

# **Lernen über Kosmische Magnetfelder**

## **Zum Entwurf eines multimedial gestalteten astronomischen Curriculums**

**Ulrich v.Kusserow**

Didaktik der Physik, Universität Potsdam

Neueste Forschungsergebnisse zeigen, welche herausragende Rolle kosmische Magnetfelder in unserem sich vorwiegend im Plasmamaterie-Zustand befindlichen Universum spielen. Das Numerische Experiment als dritter, neben dem klassischen Experiment und der analytischen Theorie neuem Eckpfeiler im physikalischen Erkenntnisgewinnungsprozess hat in den letzten Jahrzehnten neue faszinierende Erkenntnisse vor allem auch über die das Leben auf unserem Planeten bestimmenden solar-terrestrischen Prozesse ermöglicht. Die Entstehung der sich zeitlich verändernder Magnetfelder in Sternen wie der Sonne oder in Planeten wie der Erde lässt sich heute mit einem Dynamomodell recht gut verstehen. Die Entwicklung hochenergetischer solarer Eruptionen, von Kometenschweifem im Sonnenwind oder magnetischen Stürme und Polarlichterscheinungen in Magnetosphären von Planeten wie der Erde können durch sogenannte magnetische Rekonnexionsprozesse erklärt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen stellen zudem die große Bedeutung magnetischer Prozesse für den Drehimpulstransport bei der Entwicklung junger Sternsysteme, ursprünglich also auch unseres Sonnensystems, heraus. Viele dieser Prozesse und Phänomene lassen sich im Rahmen eines für die Anwendung im Bereich der Pasmaphysik erweiterten Feldlinienmodells besonders anschaulich in animierten Bilder darstellen und erläutern. Eine motivierende Auseinandersetzung mit dem Wirken kosmischer Magnetfelder bietet sich hierdurch auch für den Schulbereich der Sekundarstufe II an. Es wird der Entwurf einer multimedial gestalteten Unterrichtsreihe vorgestellt, der die Einsatzmöglichkeiten eines solchen Curriculums unter Zuhilfenahme der Methoden neuer Medien, beispielsweise des Internet, erproben soll. Eine ausführliche Darstellung der Hintergründe, Motivationen und Zielsetzungen, erste Überlegungen zur erforderlichen didaktischen und methodischen Aufbereitung, zum konkreten Ablauf und zur Auswertung der Unterrichtseinheit sowie eine Sammlung der bereitzustellenden umfangreichen Unterrichtsmaterialien sollen die an der Erprobung des Curriculums interessierten Lehrer informieren und zur kreativen Mitgestaltung animieren.

## **2. Teil**

den sich anschließend getrennt voneinander mit unterschiedlichen Feldlinien verbunden. Anders als

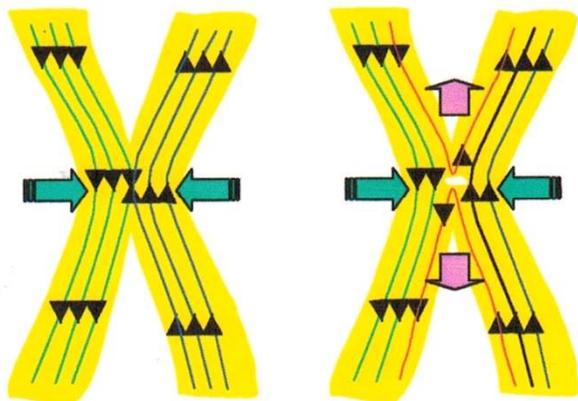


Abb. 23 Veranschaulichung des Rekonnexionsprozesses

im Bild der bei unendlich hoher elektrischer Leitfähigkeit „eingefrorenen“ Feldlinie können sich bei diesem Prozess also Magnetfeld und Plasmamaterie voneinander entkoppeln, diffundiert die Materie relativ zu den magnetischen Feldstrukturen. Verursacht durch ein Anwachsen des elektrischen spezifischen Widerstandes oder durch andere nicht-ideale Transportprozesse in lokal begrenzten Gebieten, in denen magnetische Feldstrukturen mit großem Gradienten in der magnetischen Flussdichte, in der Regel mit entgegengesetzt orientierter Ausrichtung der Feldlinien, aufeinander treffen, können Rekonnexionsprozesse großräumige Neustrukturierungen der Feldtopologien zur Folge haben. Die in den durch Materieströmungen gespannten, verdrillten und verknoteten, ursprünglich eingefrorenen magnetischen Feldstrukturen gespeicherten gewaltigen Beträge an magnetischer Energie können plötzlich freigesetzt werden. Sie beschleunigen geladene Teilchen, heizen die umgebene Materie auf und treiben großräumige Plasmamaterieströmungen.

Der magnetische Rekonnexionsprozess ist heute der eigentliche „Unruhestifter“ im Universum. Er ist nicht nur in unserem Sonnensystem an den meisten der explosiven, hochenergetischen Prozesse wesentlich beteiligt. Er stellt den zentralen Prozess dar, der die effektive Umwandlung magnetischer Energie in die kinetisch genannte Bewegungsenergie ermöglicht. Durch seine Vermittlung werden solare Eruptionen ausgelöst, wird der Sonnenwind beschleunigt, Kometenschweife zerrissen, magnetische Stürme und Polarlichter in der Erdmagnetosphäre ausgelöst. Er beeinflusst zudem manche der dynamischen Prozesse bei der Entstehung junger Sternsysteme. Ohne ihn könnten sich magnetisierte Plasmaströme unterschiedlichen Ursprungs niemals vermischen. Er löst das Dilemma, das entstehen würde, wenn alle magnetischen Feldstrukturen auf Grund unendlicher elektrischer Leitfähigkeit für immer in die Plasmamaterie eingefroren wären. Da würde sich der im Innern der Sonne durch den Dynamoprozess erzeugte magnetische Fluss ohne absehbares Ende in der Sonnenatmosphäre anhäu-

fen, sich niemals von der Sonne wirklich lösen können. Der Sonnenwind würde die für immer mit der Sonnenoberfläche verbundenen ausgedehnten magnetischen Feldstrukturen stetig in Richtung Erde zerran. Der dabei erzeugte magnetische Druck würde den Magnetkäfig der Erde mehr und mehr zusammenpressen. Niemals könnten die als Plasmoide bezeichneten magnetischen Inseln die Erdumgebung schweifseitig, auf der sonnenabgewandten Seite jemals verlassen, durch Energieabfuhr den auf der Erde lastenden Druck aufheben. Wie hätte sich dann ohne diesen Prozess Leben auf der Erde überhaupt entwickeln können? Selbst der den magnetischen Schutzkäfig erzeugende kosmische Dynamoprozess wäre ohne magnetische Rekonnexionsprozesse nicht denkbar. Ohne ihn könnten sich nämlich die im turbulenten Medium erzeugten kleinskaligen Magnetfeldstrukturen gar nicht erst zu einem globalen Magnetfeld verschmelzen.

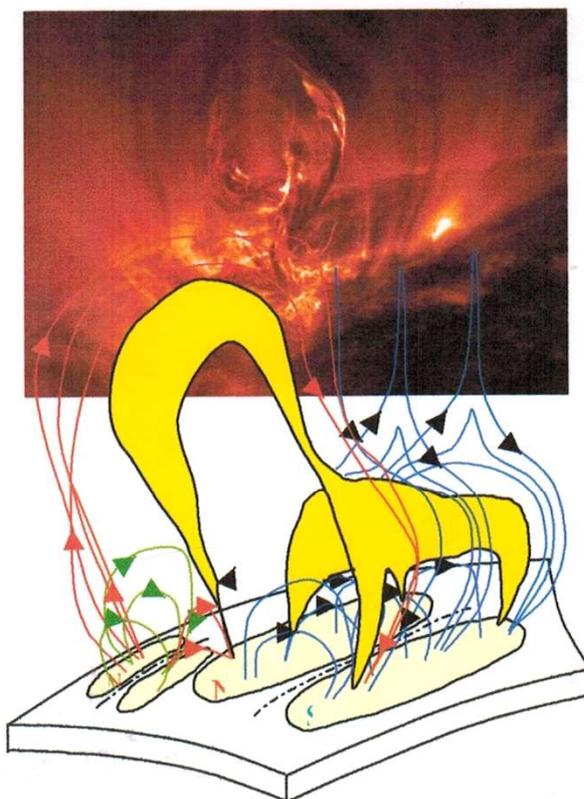


Abb. 24 Rekonnexionsprozesse und solare Eruptionen

Können Sie sich eigentlich vorstellen, dass magnetische Feldlinien „zerschnitten“ und anschließend wieder „zusammengeklebt“ werden können? Widerspricht das nicht unserer (allerdings sowieso nicht ganz richtigen) Vorstellung über die Eigenschaft der zumindest den Verlauf der magnetische Flußdichte  $B$  repräsentierenden magnetischen Feldlinien, dass sie stets geschlossen sein sollten? Abgesehen davon, dass sie tatsächlich nur quellenfrei sein müssen, also durchaus unverbunden ins Unendliche entweichen können, wie kann man dieses Bild des „Abtrennens“ von Feldlinien eigentlich

akzeptieren, es den Schülern dann auch noch verständlich machen?

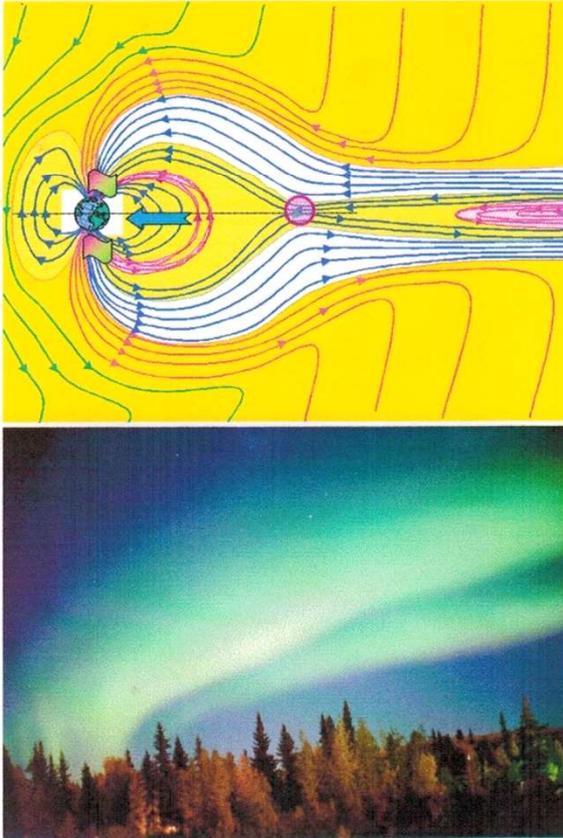


Abb. 25 Rekonnexionsprozesse und Polarlichtentstehung

**Feldlinien** stellen eine einfache und reduzierte geometrische Veranschaulichungen der Eigenschaften einer überall im Raum zu messenden vektoriellen physikalischen Messgröße dar. Für jeden zeitlichen Moment läßt uns ihre Verteilung im Raum zumindest einen qualitativen Eindruck über die am jeweiligen Ort anzutreffenden, durch Richtung und Stärke gekennzeichneten Kraftverhältnisse gewinnen. Die in komplexer Weise durch die Verteilung elektrischer Ladungen und Ströme und den Einfluss elektrischer und anderer Kraftfelder bestimmte, ortsabhängige magnetische Flussdichte  $\underline{B}(x,t)$  wird sich im Verlaufe dynamischer Entwicklungen natürlich immer wieder auch zeitlich mehr oder weniger spontan verändern. Zu jeder Zeit liefert dabei das magnetische Feldlinienbild ein grobes Abbild der in der Plasmamaterie auf Grund der magnetischen **Kraftwirkungen** anzutreffenden Kraftverhältnisse. Exakte Daten über die räumlich und zeitlich abhängige vektorielle magnetische Flussdichte können dabei aber natürlich nur aus der Lösung des im Rahmen der Plasmaphysik zugrundeliegenden komplexen Systems nichtlinearer Gleichungen der Magnetohydrodynamik gewonnen werden. Zu jedem Zeitpunkt liefern diese Gleichungen kontinuierlich neue berechnete Verteilungen der betreffenden Messgröße, zu jedem Zeitpunkt können dann entsprechende magnetische Feldlinienbilder erstellt werden. Wenn dabei die **numerischen Berechnungen** für spezielle Bedin-

gungen immer wieder plötzliche magnetische Topologieänderungen ergeben, und diese Möglichkeit veranschaulichen bereits einfache **analytische Betrachtungen** der zugrundeliegenden, die zeitliche Änderung von  $\underline{B}$  bestimmenden Induktionsgleichung, dann müssen auch die jeweils gezeichneten Feldlinienbilder „Sprünge“ aufweisen. Zwei natürlich immer noch mit kleinem Zeitabstand aufeinanderfolgende Feldlinienbilder lassen sich dann nur so interpretieren, dass sich einzelne Feldlinien getrennt und mit deutlich veränderter Struktur wieder neu zusammengesetzt haben. Auch wenn dies die gezeichneten Bilder nicht erkennen lassen, hat sich natürlich die magnetische Flussdichte  $\underline{B}$  und auf Grund der magnetischen Rekonnexion auch die magnetische Topologie in Wirklichkeit in einem kontinuierlich ablaufenden Prozess verändert.

Wenn in Stromschichten mit erhöhtem spezifischem Widerstand oder unteren anderen „**nicht-idealen**“ **Bedingungen**, in Bereichen, in denen Feldstrukturen mit entgegengesetzt ausgerichteten Komponenten aufeinandertreffen, der lokal, auf eng begrenztem Gebiet einsetzende magnetische Rekonnexionsprozess die Topologie großräumiger magnetische Feldstrukturen global verändert hat, werden große Mengen an gespeicherter magnetischer Energie freigesetzt. Jetzt wieder unter „**idealeren**“ Bedingungen im Bild der „eingefrorenen“ Feldlinien an die Magnetfeldlinien gebunden, werden Plasmaelemente mit den sich entspannenden Feldstrukturen beschleunigt. Das umgebende Plasma wird beim Durchlauf magnetosonischen Wellen unter Ausbildung von Schockfronten aufgeheizt. Die oft jetartig, gebündelt und gegenläufig sich ausbreitenden Materieströmungen lösen Instabilitäten unterschiedlicher Art aus, die in einer Art Kettenreaktion induzierte Störungen ursprünglich sich im Gleichgewicht befindender Systeme auch in größerer Entfernung bewirken. Durch magnetische Prozesse vermittelt, können so lokale Prozesse drastische globale Veränderungen bewirken. Zu den „**nicht-idealen**“ Bedingungen, die diese Prozesse auslösen können, gehören in dem, außerhalb der Sonnen- und Erdatmosphäre auf Grund der dort vorherrschenden geringen Dichte in der Regel, „stoßfreien“ Plasma sogenannte stromgetriebene Mikro-Instabilitäten, anomale Resistivitäten, ausgelöst durch resonante Welle - Teilchen - Wechselwirkungen, sowie eine zunehmende Bedeutung des Elektronendruckes und der Hallströme von Elektronen durch Entmagnetisierung, das heißt Entkopplung positiver Ladungsträger auf Grund ihrer relativ zum Durchmesser des relevanten Rekonnexions-Gebietes zu großer Gyrationradien.

Die Möglichkeit der gegenseitige **Auslöschung** entgegengesetzt orientierter **magnetischer Feldstrukturen** im nahezu materiefreien Raum ist den Schülern aus ihrem Unterricht in der Sekundarstufe I unter Umständen schon bekannt. Feldlinien veranschaulichen bekannterweise ja die potentielle Kraftwirkung in der Umgebung eines Magneten.

Bringt man beispielsweise unterschiedliche Pole zweier Magnete nahe zusammen, so wird sich im Raum zwischen ihnen sicherlich ein Punkt finden lassen, wo sich die resultierende Kraftwirkung gerade aufhebt. Durch die Zusammenführung der Magnete fand hier offensichtlich eine „Vernichtung“ des Magnetfeldes statt. Im Fall des mit Materie gefüllten Raumes, im magnetisierten Plasma, stellen sich die Verhältnisse etwas anders dar. Unter idealen Bedingungen umhüllt das Plasma noch die magnetischen Feldstrukturen und schützt sie wie ein Isolator das sie enthaltende metallische Kabel vor einer Art „magnetischen Kurzschluss“, vor einem allzu engen Kontakt mit einer ebenfalls von Plasma „durchfluteten“ anderen magnetischen Feldstruktur. Erst unter „nicht-idealen“ Bedingungen ist ein „Schlüpfen“ entgegengesetzter Magnetfeldkomponenten durch das Plasma, eine Diffusion der Materie möglich. Der Rekonnexionsprozess lässt die Feldstrukturen miteinander zu einer neuen Struktur verschmelzen und aus dem Diffusionsbereich entweichen. Sowohl die magnetische Induktionsstärke als auch der magnetische Druck nehmen in diesem Bereich ab, weitere Feldstrukturen werden durch den hier dadurch entstehenden Unterdruck zur Verschmelzung in die Rekonnexionszone „gesaugt“.

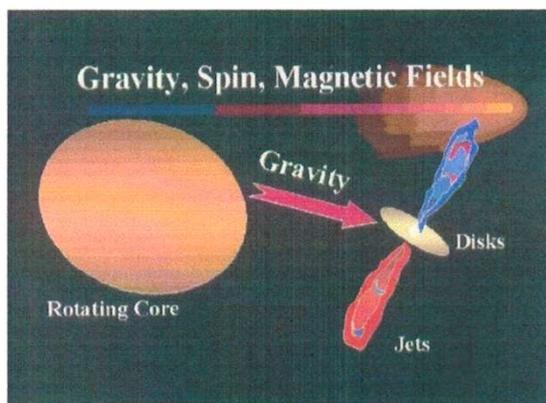


Abb. 26 Gravitation, Rotation und Magnetismus junger Sterne

Die komplexen **Entwicklungsprozesse in jungen Sternensystemen** werden in vielfältiger Weise auch durch magnetische Feldstrukturen beeinflusst. Dynamoprozesse, die Wirkung magnetischen Drucks und magnetischer Spannung sowie Rekonnexionsprozessen haben so auch die Entstehung unseres Sonnensystems, sowohl die Ausbildung des Zentralsterns Sonne als auch der erd- und jupiterähnlichen Planeten, ermöglicht. Magnetische Prozesse waren dabei wesentlich für die Steuerung der Materieakkretion, dem Prozess der Materieverdichtung im jungen Protostern und in der protoplanetaren Scheibe, sowie für die notwendige Umverteilung und den Abtransport des dem System innewohnenden Drehimpulses verantwortlich.

Auch unser **Sonnensystem** ist im Innern einer sich langsam verdichtenden, von Anfang an mit schwachen interstellaren Magnetfeldern durchsetzten Molekülwolken in einem Spiralarm der Milchstraße

entstanden. Bei besonders niedrigen Temperaturen waren nur wenige Atome ionisiert und auf Grund ihrer Ladung an das Magnetfeld gebunden. Die Materie konnte so anfangs fast ungehindert durch die Feldstrukturen schlüpfen und sich so zum Zentrum hin mehr und mehr verdichten. Wegen dem

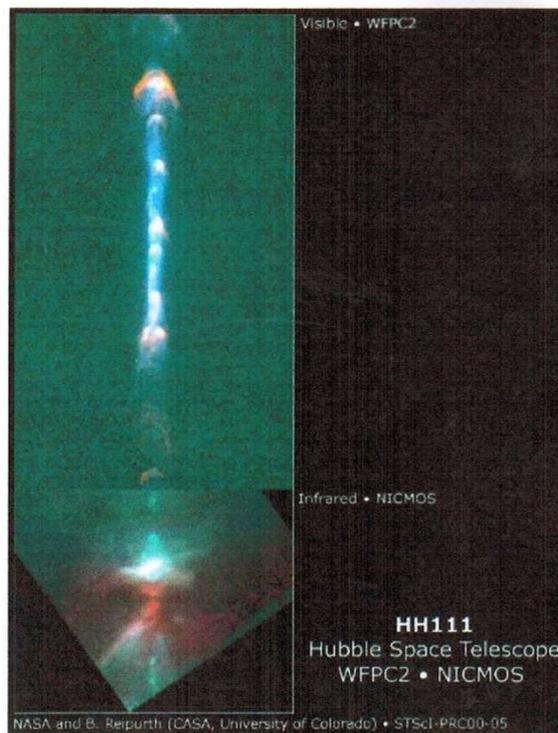


Abb. 27 Scheiben-Jet-System um jungen Stern

der **Molekülwolke** schon von ihrer Bewegung mit dem Spiralarm um das galaktische Zentrum her innewohnenden Drehimpulses entwickelte sich die ursprünglich diffusere Gaswolke auf Grund von Zentrifugalkräften langsam zu einem schwach abgeplatteten Rotationsellipsoid. Im Kernbereich dieses Systems heizte sich die Materie auf Grund der schneller zunehmenden Dichte langsam auf, der Ionisierungsgrad der Materie und die Gyrationen bewegungen geladener Teilchen um die auf Grund

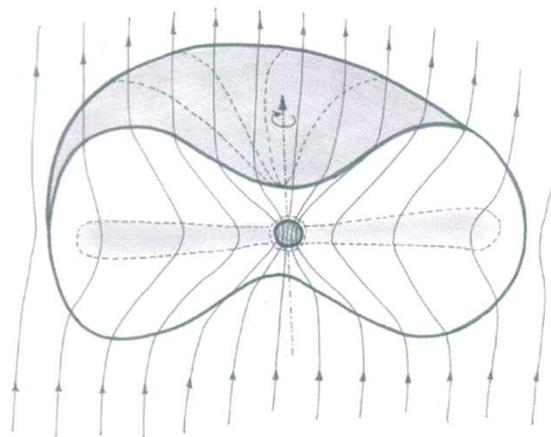


Abb. 28 Verdichtung rotierender, magnetisierter Molekülwolke ihres galaktischen Herkunftsortes vorwiegend in eine Vorzugsrichtung ausgerichteten magnetischen Feldstrukturen nahmen allmählich zu. Stoßprozesse

dieser Partikel mit neutralen Atomen behinderten in dieser Phase den zentralen **Verdichtungsprozess** deutlich. Zu diesem Zeitpunkt war nur die sogenannte „ambipolaren“ Diffusion als Verdichtungsprozess möglich. Erst als sich im Kern der verdichteten Molekülwolken die erforderliche kritische, sogenannte „Jeansmasse“ angesammelt hatte, setzte relativ plötzlich gegen den Widerstand des Magnetfeldes der gravitative Kollaps ein. Die Materie heizte sich auf, und auf Grund des erhöhten Ionisierungsgrades war jetzt die Materie an das Magnetfeld gekoppelt. Die „eingefrorenen“ Magnetfeldstruktur folgten der Bewegung nach innen und verdichteten sich erheblich. Zu diesem Zeitpunkt bildeten die Rotationsachse des langsam kollabierenden Systems und die Ausrichtungsachse der wohl noch immer ziemlich homogenen magnetischen Feldstrukturen sehr wahrscheinlich noch einen größeren Winkel miteinander.

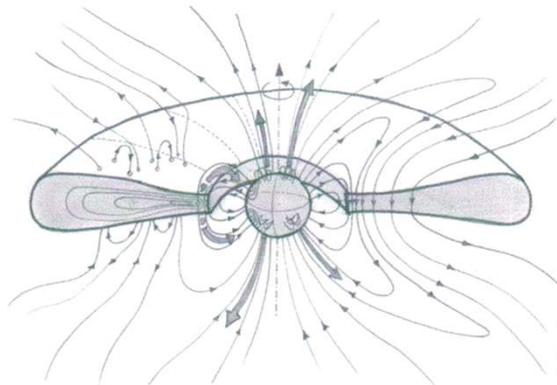


Abb. 29 Magnetfeldstrukturen in jungen Sternsystemen

In nicht zu großem Abstand vom Kernbereich der Gaswolke sorgten die magnetischen Felder, unterstützt durch den Einfluss schwacher gravitativer Kräfte, für die Strömung und Verdichtung geladener Partikel entlang der Feldlinien in den äquatorialen Bereich des sich dadurch mehr und mehr abplattenden und langsam eine scheibenförmige Strukturen ausbildenden Rotationskörpers. Ein effektiver **Materieakkretionsprozess** aus dem Außenbereich hin zum Zentralbereich konnte erst einsetzen als nach langsamer Erhöhung des Ionisationsgrades auch in diesem Bereich die sogenannte „magnetorotative“ Instabilität für die Ausbildung turbulenter Strömungsmuster der Materie und damit für erhöhte Reibung sorgte. Jetzt konnte die im inneren Bereich schneller rotierende Materie durch verstärktem Reibungskontakt mit der im äußeren Bereich langsamer rotierenden Materie abgebremst werden, Materie nach innen und der Drehimpuls nach außen strömen. Die in der sich jetzt um den Zentralkörper ausbildenden Rotationsscheibe „eingefrorenen“ Feldlinien folgten nun dem Akkretionsprozess nach innen.

Sowohl in dem sich ausbildenden zentralen Protosterns als auch im Innern des protosternnahen Scheibenbereiches konnte jetzt ein **Dynamopprozess** aus den vorhandenen Saatefeldern mit Hilfe der mit  $\alpha$  und  $\omega$  bezeichneten Induktionseffekte periodische

oder stationäre, dipolare- oder quadrupolare Magnetfelder erzeugen. Differentielle Rotation, konvektive Strömungen und infolge von Rotationsbewegungen auftretende Corioliskräfte als wichtige Ingredienzen für das Arbeiten eines kosmischen Dynamos waren dafür vorhanden. Aus dem Innern des Protostern-Scheiben-Jet-Systems aufsteigende magnetischer Flussröhren konnten hier überall Flecken erzeugt, Protuberanzen aufgebaut haben.

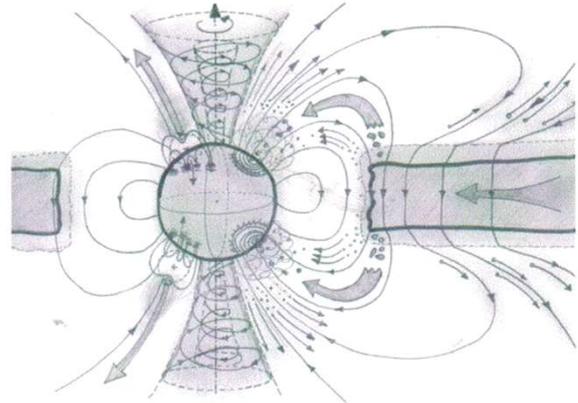


Abb. 30 Erzeugung von Stern- und Scheibenwinden

Die als Flares bezeichneten effektiven Freisetzungsprozesse **magnetischer Energien** nach dem Rekonnexionsprinzip bewirkten Instabilitäten, heftige solare Eruptionen und gewaltige koronale Plasmaauswürfe. Die bei diesen Prozessen gebildeten **Stern- und Scheiben-Koronae** wurden zu hohen Temperaturen aufgeheizt. Magnetische Rekonnexionsprozesse konnte die Plasmamaterie beschleunigen und für den Abtransport in **Stern- und Scheiben-Winden** aus den Atmosphären herausheben. Der Strahlungsdruck und das vermutlich vorwiegend dipolare Magnetfeld des jungen, den Fusionsprozess zündenden Sterns bewirkten gemeinsam die Ausbildung einer materiearmen „Lücke“ zwischen der Sternoberfläche und dem inneren Scheibenrand. Die durch Gravitationskräfte zum Zentralstern gezogene, einwärts akkretierende Materie wurde durch den gewaltigen magnetischen Gegendruck zusammengedrückter Feldstrukturen im Äquatorbereich der Scheibe sicherlich gestoppt, fand ihren Weg zur Sternoberfläche vermutlich vorwiegend nur entlang poloidaler magnetischer Feldlinien, erreichte die Oberfläche wohl vorwiegend in polaren Breiten. Die bei jungen Sternen dort auch anzutreffenden großen Aktivitätsgebiete mit komplexen Magnetfeldstrukturen erlebten durch diesen Einschuss hochenergetischer Plasmamaterie zusätzliche **Instabilitäten** im Zusammenhang mit **Rekonnexionsprozessen**. Vom Stern ausgehende Magnetfeldlinien durchsetzten im mittleren Bereich auch die hier langsamer kreisende Akkretions-scheibe. „Eingefrorenen“ Feldlinien und damit auch der an sie gekoppelte Stern werden so magnetisch gebremst, ein Zerreißen des andernfalls mit zu viel **Drehimpuls** belasteten Zentralobjektes dieses Systems verhindert. Weiter im Innern, die hier schneller als der Stern rotierende Scheibe sowie die

Scheibenkorona durchlaufenden poloidalen Feldlinien des Sterns würden zu toroidalen Feldstrukturen aufgewickelt werden. Deren magnetischer Druck beziehungsweise deren magnetische Spannung könnten die in jungen Sternsystemen häufig beobachteten Plasmawinde beschleunigen beziehungs-

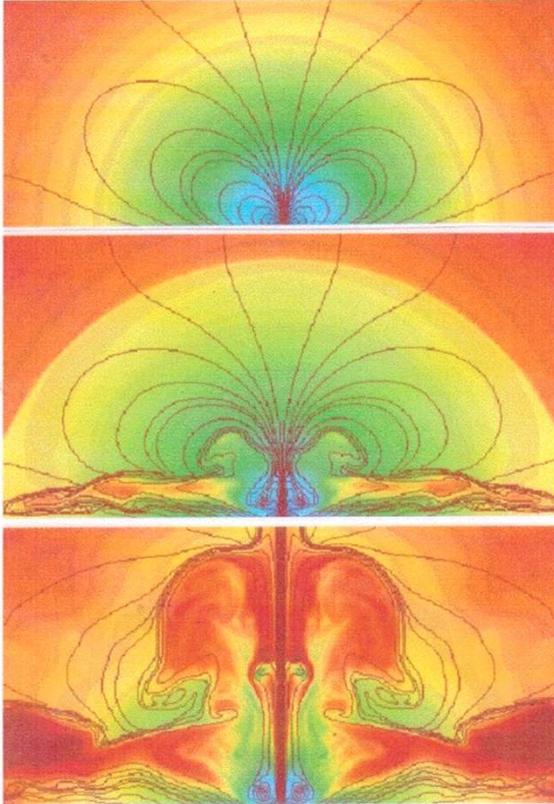


Abb. 31 Numerische Simulationen zur Jet-Erzeugung

weise kollimieren. Ein möglicher im Scheibenbereich des jungen Sternsystems erzeugter Wind könnten übrigens dadurch entstehen, dass geladene Teilchen entlang der unter großem Winkel zur Rotationsachse geneigten poloidalen Feldlinien im Scheibenbereich auf Grund von Zentrifugalkräften nach außen strömen. Auch diese, in der beim Sternentstehungsprozess verbleibenden, leicht ionisierten, das System umhüllenden Gaswolke verankerten Feldlinien werden oberhalb und unterhalb der Scheibe zu poloidalen Feldstrukturen aufgewickelt und kommen so als mögliche Ursache für die beobachtete Bündelung der Sternwindstrukturen in Frage. Der rotierende Zentralstern selbst wickelt seine strahlenförmigen, polnahen Magnetfelder natürlich auch auf. In diesen Bereichen schießt die Materie in besonders gebündelter Struktur und besonders schnell heraus, liefert ihren Beitrag zum Abtransport des Drehimpulses. Diese Materie-Jets bilden knotenförmig verteilte Plasmaverdichtungen aus, die durch Instabilitäten in der sie durch den Akkretionsprozess mit Materie versorgenden Scheibe, beziehungsweise im magnetisch beeinflussten Jet-Kanal unter anderem durch Ausbildung von Schockfronten hervorgerufen werden. Beim Auftreffen der Jets die umliegenden Gaswolken werden schließlich nach ihren Entdeckern benannte „Herbig-Haro-Objekte“ erzeugte, pilz- oder schir-

martige Strukturen, die ebenfalls auch durch magnetische Prozesse in den sich ausbildenden Schockfronten-Gebieten entstehen. Überall treten unterschiedliche, komplexe Magnetfelder gefüllt mit Plasmastrukturen unterschiedlicher Dichte und Geschwindigkeit in Wechselwirkung. Natürlich spielen hierbei magnetische Rekonnexionsprozesse ebenfalls eine wichtige Rolle.

Wenn sich die Scheibenstrukturen im weiteren Entwicklungsprozess langsam abkühlen, bilden sich erste staubartige Partikel, die miteinander verklumpen und sich verdichten. Erste Planitesimale werden durch Gravitationskräfte zum Äquatorbereich der protoplanetaren Scheibe gezogen, die weitere Verdichtung der Materie führt hier zur Ausbildung größerer Planetenembryos, die miteinander kollidieren, unter Umständen ineinander stecken bleiben. Die anhaltende Massenzunahme größerer Körper führt schließlich zur Bildung eines Protoplaneten, der wie ein Staubsauger weiterhin Gas- und Staubteilchen, Planitesimale und Embryos einsammelt. In seinem Innern könnte durch einen Dynamoprozess ein Magnetfeld erzeugt werden, das die Entwicklung von Leben in seinem Schutz ermöglicht, indem die Ausbildung und Erhaltung einer lebensnotwendigen Atmosphäre gewährleistet und die kosmische Strahlung aus dem fernen Universum oder vom eigenen Heimatstern abwehrt.

#### 4. Methodische Überlegungen

Auf den ersten Blick mag die Durchführung der vorgeschlagenen Unterrichtseinheit auf Grund des großen Stoffumfangs in einem Zeitraum von 15 Unterrichtsstunden nicht leicht möglich zu sein. Die Einführung des Plasmabegriffs, das Herausarbeiten der für das Curriculum zentralen Eigenschaften der „Eingefrorenheit“ und des „Zerschneidens und neu Zusammenfügens“ von magnetischen Feldlinien, die vielschichtige Anwendung des so für geladene Materieverteilungen gewonnenen erweiterten Feldlinienmodells im Rahmen einer Dynamotheorie zur Erzeugung solarer und geomagnetischer Felder, bei Energieumwandlungsprozessen in der Atmosphäre der Sonne, in Kometenschweif, in der Magnetosphäre der Erde sowie zur Lösung von Drehimpulstransport-Problemen bei der Entwicklung junger Sternsysteme, insbesondere unseres Sonnensystems ist tatsächlich ohne den Einsatz vielfältiger, gezielter methodischer Hilfe nur schwer realisierbar.

Das Gesamtkonzept der Unterrichtseinheit ist so angelegt, dass es sowohl von seiner Motivationslage her, seiner Zielsetzung, der Einbindung in eine größere Rahmenstruktur, als auch von seiner Unterrichtsablaufstruktur und den Möglichkeiten seines vielfältigen Medieneinsatzes her in vielen Bereichen die Eigeninitiative der Schüler anspricht und auch unbedingt erfordert. Sicherlich sind die meisten Schüler motiviert, wenn es um die Entschlüsselung von „Geheimnissen“ faszinierender, sie emotional aus verschiedensten Gründen auch per-

sönlich besonders betreffender kosmischer Phänomene geht Die Förderung der Selbständigkeit der Schüler ist ein besonderer Schwerpunkt im didaktischen „Förderungskatalog“ aktueller pädagogischer Handreichungen für die Lehrer. Eine persönlich und gezielt ausgewählte Informationsbeschaffung sowie die Bewertung von Expertisen aus dem Internet ermöglicht die Ausbildung einer Kommunikationsfähigkeit von Schülern, deren auch kritische Beurteilungsfähigkeit von Expertenmeinungen, schließlich die unbedingt notwendige Förderung von Bildung als Teilhabe im gesamtgesellschaftlichen Prozess in besonderem Maße. Zusätzlich unterstützt durch einen Tagesausflug zu wissenschaftlichen Potsdamer Instituten mit umfangreichem Besichtigungsprogramm, mit Vorträgen und der Möglichkeit engeren Kontaktes zu Wissenschaftlern können Schüler und Lehrer die in den Rahmenrichtlinien gewünschten tiefere Einblicke in den aktuelle Forschungsprozesse gewinnen. Nicht nur zur Überprüfung und Bewertung des Lernerfolges soll die Erstellung einer Kursarbeit (anstelle einer Klausur) zu einem der drei, den Schülern zur Auswahl gestellten Themen dienen. Ebenso wie Publikationen in Schülerzeitungen oder unter Umständen sogar fächerübergreifende Vorträge vor Mitschülern auch aus anderen Kursen bietet das Verfassen einer Kursarbeit zudem die für den Entwicklungsprozess jedes Schülers wichtigen Chancen der Außendarstellung und Würdigung, sowie der Identifikation mit einer selbsterstellten Arbeit.

Für viele Lehrer erfordert die große Stofffülle dieser Unterrichtseinheit sowie der vielschichtige Umgang mit den neuen Medien (Multimedia, Internet & Co) eine tiefere Auseinandersetzung mit neuen Aspekten der modernen Physik. Diese hoffentlich auch für den Lehrer mit vielen positiven, motivierenden Momenten durchsetzte Chance der „Fortbildung“ bewirkt möglicherweise zugleich auch ein Umdenken hinsichtlich seines Selbstverständnisses als Lehrer. Es ist zwar sehr wichtig, dass er als besser informierter und in vielen Bereichen weiterhin als Fachmann anzusehender Leiter dieser Unterrichtseinheit die grobe Struktur des Unterrichtsablaufes vorgibt, in Lehrervorträgen und Demonstrationsexperimenten sogar vielleicht manchmal noch deutlicher als im konventionellen Unterricht wichtige Informationen vermittelt, motivierende Anstöße und Ablaufrichtungen des Unterrichts bestimmt, er aber andererseits auf Grund seiner manchmal doch nicht so gravierend anderen Informationslage manchmal auch nur als eine Art Moderator des Lernprozesses auftritt

Die Anzahl der im Rahmen der Unterrichtseinheit über Kosmische Magnetfelder im Zusammenhang mit magnetischen Prozessen zu betrachtenden Phänomene ist besonders groß. Glücklicherweise lassen sich diese aber anhand einfacher Begriffe beschreiben, mit Hilfe weniger fundamentaler Zusammenhänge erklären, sich deren Einflussnahme selbst in komplex erscheinenden Zusammenhängen oftmals

anhand einfacher Zeichnungen und Animationen veranschaulichen. Bei der Arbeit mit dem für Plasmamaterie erweiterten Feldlinienmodell sollten Analogiebetrachtungen manchmal die Bildhaftigkeit von Veranschaulichungen unterstützen. Feldlinien, gespannt, verwirbelt oder ineinander verknotet wie „Gummibänder“, ihre energetische Katalpultwirkung, wenn sie sich entspannen, magnetische Flussröhren, die sich wie „Spaghettinudeln“ im kochenden Wasser mitbewegen, zerschnitten und neu verknotet werden können, dies alles sind aus dem Alltagsleben bekannte Bilder, die den Erklärungsprozess ermöglichen, manchmal aber auch verklären können. Das Bild der „eingefrorenen“ Feldlinien, der Rekonnexionsprozess, die magnetische Spannung und der magnetische Druck sind einige der wichtigen physikalische „Schlagwörter“, die einem „neugierigen Forscher“ das Leben leichter machen. Für die das Unterrichtsprojekt durchführenden Lehrer wird in diesem Zusammenhang eine besonders umfangreiche Sammlung von Arbeitsblätter vorliegen, anhand derer die Schüler auswahlsweise ihre Ideen zum Ablauf der magnetischen Prozesse oft mit Hilfe selbstgezeichneter Bildreihen entwickeln können. Entsprechende Powerpoint-Präsentationen mit Animationen zu den unterschiedlichen Entwicklungsabläufen der magnetische Feldstrukturen ermöglichen dem Lehrer eine ausführliche Vorinformation über die von den Schülern jeweils zu erwartenden Arbeitsergebnissen sowie die Vorführung auf dem Computer als Ergebnissicherung. Der Lehrer sollte selbst über den passenden Einsatz empfohlener Experimente, von Filmen aus dem umfangreiche Materialpool mit Videosequenzen, Realaufnahmen, gerechneten Simulationen und gezeichneten Animationen entscheiden. Für viele Themenbereiche stehen ihm Listen mit „guten“ Internetadressen zur Verfügung, die er den Schülern regelmäßig, an geeigneten Stellen des Unterrichtsablaufes mit den vorliegenden Informationen über historische Zusammenhänge zur Verfügung stellen sollte.

##### 5. Struktur eines möglichen Unterrichtsablaufes (siehe dazu Anhang A4)

##### 6. Anmerkungen zum Thema Experimente

Auf den ersten Blick bietet eine Unterrichtsreihe zum „fernen“ Thema „Lernen über Kosmische Magnetfelder“ wohl kaum Möglichkeiten zum Einsatz vieler motivierender Demonstrationen – geschweige denn Schülerexperimente, deren Einsatz natürlich auch für den Unterricht in der Sekundarstufe II besonders wünschenswert wäre. Die folgende Auflistung möglicher vorführbarer Experimente, Demonstrationsobjekte und Aktivitäten soll jedoch verdeutlichen, dass die Behandlung kosmischer Magnetfelder nicht wie die der Relativitätstheorie auf im wesentlichen theoretische Überlegungen beschränkt bleiben muss.

- Demonstrationsexperiment, Schülerexperimente zur Funktionsweise eines Dynamos
- Demonstrationsexperiment zum Scheibendynamo (rechtzeitige Fertigstellung nicht gesichert)
- Demonstrationsexperiment zum Rikitake-Dynamo (vollständige Funktionsweise nicht gesichert)

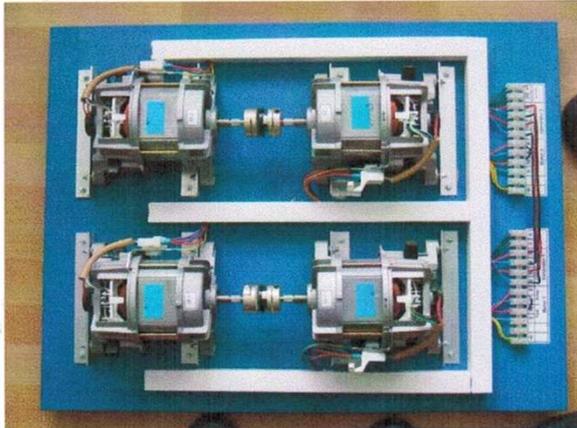


Abb. 32 Demonstrationsexperiment zum Rikitake-Dynamo

- Experimente zur Messung der lokalen Stärke und Ausrichtung des Erdmagnetfeldes
- Experimente zur Darstellung des dreidimensionalen Verlaufes magnetischer Feldlinien (Eisenpfeilspäne und Kompassnadelbrettchen)
- Demonstrationsversuche zur Lorentzkraft (Fadenstrahlrohr), Einfluss zusätzlicher magnetischer und elektrischer Felder auf die Bahnkurve der Elektronen
- Demonstrationsversuch zum Hall-Effekt, Hall-Detektor zur Messung der magnetischen Flussdichte
- Plasmakugel zur Einführung des Plasmabegriffs
- Lavalampe zur Demonstration von turbulenten und konvektiven Strömungsmustern
- Modellexperiment zum Rekonnexionsprozess, Zerschneiden von Gummibändern zur Veranschaulichung der Wirkungsweise magnetischer Spannungen
- Levitron, Demonstration der komplexen Wechselwirkung von Rotationsprozessen, Gravitations- und magnetischen Kräften
- Modellexperiment zum magnetischen Scheibendynamo, durchbohrte Holzkügelchen entweichen entlang dünner, schräg in eine rotierende Holzscheibe gebohrter Metallstangen
- Modellexperiment zur Aufwicklung magnetischer Feldlinien in rotierenden Körpern, im Außenbereich befestigte, ein rotierende Holzkugel durchlaufende Gummibänder verdrillen sich

## 7. Informations- und Unterrichtsmaterialien

Die Durchführung der vorgestellten Unterrichtseinheit erfordert eine intensive Auseinandersetzung des sie betreuenden Lehrers mit umfangreichen und

teilweise für sie noch unbekanntem fachwissenschaftlichen Hintergründen. Zur Erleichterung der Einarbeitung in die neuen Themenbereiche werden den Pädagogen rechtzeitig vor Beginn der Unterrichtsversuche die folgenden ausführlichen Artikel zu den wesentlichen Aspekten des Lernens über kosmische Magnetfelder zugeschickt.

- „To **B** or Not To **B**“ – Über die Bedeutung kosmischer Magnetfelder, Teil 1
- „How to **B**“ – Über die Bedeutung kosmischer Magnetfelder, Teil 2
- „Vom Technischen Generator zum selbsterregten Kosmischen Dynamo - Elemente einer didaktischen Aufbereitung“
- „Interpretation solar-terrestrischer und interplanetarer Prozesse mit Hilfe eines für Plasmamaterie erweiterten magnetischen Feldlinienmodells“
- „Über die Bedeutung magnetischer Prozesse bei der Entstehung von Sonnensystemen – Didaktische Aufbereitung eines komplexen astronomischen Problemkreises“

Eindrucksvolle und detaillierte Realaufnahmen der in unserem Sonnensystem oder in jungen Sternentstehungs-Gebieten ablaufenden astrophysikalischen Prozesse spielen eine zentrale Rolle sowohl für die Motivation zur Behandlung des Themas Kosmische Magnetfelder für Schüler und Lehrer als auch für die genauere Analyse der zugrundeliegenden physikalischen Abläufe. Oft kann die zugrundeliegende Dynamik der ablaufenden Prozesse nur in bewegten Bildern dargestellt werden. Die folgende Liste gibt einen Überblick über die den Lehrern in diesem Zusammenhang zur Verfügung gestellten Videomaterialien mit Realbildern und von Instituten und Fernsehanstalten zusammengestellten erläuternden Übersichtsbeiträgen zu unterschiedlichen Themen.

- Amateuraufnahmen zur Sonnenbeobachtung, Darstellung der Entwicklung von Flecken- und Fackelgebieten, Protuberanzen, Flares und koronalen Massenauswürfen im Weisslicht- und  $H\alpha$ -Bereich
- Mit solaren Großteleskopen in erdgebundenen Observatorien und von Satelliten aus in den unterschiedlichsten Spektralbereichen vom Röntgenlicht bis zur Radiostrahlung gewonnene Bildersequenzen über die vielfältigen dynamischen Prozesse in der Sonnenatmosphäre
- Aufnahmen zur Entwicklung von Kometenschweif
- Aufnahmen zur Entwicklung von Polarlichtern
- Aufnahmen aus Sternentstehungsgebieten
- Übersichtsbeiträge zu den Themenbereichen Solare Prozesse, Sonnenwind, Kometen, Welt- raumwetter, Magnetische Stürme und Polarlichter sowie Stern- und Planeten- Entstehungsprozesse

Animierte Bilder und in Filmsequenzen zusammengestellte Darstellungen der Ergebnisse von Simulationsrechnungen bieten gute Möglichkeiten

zum tieferen Verständnis der so weit entfernt von uns im Kosmos ablaufenden Prozesse. Sie veranschaulichen oft in eindrucksvoller Weise die auf wesentliche Aspekte reduzierte große Bedeutung der jeweils zugrundeliegenden Physik. Zum gezielten wahlweisen Einsatz stehen dem Lehrer unter anderem Bildsequenzen mit Animationen und Simulationen zu den folgenden Themenbereichen auf CD-ROMs zur Verfügung.

- Solare und terrestrische Dynamoprozesse
- Magnetokonvektion und Aufstieg magnetischer Flussröhren in der Sonnenatmosphäre
- Veranschaulichung von Rekonnexionsprozessen
- Veranschaulichung erdmagnetosphärischer Prozesse im Zusammenhang mit magnetischen Stürmen und Polarlichtentstehung
- Magnetische Prozesse in protostellaren Scheiben- und Jet-Systemen, Abfuhr von Drehimpuls, Unterstützung des Akkretionsprozesses, Beschleunigungs- und Kollimationsprozesse für den Materiejets

Eine vom Verfasser selbst produzierte umfangreiche Sammlung didaktisch aufbereiteter Animationen zu allen wesentlichen Themen dieses Curriculums über Kosmische Magnetfelder stehen für jeden Lehrer als besonders wichtige, grundlegende Unterrichtsmaterialien zum Einsatz bereit. Wahlweise kann er den Schülern die folgenden wichtigen physikalischen Prozesse in Power Point Präsentationen vorführen und so die bei der Behandlung entsprechender Arbeitsblätter durch den Schüler zu erzielenden Ergebnisse besonders anschaulich visualisieren.

- Gyrationbewegungen geladener Teilchen im Magnetfeld
- Übergang vom Einzelteilchen- zum Plasmamodell
- Veranschaulichung der grundsätzlichen Wirkungsweisen von magnetischem Druck und magnetischer Spannung im magnetisierten Plasma
- Veranschaulichungen des grundlegenden Prinzips der „eingefrorenen“ Feldlinien
- Veranschaulichung der Eigenschaft der differentiellen Rotation der äußeren Schichten des Sonneninneren
- Umwandlung poloidaler in toroidale magnetische Feldstrukturen auf Grund von differentieller Rotation (sogenannter  $\omega$ -Effekt)
- Magnetische Instabilitäten und magnetischer Auftrieb
- Einfluss konvektiver Strömungen auf magnetische Flussröhren
- Zur Entstehung von Sonnenflecken
- Zu den Eigenschaften solarer Fleckengruppen
- Zur Veranschaulichung von Corioliskräften
- Umwandlung toroidaler in poloidale magnetische Feldstrukturen auf Grund konvektiv un-

terstützten Auftriebs und Einfluss der Corioliskräfte (sogenannter  $\alpha$ -Effekt)

- Wirkungsweise des  $\alpha$   $\omega$ -Dynamos
- Zum Prinzip und zur Verurachung magnetische Diffusion
- Veranschaulichungen des grundlegenden Prinzips der magnetischen Rekonnexion, der „Neu-Verbindung“ magnetischer Feldlinien
- Zur Entstehung und Entwicklung der im solaren Magnetfeld eingelagerten Plasmawolken (Protuberanzen)
- Zur Entstehung von Sonneneruptionen
- Zur Entstehung von Kometenschweif
- Abriss von Kometenschweif auf Grund von Rekonnexionsprozessen
- Zur Ausbildung der charakteristischen Käfig-Schweif-Struktur der Erdmagnetosphäre im Sonnenwind
- Dynamische Prozesse und Topologieänderungen innerhalb der Erdmagnetosphäre durch Anströmung magnetisierten Sonnenwindes oder Plasmawolken mit parallel und gleichorientiert zum Erdfeld ausgerichteten Magnetfeldstrukturen
- Dynamische Prozesse und Topologieänderungen innerhalb der Erdmagnetosphäre durch Anströmung magnetisierten Sonnenwindes oder Plasmawolken mit parallel aber entgegengesetzt orientiert zum Erdfeld ausgerichteten Magnetfeldstrukturen
- Zur Entstehung von Polarlichtern nach Beschleunigung geladener Teilchen in parallel zum Magnetfeld ausgerichteten elektrischen Feldern
- Zur Advektion magnetischer Feldstrukturen in sich verdichtenden protostellaren Gaswolken
- Zum Einfluss ambipolarer Diffusion auf den protostellaren Kollaps
- Über die Rolle von Rotation und Magnetfeldern bei der Ausbildung von protostellaren Akkretionsscheiben
- Über die Bedeutung rotationsmagnetischer Instabilitäten für den Drehimpuls-Abtransport und die Materie-Akkretion in Scheiben um junge Sterne
- Veranschaulichung zentrifugalgetriebener Scheibenwinde entlang geneigter poloidaler Scheiben-Magnetfelder
- Zur Bedeutung der Aufwicklung poloidaler Scheiben-Felder im Außenbereich für die Kollimation von Scheibenwinden
- Zur Verdichtung und Aufwicklung protostellarer fossiler Magnetfelder beim Kollaps des rotierenden Zentralbereichs der Gaswolken
- Veranschaulichung der magnetischen Bremsung des protostellaren Zentralobjektes durch magnetische Kopplung an die langsamer rotierende Akkretionsscheibe

- Gesamtbild eines magnetisch beeinflussten Entwicklungsszenario für die Entstehung unseres Sonnensystems

Das Universum stellt ein kosmisches Labor zum Studium wesentlicher Prozesse im Rahmen der Plasmaphysik dar. Mit Hilfe von hochauflösenden Teleskopen aus der Ferne beziehungsweise mit Satelliten vor Ort beobachten die Wissenschaftler die Vorgänge in der näheren Umgebung unseres Plasma-Universums und sammeln Daten über die zu messenden relevanten physikalischen Messgrößen. Die Forscher versuchen heute sogar, ihre aus dem fernen Universum gewonnenen Erkenntnisse einzusetzen, um im Labor auf der Erde die im Universum im Zusammenhang mit Magnetfeldern ablaufenden Prozesse wie im Fall des Karlsruher Dynamo-Experiments aus Erkenntnisgründen oder wie im Bereich der Kernfusionsforschung sogar zum „direkten“ Wohl der Menschheit nachzubilden. Die folgenden Videomaterialien informieren über aktuelle Forschungsprojekte, die das Lernen über Kosmische Magnetfelder ermöglichen oder die Kenntnisse darüber erfolgreich anwenden.

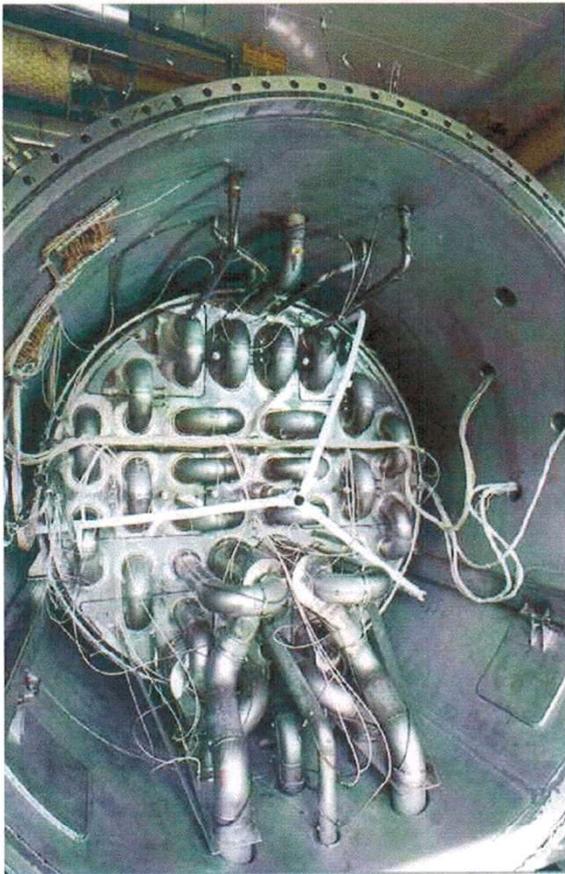


Abb. 33 Einblicke ins Karlsruher Dynamo-Experiment

- Ein Interaktives Bildschirmexperiment über die Messung solarer Magnetfelder im Potsdamer Einsteinurm
- Bilder von aktuellen Forschungsarbeiten mit den neuen Sonnentelaskopen auf den Kanarischen Inseln

- Informationen zu den aktuellen Ergebnissen der Satellitenprojekte CHAMP und CLUSTER zur Erforschung der Erdmagnetosphäre
- Bilder einer Messkampagne des Karlsruher Dynamoexperiments
- Eindrücke vom Besuch des Kernfusionsforschungszentrums in Greifswald

Neben der Bearbeitung der passend zu den oben aufgelisteten Power Point Präsentationen bereitgestellten Arbeitblätter stellt die eigenständige Suche nach geeigneten Informationen im Internet sowie deren Verarbeitung auch im Zusammenhang mit einer zu erstellenden Kursarbeit im Rahmen dieser Unterrichtsreihe eine wesentliche Aufgabe für die Schüler dar. Um der bei einem unkontrollierten Umgang mit Suchmaschinen zu befürchtenden Gefahr einer Informationsflut und der Verwertung ungeeigneten Materials zu begegnen, sollen dem Schüler zu den folgenden Themenbereichen, mit einleitenden Erläuterungen versehen, jeweils Listen mit lohnendswerten Internetadressen zur Verfügung gestellt werden.

- Lorentzkraft und Induktionsgesetz
- Gyration- und Driftbewegungen geladener Teilchen im Magnetfeld
- Vom Einzelteilchenmodell zur Plasmamaterie
- Ein für Plasmamaterie erweitertes Feldlinienmodell
- Magnetischer Druck und magnetische Spannungen
- Differentielle Rotation, Konvektionsströmungen und Corioliskräfte
- Solare  $\alpha$   $\omega$ -Dynamos
- Ein Dynamomodell für die Erde
- Magnetische Topologien und Rekonnexionsprozesse
- Magnetische Prozesse in der Sonnenatmosphäre
- Sonnenwind und solare Eruptionen
- Zum Aufbau und zur Entwicklung von Kometen
- Magnetische Stürme und Polarlichter
- Zum Einfluss magnetischer Prozesse auf die Entstehung von Sonnensystemen

Für ein tieferes Verständnis physikalischer Prozesse, der Einführung neuer Begriffe, zugrundeliegender Gesetze und Zusammenhänge sowie übergeordneter Konzepte spielt die Aufarbeitung historischer Entwicklungen im Rahmen des Erkenntnisgewinnungsprozesses eine wichtige Rolle. Für die folgenden Themenbereiche stehen dem Schüler kurze Texte mit Daten zur geschichtlichen Entwicklung zur Verfügung.

- Zur Geschichte des Magnetismus
- Zur Entwicklung des magnetischen Feldlinienmodells
- Zur Geschichte der Lorentzkraft, des Induktionsgesetzes, der Maxwell'schen Gleichungen
- Zur Entwicklung des Generatorprinzips

- Gesamtbild eines magnetisch beeinflussten Entwicklungsszenario für die Entstehung unseres Sonnensystems

Das Universum stellt ein kosmisches Labor zum Studium wesentlicher Prozesse im Rahmen der Plasmaphysik dar. Mit Hilfe von hochauflösenden Teleskopen aus der Ferne beziehungsweise mit Satelliten vor Ort beobachten die Wissenschaftler die Vorgänge in der näheren Umgebung unseres Plasma-Universums und sammeln Daten über die zu messenden relevanten physikalischen Messgrößen. Die Forscher versuchen heute sogar, ihre aus dem fernen Universum gewonnenen Erkenntnisse einzusetzen, um im Labor auf der Erde die im Universum im Zusammenhang mit Magnetfeldern ablaufenden Prozesse wie im Fall des Karlsruher Dynamo-Experiments aus Erkenntnisgründen oder wie im Bereich der Kernfusionsforschung sogar zum „direkten“ Wohl der Menschheit nachzubilden. Die folgenden Videomaterialien informieren über aktuelle Forschungsprojekte, die das Lernen über Kosmische Magnetfelder ermöglichen oder die Kenntnisse darüber erfolgreich anwenden.

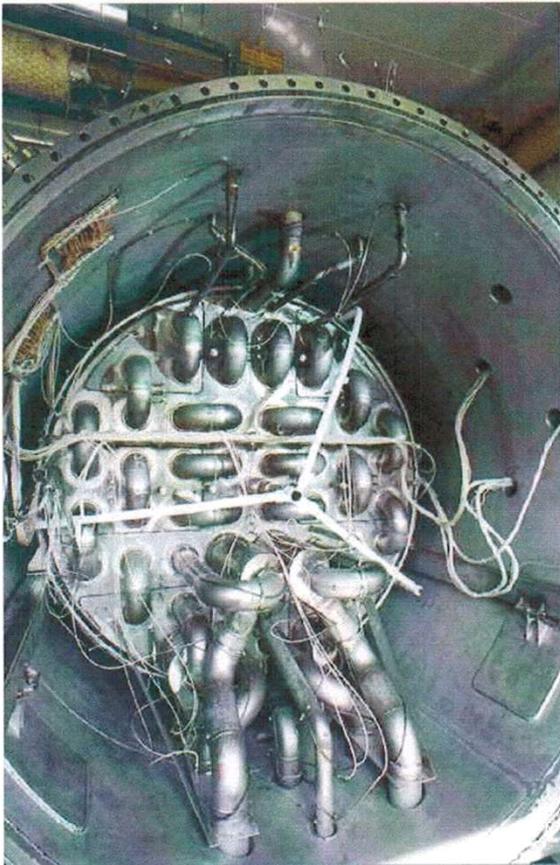


Abb. 33 Einblicke ins Karlsruher Dynamo-Experiment

- Ein Interaktives Bildschirmexperiment über die Messung solarer Magnetfelder im Potsdamer Einsteinurm
- Bilder von aktuellen Forschungsarbeiten mit den neuen Sonnentelaskopen auf den Kanarischen Inseln

- Informationen zu den aktuellen Ergebnissen der Satellitenprojekte CHAMP und CLUSTER zur Erforschung der Erdmagnetosphäre
- Bilder einer Messkampagne des Karlsruher Dynamoexperiments
- Eindrücke vom Besuch des Kernfusionsforschungszentrums in Greifswald

Neben der Bearbeitung der passend zu den oben aufgelisteten Power Point Präsentationen bereitgestellten Arbeitblätter stellt die eigenständige Suche nach geeigneten Informationen im Internet sowie deren Verarbeitung auch im Zusammenhang mit einer zu erstellenden Kursarbeit im Rahmen dieser Unterrichtsreihe eine wesentliche Aufgabe für die Schüler dar. Um der bei einem unkontrollierten Umgang mit Suchmaschinen zu befürchtenden Gefahr einer Informationsflut und der Verwertung ungeeigneten Materials zu begegnen, sollen dem Schüler zu den folgenden Themenbereichen, mit einleitenden Erläuterungen versehen, jeweils Listen mit lohnendwerten Internetadressen zur Verfügung gestellt werden.

- Lorentzkraft und Induktionsgesetz
- Gyration- und Driftbewegungen geladener Teilchen im Magnetfeld
- Vom Einzelteilchenmodell zur Plasmamaterie
- Ein für Plasmamaterie erweitertes Feldlinienmodell
- Magnetischer Druck und magnetische Spannungen
- Differentielle Rotation, Konvektionsströmungen und Corioliskräfte
- Solare  $\alpha$   $\omega$ -Dynamos
- Ein Dynamomodell für die Erde
- Magnetische Topologien und Rekonnexionsprozesse
- Magnetische Prozesse in der Sonnenatmosphäre
- Sonnenwind und solare Eruptionen
- Zum Aufbau und zur Entwicklung von Kometen
- Magnetische Stürme und Polarlichter
- Zum Einfluss magnetischer Prozesse auf die Entstehung von Sonnensystemen

Für ein tieferes Verständnis physikalischer Prozesse, der Einführung neuer Begriffe, zugrundeliegender Gesetze und Zusammenhänge sowie übergeordneter Konzepte spielt die Aufarbeitung historischer Entwicklungen im Rahmen des Erkenntnisgewinnungsprozesses eine wichtige Rolle. Für die folgenden Themenbereiche stehen dem Schüler kurze Texte mit Daten zur geschichtlichen Entwicklung zur Verfügung.

- Zur Geschichte des Magnetismus
- Zur Entwicklung des magnetischen Feldlinienmodells
- Zur Geschichte der Lorentzkraft, des Induktionsgesetzes, der Maxwell'schen Gleichungen
- Zur Entwicklung des Generatorprinzips

durchaus angemessen, soll sie den Kursteilnehmer doch durch Aktivierung von Vorkenntnissen ohne großen Leistungsdruck nur den ersten Einstieg in einen recht komplexen Problembereich erleichtern, dem Kursleiter nur einen groben Überblick über den Umfang und die Streuung der in der Lerngruppe vorhandenen Vorkenntnisse geben. Die Beschäftigung mit den historischen Aspekten zu den jeweiligen physikalischen Inhalten erscheint mir zu Beginn der Unterrichtseinheit wesentlich und motivierend, ermöglicht doch erst dieser genetischer Zugang ein tieferes Verständnis und die Würdigung der Entwicklungsgeschichte einer Theorie.

Nach einer intensiven Auseinandersetzung über die unterschiedlichen Aspekte des Einflusses von Magnetfeldern auf physikalisch relevante Prozesse im Universum kann ein Nachtest nicht nur die Verfestigung der erworbenen inhaltlichen und methodischen Erkenntnisse fördern, sondern zusätzlich auch, durch deren Transfer im Zusammenhang mit der Lösung komplexerer Probleme, weitere Erfolgserlebnisse für den Lernenden ermöglichen.

Lehrern Ideen, Anregungen und Unterrichtsmaterialien zur Verfügung zu stellen

### 9. Abschließende Anmerkungen zu Organisationsfragen

Die Unterrichtsreihe soll in insgesamt drei Physik Leistungskursen an Schule im Raum Brandenburg/Berlin erprobt werden. Eingangsvoraussetzung ist die bereits erfolgte Behandlung der Themenbereiche magnetisches Feldlinienmodell, Lorentzkraft, Induktionsgesetz, Generatorprinzip im Rahmen eines Kurses über Elektrodynamik oder Felder und, wenn möglich, auch eine Behandlung von Rotationsbewegungen in einem Mechanik Kurs. Um Probleme für Schüler und Lehrer durch zeitliche Überschneidungen mit Abitur-relevanten Kursblöcken zu vermeiden, um andererseits die Erprobung der Unterrichtseinheit zeitlich nicht zu weit hinauszuschieben, sollte der Unterricht für einen Kurs 13/1 im Herbst 2002, für Kurse 12/2 im Frühjahr 2002 durchgeführt werden.

Die eigentliche Unterrichtreihe umfasst einschließlich der Own Word Mappings 15 Unterrichtsstunden. Vor Beginn sollte der Fachlehrer den einstündigen Eingangstest in einer seiner Unterrichtsstunden durchführen lassen. Er sollte die Schüler rechtzeitig befragen, ob sie einen Internet-Zugang haben, die-

sen ihnen gegebenenfalls auch an der Schule ermöglichen. Für den Unterricht selbst sollte stets ein Computer oder die Möglichkeit einer Videoprojektion zur Verfügung stehen. Am Ende der Unterrichtsreihe findet der Institutsbesuch an einem ganzen Tag oder an zwei Nachmittagen statt. Die Abgabe der Kursarbeit soll etwa 2 Wochen nach dem Ende der Unterrichtseinheit erfolgen. Sie wird zunächst von dem Autor des Curriculums zu pädagogisch-didaktischen Fragestellungen durchgesehen. Der Fachlehrer erhält die Kursarbeit zur Korrektur erst weitere zwei Wochen später mit einer groben Bewertungseinschätzung durch den Autor.

Gerne steht den Lehrern stets auch der Autor dieser Unterrichtsreihe zur Unterstützung der Erprobungsarbeit zur Verfügung, als fachwissenschaftlicher Betreuer, für Gespräche über pädagogische und unterrichtstechnische Fragestellungen und wenn gewünscht, auch als Kollege und ehemaliger Lehrer, der Teile der Unterrichtsreihe selbst erprobt. Es ist durchaus erwünscht, dass die Lehrer auch eigene kreative Vorstellungen in den Unterrichtsablauf verwirklichen. Auf der Tagung Frühjahrstagung 2002 der Deutsch Physikalischen Gesellschaft (DPG) in Leipzig wurde in einem einleitenden Referat eine These über eine notwendige Voraussetzung eines erfolgreichen Lehr- und Lernprozesses vertreten, unter deren Motto auch die Erprobung dieser Unterrichtseinheit stehen sollte: „Lehrer müssen brennen, damit sie Schüler entzünden können“. Welcher engagierte Lehrer möchte die sicher auch erforderliche Mehrarbeit auf sich nehmen und in diesem Sinne mit einem seiner Kurse an der Unterrichtserprobung zum Thema „Lernen über Kosmische Magnetfelder“ teilnehmen?