

Kosmische Laborexperimente (2)

von Ulrich v. Kusserow

Im Labor durchgeführte analoge „kosmische“ Experimente ermöglichen Astrophysikern heute tiefere Erkenntnisse auch über wichtige Strukturbildungs- und Entwicklungsprozesse, die im fernen Universum ablaufen. Im ersten Teil (A+R, 6/2013) dieses Artikels wurden Experimente zur Klärung der Erzeugung kosmischer Magnetfelder sowie das historische Birkeland-Experiment zur Entstehung von Polarlichtern vorgestellt. In weiteren Teilen werden unter anderem Laborexperimente zum bedeutsamen Drehimpuls-transport, zum Turbulenzphänomen im kollisionsfreien Plasma und in Stoßfronten erläutert. Es werden „Bonsai“-Experimente beschrieben, anhand derer sich die für solare Eruptionen und kosmische Jets, für Supernova-Explosionen und Gammastrahlen-Ausbrüche relevanten physikalischen Prozesse analysieren lassen. Hochenergetische Laser-Experimente ermöglichen schließlich die Erforschung der Energie erzeugenden Kernverschmelzung in Sternen oder in Fusionsreaktoren, in denen Magnetfeld erzeugende Dynamo- und die für die Freisetzung großer Energiemengen wichtigen magnetischen Rekonnexionsprozesse selbstorganisierend von einiger Bedeutung sein können.

Batterien und Dynamos, magnetische Rekonnexion und Prozesse an Stoßfronten

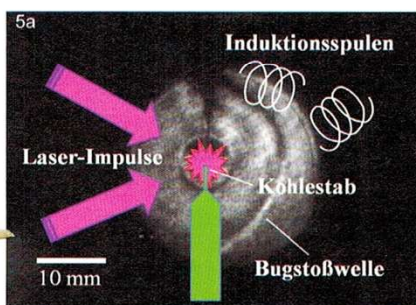
Im Rahmen der Magnetohydrodynamik beschreibt die Induktionsgleichung (S. 30) die zeitliche Entwicklung der magnetischen Flussdichte $\vec{B}(\vec{x}, t)$ in gut leit-

fähigen Fluiden. In dieser Differenzialgleichung bezeichnen $\partial \dots / \partial t$ und $\nabla = (\partial \dots / \partial x, \partial \dots / \partial y, \partial \dots / \partial z)$ Operatoren, die den zeitlichen beziehungsweise die drei räumlichen Differenzialquotienten ausführen. Ausgehend von einem ursprünglich schwachen magnetischen Saatfeld lässt sich die orts- und zeitab-

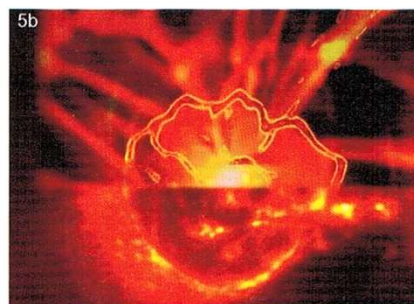
hängige Vektorgröße \vec{B} in einem Dynamoprozess beim Vorliegen geeigneter Geschwindigkeitsfelder $\vec{v}(\vec{x}, t)$ verstärken und regenerieren. In einem Fluidbereich mit hoher elektrischer Leitfähigkeit σ dominiert der 1. Term auf der rechten Seite von (1) gegenüber dem das Magnetfeld abbauenden, seine Verknüpfungsverhältnisse verändernden Diffusionsterm.

Dieser 3. Term auf der rechten Seite der Induktionsgleichung gewinnt erst an Bedeutung, wenn die zu σ umgekehrt proportionale magnetische Diffusionskonstante η in speziellen Grenzschichten aufgrund zunehmenden elektrischen Widerstands anwächst und die hier aufeinander treffenden Magnetfeldstrukturen starke Gradienten aufweisen. Werden magnetische Felder mit entgegengesetzt orientierter Polarität zusammengedrückt, so verringert sich die elektrische Leitfähigkeit im dazwischen liegenden Fluid. In einer sich ausbildenden schmalen Stromschicht entkoppeln geladene Teilchen vom Magnetfeld, in dem sie sonst wie „eingefroren“ miteinander verbunden sind. Beim lokalen Prozess der magnetischen Rekonnexion verändern sich die topologischen Verknüpfungen der Magnetfeldkomponenten instantan mit bedeutsamen Auswirkungen auch auf großräumigen Skalenbereichen. Es werden starke elektrische Felder erzeugt, die ganze Fluidbereiche und hochenergetische Teilchen beschleunigen sowie Materie aufheizen.

Der 2. Term auf der rechten Seite von Gleichung (1) könnte für die Erzeugung der ersten magnetischen Saatfelder im Universum verantwortlich gewesen sein. Dieser sogenannte Biermann-Batterie-Term entsteht bei der Herleitung der Induktionsgleichung für ein Plasma in einem Zweikomponentenmodell, bei dem die Bewegungsgleichungen für die negativ geladenen Elektronen und



5a Laser-Laborexperiment zur Erzeugung kosmischer Magnetfelder durch Wirkung des Biermann-Batterie-Prozesses. Quelle: VKS Konsortium; DRESDYN/HZDR; G. Gregori u. a., bearbeitet durch U. v. Kusserow



5b Das experimentelle Ergebnis des Laser-Laborexperiments. Quelle: VKS Konsortium; DRESDYN/HZDR; G. Gregori u. a., bearbeitet durch U. v. Kusserow

die positiven Wasserstoffkerne getrennt berücksichtigt werden. Die Größen c , m_H , χ und e bezeichnen hierbei die Lichtgeschwindigkeit, die Masse des Wasserstoffs, den Ionisationsgrad der Materie beziehungsweise die Elementarladung. Die Erzeugung der Magnetfelder ($\partial \vec{B} / \partial t \neq \vec{0}$) ohne ein magnetisches Saatfeld ist im Rahmen der Theorie zur Biermann-Batterie in Plasma allerdings nur dort möglich, wo das Kreuzprodukt $\nabla \rho \times \nabla p$ ungleich null ist, wenn also die Gradientenvektoren des Druckes p und der Materiedichte ρ nicht parallel zueinander verlaufen.

Die Differenzialgleichung (2) beschreibt die zeitliche Entwicklung der als Vortizität $\vec{\omega}(\vec{x}, t)$ bezeichneten Wirbelstärke des Geschwindigkeitsfeldes \vec{v} , die offensichtlich sehr analog zu der der magnetischen Flussdichte \vec{B} verläuft (vergleiche (2) mit (1)). Verwirbelungen im Geschwindigkeitsfeld können verstärkt (1. Term) oder abgeschwächt und verändert (3. Term mit ν als kinematischer Viskosität) werden, wenn eine anfängliche Vortizität vorhanden war. Wie aber konnte ein solches erstes Saatfeld im frühen Universum erzeugt werden? Entsprechend der Theorie zur Wirkungsweise der Biermann-Batterie

muss es anfangs Prozesse gegeben haben, bei denen die Druck- und Dichtegradienten schräg zueinander verliefen. Prozesse an Stoßfronten in kollidierenden Sternwinden und Supernova-Explosionen der ersten, besonders massereichen Sterne kämen hierfür in Frage.

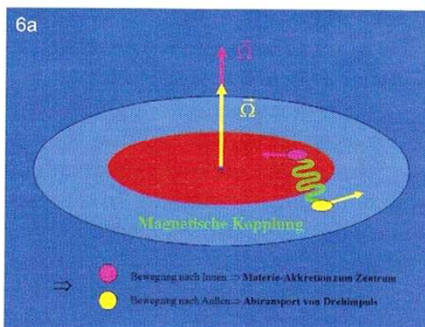
Wertvolle Erkenntnisse anhand der verblüffenden Ähnlichkeit der Induktionsgleichung für die Erzeugung der kosmischen Magnetfelder und der Gleichung für die Entwicklung der Verwirbelung von Geschwindigkeitsfeldern machen die große Bedeutung theoretischer Überlegungen anhand mathematisch-physikalischer Modelle exemplarisch deutlich.

Die Biermann-Batterie und die Erzeugung magnetischer Saatfelder

Die Erzeugung der ersten stellaren und galaktischen Magnetfelder im Universum durch Dynamoprosesse erforderte die Existenz zumindest schwacher magnetischer Saatfelder. Theoretische Überlegungen machen deutlich, dass solche frühen Magnetfelder im Plasma des Universums hätten dort erzeugt werden können, wo die Richtungen der

größten Änderungsrate des Druckes mit der der Dichte (Temperatur) nicht übereinstimmten. Ergebnisse von Simulationsrechnungen zeigen, dass beispielsweise beim Aufeinandertreffen der Winde massereicher früher Population III-Sterne, beim Kollaps protogalaktischer Strukturen oder nach Supernova-Explosionen in Stoßfronten geometrische Asymmetrien erzeugt werden können, die solche schräg zueinander ausgerichteten Gradienten hervorbringen. Die Stärke der auf Grund dieses 1950 von Ludwig Biermann entdeckten Biermann-Batterie-Effektes entstandenen magnetischen Saatfelder zur Auslösung von Dynamoprosessen sollte etwa 10^{-21} Gauß betragen [13].

Am Laboratoire pour L'Utilisation de Lasers Intenses (LULI 2000) in Paris gelang erstmals der Nachweis dieses Effektes in einem analogen Laborexperiment mit Hilfe hochenergetischer Laserpulse (Bild 1c). Das internationale Forscherteam beschloss die Spitze eines 0,4 mm dünnen Kohlenstoffstabs in einer mit Helium geringen Drucks gefüllten Gaskammer. Mit Hilfe unterschiedlicher Methoden wurde die Ausbreitung der Stoßwellen im expandierenden Plasma beobachtet und vermessen (Bild 5a).



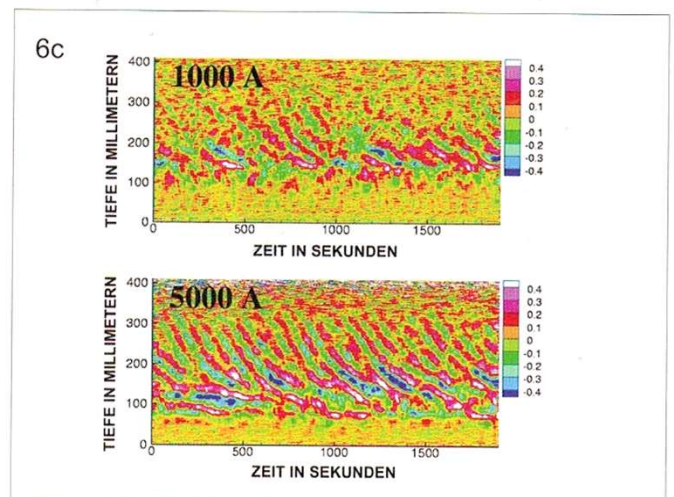
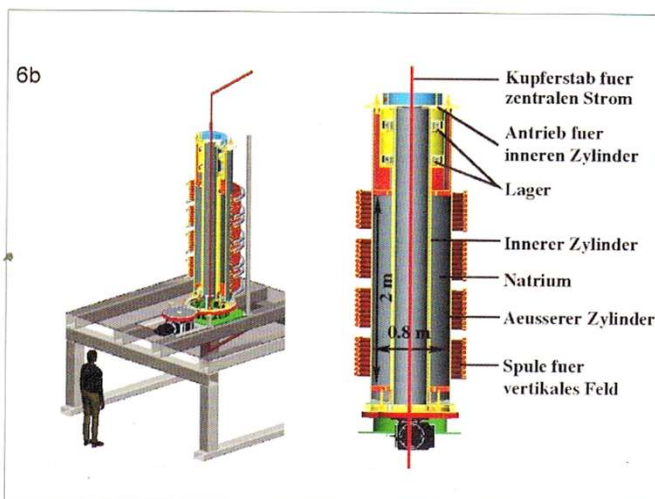
Induktionsgleichung mit Biermann-Batterie Term

$$(1) \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) - \frac{\nabla p \times \nabla \rho}{\rho^2} \cdot \frac{c \cdot m_H}{e \cdot (1 + \chi)} + \eta \cdot \nabla^2 \vec{B}$$

Zeitliche Entwicklung der Vortizität $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v}$

$$(2) \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{\omega}) + \frac{\nabla p \times \nabla \rho}{\rho^2} \cdot \frac{1}{(1 + \chi)} + \nu \cdot \nabla^2 \vec{\omega}$$

6 Der Drehimpuls-Transport durch die Magneto-Rotations-Instabilität: Prinzip des Materie- und Drehimpuls-Transportes durch magnetische Kopplung (6a), zukünftiges Dresdener Experiment zur Erforschung der Balbus-Hawley- und Taylor-Instabilität, (6b), Nachweis des Drehimpuls-Transportes in Form von Driftbewegungen rollenartiger Strömungen im PROMISE Experiment (6c).x U. v. Kusserow, HZDR/AIP, DRES-DYN/HZDR



Etwa eine Mikrosekunde nach Auftreffen des Laserpulses konnten im Abstand von 3 cm magnetische Flussdichten von bis zu 30 Gauß mit Hilfe von Induktionsspulen gemessen werden. Ergebnisse der parallel dazu durchgeführten numerischen Simulationsrechnungen (**Bild 5b**) bestätigten wesentliche Eigenschaften der Strukturen in der Bugstoßwelle und ermöglichten die Interpretation der experimentellen Ergebnisse im Rahmen des theoretischen Konzepts der Wirkung einer Biermann-Batterie. Durch Anwendung magnetohydrodynamischer Skalierungsmethoden konnten die Laborergebnisse schließlich auf die astrophysikalischen Verhältnisse im frühen Universum übertragen werden. Magnetische Saatfelder der Flussdichte 10^{-21} Gauss ließen sich so erzeugen. In Protogalaxien einsetzende Dynamoprosesse könnten die Felder dann auf die heute in fernen Galaxien registrierten Messwerte verstärken [14].

Die Magneto-Rotations-Instabilität und der Drehimpulstransport

Planeten rotieren auf stabilen Bahnen um die Sonne, weil sich die auf sie wirkenden Gravitationskräfte F_G und die Zentrifugalkräfte F_z gegenseitig aufheben. Mit ihrer Masse M bewegen sie sich deshalb im Rahmen der sogenannten Kepler-Rotation mit gleichbleibendem Abstand R vom Zentralstern mit der Winkelgeschwindigkeit $\Omega \cdot \sqrt{GM/R^3}$ (G Gravitationskonstante). Die Ausbildung von Galaxien, Sternen und Planeten erfordert jedoch eine stetige Verdichtung der aus Plasma, neutralen Atomen und Molekülen sowie teilweise geladenen Staubpartikeln bestehenden, in Akkretionsscheiben um kompakte Objekte rotierenden Materie zum jeweiligen Zentralobjekt hin. Eine solche Materieverdichtung kann nur durch den Abtransport von Drehimpuls nach außen, durch einsetzende Reibungsprozesse in den turbulenten Strömungsstrukturen dieser Scheiben gelingen. Durch welche Prozesse dafür notwendige Turbulenzen entstehen könnten, gehörte lange Zeit zu den ungeklärten Rätseln. Auch wenn sich auf Grund der wegen $\Omega = \Omega(R)$ differentiellen Rotation benachbarte, mit unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeit rotierende Materielemente in diesen Akkretionsscheiben aneinander reiben könnten, so sind die

sich daraus ergebenden Reibungskoeffizienten nachweislich aber doch nicht groß genug. Häufig wird stattdessen in erfolgreichen Modellrechnungen, die die realen Verhältnisse tatsächlich recht gut abbilden, davon ausgegangen, dass eine hinsichtlich ihrer physikalischen Entstehung nicht genau geklärte anomale Turbulenz, relativ pauschal berücksichtigt, doch den gewünschten Materietransport ermöglicht [15].

„... wir zeigen, dass eine große Klasse von astrophysikalischen Akkretionsscheiben in Gegenwart schwacher Magnetfelder gegenüber axialsymmetrischen Störungen instabil wird.“ Mit dieser Aussage beginnt ein 1991 von *Steven A. Balbus* und *John F. Hawley* veröffentlichter, in Wissenschaftskreisen häufig zitierter Artikel, in dem eine physikalische Erklärung für das Einsetzen effektiven Materietransports gegeben wurde. Die beiden Theoretiker konnten durch Stabilitätsuntersuchungen nachweisen, dass die später auch nach ihnen benannte Magneto-Rotations-Instabilität für die Erzeugung von Turbulenzen, den Abtransport von Drehimpuls sowie die Materieakkretion verantwortlich sein kann [16]. Diese magnetohydrodynamische Instabilität wird wirksam, wenn differenziell rotierendes, elektrisch gut leitfähiges Plasma nahezu senkrecht von nicht allzu starken Magnetfeldern durchsetzt wird. Umfangreiche Rechnungen zeigen, dass die Notwendigkeit der Abnahme des Quadrates Ω^2 der Winkelgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand vom Rotationszentrum das entscheidende Kriterium für das Einsetzen der Balbus-Hawley-Instabilität ist. Für Akkretionsscheiben mit einem Kepler-Rotations-Profil ist dieses Instabilitätskriterium erfüllt.

In umfangreichen Rechnungen konnten die beiden Wissenschaftler aufzeigen, unter welchen Bedingungen ein solches Medium durch Erzeugung starker Turbulenzbewegungen destabilisiert werden kann.

Das Prinzip der Wirkungsweise der Magneto-Rotations-Instabilität lässt sich anhand von **Bild 6a** modellhaft veranschaulichen. Gemäß der Kepler-Rotation bewegt sich ein inneres Fluid-Element (violett dargestellt) auf einer Bahn mit höherer Winkelgeschwindigkeit als ein weiter außen strömendes Fluid-Element (gelb dargestellt). Bei einer unterstellt guten elektrischen Leitfähigkeit

der Plasmamaterie sind existente magnetische Feldstrukturen in der Akkretionsscheibe wie „eingefroren“ an die Fluidelemente gebunden. Die in der Abbildung dargestellte (grüne) Spirale soll die verstärkte magnetische Spannung symbolisieren, die entsteht, wenn sich zwei benachbarte Fluid-Elemente auf Grund von Störungen auf unterschiedliche Orbits begeben haben. Wie bei einer gespannten Metallfeder möchte auch die zu stark ausgedehnte, die beiden Fluid-Elemente verbindende magnetische Feldlinie auf Grund der entlang ihr wirksamen magnetischen Spannung gerne wieder „möglichst kurz“ werden. Diese magnetische Einflussnahme bewirkt sowohl die Abbremsung des inneren als auch die Beschleunigung des äußeren Fluid-Elements. Das innere Fluid-Element verliert an Drehimpuls und rutscht weiter nach innen. Das äußere Fluid-Element gewinnt an Drehimpuls und bewegt sich weiter nach außen. Die dadurch angeregten turbulenten Bewegungsmuster ermöglichen die zu erklärende Materieakkretion nach innen und gleichzeitig den Drehimpulstransport nach außen [17]. In turbulenten Dynamoprosessen könnten zusätzlich stärkere Magnetfelder in Akkretionsscheiben regeneriert werden.

Erstmals 2006 ist im Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) der experimentelle Nachweis der Einflussnahme der Magneto-Rotations-Instabilität mit Hilfe des Laborversuchs PROMISE (Potsdam-Rossendorf Magnetic in Stability Experiment) gelungen (**Bild 1d** im Teil 1, rechts unten) [18]. Basierend auf der Idee von Wissenschaftlern vom Astrophysikalischen Institut in Potsdam und von der Universität Leeds wurden bei diesem – anstelle von Plasmamaterie mit einer flüssigen (Gallium-Indium-Zinn-) Metall-Legierung betriebenen – Experiment Driftbewegungen rollenartiger Strömungen mit Ultraschallsensoren zum Nachweis des erfolgten Drehimpulstransportes registriert (**Bild 6b**). Das flüssige Metall befand sich zwischen zwei mit unterschiedlichen Umlaufzeiten um die gleiche Achse rotierenden Zylindern. Um ein solches Experiment im Labor erfolgreich durchführen zu können, musste das im wesentlichen rein axiale Magnetfeld einer magnetisierten Akkretionsscheibe allerdings durch ein helikal geformtes Feld ersetzt werden [19]. Die Erzeugung der azimuthalen beziehungs-

weise vertikalen Feldkomponenten erfolgte dabei durch besonders starke Ströme (5000 A) entlang der Rotationsachse sowie durch schwächere Ströme (50 A) durch eine die Apparatur umwickelnde Spule. Die Wellenausbreitung im Rahmen der als helikale MRI bezeichneten Instabilität soll in Dresden im Rahmen des DRESDYN-Projektes [20] (siehe auch erster Teil dieses Artikels) zukünftig in einem Experiment mit flüssigem Natrium (**Bild 6c**) vertiefend erforscht werden.

Auch die Wirkung einer anderen, 1973 von Roger J. Taylor vorausgesagten astrophysikalisch relevanten magnetischen Instabilität konnte am HZDR im Experiment nachgewiesen werden. Die Taylor-Instabilität (TI) setzt bei Störungen in rein azimuthalen Magnetfeldstrukturen ein. Sie spielt vermutlich nicht nur im Kosmos beispielsweise in Bezug auf die beobachtete Abbremsung von Neutronensternen oder in kosmischen Jetströmen eine wichtige Rolle [21]. Dresden-Rossendorfer Wissenschaftler untersuchen auch ihre mögliche Auswirkung auf den geplanten Bau großer Flüssigmetall-Batterien als Speicher von regenerativen Energien. Wenn allzu starke Ströme

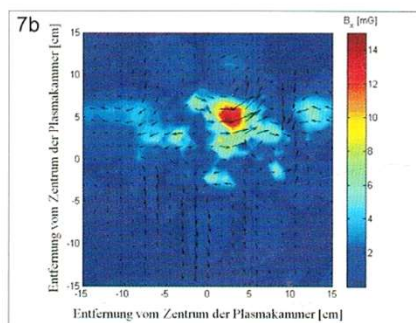
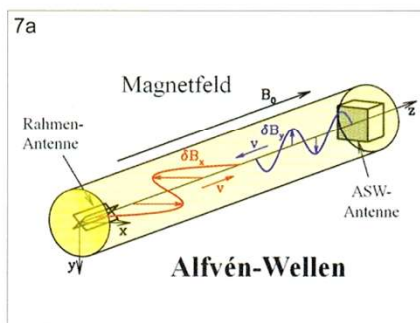
durch Batterien mit stabil geschichteten Flüssigkeitsschichten fließen, dann könnten die dabei erzeugten starken, dadurch Knickinstabilitäten unterworfenen Magnetfeldstrukturen heftige Bewegung der unterschiedlichen Metalle auslösen. Die Speicherung umfangreicher Energiemengen wäre somit in Frage gestellt. Konstruktive Verbesserungsmöglichkeiten werden heute erforscht.

Turbulenzen und selbstorganisierte Stoßfronten

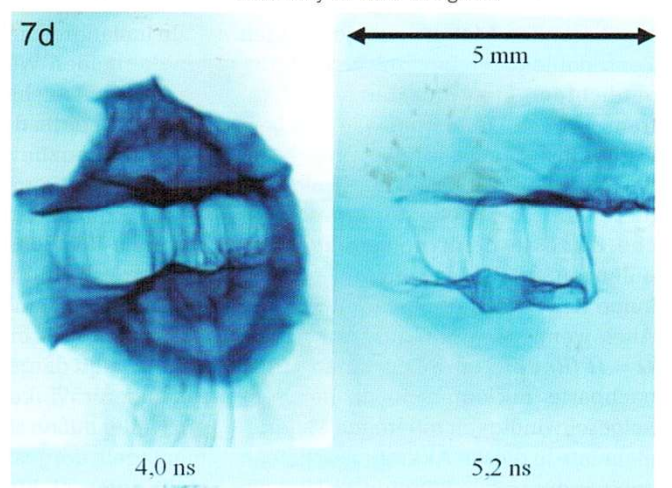
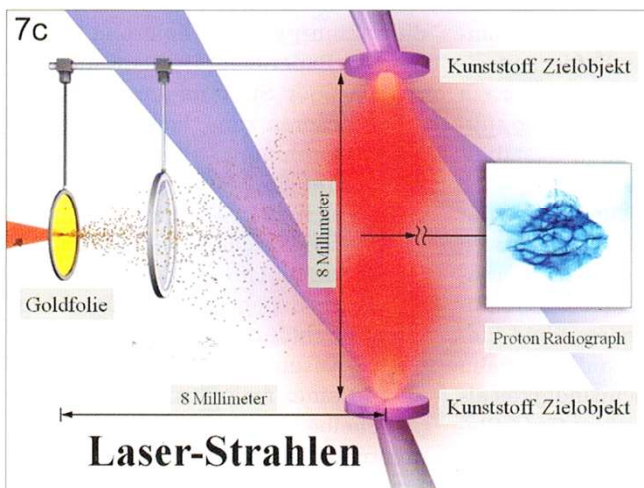
Turbulenzphänomene spielen beim Transport von Materie, Impuls und Energie in der Umgebung von Galaxienhaufen, Akkretionsscheiben um junge Sterne und kompakte Objekte, in der Korona heißer Sterne, im Sonnenwind oder in planetaren Magnetosphäre häufig eine entscheidende Rolle. Getrieben von stürmischen Ereignissen oder einsetzenden Instabilitäten breiten sich zunehmend kleinskaligere Störungen im Plasma aus. Die Entwicklung der durch komplexe nicht-lineare Prozesse ausgelösten turbulenten Energiekaskade von großen zu kleinen Skalen endet

schließlich mit der Umwandlung der Bewegungsenergien in Wärme.

Astrophysikalische Plasmen sind stets von Magnetfeldern durchsetzt, die die Natur der Turbulenzerscheinungen wesentlich beeinflussen. Im häufig stoßfreien, extrem dünnen Plasma, in dem es nur sehr selten zu Zusammenstoßen der Teilchen kommt, können Stoßprozesse durch aufeinandertreffende, mit geladenen Partikeln gefüllte kosmische Magnetfeldstrukturen vermittelt werden. Nach einem intuitiven theoretischen Konzept bestimmt im extrem dünnen magnetohydrodynamischen Plasma anstelle der hierarchisch gestalteten Strömungswirbel im Rahmen der hydrodynamischen Turbulenz die Physik aufeinandertreffender Alfvénwellen die Ausbildung hierarchisch strukturierter turbulenter Bewegungen. Die nach *Hannes Alfvén* benannten niederfrequenten, transversalen magnetohydrodynamischen Wellen bewegen sich entlang lokaler Magnetfelder. Die den Feldern inwohnende magnetische Spannung vermittelt dabei die Rückstellkräfte. Die beim frontalen Zusammenstoß zweier solcher Wellen auftretenden nicht-linearen Wechselwirkungsprozesse mit der



7 Turbulenzen und selbstorganisierte elektromagnetische Felder, Kollisionen von Alfvén-Wellen und Plasmamaterie: Schematische Darstellung des Kollisionsexperiments von Alfvén-Wellen (**7a**), Registrierung der Stärke und Ausrichtung von Magnetfeldkomponenten der dabei erzeugten Tochterwelle (**7b**), schematische Darstellung eines Kollisionsexperiments von turbulenter Plasmamaterie (**7c**), Nachweis der Ausbildung selbstorganisierter elektromagnetischer Felder anhand der von Protonen erzeugten Röntgenbilder (**7d**). G.G. Howes u.a./Large Plasma Device University of California, H. S. Park u.a./Lawrence Livermore National Laboratory /University of Rochester Laboratory for Laser Energetics



möglichen Ausbildung von kleinskaligen Tochterwellen können aufgrund fehlender räumlicher Auflösung nicht durch Beobachtungen in astrophysikalischen Zusammenhängen verifiziert werden. Allein unter kontrollierten Bedingungen im Labor hochaufgelöst durchgeführte Messreihen können die alfvénische Natur des Turbulenzphänomens im nahezu kollisionsfreien Plasma bestätigen [22].

An der Universität von Kalifornien gelang jetzt in einem „kosmischen“ Laborexperiment der Nachweis der Entstehung einer Energiekaskade von großen zu kleinen Skalen für magnetohydrodynamische Turbulenz durch Alfvénwellen-Kollisionen (Bild 7a). In einer mit homogenem Magnetfeld der Stärke $B_0 = 0.08 \text{ T}$ durchsetzten, mit zu 50% ionisiertem Wasserstoff der Teilchendichte 10^{12} cm^{-3} gefüllten 16,5 m langen Plasmasäule wurden zwei polarisierte Alfvénwellen frontal zur Kollision gebracht. Die von dem als ASW- (Arbitrary Spatial Waveform) Antenne bezeichneten Stabantennen-Feld ausgesandte sinusförmige Welle mit kleiner Amplitude besaß eine Frequenz von 270 kHz. Von einer Rahmen- (90-Grad-Doppel-Dipol) Antenne wurde eine senk-

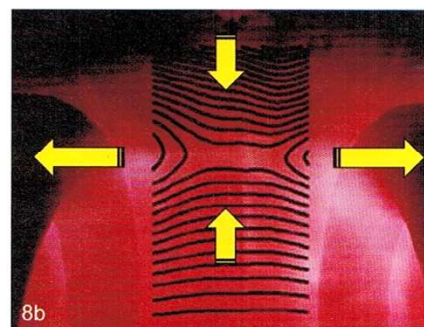
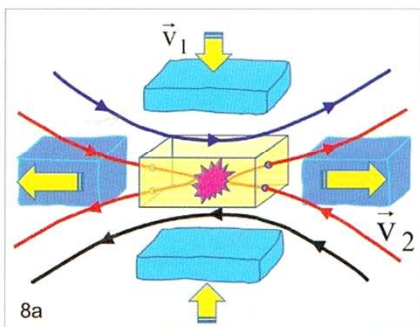
recht dazu polarisierte Alfvénwelle mit relativ großer Amplitude und niedrigerer Frequenz von 60 kHz ausgesandt.

Wie nach theoretischen Vorhersagen vermutet wurde, entstand bei diesem Experiment tatsächlich eine Tochter-Alfvénwelle mit den erwarteten Eigenschaften. Unter anderem stimmten die Messergebnisse für die erzeugten Magnetfeldkomponenten dieser Welle (Bild 7b) recht gut mit den Ergebnissen der Modellrechnungen überein. Es erfolgte tatsächlich ein Energietransfer zu kleineren Skalen [23]. Die Ausbildung der turbulenten Energiekaskade kann im magnetisierten, dünnen turbulenten Plasma des Universums durch die häufige Kollision von Alfvénwellen erfolgen.

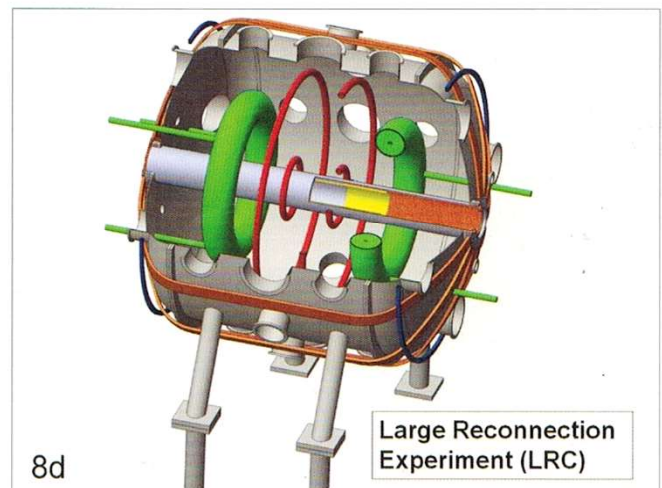
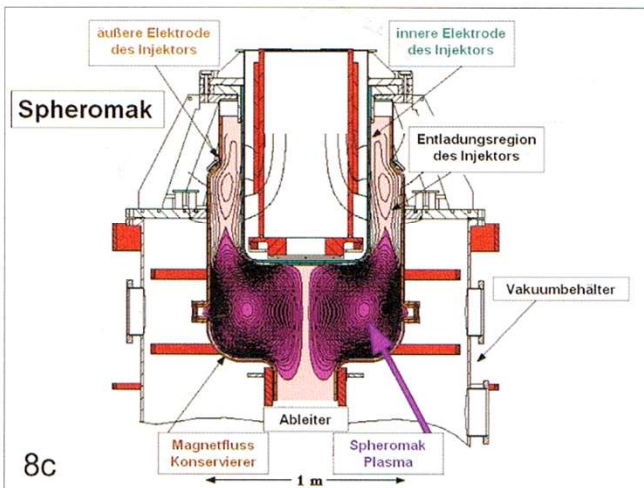
Es gehört noch immer zu den Rätseln auch der modernen Astrophysik, wie sich überall im Universum großskalige Strukturen im turbulenten kosmischen Medium haben ausbilden können. Durch welchen Prozess der Selbstorganisation konnten Magnetfeldstrukturen mit so großer Kohärenzlänge trotz der unbändigen, chaotischen Bewegung superschneller Ionen und Elektronen im Plasma entstehen? Wie gelingt die Entwicklung von Ordnung aus Unordnung, die Ausbildung der damit einhergehen-

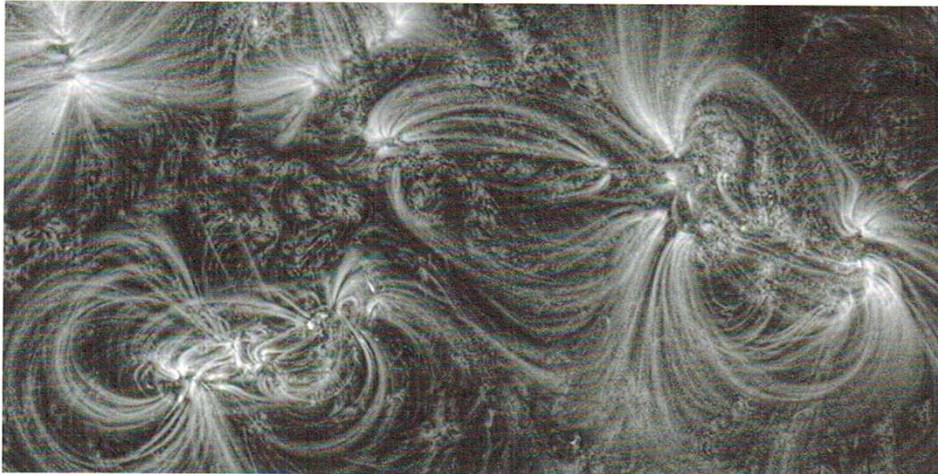
den inversen Energiekaskade von kleinen zu großen Skalen? Ein internationales Team von Wissenschaftlern hat jetzt erste Experimente im Laser-Labor der Universität von Rochester durchgeführt, anhand derer die Mysterien der Selbstorganisation elektromagnetischer Feldstrukturen im Universum gründlicher erforscht werden können [24].

Die Wissenschaftler beschlossen mit Hilfe des OMEGA EP (Extended Performance) Lasers gleichzeitig zwei im Abstand von nur 8 Millimetern befestigte, 2mm große und 0,5 mm dicke Plastik-Zielobjekte für $3 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ mit Laserpulsen der Leistung von 10^{15} Watt (Bild 7c). Dadurch wurden zwei Plasmaströme erzeugt, in denen die geladenen Teilchen aufeinander zu und wegen hoher Geschwindigkeiten von mehr als 1000 km/s wechselseitig nahezu stoßfrei aneinander vorbei liefen. Die Auswirkungen der dabei eintretenden elektromagnetischen Wechselwirkungsprozesse zwischen den sich durchdringenden beiden Teilchenströmen konnten anhand hochaufgelöster Röntgenaufnahmen studiert werden, die die Verteilung von seitlich in dieses Gebiet eingeschossenen geladenen Protonen abbildeten. Durch nur 10^{-12} s andauernde Laserbestrahlung von



8 Erforschung der magnetischen Rekonnexion in Laborversuchen: Darstellung des Wirkungsprinzips der Rekonnexion (8a), Schema des Spheromak Experiments in Livermore u.a. zum Nachweis der magnetischen Rekonnexion (8b), Nachweis der Rekonnexion im MRX Experiment (8c), geplantes Large Reconnection Experiment MRX-U (8d)
U. v. Kusserow, MRX/Princeton, SSPX/Livermore, MRX-U/PPPL(Text U. v. Kusserow).





9 Orte magnetischer Rekonnexionsprozesse auf der Sonne (SDO/AIA NASA/GSFC/M. Druckmüller)

zwei 2 mm großen Goldfolien konnten diese Teilchen erzeugt werden. Es wurden Zeitserien von Röntgenaufnahmen erstellt, die die Veränderung der Protonenverteilung auf Grund der sich zeitlich beim „kollisionsfreien Zusammenstoß“ der beiden Plasmaströme entwickelnden elektromagnetischen Felder dokumentierten (**Bild 7d**). Für die Wissenschaftler sehr überraschend, bildeten sich schon nach wenigen Nanosekunden parallele, Pfannkuchen ähnliche und vor allem auch zeitlich gesehen stabile Strukturen aus anfangs stark turbulent strukturierten Verteilungen aus. Die scharfkantigen Eigenschaften dieser Abbildungen sprechen dafür, dass sich in diesem Experiment organisierte elektromagnetische Felder ausgebildet haben [25]. Mit Hilfe noch leistungsfähigerer Laser soll anhand weiterer Experimente geklärt werden, ob es sich dabei um die Selbstorganisation vorwiegend elektrischer oder magnetischer Felder handelt.

Mit Hilfe von Laborexperimenten können vielleicht in Zukunft die bei jetartigen galaktischen Auswürfen, bei Supernova-Explosionen oder solaren Eruptionen ablaufenden stoßfreien Schocks besser erforscht werden.

Energiefreisetzung und Topologieänderungen durch magnetische Rekonnexion

Die Gewinnung von Erkenntnissen über relevante Strukturbildungs- und Entwicklungsprozesse im interstellaren und galaktischen Medium, in Stern- und Galaxienhaufen ist in der Astrophysik von zentraler Bedeutung. Magnetische Rekonnexion ist dabei der wichtigste

fundamentale Prozess im Zusammenspiel von Plasmamaterie und kosmischen Magnetfeldern. Er ist für das Aufbrechen und die topologische Reorganisation der Feldlinien verantwortlich. Bei der Transformation der Magnetfeldkonfigurationen wird die gespeicherte magnetische Feldenergie mehr oder weniger schnell in kinetische Energie umgewandelt. Teilchen werden in Flare-Prozessen stark beschleunigt. Die Materie wird aufgeheizt. Heftige Eruptionen können ausgelöst werden. Magnetische Rekonnexion ist für Selbstorganisationsprozesse im Plasma von herausragender Bedeutung [26].

Bei großer elektrischer Leitfähigkeit der Materie verhält sich das Magnetfeld üblicherweise wie in das Plasma „eingefroren“. Treffen jedoch Feldstrukturen mit entgegengesetzt orientierten Feldkomponenten aufeinander, so bilden sich zwischen ihnen schmale Stromschichten mit deutlich verstärkter Resistivität aus (siehe auch Teil 1 dieser Artikelserie). Die enge Kopplung zwischen den unterschiedlich geladenen Teilchenkomponenten des Plasmas und den Magnetfeldern bricht auf, die Felder diffundieren durch die Materie hindurch, der magnetische Rekonnexionsprozess beginnt. Im vereinfachten Modellbild (**Bild 8a**) verschmelzen die blaue und die schwarze Feldlinie miteinander. Instantan bilden sich dabei die beiden roten Feldlinien mit starker Krümmung aus. Ähnlich wie bei einem plötzlich unter hoher Spannung stehenden Gummiband bewirkt die den Feldstrukturen jetzt innewohnende große magnetische Spannung ein seitliches Herausschnellen der „möglichst kurzen“ Feldlinien. Außerhalb der Stromschicht verhalten sich die mitströ-

menden Partikel auf Grund der magnetischen Lorentzkraft wieder wie an die Feldlinien gebunden. Die Dynamik dieses Neuverbindungsprozesses beschreibende Rekonnexionsrate wird durch das Verhältnis der Geschwindigkeiten v_2/v_1 bestimmt [6].

Der Prozess der magnetischen Rekonnexion wird schon seit mehreren Jahrzehnten im Detail in geeigneten Laborexperimenten studiert. Nicht nur mit dem Magnetic Reconnection Experiment (MRX) im Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL) (**Bild 1b** im Teil 1, *rechts oben*) gelang der Nachweis der Existenz dieses Phänomens (**Bild 8c**), wurden viele theoretisch vermutete Aspekte überzeugend bestätigt. Auch mit dem Sustained Spheromak Physics Experiment (SSPX) in den Lawrence Livermore National Laboratories (LLNL) (**Bild 8b**), dessen vorrangiges Ziel die Erforschung der gewünschten magnetischen Kollimation von Plasma für zukünftige Fusionsreaktoren ist, wurde die Zerstörung geschlossener Magnetflussflächen durch magnetische Rekonnexions-Prozesse untersucht. Mit dem MRX-U, dem geplante Large Reconnection Experiment (LRE) der nächsten Generation (**Bild 8d**) mit seinen gewaltigen Abmessungen von 3m Durchmesser und 4m Länge und einem speicherbaren Energieumsatz von 4 Megajoule werden die Wissenschaftler die multiplen und schnellen Rekonnexionsvorgänge sowie die Teilchenbeschleunigung im turbulenten Plasma der Heliosphäre vor Ort im Labor in Zukunft noch intensiver erforschen können [27].

Fortsetzung folgt

Literatur

- [13] Kayser R.: Magnetfelder im jungen Kosmos, pro-physik.de, 2012 http://www.pro-physik.de/details/news/1453025/Magnetfelder_im_jungen_Kosmos.html
- [14] Gregori, G. u. a.: *Generation of scaled protogalactic seed magnetic fields in laser-produced shock waves*, NATURE Vol 481, 2012
- [15] v. Kusserow, U.: Über die Entstehung junger Sterne und Planeten (1) – Materie-Akkretion und der Transport des Drehimpulses. Nachrichten der Olbers-Gesellschaft 242, 2013 <http://uvkusserow.magix.net/website#Artikel>
- [16] Balbus, St. A. u. Hawley, J. F.: A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I. Linear Analysis. APJ 376, 1991 http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1991ApJ...376..214B&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf
- [17] Fromang, S.: MRI-driven Angular Momentum Transport in Protoplanetary Disks. EAS Publications Series, 2013 <http://arxiv.org/pdf/1305.3416.pdf>
- [18] PROMISE – Das magnetische Universum ins Labor geholt. AIP Highlights, 2007 http://ooo.aip.de/highlight_archive/promise_2006/index_de.html
- [19] Stefani, F. u. a.: Results of a modified PROMISE experiment. Astron. Nachr. 329, 2008 <http://www.aip.de/groups/MHD/publications/preprints/stefanietal.pdf>
- [20] Bohnet, Ch.: Facettenreiches magnetisches Phänomen erstmals im Labor nachgewiesen. Informationsdienst Wissenschaft e.V. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 2012 <http://www.schattenblick.de/infopool/natur/physik/npfor903.html>
- [21] Stefani, F. u. a.: How to circumvent the size limitation of liquid metal batteries due to the Taylor instability. Energy Conversion and Management, 2011 <http://arxiv.org/pdf/1005.5046v2.pdf>
- [22] Gregori, G. u. Reville, B.: Viewpoint: Turbulent Plasma in the Lab. Physics – spotlighting exceptional research, APS Physics 5, 2012 <http://physics.aps.org/articles/v5/141>
- [23] Drake, D. J. u. a.: Alfvén Wave Collisions, The Fundamental Building Block of Plasma Turbulence IV: Laboratory Experiment, 2013 <http://arxiv.org/abs/1306.1130>
- [24] Kugland, N.L. u. a.: Self-organized electromagnetic field structures in laser-produced counterstreaming plasmas. Nature Physics Vol. 8, No. 11, 2012 <http://www.readcube.com/articles/10.1038/nphys2434?locale=en>
- [25] Heller, A.: Chaotic Plasmas Give Birth to Orderly Electromagnetic Fields. Science & Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, 2013 <https://str.llnl.gov/content/pages/march-2013/pdf/3.13.4.pdf>
- [26] Paschmann, G.: Durchbruch auf ganzer Linie. Physik Journal 5, 2006 s.u. http://www.pro-physik.de/details/physikjournal/issue/1089745/Issue_3_2006.html
- [27] Ji, H. u. a.: Next Generation Experiment for Laboratory Investigations of Magnetic Reconnection Relevant to Heliophysics. PPPL, 2010 http://www8.nationalacademies.org/SSBSurvey/DetailFileDisplay.aspx?id=665&parm_type=HDS

Ulrich v. Kusserow
Besselstr. 32–34
28203 Bremen
E-Mail: uvkusserow@t-online.de