

Vom Technischen Generator zum selbsterregten Kosmischen Dynamo

- Elemente einer didaktischen Aufbereitung -

Ulrich v. Kusserow, Helmut Mikelskis

Didaktik der Physik, Universität Potsdam

Neueste Forschungsergebnisse zeigen, welche herausragende Rolle kosmische Magnetfelder überall in unserem "Plasma-Universum" spielen. Nicht nur theoretischen Astro- oder Geophysikern stellt sich dabei die Frage, wie die komplexen Magnetfeldstrukturen beispielsweise in der Sonne oder in der Erde entstehen können. Das Wirken selbsterregter Dynamos bei der Erzeugung kosmischer Magnetfelder in diesen und anderen Himmelskörpern wird heute allgemein als gesichert angesehen. Es ist die Aufgabe didaktisch-methodischer Analysen und Untersuchungen zu klären, wie die Vorkenntnisse von Lernenden über Induktionsprozesse im Zusammenhang mit technischen Generatoren eingesetzt werden können, um auch ein tieferes Verständnis über die in einfach zusammenhängenden, homogenen Plasmakörpern ablaufenden Dynamoprozesse zu erlangen. In diesem Vortrag sollen in diesem Zusammenhang durchgeführte Vorarbeiten zu einer multimedial gestalteten Curriculums-Studie vorgestellt werden.

1. Zur Gliederung des Vortrags

Dieser Beitrag zur didaktischen Aufbereitung der Übertragung wesentlicher Aspekte des Dynamoprinzips von komplex zusammenhängenden Technischen Generatoren zu den dagegen in relativ homogener Plasmamaterie wirkenden selbsterregten Kosmischen Dynamos enthält die folgenden Unterpunkte:

- Motivation und Problemstellung
- Zum Scheibendynamo als Modellbild eines technischen Generators
- Über die Besonderheiten der Materieeigenschaften kosmischer Plasmakörper
- Anmerkungen zur Induktionsgleichung des kinematischen Dynamoproblems
- Veranschaulichung zentraler Induktionseffekte selbsterregter kosmischer Dynamos
- Zusammenstellung wesentlicher Materialien und Unterrichtselemente eines geplanten Curriculums

Wesentliches Ziel der hier vorgestellten Analyse soll die Beantwortung der Frage sein, ob und wie weit es möglich ist, die Untersuchung der komplexen Fragestellung nach den Entstehungsursachen kosmischer Magnetfelder in ein motivierendes Schulcurriculum einzubauen.

2. Motivation und Problemstellung

Neue Forschungsergebnisse der letzten Jahrzehnte machen deutlich, welche herausragende Rolle kosmische Magnetfelder mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften bei der Erklärung der im Universum ablaufenden, selbst die breitere Öffentlichkeit oft sehr faszinierenden physikalischen Prozesse spielen [7]. Die folgende Auflistung betont einige der wesentlichen Motivationselemente dieses Themenbereiches wissenschaftlicher Forschung:

- Magnetfelder sind heute neben Rotationsprozessen die „radikalen Elemente“ im Universum.
- Hochenergetische solare Eruptionen (siehe Abb.1) und farbenprächtige Polarlichter werden durch „magnetische“ physikalische Prozesse ausgelöst.



Abb.1: Sonnenbild des Satelliten TRACE

- Kosmische Magnetfelder spielen eine zentrale Rolle für die Entwicklung von Leben im Universum.
- Zu beobachten ist eine verstärkte Berücksichtigung des Einflusses magnetischer Prozesse in der aktuellen astronomischen Forschung.
- Moderne Computer- und Modellierungstechniken sowie hochentwickelte Laborexperimente ermöglichen heute unter anderem durch anschauliche Visualisierung ein tieferes Verständnis magnetisch beeinflusster Prozesse im Kosmos.

Über die naheliegende Frage nach den möglichen Entstehungsursachen kosmischer Magnetfelder wurde in der Vergangenheit verständlicherweise viel spekuliert:

- Könnten es Permanentmagneten sein, die in die Himmelskörper eingelagert sind? Nicht möglich, wenn man bedenkt, dass die hier anzutreffenden Temperaturen deutlich über den Curie-Temperaturen, den oberen Grenztemperaturen für die Existenz von Permanentmagneten, liegen.
- Könnten batteriegetriebene Ströme die Erzeugung der Magnetfelder bewirken? Unmöglich, auch wenn eine Art „Plasmabatterie“ möglicherweise in relativistisch schnell rotierenden exotischen Himmelskörpern arbeitet, im frühen Universum magnetische Saatfelder erzeugt haben könnte.
- Sind die heute beobachteten kosmischen Magnetfelder vielleicht einfach nur die fossilen Überreste früher primordialer Magnetfelder? Abgesehen davon, dass durch diesen Erklärungsversuch natürlich sofort die Frage nach den Entstehungsursachen früher Magnetfelder aufgeworfen würde, könnte diese Tatsache sicherlich auch nicht die beobachteten chaotischen oder periodischen Umpolungen des Erd- und Sonnen-Magnetfeldes erklären.
- Auch wenn es angesichts des in dem relativ homogen strukturierten, mit elektrisch sehr gut leitender Plasmamaterie gefüllten Inneren von Himmelskörpern so ganz anders aussieht als in einem „verkabelten“, mit Weicheisenkernen effektiv arbeitendem technischen Generator - könnte das von Siemens entwickelte Prinzip des selbsterregten Dynamo nicht auch für die Magnetfelderzeugung und charakteristischen zeitlichen Entwicklungsmuster in den kosmischen Himmelskörpern verantwortlich sein?

Die Auseinandersetzung mit dieser Fragestellung erfordert verständlicherweise die Erkenntnisgewinnung auf dem Gebiet der Plasmaphysik, einem in den letzten Jahrzehnten vor allem auch im Bereich der Kernenergieforschung entwickelten Themenbereich der modernen Physik. Eine solche Auseinandersetzung könnte auch für die an den Vorgängen im Universum so interessierten Schüler sehr motivierend sein, bedenkt man doch, dass der Plasmazustand, kosmisch gesehen, der normale Materiezustand ist. Etwa 99% der Materie in unserem Universum verhalten sich wie ein Plasma, unsere eigene Welt stellt so nur eine kleine neutrale Insel im großen Plasma-Universum dar. Wie könnten die typischen Induktionseffekte des Dynamoprozesses aussehen, die in rotierenden Plasmakörpern aus ursprünglichen kleinen Saatfeldern selbsterregt teilweise gigantisch starke kosmische Magnetfelder erzeugen?

3. Zum Scheibendynamo als Modellbild eines technischen Generators

Die Funktionsweise eines Technischen Generators lässt sich relativ einfach am Bild eines sogenannten Scheibendynamos erläutern (siehe Abb. 2). Die sich mit der Dynamotheorie beschäftigenden Astrophy-

siker benutzen dieses Modellbild gerne zur Darstellung ihrer Arbeit in der Öffentlichkeit, weil die Scheibe ähnlich kosmischen Himmelskörpern homogen ist, die Kabelwicklung ohne Eisenkern und die elektrischen Kontakte im Vergleich zum technischen Generator in der Praxis relativ einfach zusammenhängend und damit überschaubar erscheint. Es verdeutlicht den auch für einen selbsterregten kosmischen Dynamo zentralen Prozess der Umwandlung von Rotationsenergie in elektromagnetische Energie.

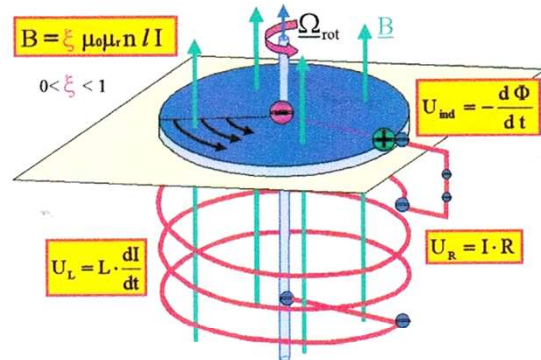


Abb. 2: Modellbild eines Scheibendynamos

Im Bild dieses Scheibendynamos wird in der in einem relativ schwachen magnetischen Anfangsfeld, dem sogenannten „Saatfeld“, rotierenden Scheibe nach dem Faradayschen Induktionsgesetz eine elektrische Spannung induziert. Verbindet man den Schleifkontakt am Rande der Scheibe über eine geeignete um die Rotationsachse der Scheibe gewendelte Drahtspule mit einem Schleifkontakt an der Rotationsachse, so fließt ein elektrischer Strom, der das ursprüngliche Magnetfeld bei geeigneter hoher Rotationsfrequenz der Scheibe verstärkt. Die ursprünglich im Ionengitter willkürlich hin- und her-treibenden Elektronen werden dabei zu einer koordinierten Bewegung gezwungen.

Ohmscher Spannungsabfall	$U_R = I \cdot R$
Induktiver Spannungsabfall	$U_L = L \cdot \frac{dI}{dt}$
Induzierter Spannungsabfall	$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} \approx -\frac{\Phi}{T} = -f \cdot \Phi$ $\Phi = A \cdot B \propto I \Rightarrow \Phi = L \cdot I$ $\Rightarrow U_{ind} \approx -f \cdot L \cdot I$
2. Kirchhoffsche Regel	$U_R + U_L + U_{ind} = 0$ $L \cdot \frac{dI}{dt} + (R - f \cdot L) \cdot I = 0$
Lösungsansatz	$I(t) = I(0) \cdot e^{pt}$
Bedingung für Selbsterregung	$p = \frac{f \cdot L - R}{L} \geq 0 \Leftrightarrow f \geq f^{krit} = \frac{R}{L}$

Abb.3: Anregungsbedingung des Scheibendynamos

Dieser Prozess schaukelt sich solange auf, bis die auf die Rotationswirkung rückwirkenden magnetische Kräfte und andere „Reibungs“-Kräfte in diesem selbsterregten Dynamoprozess einen Gleichgewichtszustand mit konstanter magnetischer Flussdichte herbeiführen. Abb. 3 erläutert die Anregungsbedingung für den Scheibendynamo. Zur experimentellen Realisierung eines Scheibendynamos werden zur Zeit theoretische und experimentelle Überlegungen und Untersuchungen in Zusammenarbeit mit Karl-Heinz Rädler [10] [11], Potsdam, und Werner Föhse [4], Bremen, durchgeführt.

4. Über die Besonderheiten der Materialeigenschaften kosmischer Plasmakörper

Materie im Plasmazustand verhält sich sehr kontrovers, einerseits ähnlich der Materie in gasförmigem, flüssigem oder festem Zustand, sie zeigt andererseits Eigenschaften, die keine Parallelen zu anderen Zustandsformen aufweisen (siehe Abb. 4).

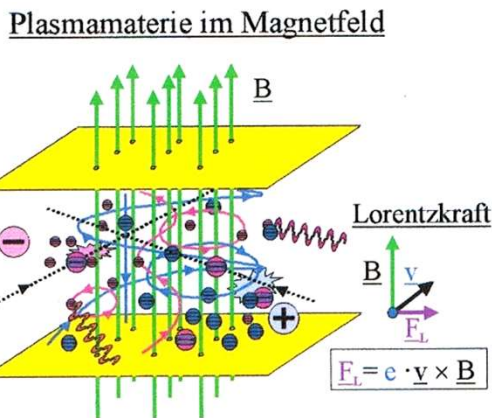


Abb. 4: Physikalische Prozesse im Plasma

- Plasmamaterie besteht aus Elektronen, Protonen, Ionen und neutralen Atomen, Molekülen und Staubpartikeln.
- Kompressibilität bei geringer Materiedichte, die Fähigkeit zur Diffusion sind typische gasförmige Eigenschaften.
- Das Einsetzen von Instabilitäten, die Ausbreitung von Wellenprozessen sind auch Eigenschaften flüssiger Materie.
- Sehr hohe elektrische Leitfähigkeit sowie Wärmeleitfähigkeit trotz Quasineutralität prägen ihre metallischen Eigenschaften.
- Stoß- und Strahlungs-Prozesse sowie Sedimentationsprozesse in Gravitations- und anderen Kraftfeldern können in kosmischen Plasmakörpern beobachtet werden.
- Plasmamaterie zeigt eine ausgeprägte Tendenz zum Ausgleichen von Ladungsunterschieden.
- Lokale Ladungsüberschüsse erzeugen elektrische Felder, treiben elektrische Ströme, die ihrerseits interne Magnetfelder erzeugen.

- Die weitreichende Wirkung insbesondere magnetischer Kraftfelder sowie die dadurch vermittelte kollektive Wechselwirkung der Ladungsträger in Plasmen ruft großräumige Bewegungen, die Ausbildung charakteristischer raumzeitlicher Strukturen hervor.
- Die geladenen Plasmateilchen führen in Magnetfeldern Gyrationbewegungen, durch zusätzliche Kraftfelder ausgelöst, überlagerte Driftbewegungen durch.
- Magnetische Feldstrukturen verhalten sich in extrem gut leitender Plasmamaterie wie „eingefroren“, sie folgen den Bewegungen des Plasmas.
- Magnetische Rekonnexionsprozesse in Gebieten mit hohem Magnetfeldgradienten und reduzierter elektrischer Leitfähigkeit können zu einer Neuverbindung der Feldlinien, zu einer Änderung der Topologie der magnetischen Feldstrukturen führen.

Ein Plasma ist aufgrund dieser Eigenschaften ein teilweise oder vollständig ionisiertes, quasineutrales Gas mit kollektivem Teilchenverhalten [12]. In ihm können magnetische Felder in astrophysikalischen Systemen wegen der hier oft vorherrschenden hohen elektrischen Leitfähigkeit als eine Art plastisches Material angesehen werden, das der Bewegung der Plasmamaterie folgt und dabei gebogen, verdreht und verzerrt werden kann. Während Magnetfelder im Labor scheinbar passiv auf die jeweilige Stärke des durch Drahtspulen fließenden elektrischen Stromes reagieren, scheint das Magnetfeld in astrophysikalischen Zusammenhängen dabei ein eigenständiges „Leben“ zu führen. Natürlich besteht zwar auch hier entsprechend dem Ampèreschen Gesetz ein Eins-zu-eins-Zusammenhang zwischen elektrischer Stromstärke und magnetischer Flussdichte. Anders als in der Elektrotechnik gibt es in der sogenannten Magnetohydrodynamik, der Lehre von der Wechselwirkung der Plasmamaterie-Strömungen mit Magnetfeldern, aber offensichtliche Vorteile, die magnetische Flussdichte anstelle der Stromstärke als physikalische Basisgröße zu verwenden. Bei im Idealfall unendlicher elektrischer Leitfähigkeit kann nämlich nach dem sogenannten Alfvén-Theorem der „eingefrorenen“ Feldlinien aus einer Anfangs-Feldlinienstruktur bei vorgegebenem Materiestromprofil auf die zeitliche Entwicklung des Magnetfeldes zumindest qualitativ geschlossen werden. Ohne tiefere analytische Überlegungen und ohne die Lösung komplizierterer Differentialgleichungen vermittelt die relativ einfache bildhaft-anschauliche Visualisierung dieses Prozesses ein Gefühl tieferen Verstehens des zugrundeliegenden physikalischen Prozesses und ist von daher für den Einsatz in Lernsituationen aus methodisch-didaktischen Gründen von großem Vorteil. [1]

5. Zum Beweis des Alfvén-Theorems der „eingefrorenen“ Feldlinien

Die Anwendung des bekannten Faradayschen Induktionsgesetzes in einem im Idealfall unendlich gut leitenden Plasma ermöglicht auch Schülern einen relativ einfachen Zugang zum Beweis dieses Theorems.

- Voraussetzung ist eine unendlich hohe elektrische Leitfähigkeit der Materie.
- Die Behauptung des Alfvén-Theorems ist es dann, dass sich magnetische Feldlinien in Strömungsfeldern des Plasmas wie in die Materie „eingefroren“ verhalten (siehe untere Entwicklung in Abb. 5).

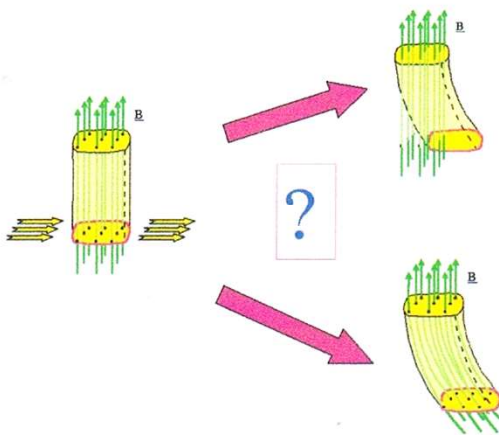


Abb.5: Zum Beweis des Alfvén-Theorems

- Ein Beweis erfolgt durch Widerspruch. Angenommen, die Feldlinien seien nicht eingefroren (siehe obere Entwicklung in Abb. 5). Dies würde eine Magnetflussänderung durch die eingezeichnete rot umrandete Fläche zur Folge haben. Nach dem Faradayschen Induktionsgesetz bewirkt dies aber den Aufbau eines elektrischen Feldes mit geschlossenen Feldlinien. Wegen der angenommenen unendlichen Leitfähigkeit der Plasmamaterie würde hierdurch nach dem Ohmschen Gesetz ein Ringstrom unendlicher Stärke erzeugt. Dies hätte ein Magnetfeld mit unendlicher Energiedichte zur Folge, was nicht möglich ist. Da diese Argumentationskette einen Widerspruch für alle möglichen Querschnittsflächen hervorruft, müssen statt dessen alle Feldlinien bei der Plasmabewegung mitgenommen werden. Sie können den Plasmakörper also nicht verlassen, verhalten sich wie „eingefroren“.

Die Erhaltung des Magnetflusses wird im Übrigen dadurch erreicht, dass im geladenen Plasma durch dessen Bewegung relativ zum Magnetfeld Ströme induziert werden, die das Magnetfeld jeweils geeignet korrigieren [12]. Es gilt dann auch der Satz von der Feldlinienerhaltung, wonach zwei verschiedene Punkte auf einer magnetischen Feldlinie bei unendlich hoher elektrischer Leitfähigkeit im Strömungs-

feld der Plasmamaterie stets auf ihrer „Heimattfeldlinie“ bleiben.

6. Anmerkungen zur Induktionsgleichung des kinematischen Dynamoproblems

Die in der Magnetohydrodynamik abgeleiteten sogenannten Induktionsgleichungen beschreiben die zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von unterschiedlichen Induktions- und den Magnetfeldabbau bewirkenden Prozessen. Beim sogenannten „kinematischen“ Dynamoproblem werden dabei die Geschwindigkeitsfelder der Plasmamaterie-Strömung als unveränderlich vorgegeben und nach zeitlich konstanten stationären oder oszillierenden Magnetfeld-Lösungen der Induktionsgleichung gesucht. Die Herleitung dieser Induktionsgleichungen ist mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen und einem für die leitenden Plasmaströmungen abgewandelten Ohmschen Gesetz möglich (siehe Abb. 6).[1]

Zur Herleitung der Induktionsgleichung

Faradaysches Induktionsgesetz $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

Ohmsches Gesetz $\mathbf{j} = \sigma \cdot (\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c})$

Ampèresches Gesetz $\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$

Gaußsches Gesetz $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Induktionsgleichung ($\sigma = \text{konst.}$) $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \frac{c^2}{4\pi \sigma} \nabla^2 \mathbf{B}$

Ansatz „Mean Field“ Theorie $\mathbf{B} = \overline{\mathbf{B}} + \mathbf{B}^*$ und $\mathbf{v} = \overline{\mathbf{v}} + \mathbf{v}^*$

Induktionsgleichung der „Mean Field“ Theorie

$$\frac{\partial \overline{\mathbf{B}}}{\partial t} = \nabla \times (\overline{\mathbf{v}} \times \overline{\mathbf{B}}) + \nabla \times (\alpha \cdot \overline{\mathbf{B}}) + \left(\frac{c^2}{4\pi \sigma} + \lambda_{\text{turb}} \right) \cdot \nabla^2 \overline{\mathbf{B}}$$

(λ_{turb} turbulente magnetische Diffusivität, α Koeffizient des α -Effektes)

Abb. 6: Gleichungen zur „Mean Field“-Theorie

Die obere Induktionsgleichung lässt nach einem sogenannten Anti-Dynamo-Theorem von Cowling für axialsymmetrische stationäre Geschwindigkeitsfelder noch keine stationären Lösungen mit axialsymmetrischen Magnetfeldern zu. Um aber die im Kosmos näherungsweise anzutreffenden symmetrischen Geschwindigkeits- und Magnetfeldstrukturen erklären zu können, wurde ein erfolgreicher neuer Modellansatz gemacht. Im Rahmen einer sogenannten „Mean Field“-Theorie [8][9] werden sowohl die Magnetflussdichten als auch die Geschwindigkeitsfelder in einen gemittelten sowie einen fluktuierenden Anteil zerlegt. In der aus solchen Überlegungen resultierenden unteren Induktionsgleichung in Abb. 6 ermöglichen die beiden ersten Induktionsterme (sogenannte ω - beziehungsweise α -Effekte) auf der rechten Seite der Gleichung die Aufrechterhaltung realistischerer Magnetfeldern gegen die durch Turbulenz-Anteile verstärkte abbauenden Wirkung des dritten, sogenannten Diffusionsterms.

Anders als bei dem bisher dargestellten „kinematischen“ Dynamoproblem wird in neueren, selbstkonsistent gerechneten Dynamomodellen auch die Rückwirkung des im Induktionsprozess erzeugten Magnetfeldes durch die Lorentzkraft auf das Strömungsfeld berücksichtigt.

7. Veranschaulichung zentraler Induktionseffekte selbsterregter kosmischer Dynamos

Anstelle der elektrisch leitenden Kabel in technischen Generatoren übernehmen es unterschiedliche physikalische Kräfte (Gravitationskräfte, magnetische und elektrische Kräfte, Trägheitskräfte, in rotierenden Körpern Coriolis- und Zentrifugalkräfte) in den rotierenden Plasmakörpern des Universums, Materieströmungen (Auftriebs-, Konvektionsströmungen, Differentielle Rotation, jetartige Strömungen) auf charakteristische ausgezeichnete Bahnen zu zwingen, in denen ein mehr oder weniger geordneter Stromfluss Magnetfeldstrukturen unterschiedlichster Form und Stärke erzeugt.

Mit Hilfe des Bildes der „eingefrorenen“ Feldlinien lassen sich dabei die wesentlichen Induktionseffekte zur Erregung eines kosmischen Dynamos für Lerngruppen bildhaft-anschaulich gut visualisieren. In Animationen wird zunächst das Prinzip der differentiellen Rotation, der ortsabhängigen Variation der Winkelgeschwindigkeit am Beispiel der rotierenden Wasserstoff-Konvektionszone der Sonne, der magnetokonvektive Auftrieb magnetischer Flussröhren auf Grund von Temperaturgradient sowie die Wirkung der Corioliskraft auf rotierenden Scheiben erläutert.

Es folgt schließlich die anschauliche animierte Darstellung der Wirkungsweise der zentralen Induktionseffekte selbsterregter kosmischer Dynamos, des sogenannten ω - beziehungsweise α -Effektes.

Erzeugung toroidaler Feldstrukturen

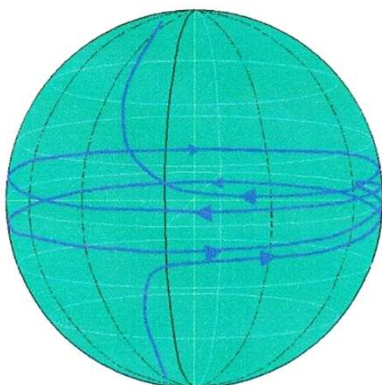


Abb. 7: Einfluss differentieller Rotation auf ein ursprünglich poloidales Magnetfeld

Als ω -Effekt wird dabei der Induktionsprozess bezeichnet, der bei einsetzender differentieller Rotation (sie bezeichnet die Eigenschaft der Ortsabhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit $\omega(r)$) auf

Grund der Eingefrorenheit der Feldlinien ein ursprünglich meridional ausgerichtetes, sogenanntes poloidales Magnetfeld zu einem azimuthal aufgewickelten, sogenannte toroidale Feldanteile besitzenden Magnetfeldes umwandelt (siehe Abb. 7).

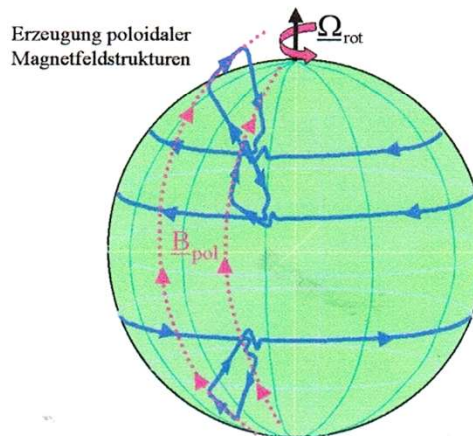


Abb. 8: Einfluss konvektiver, helikaler Strömungen auf ein ursprünglich toroidales Magnetfeld

Magnetokonvektiver Auftrieb unter Einfluss der Corioliskraft lässt diese so erzeugten eingefrorenen toroidalen Feldlinien aufsteigen und durch helikale Verdrehungen wieder in Feldstrukturen mit poloidalen Anteilen zurückverwandeln (siehe Abb. 8). Dieser Effekt wird als α -Effekt bezeichnet, weil in ihm gemäß $I \propto B_{\text{tor}}$ über eine mit α bezeichnete Proportionalitätskonstante elektrische Ströme parallel zum toroidalen Feld erzeugt werden. [8] [9] Die in kosmischen Plasmakugeln zur Verfügung stehenden Energien (Fusionsenergie, Rotationsenergie, freiwerdende Kristallisationswärme, Radioaktive Energie) treiben die für den Induktionsprozess notwendigen Materieströmungen, die die eingefrorenen Magnetfeldstrukturen verformen, magnetische Spannungen und Drücke erzeugen, in ihnen magnetische Energien speichern. Ein ursprünglich schwaches magnetisches „Saatfeld“ reicht dabei aus, um unter geeigneten Bedingungen in rotierenden Plasmakörper in dem als Prozess der Selbsterregung bezeichneten Vorgang starke, auch oszillierende Magnetfelder aufzubauen und zu regenerieren.

8. Zusammenstellung wesentlicher Materialien und Unterrichtselemente eines geplanten Curriculums

Für ein im Detail noch zu erstellendes Unterrichtscurriculum können eine Vielzahl von Materialien und Unterrichtselementen eingeplant werden:

- Plasmaexperimente (Lavalampe, Plasmakugel)
- Klassische Schulexperimente zum technischen Generator
- Dia- und Video-Realaufnahmen der dynamischen Sonne, der Polarlichter, von Dynamoexperimenten

- Videosequenzen von Simulationsrechnungen zur Plasmaphysik, zu Dynamoprozessen
- Animationen zur Erläuterung der physikalischen Prozesse in magnetisiertem Plasma, zu Induktionsprozessen im Rahmen der Dynamotheorie
- Vertiefende Analyse des Prinzips des selbsterregten Dynamos, Einführung in wesentliche Elemente der Plasmaphysik und Weiterentwicklung des Feldlinienmodells für magnetisiertes Plasma als zentrale Unterrichtsinhalte
- Nutzung vielfältiger multimedialer Methoden (Video-, Internet-Einsatz, Interaktive Bildschirmexperimente, Simulationen und Animationen) zum Verständnis faszinierender und relevanter Prozesse im Universum
- Unterrichtseinheiten mit gezielten Materialrecherchen im Internet
- Unterrichtsbesuch mit Besichtigung und Diskussionen im Astrophysikalischen Institut Potsdam (AIP)
- Eingangs- und Abschluss-Test sowie Interviews, gezielte Evaluationsstudien

Die Planung eines erfolgreichen Curriculums erfordert die Betonung und Herausarbeitung vielfältiger Möglichkeiten zur Eigeninitiative für Schüler.

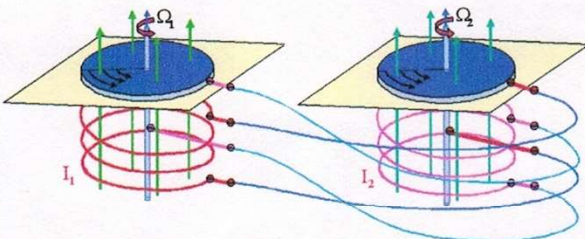


Abb. 9: Zum Modell des Rikitake-Dynamos

9. Anmerkungen zum Rikitake-Dynamo

Der Rikitake-Dynamo bezeichnet das Modell eines gekoppelten Systems von zwei Scheibendynamos (siehe Abb. 9). Wechselseitig speist die von einem Scheibendynamo induzierte Spannung jeweils das die Induktionswirkung vermittelnde Magnetfeld des anderen Scheibendynamos. Simulationsrechnungen zeigen, dass Rikitake-Dynamos grundsätzlich angeregt werden können, sogar chaotisch einsetzende Wechsel der Stromrichtung und damit Umpolungen der Magnetfelder möglich sind. Kann ein Rikitake-Dynamo möglicherweise als elektrotechnisches Analogon zu dem sich immer wieder chaotisch umpolenden Erddynamo [6] in einem Experiment realisiert werden?

Zur experimentellen Realisierung eines Rikitake-Dynamos, möglicherweise auch für Unterrichtszwecke, werden zur Zeit theoretische und experimentelle Untersuchungen in Zusammenarbeit mit

Franz Bader [2] [3], Ludwigsburg, und Werner Föhse, Bremen, durchgeführt [5]. In ersten Experimenten ließ sich ein gekoppeltes Dynamosystem tatsächlich erregen (siehe Abb.10), eine erhoffte Umpolung konnte bisher jedoch nicht beobachtet werden.

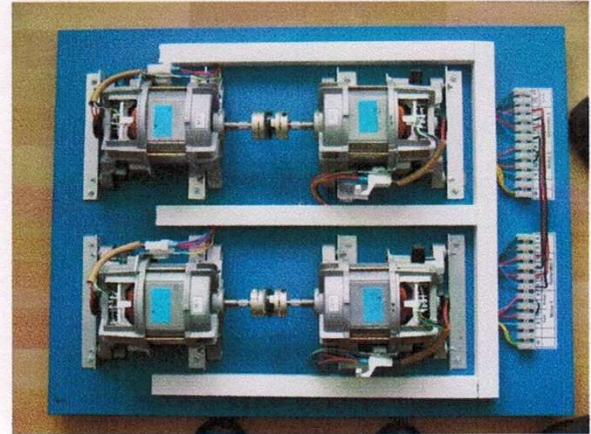


Abb. 10: Ein erstes Rikitake-Dynamo Experiment

10. Literatur

- [1] A.R. Choudri, The Physics of Fluids and Plasmas, An Introduction for Astrophysicists, Cambridge University Press 1998
- [2] F. Bader, Entropie - Herrin der Energie, Synergetik am Dynamo, Naturwissenschaftlicher Unterricht heute, Schroedel Schulbuchverlag GmbH, Hannover 1993
- [3] F. Bader, Simulationen chaotisch/synergetischer Vorgänge, private Kommunikation, Ludwigsburg 2001
- [4] W. Föhse, Unipolarmaschine mit rotierender Kupferscheibe, private Kommunikation, Bremen 2001
- [5] W. Föhse, Simulationen zum Rikitake-Dynamo, private Kommunikation, Bremen 2002
- [6] U. v. Kusserow, Stationäre Sphärische $\alpha\omega$ -Dynamos und das Erdmagnetfeld, Diplomarbeit, Georg-August-Universität Göttingen 1974
- [7] U. v. Kusserow, To B or Not To B, Über die Bedeutung kosmischer Magnetfelder (Teil 1), Nachrichten der Olbers-Gesellschaft Bremen, Ausgabe 193, Bremen 2001
- [8] E.N. Parker, Cosmic Magnetic Fields, Oxford University Press 1979
- [9] K.-H. Rädler, Mean-Field Approach to Spherical Dynamo Models, Astron. Nachr., Bd. 301, H. 3 (1980)
- [10] K.-H. Rädler, Considerations on the Disc Dynamo, Draft, in Vorbereitung (2001)
- [11] K.-H. Rädler and M. Rheinhardt, Can a Disc Dynamo work in the Laboratory, Magnetohydrodynamics, in Vorbereitung (2001)
- [12] E. Rebhan, Heisser als das Sonnenfeuer, Plasmaphysik und Kernfusion, R. Piper GmbH&Co. KG, München 1992