

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 Kometenschweifeln 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.

1. Hintergründe und Motivationen

Die Astronomie gehörte in vielen Kulturen zu einem der ältesten Wissenschaftsgebiete. Sie hat sich in den vergangenen 50 Jahren von einem Art „Orchideenfach“ zu einem Mitglied der „Big Science“ entwickelt, ist auf Grund der fächerübergreifenden Integration so vieler Teildisziplinen zu einem anerkannten Forschungsbereich der modernen Physik geworden. Früher vielleicht eher als exotisches Spezialgebiet ohne große gesamtgesellschaftliche Bedeutung verkannt, liefert die Astrophysik heute mit besonders hohem technischen Aufwand, durch den Einsatz hochentwickelter Bildbearbeitungs- und Modellierungs-Techniken mit Hilfe besonders leistungsfähiger Computer viele wertvolle, auch Fachgebiet übergreifende wissenschaftliche Erkenntnisse.

Der Blick hinauf zum sternensäten Nachthimmel ist sicher für viele Menschen zum astronomischen Urerlebnis geworden. Der Wunsch danach, die Welt des Außerirdischen zu ergründen, Klarheit über die eigene Existenz zu gewinnen, hat schon immer eine große Faszination für die Auseinandersetzung mit astronomischen Themen, seit einigen Jahrzehnten auch für die Möglichkeit der Weltraumfahrt ausgelöst. Diese Faszination ist natürlich auch zur Wurzel und Triebkraft der wissenschaftlichen Himmelerforschung geworden. Auch Wis-

senschaftler sind begeistert, wenn sie ihre mit modernen bodengestützten oder Satelliten-Teleskopen gewonnenen farbenprächtigen Bilder oder ihre manchmal überraschenden, aus aktuellen Forschungsergebnissen logisch abgeleiteten Schlussfolgerungen betrachten. In mancherlei Hinsicht ist

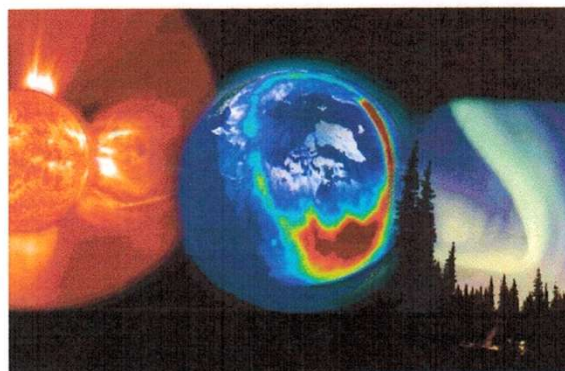


Abb. 1 Veranschaulichung solar-terrestrischer Beziehungen

der Weltraum sogar zum physikalischen Labor geworden. So konnten beispielsweise grundlegende Erkenntnisse der modernen Plasmaphysik, die ihre Anwendung heute unter anderem in der Kernfusionsforschung finden, nur durch die Untersuchung der in der Sonnenatmosphäre und in der Erdmagnetosphäre ablaufenden Plasma-Prozesse gewonnen werden.

Die Erkenntnisse der modernen Physik sind für die Entwicklung unserer technisch hochentwickelten Welt von großer, sogar existentieller Bedeutung. Nicht nur die Aufrechterhaltung eines individuellen komfortablen Lebensstils, sondern vor allem auch die weltweit dramatisch zunehmenden Umweltprobleme erfordern die verantwortungsvolle Verwertung neuer Forschungsergebnisse. Die Wertschätzung für das Fach Physik ist in der Bevölkerung von daher auch relativ hoch, allein die konkrete Bereitschaft für die Auseinandersetzung mit physikalischen Themen ist in der schulischen Ausbildung gering. Dafür gibt es eine Reihe triftiger Gründe. Fehlende Praxisnähe, eine realitätsferne, wenig motivierende Behandlung möglicherweise „verstaubter“ Unterrichtsthemen ohne Eigeninitiative der zu Unterrichtenden sind sicherlich keine guten Voraussetzung zur Entwicklung eines Wunsches, die Welt um uns herum auch aus physikalischer Sicht tiefer zu begreifen. Vielleicht sind heute manche der Unterrichtenden selbst im Zusammenhang mit dem Unterricht zu wenig an ihrer eigenen Entwicklung, an neuen motivierenden curricularen Zielsetzungen interessiert. Wahrscheinlich sind manche der Schüler zu wenig motiviert, vielleicht aber auch zu bequem, um sich den anspruchsvolleren Anforderungen eines auch durch Einsatz mathematischer Methoden deutlich strukturierten Unterrichts erfolgreich zu stellen.

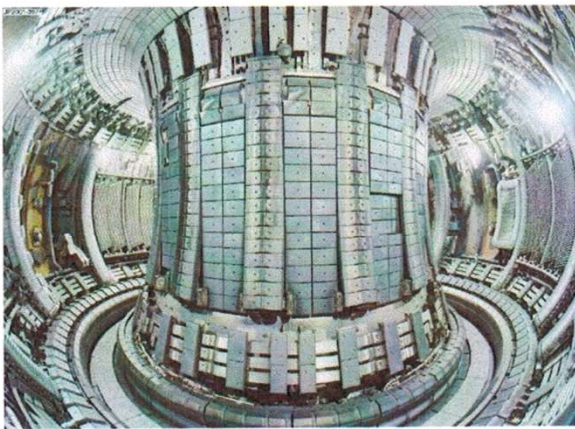


Abb. 2 Blick ins Innere eines Fusionsreaktors

Die in Handreichungen und Rahmenplänen aufgeführten Ziele eines modernen und erfolgreichen Physikunterrichtes sind vielfältig und anspruchsvoll. Primäres Bildungsziel ist es danach, die Lernenden zu befähigen, ihre natürliche und technische Umwelt aus einer naturwissenschaftlichen Perspektive zu erschließen. Sie sollen sich mit den Zielen, Methoden und Ergebnissen der historischen und aktuellen physikalischen Forschung auseinandersetzen, aus Ergebnissen von Experimenten und theoretischen Überlegungen auf Naturgesetze schließen, komplexe Zusammenhänge aus ihrer Erfahrungswelt mit Hilfe von geeigneten Modellvorstellungen analysieren und in die Wirklichkeit ihres Lebensraumes verantwortungsvoll integrieren können. Die Rahmenrichtlinien nicht durch des Physikunterrichtes weisen dabei immer wieder auf die

große Bedeutung der durch Verwirklichung schülergerechterer Lernformen, durch größere Handlungsorientiertheit und Selbstständigkeit zu sichernden zufriedenstellenden Motivationslage für die Lernenden hin, auf die Notwendigkeit der Aktualität und Wirklichkeitsnähe der curricularen Inhalte, auf die Bedeutung fachübergreifender Aspekte sowie auf die großen didaktischen Potentiale multimedial gestalteter Unterrichtseinheiten hin. Ein mit Ergebnissen der modernen Physik „gefülltes“ astronomisches Curriculum bietet die Chance der Verwirklichung nicht nur dieser abstrakten programmatischen Ziele, sondern könnte konkret wieder wirkliches Interesse und vielleicht auch sogar Freude sowohl für die Lernenden als auch für Lehrenden in den Unterricht zurückbringen.



Abb. 3 Blick auf die Internationale Raumstation

Auch in Deutschland haben Wissenschaftler und Pädagogen längst erkannt, welche Schlüsselrolle Themenbereiche wie Astronomie und Raumfahrt aufgrund ihres motivierenden und interdisziplinären Charakters sowie ihrer gesellschaftlichen Bedeutung vor allem auch für den Unterricht spielen können. Physikalische, geowissenschaftliche, chemische, biologische und technische Aspekte, informations- und kommunikations-technologische Anwendungen sowie philosophische und wissenschaftshistorische Fragestellungen sind in diesem Bereich der Naturwissenschaften eng miteinander verwoben. Der Fachverband Didaktik der Physik der Deutsch Physikalischen Gesellschaft (DPG) beschäftigt sich in einer seiner Fachgruppen ausschließlich mit Themen zur Astronomie, „Astronomie und Raumfahrt - im Unterricht“ ist der Name einer auch unter Didaktikern anerkannten pädagogischen Zeitschrift, die historische und aktuelle astronomische Themen didaktisch aufbereitet. „Hands-On Universe“ vertritt auch im Internet ein pädagogische Programm, das Schülern vermitteln möchte, wie man die spannenden Vorgänge im Universum durch Anwendung naturwissenschaftlicher, mathematischer und technologischer Konzepte besser verstehen lernt. Gerade wurde von der Technischen Universität Berlin ein Förderantrag NaT-Working zum Thema „Astronomie und Raumfahrt in Berlin und Brandenburg“ an die Robert Bosch Stiftung verschickt, indem die finanzielle

Unterstützung eines aus mehreren Teilprojekten bestehenden, pädagogisch ausgerichteten Projektes beantragt wurde, das die Förderung einer engeren Zusammenarbeit zwischen Schule und Wissenschaft zur weiteren Popularisierung sowie fachlichen und unterrichtsgerechten Aufbereitung astronomischer und im Zusammenhang mit der Raumfahrt stehender Themenbereiche zum Ziel hat.



Abb. 4 Blick ins ferne Universum

Sicherlich sind viele Menschen besonders fasziniert, wenn sie vom Urknall, von Schwarzen Löchern und Supernova-Explosionen im fernen Universum hören. In diesem Beitrag soll aber stattdessen ein Curriculum vorgestellt werden, das sich allein mit unserem, aus Sicht des riesigen Universums, eher engeren Lebensraums beschäftigt. In unserem eigenen Sonnensystem gibt es genügend beeindruckende Phänomene, deren spezielle Untersuchung uns aber dann auch viele Prozesse im fernen Universum viel besser verstehen lässt. Da gibt es viele Fragen, deren Beantwortung uns tiefe Einblicke in alle für das gesamte Universum wesentlichen physikalischen Prozesse vermittelt: Wie ist unser Sonnensystem, bestehend aus einem Zentralstern, seinen Planeten, den Monden, Kometen und anderen Kleinstobjekten eigentlich entstanden? Wie kommt es immer wieder zu den heftigen Eruptionen auf der für uns doch so „harmlos“ aussehenden Sonne, von denen uns die modernen Sonnentelkope in letzter Zeit immer höher aufgelöste „tolle“ Bilder liefern? Woraus bestehen eigentlich die uns so beeindruckenden Kometen? Wie genau entwickelt sich deren feinstrukturierter Schweif beim Umlauf um die Sonne? In den letzten Jahren hat es auch in unseren geographischen Breiten farbenprächtige Polarlichter gegeben. Wie genau entstehen diese Leuchterscheinungen eigentlich und warum in der Regel nur in den Polargebieten? Hängt unser Klima eigentlich von den Vorgängen auf der Sonne, unserer das Leben erst ermöglichenden Energiequelle ab? Wenn wir einmal in Zukunft mit benannten Raumfahrzeugen zum Mars, vielleicht sogar zum Jupiter-Mond Europa fliegen wollen, kann uns da außerhalb unserer Atmosphäre die Sonnenstrahlung eigentlich gefährlich werden?

Warum sind eigentlich in letzter Zeit immer wieder teure Satelliten in der Erdumlaufbahn zerstört worden? Werden es die Wissenschaftler irgendwann einmal schaffen, einen „von der Sonne abguckten“ Fusionsofen zu bauen, der unsere Energie- und Umweltprobleme lösen wird?

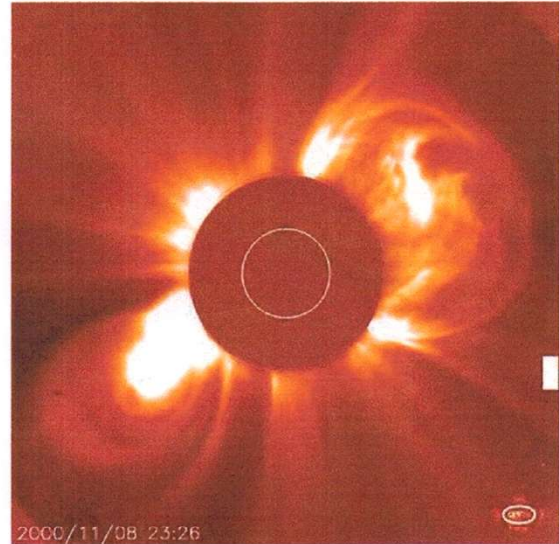


Abb. 5 Blick ins unsere „nähere“ Umgebung

Hätten Sie gedacht, dass kosmische Magnetfelder bei der Beantwortung all dieser Fragen die entscheidende Schlüsselrolle spielen? Magnetische Prozesse haben den Menschen schon immer fasziniert. Auch heute noch stellt der Magnetismus für manchen von uns eine besonders geheimnisvolle Kraft dar. Wir können den Magnetismus ja nicht sehen, hören oder fühlen, er hat kein Gewicht. Unsere Sinne nehmen ihn direkt nicht wahr. Allein die durch den Magnetismus vermittelte Kraftwirkung und deren Auswirkungen ist für uns beobachtbar. Gleichzeitig haben wir Menschen den Nutzen der Wirkung dieser Naturkraft aber schon so selbstverständlich und erfolgreich in unserer gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Leben integriert, dass wir auf diesen Nutzen sicher nicht verzichten möchten. Die heutige und zukünftige Energieerzeugung als Basis unserer komplexen Konsumgesellschaft, der Maschinenbetrieb in Industrie und privaten Haushalten, das Transportwesen in Freizeit und Beruf, die Wissenschaft und Weltraumfahrt, die moderne Computertechnologie und Telekommunikation, das Gesundheitswesen und die Freizeitgestaltung sind ohne die Vermittlung elektromagnetischer Prozesse nicht mehr möglich. Nicht vielen Menschen aber sind sie die Tatsache bewusst, dass magnetischer Kräfte überall im Kosmos eine überragende Rolle spielen.

Unser Sonnensystem wäre ohne die Wirkung magnetischer Kräfte gar nicht erst entstanden. In den Protostern-Scheiben-Jet Strukturen junger sonnenähnlicher Sterne sind diese Magnetfeldstrukturen nämlich für den erforderlichen Drehimpulsabtransport unerlässlich. Ohne sie würde die Materie in den Akkretionsscheiben gar nicht erst in Richtung auf das kompakten Zentralobjekt zuströmen,

sich hier verdichten und Planetenembryos ausbilden können. Ohne magnetische Bremsung durch Kopplung magnetischer Feldstrukturen an die im äußeren Bereich langsamer rotierenden Scheibe würde ein Protostern bei ständiger Drehimpulszufuhr von außen sehr wahrscheinlich zerreißen, bevor in ihm ein Kernfusionsprozess zur effektiven Energieerzeugung einsetzen könnte. Fast alle wichtigen physikalischen Prozesse in den äußeren Schichten und in der Atmosphäre sonnenähnlicher Sterne laufen im Rhythmus eines magnetisch gesteuerten Aktivitätszyklusses ab. Im Innern dieser Himmelskörper werden in einem Dynamoprozess starke Magnetfelder erzeugt. Ein durch die Wirkung magnetischen Drucks vermittelter Auftrieb lässt sie, in Flussröhrenform konzentriert, „schlangengleich“ die Sternoberfläche durchqueren.

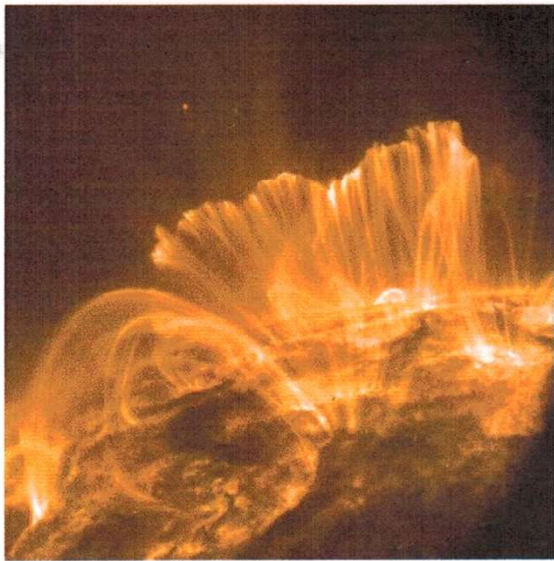


Abb. 6 Magnetische Arkaden auf der Sonnenoberfläche

Die Wechselwirkung dieser Magnetfeldstrukturen mit der turbulenten und in großskaligeren Konvektionsströmungs-Mustern aufsteigenden heißen Plasmamaterie bewirkt die Ausbildung brodelnder Granulationszellen, dunkler Sonnenflecken und heller Fackelgebiete als die an der Sonnenoberfläche im Weisslicht zu beobachtenden charakteristischen Phänomene. Sogenannte Protuberanzen, riesige, über längere Zeiträume in magnetischen „Hängematten“ eingelagerte Plasmawolken, blitzartig, unter Freisetzung gewaltiger Mengen an gespeicherter magnetischer Energie auftretende sogenannte Flares sowie die durch magnetische Instabilitäten ausgelöste solare Eruptionen und Auswürfe magnetischer Plasmawolken bestimmen das dynamische Bild der äußeren Sonnenatmosphäre.

Aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit der fast überall in unserem „Plasma-Universum“ anzutreffenden ionisierten Materie verhalten sich die magnetischen Feldstrukturen üblicherweise wie in die Plasmamaterie „eingefroren“. In Bereichen relativ hohen Plasmadrucks folgen sie den komplexen Plasmaströmungen und werden dabei selbst verwirbelt und verschert. Dort, wo dagegen der

magnetische Druck dominiert, erzwingen sie den Strömungsweg des Plasmas. Ein Magnetfeld kann also weder aus einem ideal leitenden Plasma verschwinden, noch kann in einem feldfreien Plasma ein neues Magnetfeld entstehen oder von außen eindringen. Sowohl der im Universum wirkende Dynamoprozess zur Erzeugung kosmischer Magnetfelder als auch der überall im Universum anzutreffende dynamische Prozess der Freisetzung gewaltiger Mengen gespeicherter magnetischer Energien lassen sich allerdings in diesem „Bild der eingefrorenen magnetischen Feldlinien“ allein erklären. Dort wo, lokal begrenzt, Instabilitäten die elektrische Leitfähigkeit herabsetzen, durch die Verwirbelung von Feldlinien starke Magnetfeldgradienten entstehen, sich entgegengesetzt orientierte, in Plasma eingelagerte Felder gegenüber stehen, kann und muss sich die Topologie der Magnetfeldstrukturen, das heisst, das Erscheinungsbild der Verdrillungen, Verschlingungen und Verknötungen der magnetischen Feldlinien beziehungsweise Flussröhren ändern können. Dieser als „magnetische Rekonnexion“ bezeichnete Prozess läßt in einem für die Anwendung im Bereich der Plasmaphysik erweiterten magnetischen Feldlinienbild die Möglichkeit des Zerschneidens und sofortigen Neuverbindens magnetischer Feldlinien zu. Nur so wird die für den kosmischen Dynamoprozess erforderliche Verstärkung und periodische Veränderung eines vorhandenen Magnetfeldflusses durch die Zufuhr von Bewegungsenergie möglich. Nur so lässt sich die Freisetzung der in verknöteten Feldlinien gespeicherten magnetischen Energie erklären, wenn sich in diesem Bild die neu verbundenen Feldlinien wie Gummibänder entspannen können. Wenn sich die magnetische Topologie durch Neuverbindung der Feldlinien ändert, können geladene Teilchen durch erzeugte elektrische Felder beschleunigt werden, heizt sich die eingelagerte Plasmamaterie auf, werden bipolare, impulsive, jetartige Plasmaströme durch die Wirkung magnetischer Spannungen ausgelöst.



Abb. 7 Magnetische Feinstrukturen im Kometenschweif

Die Dynamik des aus der Sonnenatmosphäre strömenden Sonnenwindes wird wesentlich durch magnetische Prozesse bestimmt. Dieses aus geladenen Teilchen und magnetischen Feldstrukturen

zusammengesetzte magnetisierte Plasma ist es, das beispielsweise den Kopf und die eindrucksvollen Schweife der Kometen formt. Das Bild der eingefrorenen Feldlinien erklärt die feinstrukturierte, filamentartige Struktur dieser Kometenschweife, Rekonnexionsprozesse sind es, die deren häufiger zu beobachtende Abrisse verursachen. Der Sonnenwind und verstärkt auch solare Eruptionen prägen mit ihren gewaltigen koronalen Masseauswürfe das sogenannte Weltraumwetter. Gemeint sind damit vorrangig vor allem die Auswirkungen der magnetisierten solaren Teilchenströme auf die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in der Magnetosphäre, Ionosphäre und Atmosphäre unserer Erde. Magnetische Induktionsprozesse treiben hier elektrische Stromsysteme, Rekonnexionsprozesse verursachen die als magnetische Stürme bezeichneten abrupten Veränderungen des Erdmagnetfeldes, sowie die Polarlichterscheinungen. Neueste Erkenntnisse der Klima- und Sonnen-



Abb. 8 Polarlichtbeobachtung aus dem Weltall

forschung gehen heute davon aus, dass der magnetisierte Sonnenwind sogar deutlichen Einfluss auf das Klima der Erde nimmt. Er formt die Magnetfeldkäfige mehrerer Planeten unseres Sonnensystems in charakteristischer Weise. Die in Dynamo-
prozessen erzeugten, häufig vorrangig dipolartigen Feldstrukturen werden dabei auf der der Sonne zugewandten Seite durch die Einwirkung des magnetisierten Plasma-Drucks zusammengepreßt, auf der sonnenabgewandten Seite zu einem viele Planetenradien langen Schweif auseinander gezogen. Zusammen mit der Atmosphäre unseres Planeten hat dieser Schutzkäfig die Entwicklung von Leben auf der Erde ermöglicht und gesichert. Er schützt uns vor der hochenergetischen kosmischen Strahlung aus dem fernen Universum, vor der magnetisierten Teilchenstrahlung unseres Heimatsterns. Seit einigen Jahrhunderten nimmt zumindest die Stärke des Dipolanteils des Erdmagnetfeldes kontinuierlich ab, verändert sich die Lage der magnetischen Pole wie schon gewohnt ständig. Welche Auswirkungen hätte aber eine schon sehr häufig in der Erdgeschichte aufgetretene totale Umpolung des Erdmagnetfeldes mit einhergehender starker Abschwächung der magnetischen Feldstärke für das Leben auf der Erde? Für Albert Einstein gehörte die Beantwortung der spannenden Frage nach den Ursachen solcher chaotischen Umpolungen

übrigens zu den wichtigsten ungelösten Problemen der naturwissenschaftlichen Forschung seiner Zeit.



Abb. 9 Polarlichtbeobachtung von der Erde aus

Solare Teilchenströme zerstören hochempfindliche technische Instrumente an Bord von Satelliten, sie können das Leben von Astronauten gefährden. Wie können sich eigentlich die Weltraumreisenden schützen, die sich auf den langen Weg zum Mars oder zu entfernteren Planeten begeben wollen? Ist so eine Reise wirklich nötig? Suchen wir eigentlich neue Orte im Universum, weil wir auf unserem Planeten auf Grund der Überbevölkerung nicht mehr genügend Platz zum Leben finden, wir viele lebensnotwendige Rohstoffe aufgebraucht oder vergeudet haben? Haben wir Angst, dass unsere Energieversorgung demnächst zusammenbricht? Eigentlich könnten wir doch glücklich sein, dass uns unsere Sonne noch etwa eine Milliarde Jahre mit genügend Energie versorgt, ohne uns gleichzeitig durch eine allmählich zunehmende Teilchenstrahlung zu sehr zu gefährden. Müssen wir uns heute wirklich Gedanken darüber machen, wie wir unseren Planeten einmal verlassen, oder sollten wir nicht lieber alle unsere Kräfte dafür einsetzen, akzeptable Lebensbedingungen für alle Menschen zu schaffen und zu erhalten? Die Sonne macht uns vor, wie man Energie erzeugen kann. Und so versuchen Wissenschaftler heute auch, den solaren Prozess der Kernfusion zur friedlichen Nutzung der Kernenergie in einem Fusionsreaktor nachzubauen. Wie aber soll man ein heißes Plasma bei den für die Zündung des Fusionsprozesses in einem Reaktor erforderlichen Temperaturen von 100 Millionen Grad eigentlich einschließen? Natürlich mit Hilfe von Magnetfeldern.

Magnetische Kräfte sind es nicht nur, die etwa 15 Milliarden Jahre nach dem Urknall im Universum als besonders „radikales Element“ für viele der so faszinierenden Phänomene, beispielsweise im Zusammenhang mit den frühen Galaxien des jungen Universums, mit exotischen relativistischen Schwarzen Löchern, hochenergetischen Supernova-Explosionen oder einfach farbenprächtig strukturierter Planetarischer Nebeln, verantwortlich sind. Sie schaffen, vermutlich an vielen Stellen im Uni-

versum, nicht nur Bedingungen für die Entwicklung von Leben. Die durch sie vermittelten Prozesse können dieses Leben gleichzeitig bedrohen, es aber auch schützen. Kein Wunder also, dass im Zeitalter des Handys ein neuer Forschungsbereich wie der der Magnetobiologie so an Bedeutung gewinnt, manche Menschen ihre gesundheitlichen Hoffnungen sogar in Magnetfeldtherapien legen. Mit Hilfe magnetischer Prozesse können wir darüber hinaus offensichtlich aber auch eigenständig manche Probleme für unser Leben auf dem Planeten Erde lösen. Man denke aus aktuellem Anlass neben der möglichen Bedeutung der Kernfusion für die zukünftige Energieversorgung beispielsweise auch an den Segen der durch magnetische Kräfte möglich gemachten Kernspintomographie für das Gesundheitswesen oder an die potentielle Rolle der magnetischen Schwebebahn als umweltfreundliches Verkehrsmittel der Zukunft. Elektromagnetische Kräfte stellen die, neben den uns hinsichtlich ihrer Auswirkungen noch sehr viel vertrauter erscheinenden Graviationskräften, wesentlichsten und von daher wichtigsten physikalischen Einflussfaktoren zur Gestaltung unseres Alltagsleben dar.



Abb. 10 Ein „fiktiver“ Blick auf unser Sonnensystem

Dies alles sind Gründe genug, mehr über die Wirkungsweise der uns manchmal noch mysteriös erscheinenden magnetischen Kräfte zu erfahren. Und dies im Rahmen der Plasmaphysik, einem Bereich der aktuellen physikalischen Forschung, die die Eigenschaften des Zustandes der Materie untersucht, der in unserem Universum der mit Abstand weit verbreitetste ist. Bedenkt man, dass sich im Weltall vermutlich etwa 99% der Materie im geladenen, global gesehen aber quasi-neutralen Plasmazustand befindet, unsere Erde somit nur eine „neutrale Insel“ darstellt, so erscheint die Bezeichnung unserer Welt als „Plasma-Universum“ mehr als angemessen, die Erforschung und Kenntnis ihrer besonderen Eigenschaften sicherlich auch wünschenswert. In einem solchen Universum ist die Nichtexistenz von Magnetfeldern unmöglich, der unmagnetische Zustand von daher instabil. Jede zufällige lokale Ladungshäufung würde nämlich ein Potentialgefälle aufbauen. Im hierdurch erzeugten elektrischen Feld könnte ein elektrischer Strom fließen, der schließlich ein Magnetfeld er-

zeugt, das über große Entfernungen wiederum eine Wechselwirkung mit den Ladungsträgern des strömenden Plasmas aufnimmt. Kenntnisse über Lorentzkräfte, magnetische Induktionsprozesse sowie Eigenschaften von Feldlinienmodellen stellen wichtige Voraussetzungen zum Verständnis relevanter nichtlinearer Rückkopplungsprozesse im Bereich der Plasmaphysik dar.

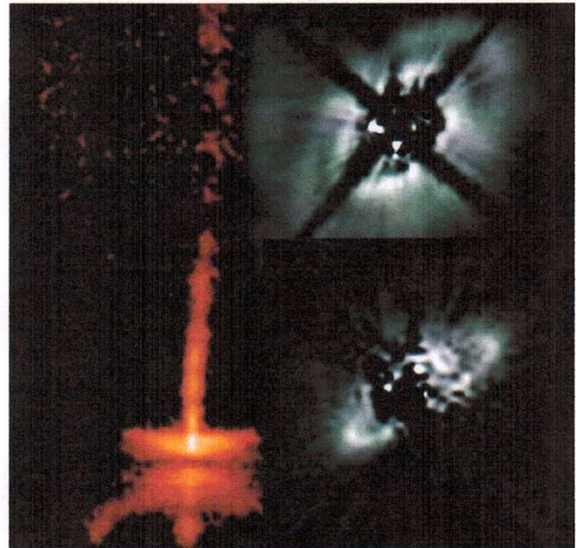


Abb. 11 Jets und protoplanetare Scheiben um junge Sterne

Die Beobachtung und Auswertung der Ergebnisse von Experimenten sowie theoretische Überlegungen mit Hilfe induktiver und deduktiver Schlussweisen stellen neben der Anforderung kreativer Intuition an den Forscher die Grundpfeiler im klassischen Prozess der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung dar. Im Bereich der Astronomie und modernen Astrophysik entfällt oft ein geeignetes Laborexperiment zur Überprüfung einer Hypothese. Die räumlichen und zeitlichen Dimensionen im Universum, die Messgrößen wichtiger kosmischer Parameter wie etwa der Dichte, der elektrischen Leitfähigkeit oder der magnetischen Flussdichte überspannen oft einen viel zu großen, im Labor nicht zu realisierenden Skalenbereich. Mit Hilfe von Teleskopen, Messapparaturen und modernen Bildverarbeitungsmethoden werden stattdessen kosmische Himmelsobjekte im teilweise besonders fernen Universum beobachtet, Daten ihrer Eigenschaften gesammelt und durch Bildfehlerkorrektur für die spätere Analyse aufbereitet. Nur selten wie im Fall der „nahen“ Erdmagnetosphäre können dabei direkt vor Ort „in situ“-Messungen mit Hilfe von Messapparaturen an Bord von Satelliten durchgeführt werden oder dringen kosmische Teilchen durch die Erdatmosphäre zur Auswertung direkt in die „klassischen“ Labors der Wissenschaftler auf der Erde vor. Zur Sichtung und Auswertung der großen Fülle von Daten stehen dem modernen Astronomen heute leistungsfähige Computer zur Verfügung. Hochentwickelte Bildbearbeitungstechniken ermöglichen eine besonders plastische, anschauliche Darstellung der erhaltenen Beobachtungsergebnisse. Zur Analyse und Inter-

pretation der Daten werden analytische Rechnungen oder numerische Modellierungen durchgeführt. Zur Bewertung der aus dem Vergleich der Daten mit den Ergebnissen der Modellrechnungen erstellten Hypothesen können abgeleitete Schlußfolgerungen dann anhand neuer Beobachtungsdaten aus dem Weltall überprüft werden. Aufgrund großer Komplexität, der Bedeutung so vieler unterschiedlicher physikalischer Einflussfaktoren auf die Lösung der in der Regel nichtlinearen Probleme, hat sich gerade auch für den Bereich der modernen Astrophysik in den letzten Jahrzehnten aber ein neuer, dritter Grundpfeiler der physikalischen Erkenntnisgewinnung erfolgreich etabliert. Numerisches Experimentieren mit Hilfe von Simulationsrechnungen ermöglicht es dem Forscher heute, die für ein Problem wichtigen physikalischen Einflussfaktoren eines komplexen Prozesses durch ein „Experimentieren“ mit unterschiedlichen Modellansätzen auf dem Computer zu eliminieren. Die oft unter großem Rechenaufwand auf besonders leistungsfähigen Computern gewonnene Ergebnisse der Simulationsrechnungen werden dann auf kleinen Filmen „abgelichtet“. Die „berechnete“ zeitliche Entwicklung dargestellter astronomischer Prozesse kann so mit den oft in großer Fülle vorhandenen realen Daten verglichen werden. Eine veränderte Berücksichtigung physikalischer Einflussfaktoren beziehungsweise eine Variation der in den Computer eingegebenen Parameterdaten ermöglicht schließlich eine Annäherung der berechneten an die beobachteten Daten und damit ein begründetes Erschließen der dem betrachteten astrophysikalischen Problem zugrundeliegenden, wesentlichen physikalischen Prozess, eine mögliche Erklärung, ein tieferes Verstehen des Problems.

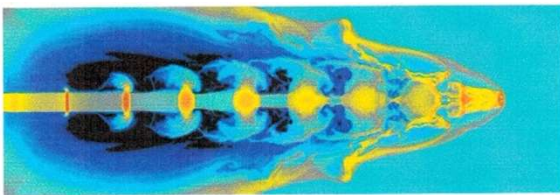


Abb. 12 Ergebnisse von Simulationsrechnung zur Jet-Erzeugung

Ohne den Einsatz leistungsfähiger Computer wäre es nicht zu einem Paradigmenwechsel hinsichtlich der Grundpfeiler des physikalischen Erkenntnisgewinnungsprozesses gekommen. Neben dem Experimentieren im Labor, den analytischen Überlegungen der Theorie hat sich dadurch heute das Numerische Experimentieren als zusätzlicher wichtiger Bereich der modernen naturwissenschaftlichen Forschung bewährt. Sicherlich hat die Astronomie bei dieser Entwicklung, auf Grund ihrer besonderen „Notlage“, ihren erschwerten Bedingungen bei der Erkenntnisgewinnung, eine wichtige Vorreiterrolle gespielt. Immer stand in diesem Forschungsbereich die Bedeutung moderner technischer Entwicklungen und multimedialer Methoden im Zusammenhang mit der Beobachtung von fernen Himmelsobjekten, der Notwendigkeit der Gewinnung, Aufbereitung und Analyse von Daten mit Hilfe besonders

effektiver Methoden im Vordergrund. Schüler und Studenten sollen in ihrer Ausbildung die erfolgreichen Methoden der naturwissenschaftlichen Forschung kennenlernen. In den Rahmenplänen zur Gestaltungen physikalischer Kurse der Oberstufe der unterschiedlichen Bundesländer wird zudem aus unterschiedlichen Gründen der verstärkte Einsatz multimedialer Methoden empfohlen. Hinsichtlich beider Aspekte bietet die Behandlung astronomischer Themen im Unterricht hervorragende Voraussetzungen.

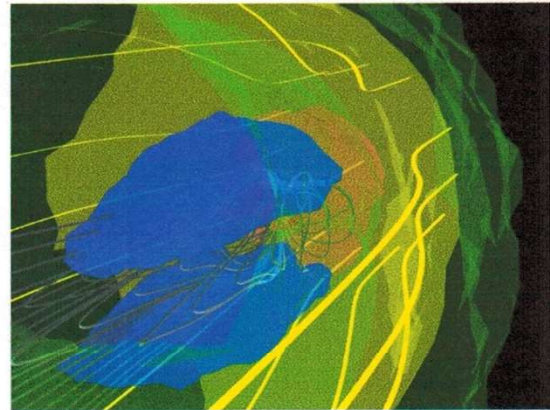


Abb. 13 Computeranimation zur Erdmagnetosphärenstruktur

Unterstützt durch das Internet lässt sich die besondere Aktualität und Vielfalt der modernen Astronomieforschung naturgemäß besonders gut darstellen. Neue Bilder der mit Großteleskopen wie dem Hubble-Space-Teleskope, dem Very Large Telescope in Chile, den Sonnen-Satelliten SOHO und TRACE oder den Magnetosphärenforschungssatelliten CLUSTER oder CHAMP werfen neue Fragestellungen auf. Die durch das Internet aber auch durch andere Medien (Video, DVD, CD-ROMS und IBES) ermöglichte „Teilhabe“ am Ablauf aktueller Forschung sichert ein gewisses Maß an Authentizität und Wirklichkeitsnähe, motiviert zudem die Forderung nach selbstständigem Arbeiten, nach

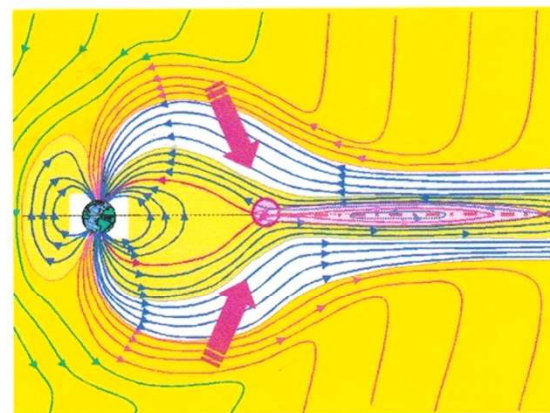


Abb. 14 Gezeichnete Animationen zur Polarlicht-Entstehung

handlungsorientierteren und schülergerechteren Lernformen. Schüler können angeregt werden, selbst Bilder und Bewegungsabläufe beispielsweise in Animationen, möglicherweise in einer Power-Point-Darstellung aufzubereiten, ihre Ergebnisse

einer größeren Öffentlichkeit vorzustellen oder in einer Kursarbeit zusammenzutragen. Das große gemeinsame Interesse vieler Menschen an aktuellen Ergebnissen der Astronomie bietet dabei ideale Voraussetzungen für die Entwicklung der so wichtigen Teamfähigkeit. Die im Rahmen eines astronomischen Curriculums erworbenen Fähigkeit im Umgang mit multimedialer Techniken und wissenschaftlicher Methoden durch engere Zusammenarbeit etwa in Arbeitsgruppen oder durch Kontakte mit Wissenschaftlern ist dann sicherlich auch von großer Relevanz für die Bewältigung von Alltagsproblemen und Anforderung im Berufsleben. Die Umgebung von Potsdam und Berlin mit ihren besonderen historischen und aktuellen Bezügen zur Astronomie bietet geradezu hervorragende Möglichkeiten zum persönlichen Kontakt mit Wissenschaftlern im Rahmen von Vortrags- oder Institutsbesuchen.

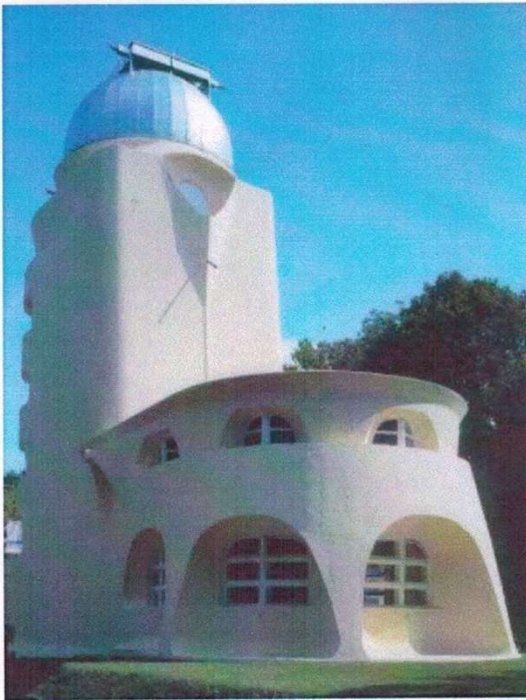


Abb. 15 Blick auf den Potsdamer Einsteinurm

2. Zielsetzungen

„Lernen über Kosmische Magnetfelder“ ist der Titel eines neu konzipierten astronomischen Curriculums für den Unterricht in der Sekundarstufe II, dass unter besonderer Betonung des Einsatzes multimedialer Methoden in Physik-Leistungskursen an unterschiedlichen Schulen im Raum Berlin/Brandenburg erprobt werden soll.

Themenschwerpunkte dieser Unterrichtseinheit sind

- die Entstehung Kosmischer Magnetfelder in Sternen und Planeten nach dem Dynamoprinzip
- die Änderungen der magnetischen Topologie sowie Energieumwandlungsprozesse in Sternatmosphären und Magnetosphären von Planeten und Kometen auf Grund von magnetischer Rekonnexion

- die Rolle magnetischer Prozesse zum erforderlichen Drehimpulstransport bei der Entstehung junger Stern- und Planetensysteme

Konkret geht es um

- die Entstehungsursachen der sich periodisch beziehungsweise chaotisch ändernden Magnetfelder auf der Sonne und in der Erde
- die magnetischen Prozesse, die für die Entstehung von Sonnenflecken und solaren Eruptionen verantwortlich sind
- den Einfluss des magnetisierten Sonnenwindes auf die Struktur und Entwicklung von Kometenschweifen
- die Erklärung des Weltraumwetters, magnetischer Stürme in der Erdmagnetosphäre sowie um die Entstehung von Polarlichtern
- die wichtige Rolle magnetischer Prozesse bei der Entstehung unseres Sonnensystems

Die Realisierung dieses anspruchsvollen Unterrichtskonzepts erfordert eine umfangreiche didaktische Aufbereitung der zugrundeliegenden physikalischen Theorien und Modelle gezielt für den Einsatz in der Sekundarstufe II. Aufbauend auf den erforderlichen, beziehungsweise gewünschten Vorkenntnissen der Schüler zu den Themenbereichen Lorentzkraft, magnetische Induktion, Generatorprinzip und magnetisches Feldlinienmodell beziehungsweise zu den Themenbereichen Rotationsbewegungen, Drehimpuls, Energiebegriff und Gasdruck, geht es hierbei schwerpunktmäßig vor allem um

- die Einführung des Plasmabegriffs
- die Vorstellung eines Entwicklungsweg hin zu grundlegend neuen, einfach zu verstehenden und anzuwendenden Bildern des plasmamagnetischen Feldlinienmodells, dem im ideal leitenden Plasma geltenden Bild der „eingefrorenen Feldlinien“ sowie dem, unter speziellen Bedingungen für den Rekonnexionsprozess benötigten Bild von „zerschnittenen und verändert wieder-verbundenen Feldlinien“
- die Darstellung der Bedeutung der Begriffe des magnetischen Drucks und der magnetischen Spannung
- die Entwicklung einer einfachen Darstellungsmöglichkeiten der qualitativen Auswirkungen zusätzlicher physikalischer Einflussfaktoren (Temperatur- und Dichtegradienten, Gravitations-, elektrische, Trägheits-, Zentrifugal- und Coriolis-Kräfte) auf strömendes magnetisierte Plasma

Methodische Überlegungen zur Realisierung dieses im formalen Unterrichtsplan für etwa 15 Unterrichtsstunden konzipierten Projekts sollten Vorschläge beinhalten

- zur begleitenden äußeren Rahmenstruktur des Unterrichtsversuches (Einplanung zusätzlicher Informationsveranstaltungen im Rahmen eines Institutsbesuchs, Ergebnissicherung in einer Kursarbeit zu vorgegebenen Themen anstelle

einer Klausur, Einplanung von Publikationsmöglichkeiten im Internet, im Rahmen eines öffentlichen Vortrags für Mitschüler, etwa mit Hilfe von Power-Point-Präsentationen)

- zur Abfolge und methodischen Aufbereitung des Unterrichtsablauf (Wie und mit welchen Hilfen lassen sich die wesentlichen Unterrichtsinhalte schülergerecht vermitteln?)
- zur eingeschränkten Möglichkeit von Schulexperimenten (Welche Experimente sollten durchgeführt werden? Welche Methoden der Unterrichtsgestaltung sowie handlungsorientierten Schüleraktivitäten können den themenimmanenten Mangel an Experimenten ausgleichen helfen?)
- zum gezielten Einsatz multimedialer Methoden (von Videos, DVDs, Power-Point-Präsentationen und interaktiven Bildschirm-Experimenten, zum Ablauf von Internet-Recherchen, zur Erstellung von Animationen)

Ein detaillierterer Entwurf eines konkreten Unterrichtsablaufs soll Informationen zu den folgenden Fragestellungen für jede Unterrichtsstunde auflisten:

- Was ist das Thema der Unterrichtsstunde?
- Wie kann die Behandlung gerade dieses konkreten Thema motiviert werden (durch ein Experiment, durch ein Video, durch ein Gespräch, durch ein Arbeitsblatt)?
- Unter welcher konkreten Fragestellung könnte der Inhalt der jeweiligen Unterrichtsstunde erarbeitet werden?
- Welche Eigeninitiativen und Aktivitäten der Schüler sind bei der Behandlung eines konkreten Themas möglich, welche Vorgaben müssten vom Unterrichtenden selbst kommen
- Welcher Zeitumfang sollte für die Bearbeitung des konkreten Themas eingeplant werden?
- Welche sinnvollen Aufgaben oder Fragestellungen können dem Schüler zur eigenständigen Bearbeitung mit nach Hause gegeben werden?
- Wie können notwendige Eingangsvoraussetzungen und die Ergebnisse eigenständig vom Schüler gelöster Aufgaben überprüft werden?

Für die in der Regel mit den Inhalten des vorgelegten Unterrichtskonzepts noch wenig vertrauten Lehrer soll in diesem Artikel eine ausführliche Liste mit den vor Beginn der Unterrichtsreihe bereitstehenden Informations- und Unterrichtsmaterialien zusammengestellt werden. Welche Experimente, interaktiven Bildschirmexperimente, Videos, CD-ROMS, DVDs mit Realbildern, Simulationen und Animationen gibt es zu welchem Thema? Welche Internet-Adressen liefern wichtige und richtige, anschauliche und aktuelle Informationen zu welchen konkreten Inhalten? Den das Curriculum erprobenden Lehrern wird eine über die große Bedeutung Kosmischer Magnetfelder und im Details über tiefere fachwissenschaftliche Hintergründe informierende Artikelserie sowie ein umfangreiches Materialienpaket bestehend aus Videosequen-

zen, Power Point Präsentationen, Arbeitsblättern und Internetadressen-Listen zu den einzelnen Themenbereichen rechtzeitig zur Verfügung gestellt.

Wichtiger Bestandteil der Erprobung einer Unterrichtseinheit ist natürlich auch die Evaluierung ihrer Ergebnisse. Welche Entwicklung haben die Schüler bei der Bearbeitung dieses Curriculums gemacht? Wie war die Motivation für Schüler aber auch Lehrer? Was hat Spass gemacht? In wie weit ist das vorliegende Konzept für die Weiterempfehlung geeignet? Was müsste verändert werden? Welche weiteren Hilfen brauchen die Lehrer? Welche Unterrichtsmaterialien müssen in Zukunft zur Verfügung gestellt werden?

3. Didaktische Bemerkungen (siehe hierzu auch Anhang A1-A3)

Die der vorgeschlagenen Unterrichtseinheit zugrundeliegende physikalische Sachstruktur wird den meisten Lehrer in vielen Teilen nicht bekannt sein. Wesentliche Ursache ist hierfür sicherlich vor allem die Einbeziehung von Elementen der **Plasmaphysik** und der Hydrodynamik in die Behandlung des Themas „Lernen über Kosmische Magnetfelder“. In diesem Abschnitt sollen wichtige Grundlagen der didaktischen Aufbereitung in einfacher Form ohne Verwendung physikalischer Gleichungen und mathematischer Methoden so erläutert werden, dass die an der Erprobung der Unterrichtseinheit interessierten Lehrer einen ersten motivierenden Eindruck über die didaktisch relevanten, sachlichen Hintergründe gewinnen können. Einige Wochen vor Beginn der Unterrichtseinheit erhalten sie dann zusätzlich eine umfangreiche Zusammenstellung der für ein tieferes Verständnis erforderlichen fachwissenschaftlichen Grundlagen.

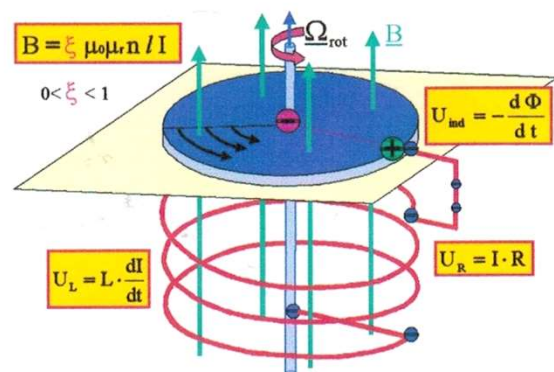


Abb. 15 Elemente des Scheibendynamo-Modells

Ausgehend von der Frage nach den grundsätzlichen Entstehungsursachen kosmischer Magnetfelder soll, nach dem Ausschließen von Permanentmagneten und Batterieeffekten als mögliche Verursacher, rückblickend näher auf das schon bekannte **Generatorprinzip** eingegangen werden. Angenommen, dieser Mechanismus bleibt als einziger vernünftiger „Kandidat“ für die Erzeugung der in der Erde und auf der Sonne anzutreffenden, periodisch oder chaotisch abrupt sich verändernden Magnetfelder

übrig. Wie nur soll es dann im heißen, recht homogenen Innern dieser Himmelskörper aber überhaupt möglich sein, einen solchen Dynamo zu treiben? Bei den dort vorherrschenden hohen Temperaturen können keine isolierten elektrischen Leiter, metallische Bauteile, geschweige denn Permanentmagnete oder Eisenkerne existieren. Statt eines komplex zusammenhängenden Leitersystems, indem elektrische Ströme in gezielt „verkabelten“ Stromsystemen relativ zu feststehenden, permanenten oder selbsterregt verstärkten Magnetfeldern fließen, trifft man hier auf ein relativ einfach zusammenhängendes, gleichverteiltes, überall elektrisch sehr gut leitendes, nach außen hin quasi-neutrales Medium, bestehend aus elektrisch geladenen Elektronen, Protonen und Ionen. Wie nur sollen die unterschiedlichen Ladungsträger auf geeignete Bahnen gezwungen werden? Heben sich nicht die durch Elektronenfluss und die Materieströmung positiver Ladungen erzeugten elektrischen Ströme in ihrer Wirkung auf? Sicherlich lässt sich auch für Himmelskörper aus Sicht des Energieerhaltungssatzes eine Umwandlung der ja vorhandenen mechanischen Rotationsenergie in elektromagnetische Energie als zentrales Moment des durch von Siemens realisierten Prinzips des selbsterregten Dynamos als denkbar erscheinen. Wie aber sollen eigentlich in einem solchen Medium die zur Vermittlung des Induktionsprozesses notwendigen Magnetfelder erzeugt werden? Sicherlich als kein großes Problem sollte sich in diesem Zusammenhang für die Schüler die Tatsache darstellen, dass man sich im Fall des technischen Generators eher für die Erzeugung von elektrischen Strömen interessiert, beim **selbsterregten kosmischen Dynamo**

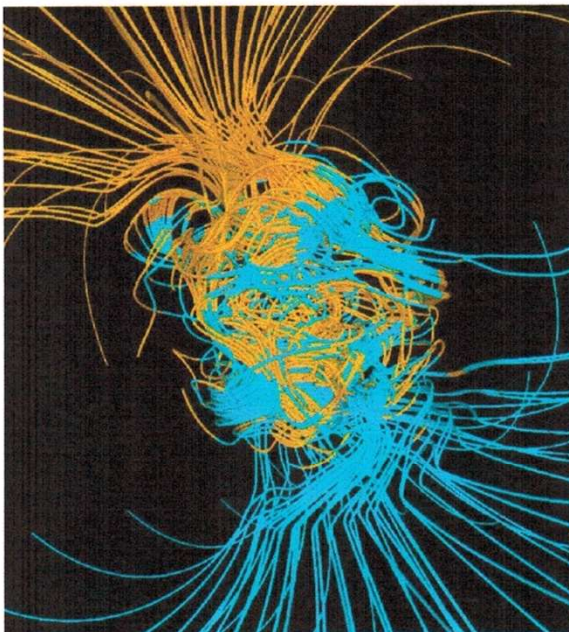


Abb. 16 Ergebnisse von Modellrechnungen zum Erddynamo

aber die Frage nach der Entstehung von Magnetfeldern im Mittelpunkt steht. Die Schüler wissen, dass elektrische Ströme ihrerseits stets Magnetfelder erzeugen, können sicherlich schnell einsehen, dass

eine Betrachtung der induzierten Magnetfelder stets zu der der erzeugten elektrischen Ströme identisch ist.

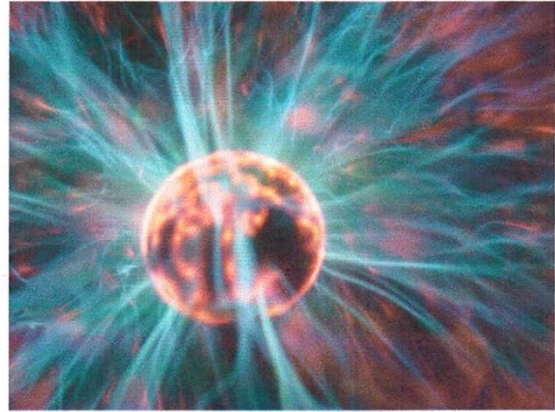


Abb. 17 Modellvorstellungen zur Plasmamaterie im Magnetfeld

Die Beantwortung der aufgeworfenen Fragen erfordert die Einführung und nähere Analyse des **Plasma**begriffs. Wie wechselwirken eigentlich Magnetfelder mit geladenen Teilchen miteinander, bezogen auf die Verhältnisse im Innern der Erde oder Sonne besser noch mit homogen verteilten Teilchenansammlungen? Wie eng sind sie eigentlich aneinander gekoppelt? Ausgehend vom Verhalten isolierter geladener Einzelteilchen im Magnetfeld, den durch Lorentzkräfte ausgelösten bekannten Gyrationbewegungen von Elektronen und Protonen, über Driftbewegungen durch zusätzlichen Einfluss beispielsweise elektrischer Felder, lässt sich auf das Verhalten eines quasi-neutralen, aus etwa gleichviel positiven und negativen Ladungsträgern zusammengesetzten Mediums schließen, indem Stoß- und Strahlungsprozesse mögliche zusätzliche Auswirkungen haben. Was passiert eigentlich, wenn sich in einem turbulenten nach außen hin neutralen Plasma-Medium plötzlich und kurzzeitig lokale Ladungsanhäufungen ausbilden? Sicherlich lassen die dadurch entstandenen elektrischen Felder elektrische Ströme fließen, erzeugen diese wiederum magnetische Felder. So könnten bereits im frühen Universum spontan die ersten, für den Dynamoprozess unbedingt erforderlichen magnetischen Saatfelder erzeugt worden sein. Elektrische und magnetische Felder sind es anscheinend, die in dem sich oft wie ein flüssiges oder gasförmig „Fluid“ verhaltenen Plasma über große Entfernungen hinweg Wechselwirkungen zwischen den Teilchen vermitteln, unter Umständen sogar großskalige Strukturbildungsprozesse in Gang setzen.

Wenn man Magnetfeldstruktur ohne auftretende Stoß- und Gyrationprozessen der Teilchen „adiabatisch“ langsam, das heißt ohne die nach dem Induktionsgesetz andernfalls mögliche Erzeugung elektrischer Felder verändert, so erscheint es unmittelbar einleuchtend, dass sich die Menge aller geladenen und gyrierenden Bestandteile der das Magnetfeld umhüllenden Plasmamaterie mit dem Magnetfeld ebenfalls mitbewegt. Durch Anwendung des Induktionsgesetzes läßt sich dann umgekehrt zeigen, dass sich andererseits auch die ma-

gnetischen Feldstrukturen mit einem „idealen“, das heißt unendlich gut elektrisch leitenden Plasma, stets eng verbunden, wie „eingefroren“ mitbewegen. Die Interpretation der in der Magnetohydrodynamik abgeleiteten Induktionsgleichung bestätigt diesen Sachverhalt auch auf streng mathematisch-physikalischem Hintergrund. Das so entwickelte, in seinem Anwendungsbereich „machtvolle“ und besonders anschauliche **Bild der „eingefrorenen“ Feldlinien** ermöglicht besonders einfache Analysen der Entwicklung magnetisierter Plasma unter den beschriebenen idealen Bedingungen. Ohne Lösung

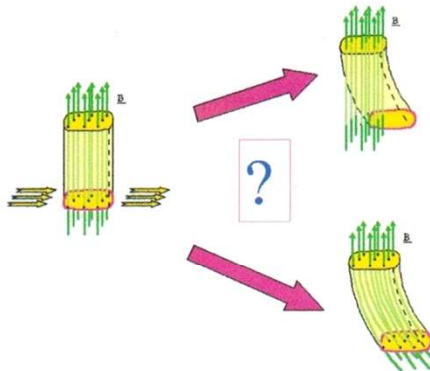


Abb. 19 Überlegungen zum Bild „eingefrorener“ Feldlinien

mathematischer Gleichungen und ohne die Betrachtung der sehr viel schwieriger zu interpretierenden elektrischen Stromdichtenverhältnisse lässt sich dabei zumindest qualitativ vorhersagen, wie sich eine vorgegebene Plasmastruktur mit eingelagerten Magnetfeldern unter Einfluss unterschiedlicher physikalischer Kräfte bewegen wird. Eine hierdurch sinnvolle erste Erweiterung des den Schülern schon bekannten magnetischen Feldlinienmodells für die Anwendung auf geladene, ionisierte Materieverteilungen unter „idealen“ Bedingungen bildet so eine entscheidende Grundlage für die folgende Auseinandersetzung mit dem Thema „Kosmische Magnetfelder“. Die nach ihren Entdeckern Navier-Stokes-Gleichung benannte Bewegungsgleichung enthält einen der Lorentzkraft entsprechenden Term für kontinuierliche Materieverteilungen, der die Wirkungen des magnetischen Druckes und der magnetischen Spannung auf die geladene Materie beschreiben. Ähnlich wie im materiefreien Raum lassen sich die von ihnen ausgeübten Kraftwirkungen auch im magnetisierten Plasma durch einfache Vorstellungen veranschaulichen. Magnetische Feldlinien zeigen danach die Tendenz, sich voneinander abzustößen, und möchten andererseits jeweils möglichst kurz sein.

Mit Hilfe des Bildes der „eingefrorenen“ Feldlinien lässt sich nun ein wesentlicher Teil des Entstehungsprozesses kosmischer Magnetfelder nach dem Prinzip eines selbsterregten Dynamos erklären. Das beispielsweise im äußeren Drittel des Sonneninneren anzutreffende charakteristische Strömungsmuster einer sogenannten differentiellen Rotation, bei der der solare Äquatorbereich (Umlaufzeit etwa 25

Tage) deutlich schneller als der Polbereich (Umlaufzeit etwa 35 Tage) rotiert, wickelt ein ursprünglich vollständig in der Meridional-Ebene liegendes sogenanntes poloidales Magnetfeld zu einem azimuthal ausgerichteten, sogenannten toroidalen Magnetfeld auf. Die aus der Rotationsbewegung gewonnene Energie wird dabei als magnetische Energie in den wie ein Gummiband gespannten Feldstrukturen gespeichert. Neben diesem mit dem griechischen Buchstaben ω (kennzeichnet den Zusammenhang mit der Rotationsgeschwindigkeit)

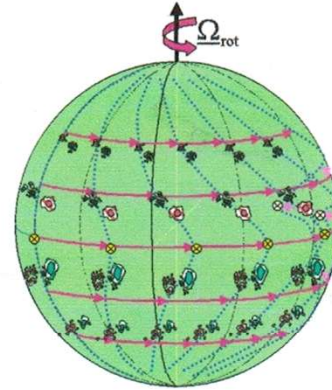


Abb. 20 Darstellung der solaren differentiellen Rotation

bezeichneten Induktionseffekt muss es aber zusätzlich einen weiteren Effekt geben, der die bei diesem Teilprozess „zerstörte“ poloidale Feldkomponente wieder regeneriert. Tatsächlich werden die in der Wasserstoffkonvektionszone der Sonne erzeugten toroidalen Feldstrukturen ihrerseits durch helikal verdrehte, turbulente Aufwärtsströmungen

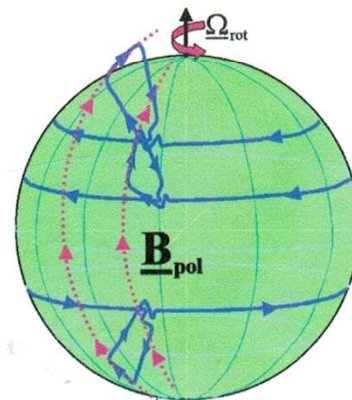


Abb. 21 Erzeugung poloidaler Feldlinien durch den α -Effekt

wieder in die meridionale Richtung verdreht. Temperaturgradienten treiben konvektive Plasmaströmungen, in denen die eingefrorenen, azimuthal verlaufenden Magnetfeldstrukturen aufsteigen und sich unter dem Einfluss von Corioliskräften geeignet so verdrehen, dass sie das ursprünglich poloidale Feld wieder reproduzieren. Die weiter unten beschriebene magnetische Rekonnexion bezeichnet dabei einen weiteren wichtigen „nicht-idealen“ Prozess, durch den die im zweiten Schritt erzeugten kleinskaligen Feldstrukturen zu einer großskaligen poloidalen Feldstruktur verschmolzen werden. Die Betitelung dieses zweiten Induktionsprozesses mit

dem Buchstabe α trägt dabei der Tatsache Rechnung, dass durch ihn eine parallel und proportional zum ursprünglich toroidalen Feld ausgerichtete Stromdichte ($j = \alpha B$) erzeugt wird. In Zusammenhang mit der Sonne spricht man so auf Grund der beiden unterschiedlichen Induktionseffekte vom Wirken eines $\alpha \omega$ - **Dynamos**. Im Erdinnern arbeitet dagegen wohl eher ein sogenannter α^2 - **Dynamo**. Der Umwandlungsprozess der poloidalen und toroidalen Feldkomponenten ineinander erfolgt dabei in beiden Richtungen durch den α -Effekt. Wesentliche Energiequelle dieses planetaren Dynamos ist vermutlich weniger die in ihm vorhandene Rotationsenergie als vielmehr die an der Oberfläche des festen inneren Eisenkerns bei der Kristallisierung des Eisens freiwerdende Kristallisationswärme, die ihrerseits Konvektionsströmungen unter dem Einfluss von Gorioliskräften treibt. Das Funktionieren beider Dynamoarten ließe sich natürlich außer durch die hier dargestellte Entwicklung der magnetischen Feldstrukturen auch durch das Fließen der durch die beschriebenen Plasmaströmungen geeignet geleiteter elektrischer Ströme im ansonsten homogenen Plasma erklären. Die auf Grund ihrer deutlich geringeren Masse sehr viel beweglicheren Elektronen bestimmen dabei in der Regel die Stärke der elektrischen Stromdichte, die massereichen positiven oder neutralen Plasmateilchen bestimmen den Massetransport, die Materieströmung des Plasmas. Bei zeitlich sehr schnell ablaufenden Prozessen ordnen sich die trägen, positiven Ladungsträger fast zu einer Art Raumgitter, durch die Elektronen wie in einem metallischen Draht den Stromtransport alleine bewerkstelligen. Die für das „Anlaufen“ stellarer oder planetarer **selbsterregter kosmischer Dynamos** erforderlichen Saatfelder waren bereits in der zu Sternsystemen kollabierenden interstellaren Gaswolke enthalten.

Der Ablauf einer Vielzahl weiterer, unter dem Einfluss magnetischer Kräfte stehender **solar-terrestrischer Prozesse** lässt sich mit Hilfe des Bildes der „eingefrorenen“ Feldlinien, anhand der Auswirkungen des magnetischen Drucks und der magnetischen Spannung besonders anschaulich erklären. So entstehen beispielsweise Sonnenfleckepaare auf der Oberfläche unseres „Heimatsterns“, wenn die im Dynamoprozess erzeugten, ursprünglich am Boden der Konvektionszone gelagerten toroidalen magnetischen Flussröhren durch Instabilitäten ausgelöst, durch einsetzenden magnetischen Auftrieb und in konvektiv aufsteigende Plasmaströmungen eingefroren, ihren Weg zur Sonnenoberfläche suchen, um hier seeschlängengleich in zwei benachbarten Gebieten durch die Sonnenoberfläche zu stoßen. An den kühleren und deshalb fleckenartig dunkler erscheinenden Durchstoßpunkten unterdrücken die Magnetfeldstrukturen den Aufstieg heißer Plasmaballen aus dem Sonneninnern. Ohne die in den Plasmastrom des Sonnen-

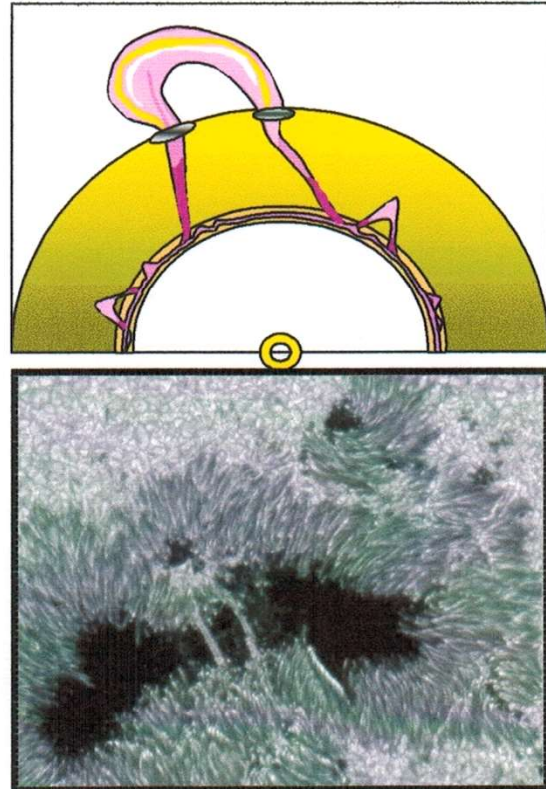


Abb. 22 Animationen zur Entstehung von Sonnenflecken

windes eingefrorenen, sich am Kometenkopf stauenden magnetischen Flussröhren würde sich niemals die langgestreckte, filigrane Struktur der Kometenschweiften ausbilden können. Und das stark verdünnte Sonnenplasma und vor allem der magnetische Druck der in sie eingelagerten Feldstrukturen sind es, die die sonnenseitige Magnetosphäre der Erde zusammendrücken, den viele hundert Sonnenradien langen sonnenabgewandten Schweif ausbilden. Wie die Bemerkungen am Ende der didaktischen Bemerkungen über die relevanten physikalischen Prozesse bei der Entstehung unseres Sonnensystems zeigen werden, spielt schließlich auch hier die „Eingefrorenheit“ der Feldlinien eine entscheidende Rolle.

Magnetische Rekonnexion ist ein fundamentaler dynamischer Prozess in elektrisch sehr gut leitender Plasmamaterie. Wie andere grundlegende physikalische Begriffe beschreibt auch er eine große Vielzahl der in unserem Universum ablaufenden Prozesse und zu beobachtenden Phänomene mit Hilfe eines einzigen universellen Prinzips. Ganz im Gegensatz zur „Eingefrorenheit der Feldlinien“ bezeichnet er die Tatsache, dass sogenannte magnetische Topologien, also die Anordnungen, Verbindungen und Verknötungen magnetischer Feldstrukturen unter bestimmten Umständen neustrukturiert werden können. In einem einfachen, anschaulichen und modellhaften Bild werden dabei magnetische Feldlinien an bestimmten Stellen plötzlich zerschnitten und unverzüglich in veränderter Form mit Segmenten einer anderen benachbarten Feldlinie wieder verknüpft. Zwei ursprünglich an die gleiche Feldlinie gebundene Plasmaelemente befin-