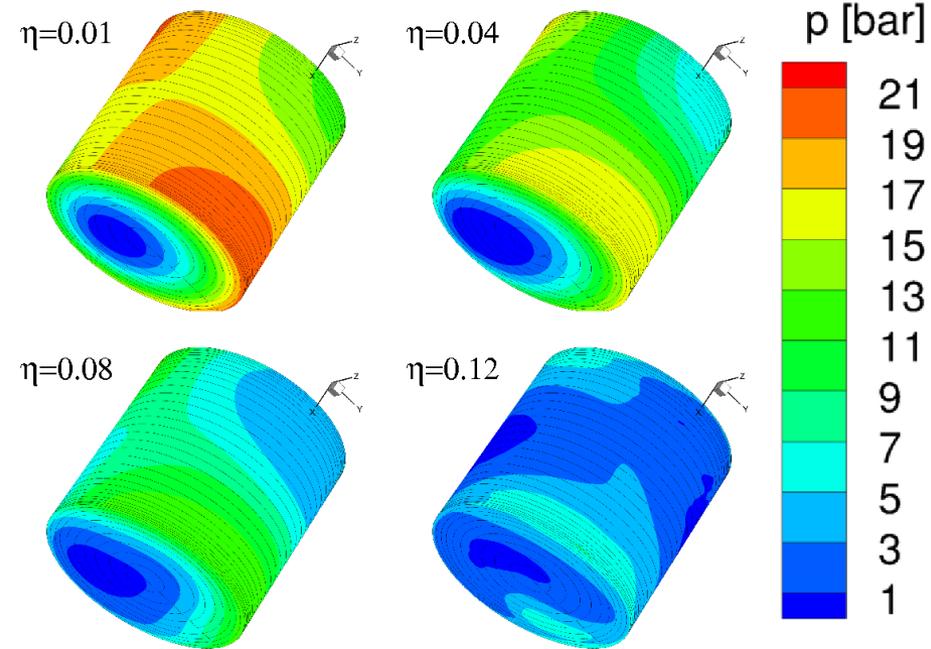
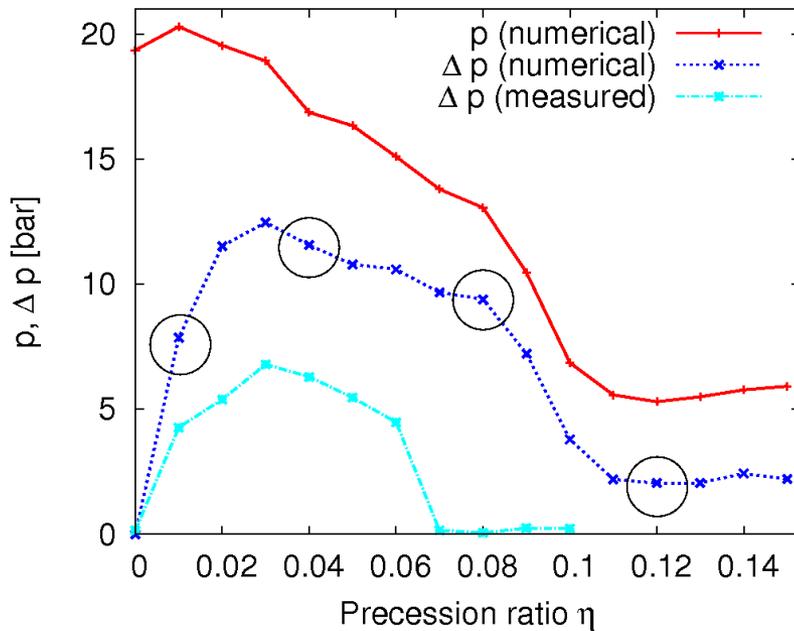
Wasser-Vorexperimente: Leistungsaufnahme bei verschiedenen Winkeln zwischen Rotations- und Präzessionsachse



$f_{\text{cyl.}} = 10 \text{ Hz}$

Der Sprung der Leistungsaufnahme resultiert aus Übergang zur Turbulenz

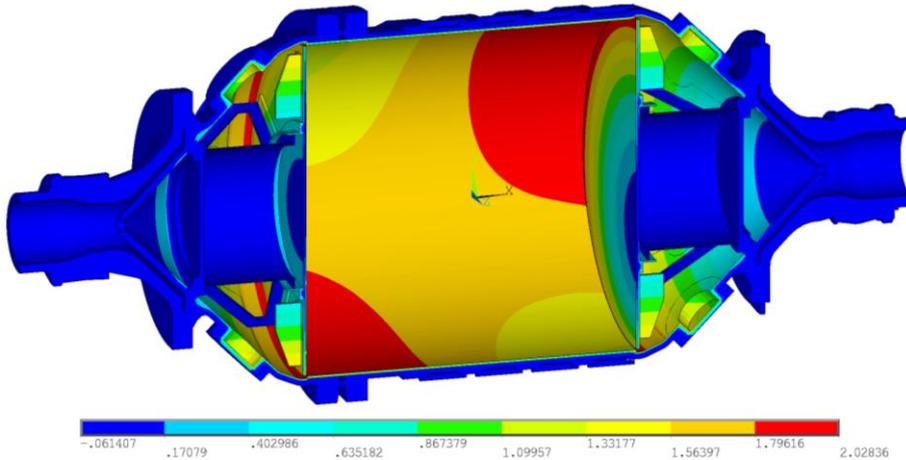
Drücke und Druckvariationen



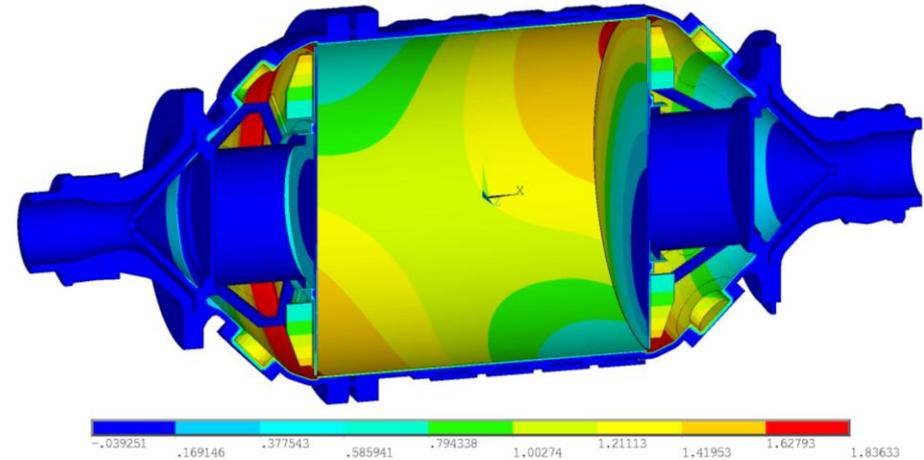
Zentrifugaldruck am Rand bis 21 bar,
Variation bis 10 bar (bei 10 Hz)

Aufwändiger Festigkeitsnachweis mit Druckfeldern als Grundlage

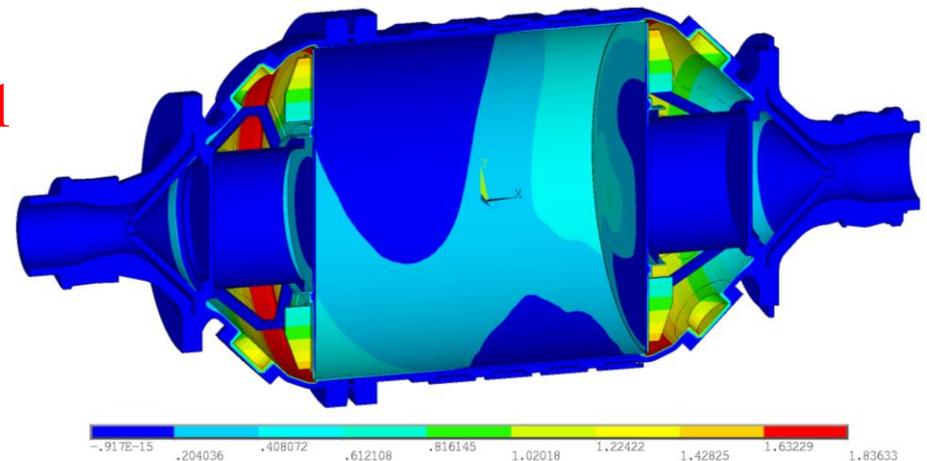
$\eta=0.01$



$\eta=0.05$



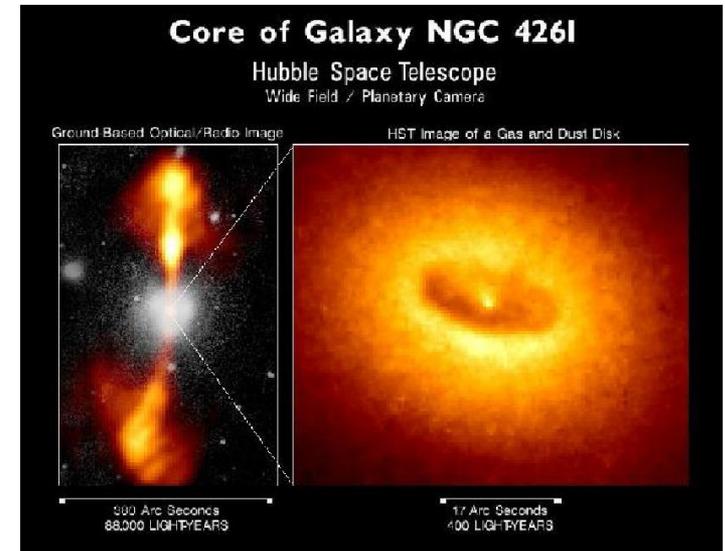
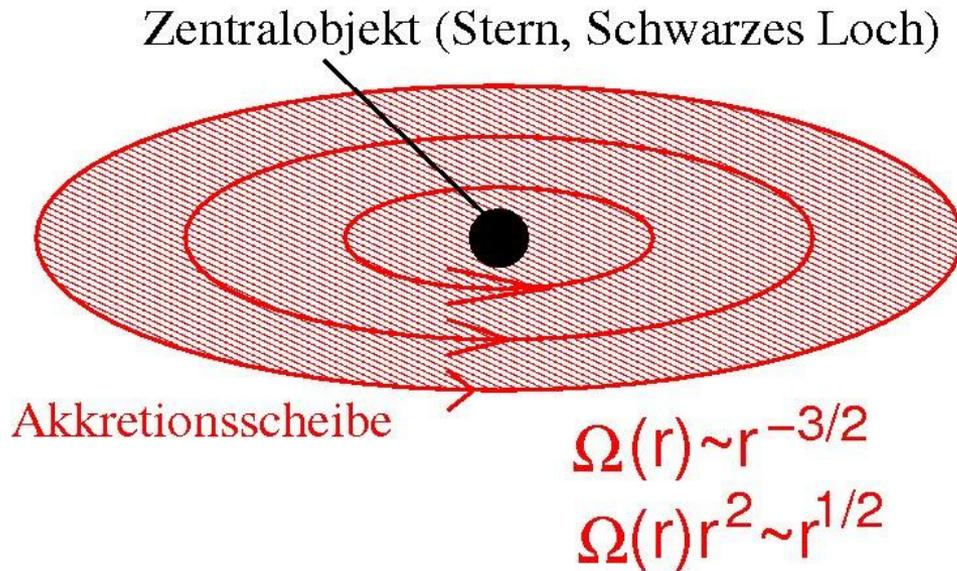
$\eta=0.1$



Drücke in MPa für
unterschiedliche
Präzessionsraten η

Magneto-Rotationsinstabilität (MRI) und Tayler-Instabilität (TI)

Wie funktionieren Akkretionsscheiben?

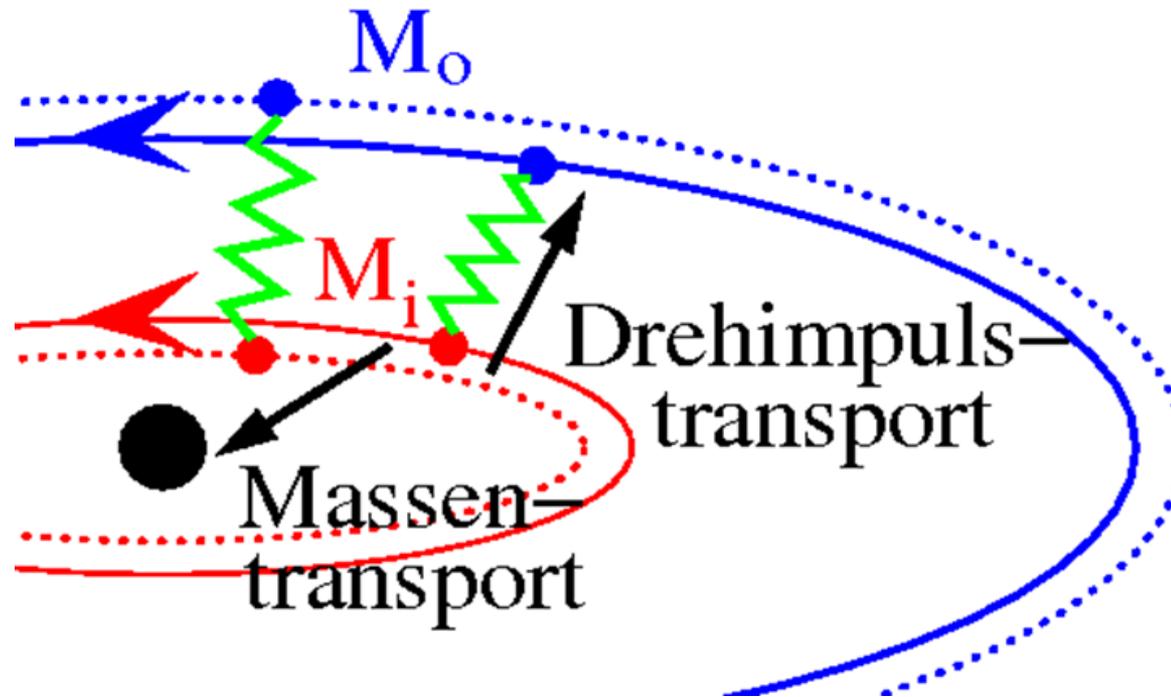


- Problem: Drehimpulstransport nach außen ist durch Viskosität nicht erklärbar.
- Turbulenz könnte helfen. Aber: **Kepler-Rotation ist hydrodynamisch stabil! Wie kommt die Turbulenz zustande?**

Wie funktionieren Akkretionsscheiben?

Magneto-Rotationsinstabilität (MRI):

Magnetfelder wirken wie Federn und bewirken Drehimpuls- und Massentransport in Akkretionsscheiben, aus denen Sterne und Schwarze Löcher gefüttert werden.

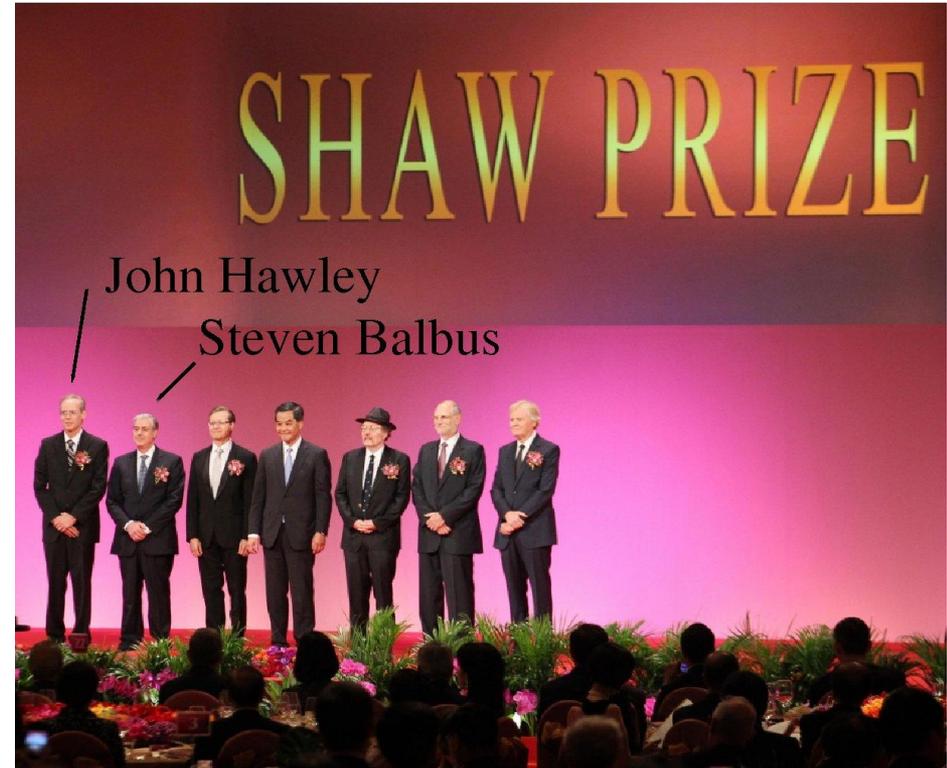


Magneto-Rotationsinstabilität: Entdecker und Anwender

Jewgenij Pawlowitsch Welichow



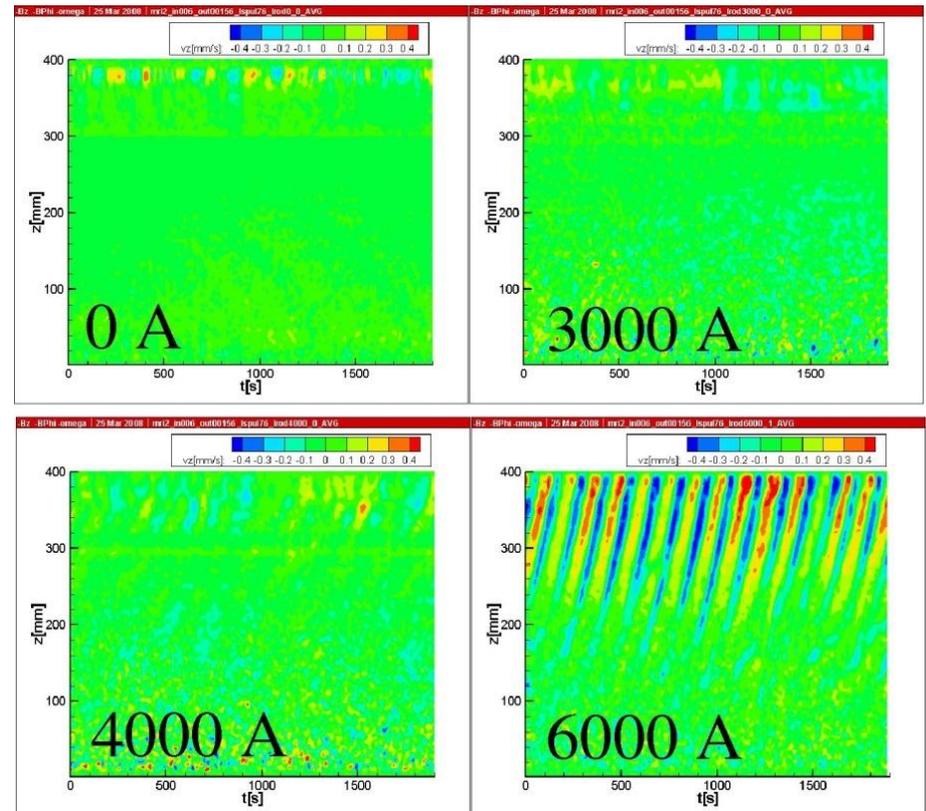
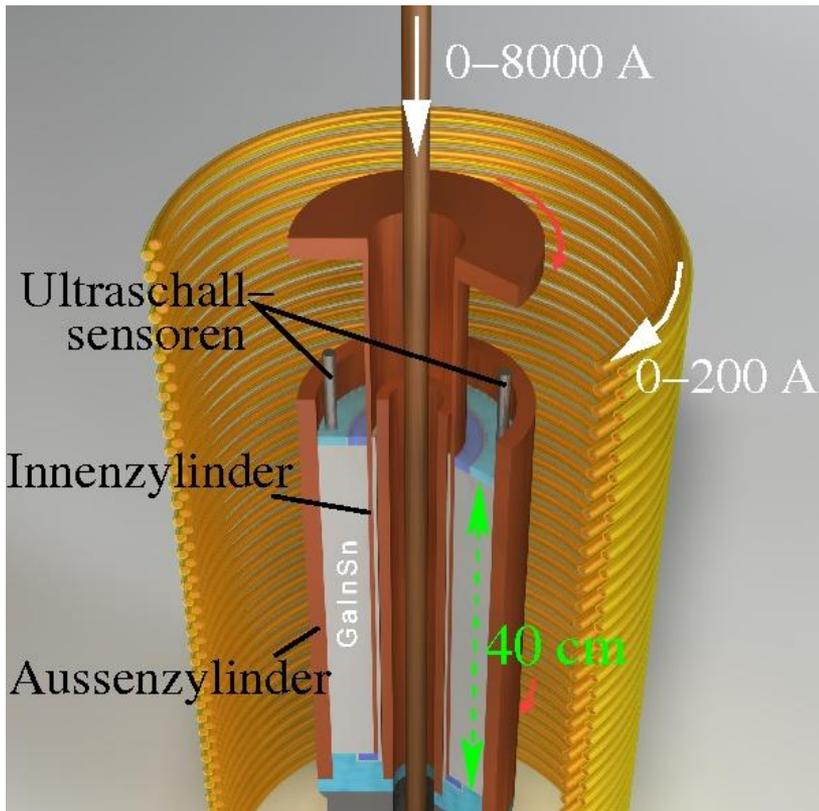
Der Entdecker (1959)



Die Anwender (1991)

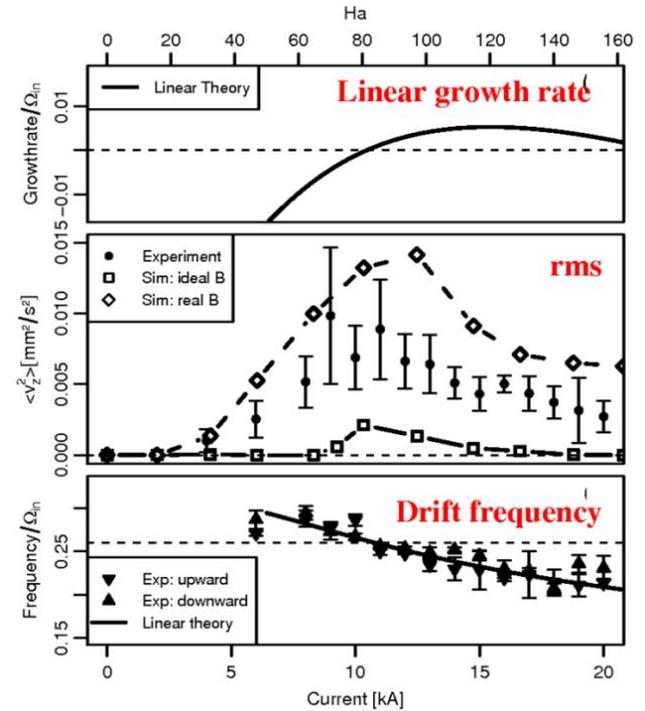
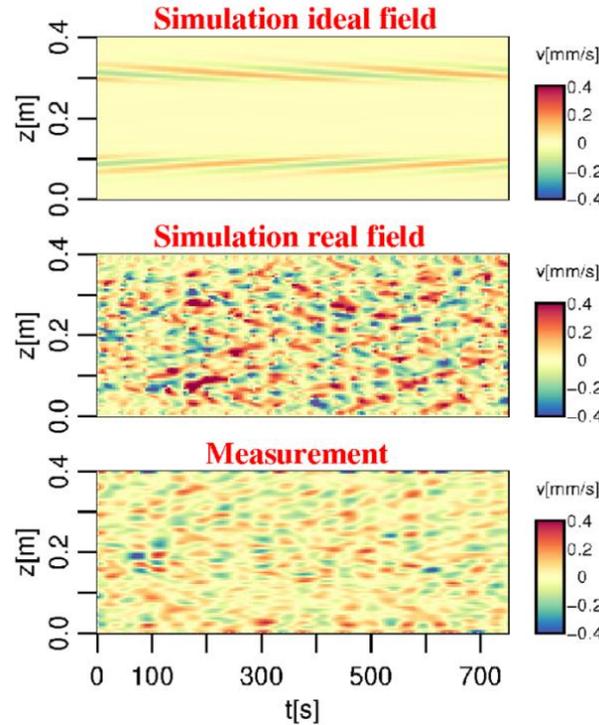
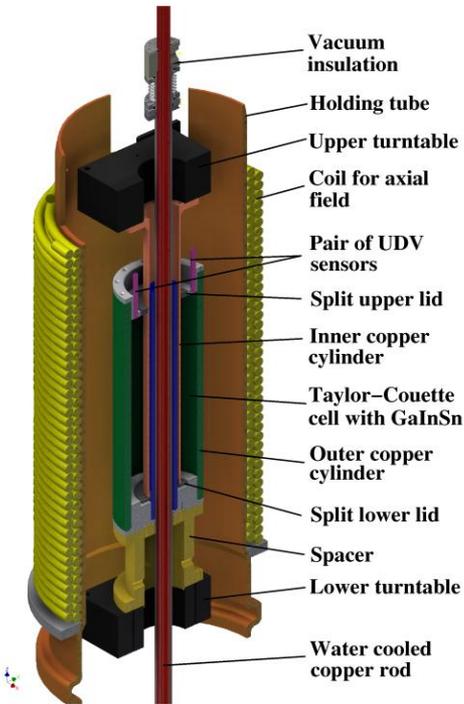
Magneto-Rotationsinstabilität im Experiment

2006: Experimenteller Nachweis der helikalen MRI am HZDR



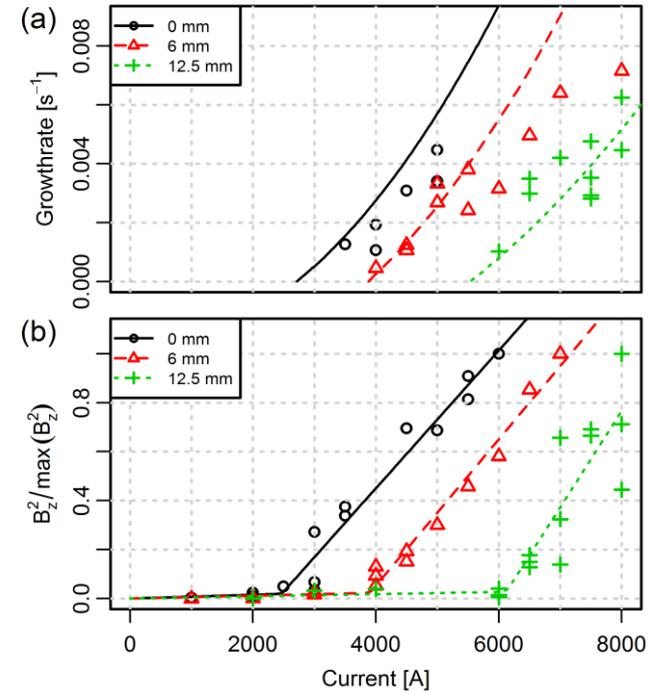
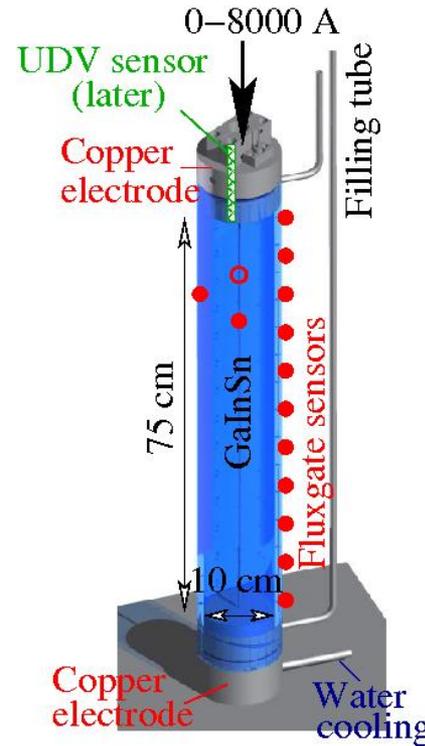
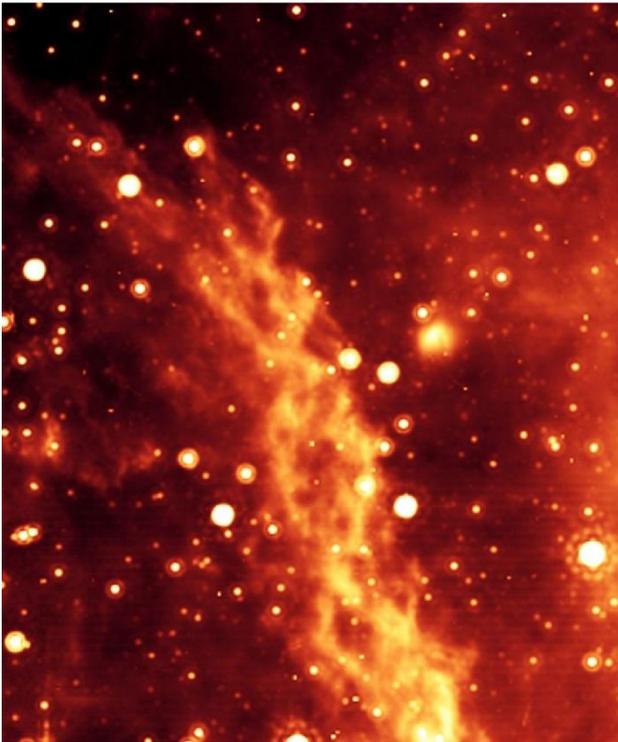
Magneto-Rotationsinstabilität im Experiment

2014: Experimenteller Nachweis der azimuthalen MRI am HZDR



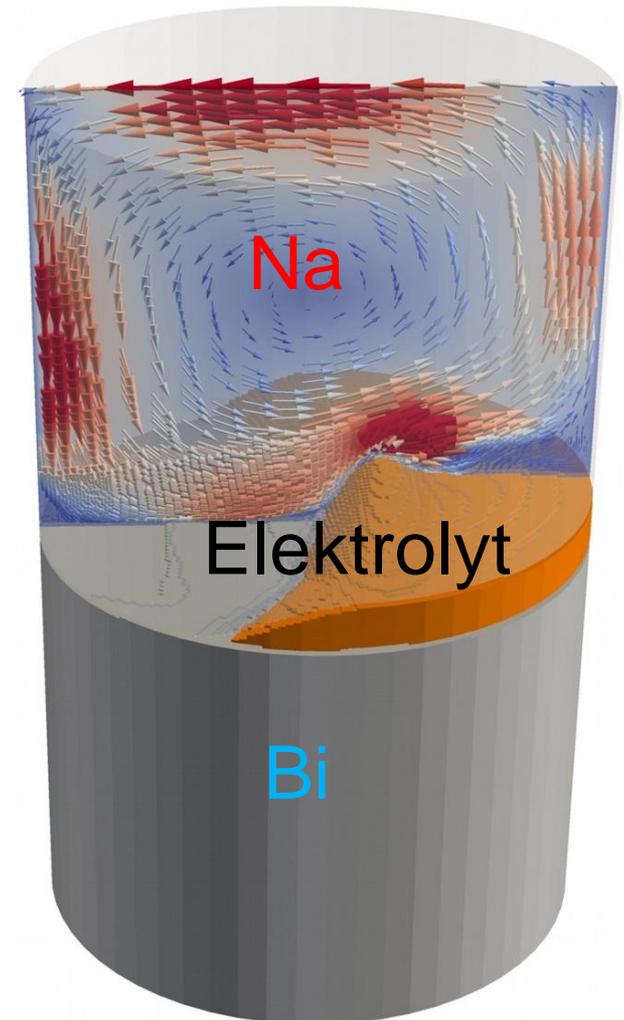
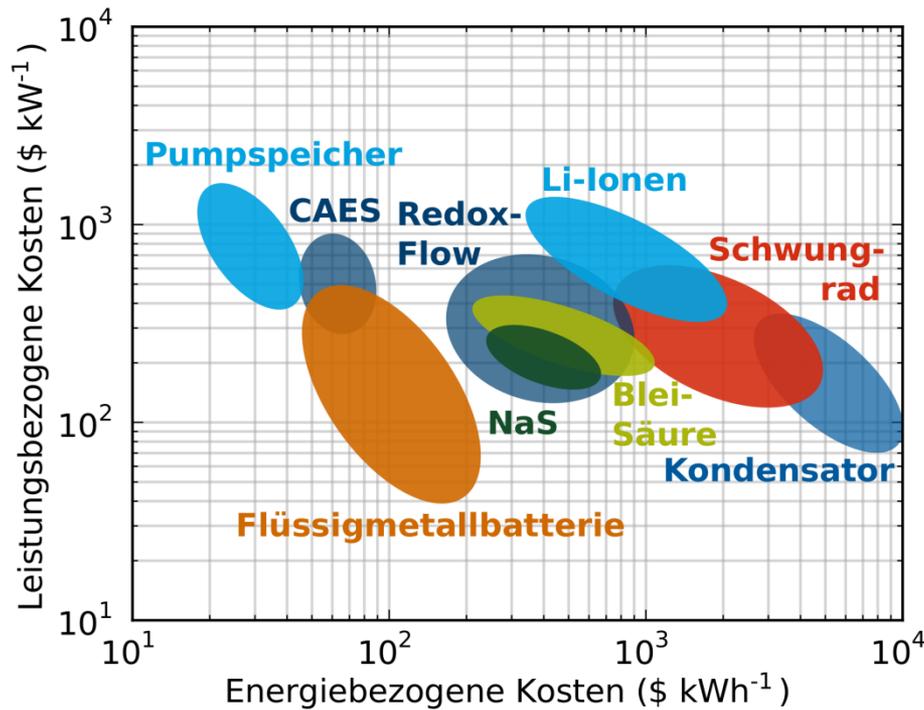
Stromgetriebene Tayler-Instabilität (TI)

Ursprüngliche Motivation:
Astrophysik (alternativer
Mechanismus der Entstehung
des Sonnenmagnetfeldes;
Strukturbildung in kosmischen
jets)



Erstes Experiment am HZDR: Gute
Übereinstimmung der kritischen Ströme
und der Anwachsrate für TI mit Numerik.

Taylor-Instabilität: Ein Problem für große Flüssigmetall-Batterien?



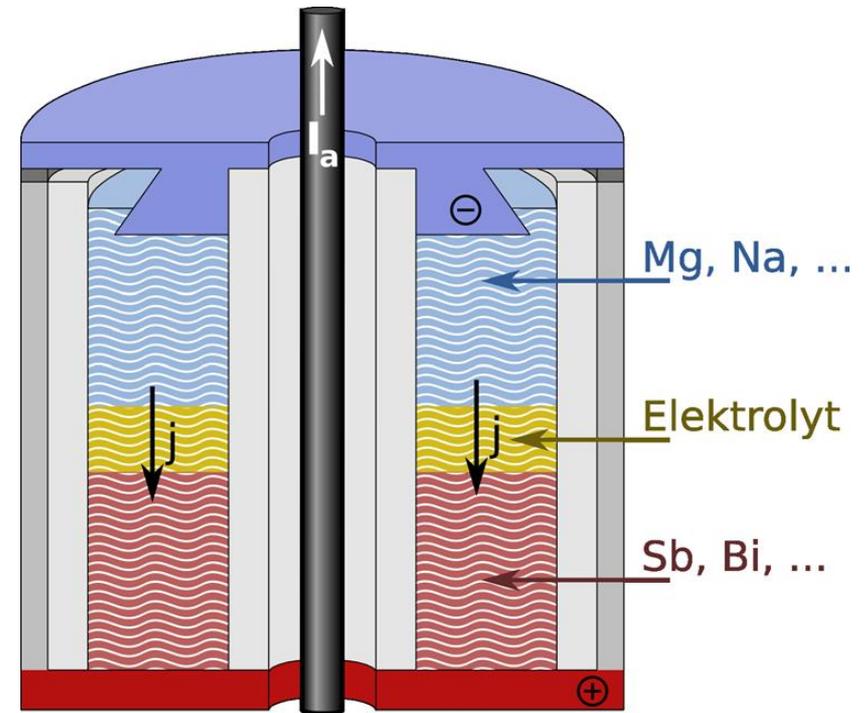
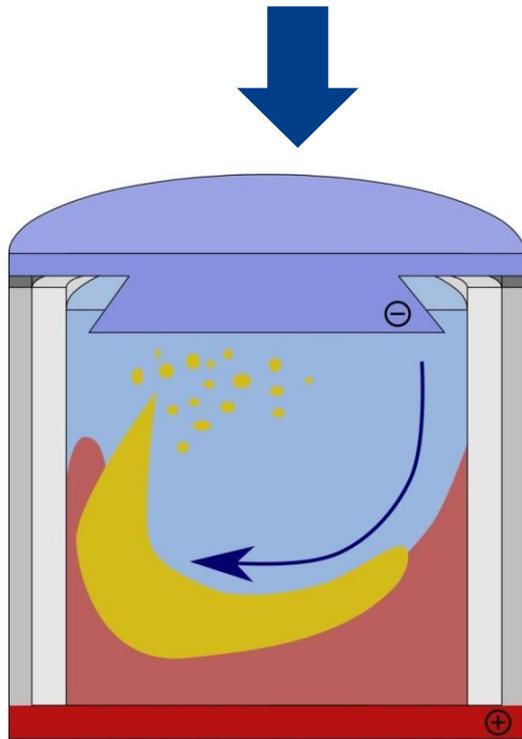
Große Flüssigmetallbatterien könnten sehr preiswerte Energiespeicher sein.

Dafür muss aber die Schichtung stabil bleiben!

Taylor-Instabilität: Ein Problem für große Flüssigmetall-Batterien?

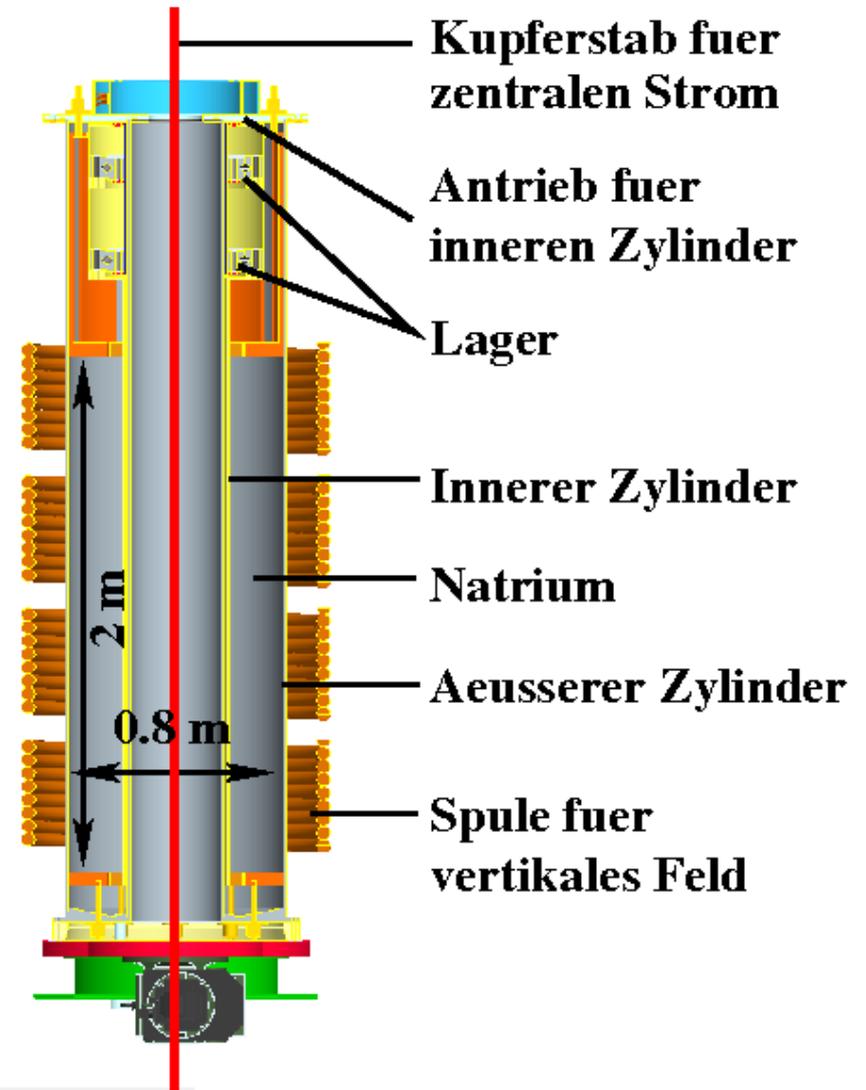
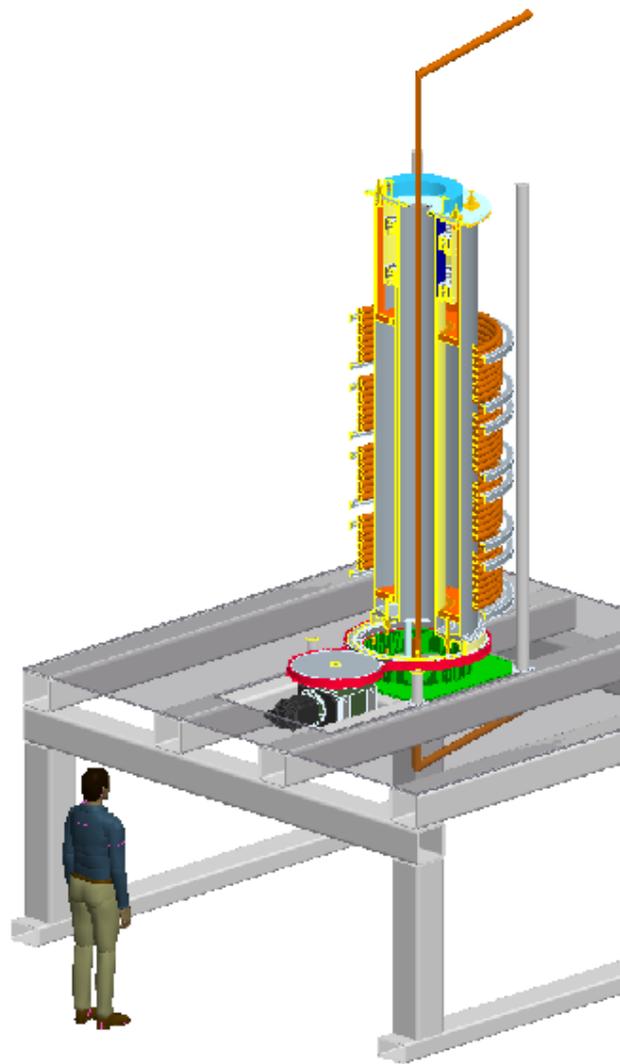
Vorteil: Hohe Stromdichten, hohe Speicherkapazität. **Idealer Speicher für erneuerbare Energien!!!**

Problem: Taylor-Instabilität.



Lösung: Strom umkehren und „ab durch die Mitte“

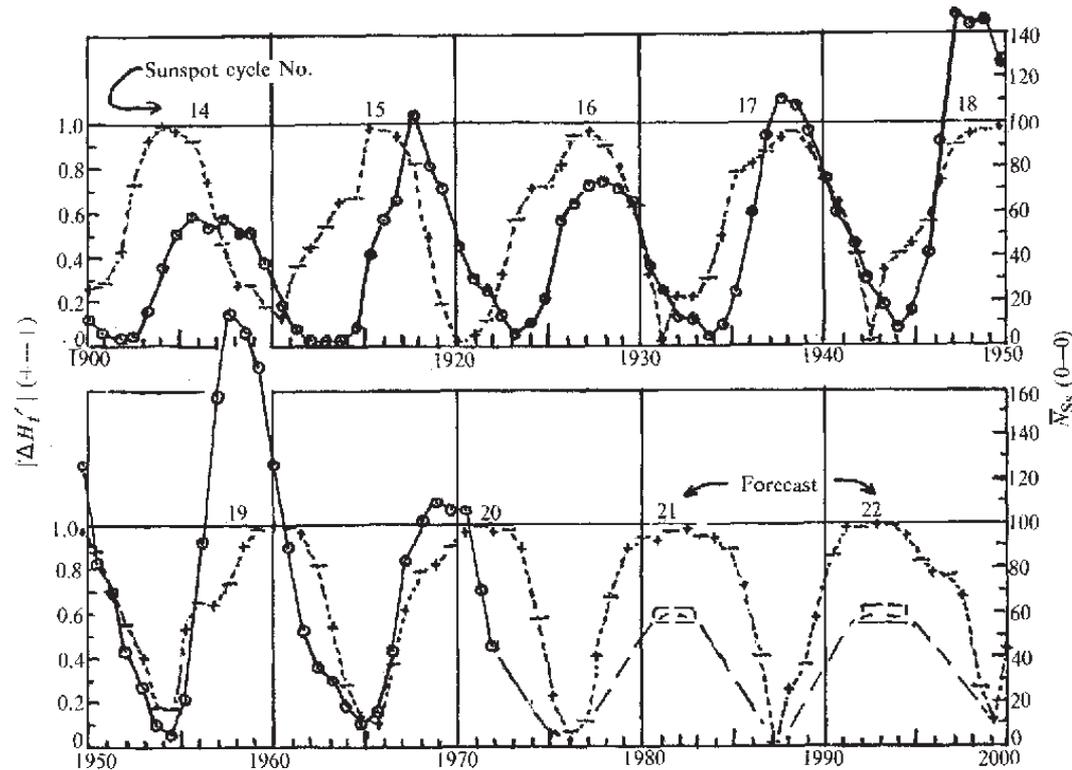
In DRESDYN geplantes MRI/TI- Experiment



Lässt sich der Sonnendynamo durch planetare Gezeitenkräfte synchronisieren?

Astrophysikalischer Hintergrund:

Auffällige Synchronisierung des Sonnen-Zyklus mit 11.07 Jahres-Zyklus des Venus-Erde-Jupiter-Systems (trotz winziger Gezeitenkräfte!)

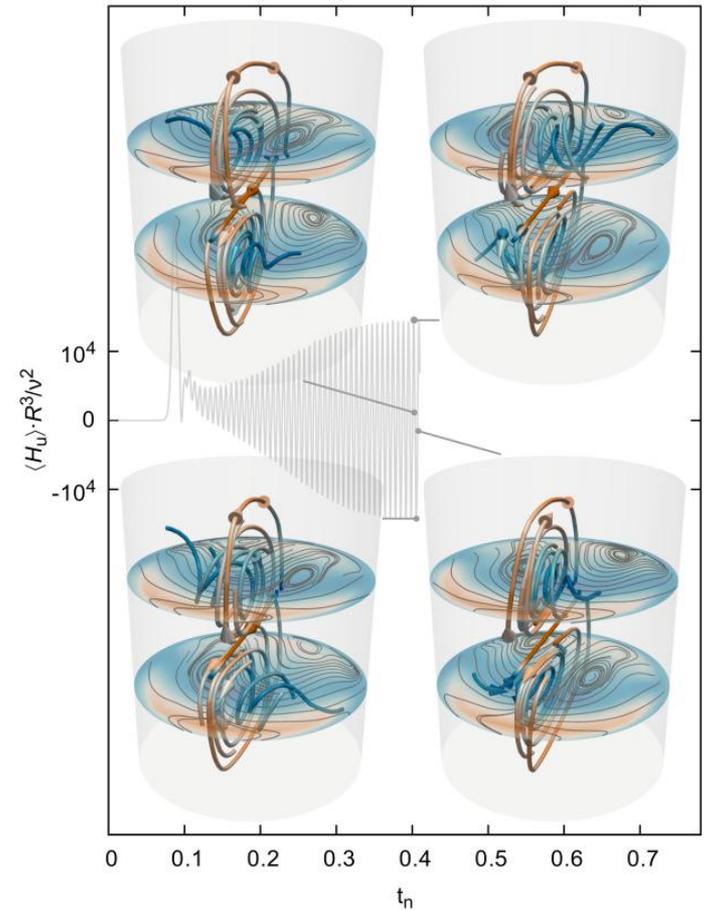
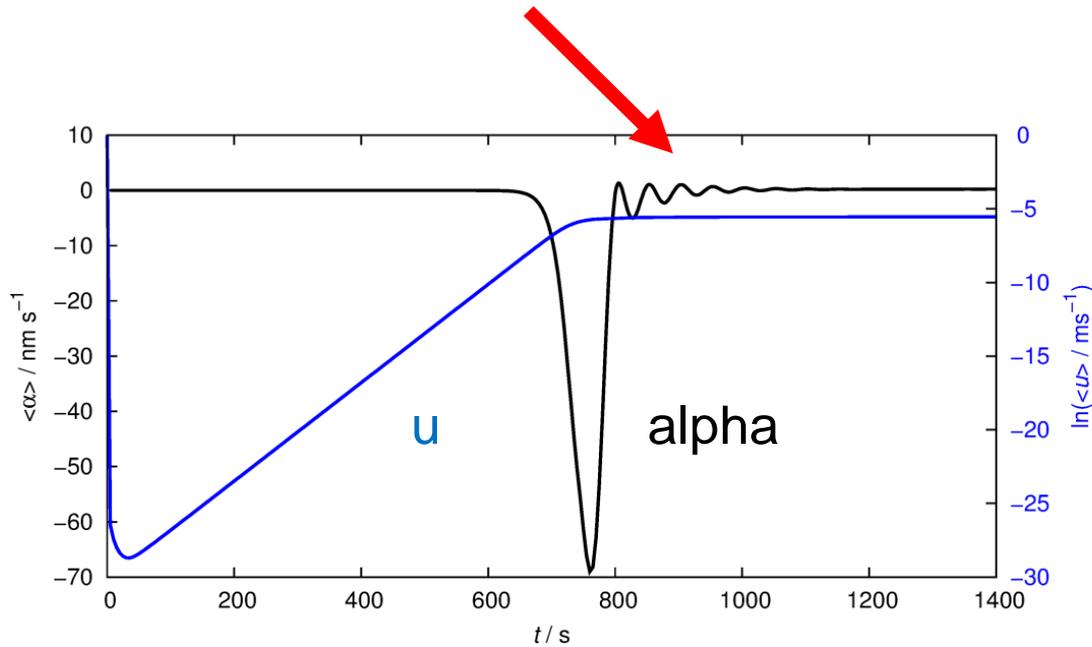


Wood, Nature 240 (1972), 91

Zufall, oder mehr ?

Taylor-Instabilität: Sättigung und helikale Symmetriebrechung

Helizitätswellen bei $Ha=70$

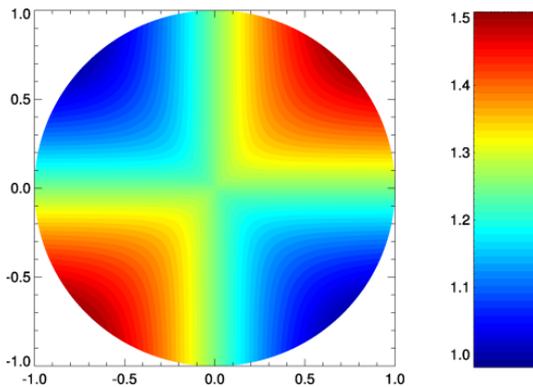


Weber et al., New J. Phys. 17 (2015), 113013

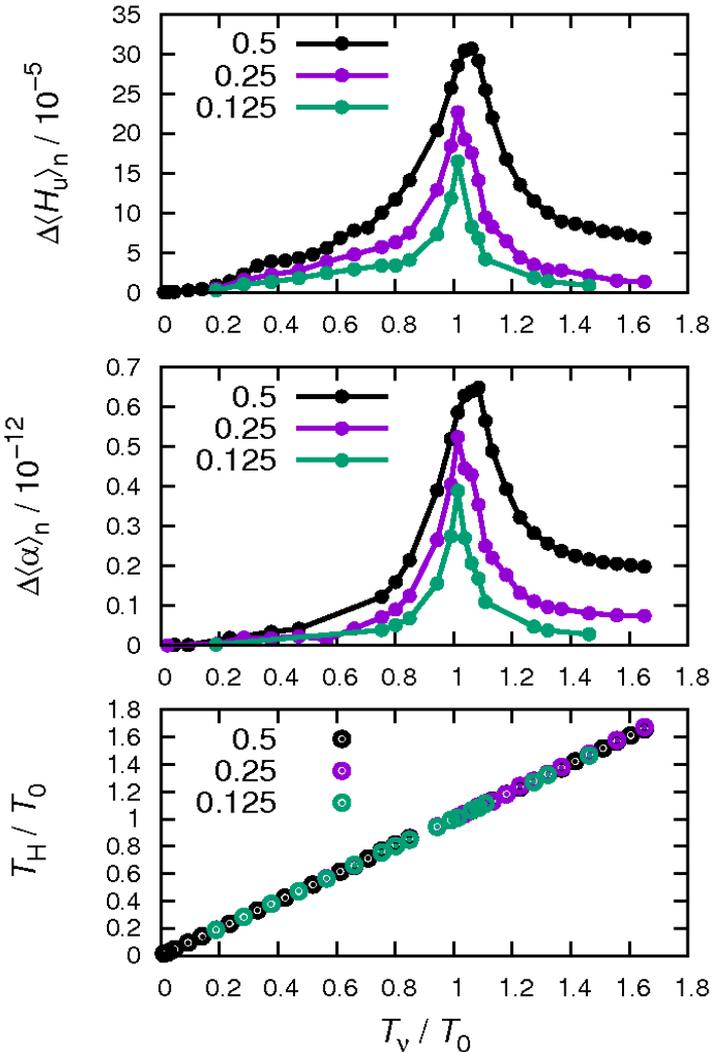
Helizitätswellen lassen sich durch planetare Gezeiten synchronisieren

Taylor-Spruit-Dynamo:

- Ω -Effekt aufgrund differentieller Rotation
- α -Effekt basiert auf helikaler Symmetriebrechung der Taylor-Instabilität
- α -Oszillation kann durch planetare Gezeiten getriggert und synchronisiert werden (**Resonanz braucht fast keine Energie!**)

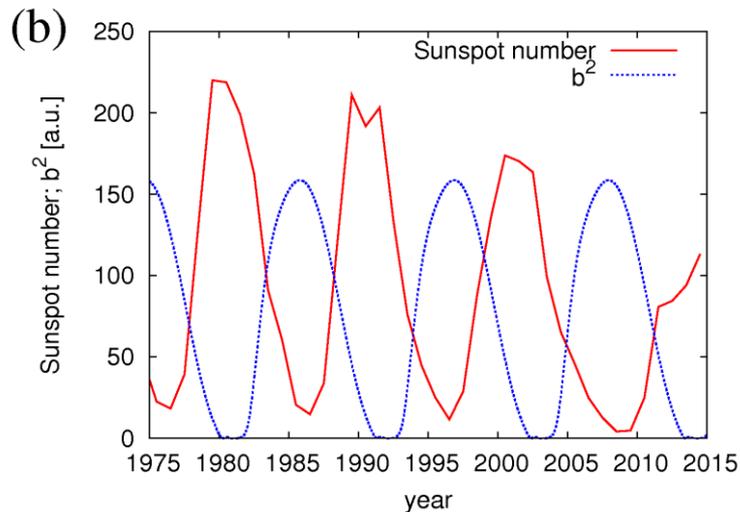
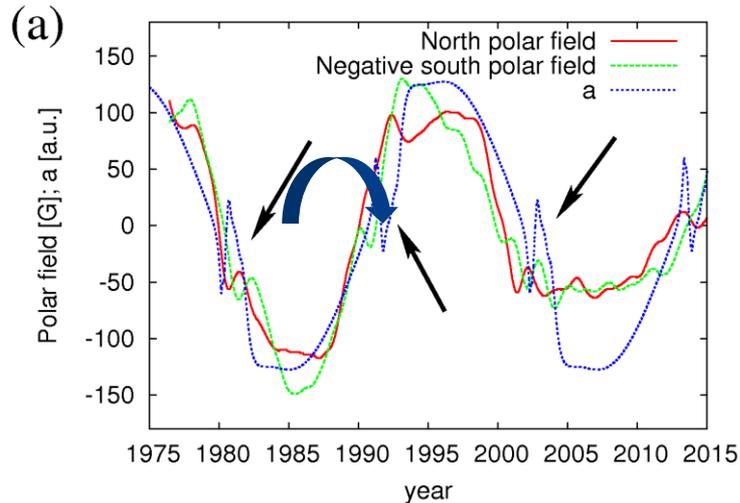


Hier wird $m=2$ -
Gezeitenwirkung
durch ähnliche
Viskositätswelle
simuliert



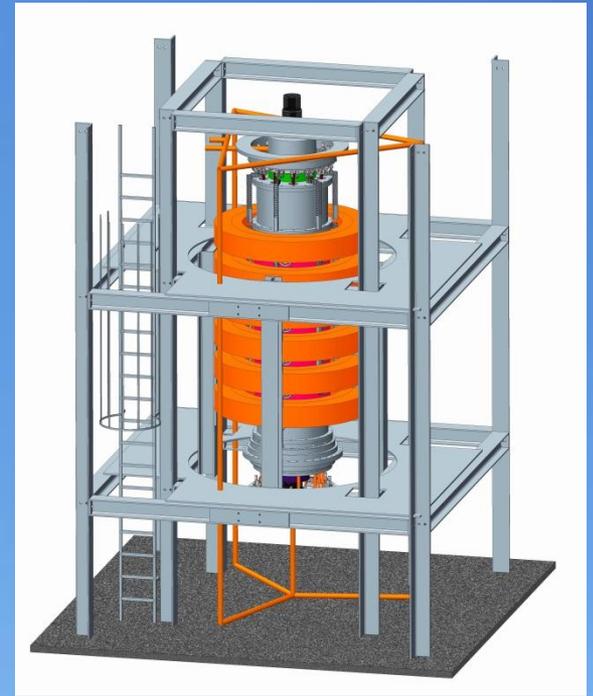
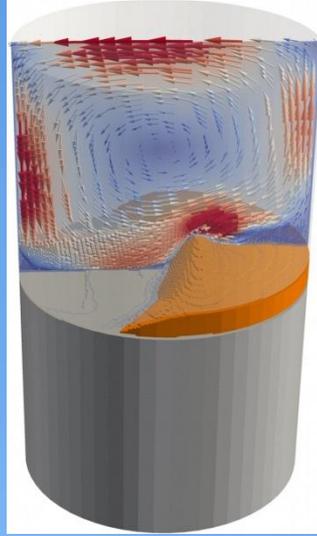
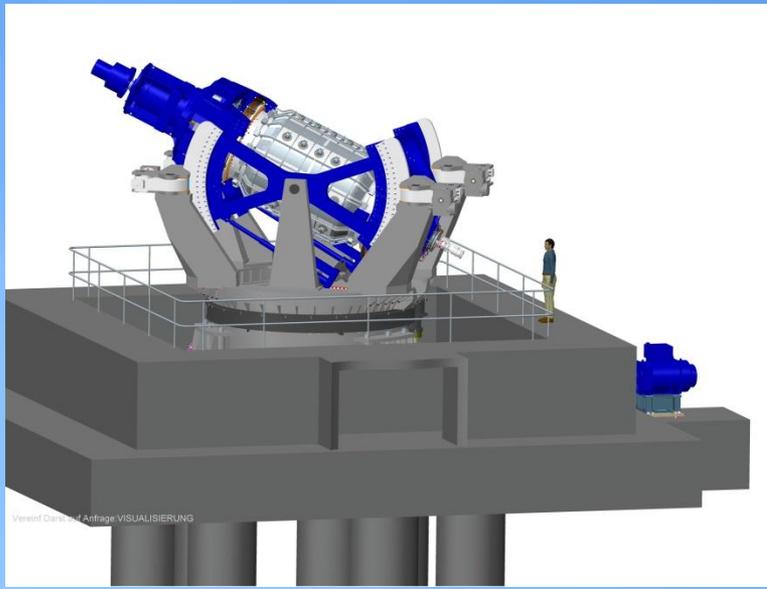
Stefani et al, arXiv:1511.09335

Wirkung auf Sonnendynamo



Die getriggerte 11.07
Jahres-Oszillation des α -
Effektes führt tatsächlich
zum gewünschten 22.14
Jahres-Zyklus des
Sonnendynamos

**Achtung: Noch sehr
spekulative Theorie!**



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**

Laborexperimente zur Entstehung und Wirkung kosmischer Magnetfelder

Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule,
63(2), 2014, S. 31-37

<http://arxiv.org/abs/1403.3643>

