

KARL-OTTO ESCHRICH

Das Rätsel der Magnetfelder von Sonne und Erde

Hommage à Fritz Krause

Der Mathematiker und Physiker Fritz Krause, in Bergholz-Rehbrücke bei Potsdam lebend, ist am 27. März 2007 80 Jahre alt geworden. UTOPIE kreativ bekommt selten Manuskripte zugesandt, in denen es um Naturwissenschaften und Naturwissenschaftler geht. Umso erfreuter ist die Redaktion über den folgenden Text.

Zur Theorie des Magnetfeldes der Erde fehlte bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts ein wichtiger Baustein. Als verzweifelt absonderlichste Ideen entwickelt wurden, gelang Max Steenbeck, der sich für elektromagnetische Effekte in turbulenten, elektrisch leitenden Medien interessierte, und Fritz Krause der Durchbruch. Steenbeck stellte fest, dass in Richtung eines Magnetfeldes im Mittel ein elektrischer Strom induziert wird, und Krause erarbeitete die mathematisch-physikalische Theorie dazu. Der Alpha-Effekt – so nannten sie das Resultat ihres Forschens – erwies sich als der fehlende Baustein zur Dynamotheorie der Magnetfelder von Himmelskörpern.

Wer ist Fritz Krause?

Fritz Krause wurde am 14. März 1927 in Großsärchen, Kreis Sorau in der Niederlausitz, heute in Polen gelegen, geboren. Seine Eltern hatten eine Bäckerei. Die Flucht am Ende des II. Weltkrieges verschlug die Familie an verschiedene Orte im Osten Deutschlands, bis sie im Oktober 1945 in Friedrichroda in Thüringen eine Heimstatt fand. Noch lange spielte in seinen Lebenserzählungen der *Wald* eine entscheidende Rolle. Unweit des Thüringer Waldes nahm er im Herbst 1946 ein Mathematikstudium in Jena auf, im bekannten Abbeanum, wo er auch Vorlesungen über Physik und Astronomie besuchte. Nach dem Abschluss als Diplommathematiker 1951 blieb er als Assistent am Institut, das er mit seiner Promotion 1958 verließ. Nicht nur das wissenschaftliche Milieu, auch die ausgeprägten persönlichen Beziehungen der Mathematiker an dem kleinen Institut begeisterten und prägten ihn.

Nach Abschluss der Ausbildung war es nicht einfach, eine Arbeitsstelle zu finden. So glücklich Fritz Krause mit der Gründung seiner Familie im Jahre 1958 war, aus der zwei Söhne entstammen, so bedrückend waren die Zukunftsaussichten. Durch eine für ihn zufällige Fügung kam Max Steenbeck nach Jena. Der verdiente Wissenschaftler, der in der Sowjetunion die Ultrazentrifugen zur Anreicherung des Urans maßgeblich entwickelt hatte und deshalb dort mit höchsten Auszeichnungen bedacht worden war, hatte in der DDR großes wis-

Karl-Otto Eschrich war ab 1970 mehr als ein Jahrzehnt bei Prof. Kritz Krause tätig. Nach einer Idee Krauses konnte er in einer gemeinsamen Veröffentlichung 1974 erklären, weshalb die Sonnenflecken weniger heiß und somit dunkler sind.

senschaftliches und auch politisches Gewicht und nahezu alle Freiheiten. Am Berghang oberhalb des Abbeanums wurde sein »Privatinstitut« für Magnetohydrodynamik, eingebunden in die Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, untergebracht. Steenbeck kehrte zu seinem alten Aufgabengebiet, der Plasmaforschung, zurück, das wichtig war für die Entwicklung der Leuchtstoffröhren, bedeutend aber auch in der Astrophysik, kurz: überall da, wo elektrisch leitende Gase oder Flüssigkeiten existieren. Dazu brauchte er junge Wissenschaftler, Techniker, Physiker und Mathematiker. So konnte Fritz Krause bei ihm noch im Herbst 1958 eine Anstellung finden – ebenso wie Karl-Heinz Rädler, der aus Leipzig zur Steenbeck-Gruppe stieß. Die von Steenbeck entwickelte Betrachtung der elektromagnetischen Effekte in Verbindung mit der Strömungsmechanik war Neuland in der Astrophysik. Erste Ergebnisse wurden in einer Sitzung der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 21. Juni 1962 präsentiert.

Es gab – und gibt – das große Problem der chaotisch brodelnden Materie. Ob im Inneren der Erde oder anderer Gesteinsplaneten, ob in der Konvektionszone der Sonne oder anderer Sterne, ob in den extrem dünnen, aber weit ausgedehnten Gasen der Milchstraße oder anderer Sternsysteme, der Galaxien: Immer wieder taucht diese schwer zu fassende Bewegung auf. In der Strömungsmechanik stieß man im Flugzeugbau bei der Umströmung der Tragflügel zuerst auf dieses – dort Turbulenz genannte – Phänomen. Die Ursachen dieser Bewegungen sind zwar verschieden, mathematisch handelt es sich um die gleiche Erscheinung.

Für die Strömungslehre hat bereits Ludwig Prandtl am Ende des 19. Jahrhunderts eine Lösungsmöglichkeit gezeigt, wenn in einer Strömung zwei unterschiedlich große Skalen vorhanden sind: im Großen eine laminare, gleichförmige, und im Kleinen – in kleiner Ausdehnung und auch im kürzeren Zeitmaßstab – die relativ ungeordnete, verwirbelte, eben: turbulente Strömung. Verallgemeinert und mathematisch abgehandelt hat dies der in Großbritannien und später in den USA tätige indische Mathematiker, Physiker, speziell auch Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar. Er führte u. a. die Methode der mittleren (großskaligen) und der schwankenden (kleinskaligen) Felder ein. Unter »Feld« wird in der Physik ein Geschwindigkeitsfeld, Temperaturfeld, Druckfeld, Kraftfeld, Magnetfeld, elektrisches Feld usw. verstanden. Chandrasekhars Methode wandte Rädler auf den elektrischen (oder Ohmschen) Widerstand an. Er berechnete, wie eine kleinskalige Bewegung den als Materialeigenschaft vorhandenen, in Tabellenbüchern angegebenen, elektrischen Widerstand im großskaligen Bereich scheinbar verändert. Die »Strombahn« wird zerknittert und somit verlängert, was im Großen als Zunahme des Widerstandes erscheint, er nimmt effektiv im Vergleich zur Materialgröße zu.

Im Gegensatz zur Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit nimmt in turbulenten Medien die effektive Wärmeleitfähigkeit zu. Und für den einfachen Fall inkompressibler Medien berechnete dies mit der Chandrasekharschen Methode der gemittelten Felder nun Fritz Krause. Wird kleinskalig »gerührt«, wird das Temperaturfeld schneller ausgeglichen.

Komplizierter ist es bei so genannten Vektorfeldern, denen im Gegensatz zu den Skalarfeldern (wie Druck und Temperatur) in einem Raumpunkt nicht nur ein einziger Wert zugeordnet wird, sondern ein

Vektor, eine gerichtete Größe, der drei Werte – jeder Raumdimension einer – zugeordnet werden müssen. Das führt u. U. dazu, dass ein elektrischer Strom nicht genau in Richtung des angelegten elektrischen Feldes fließt oder in Richtung von Magnetfeldwirbeln, sondern ein elektrischer Strom kann in Richtung eines Magnetfeldes strömen! Das hängt von den Symmetrieeigenschaften der (doch nicht ganz) chaotischen kleinskaligen Bewegung ab. So haben z. B. bei der Sonne die heißen, aufsteigenden Gasblasen – hier als die kleinskalige Bewegung angesehen – einen bevorzugten Drall auf Grund der Rotation der Sonne, und bei den absteigenden Gasblasen ist der Drall umgekehrt. Diese sich drehend aufsteigenden Gasblasen verdrehen ein ursprünglich gleichförmiges Magnetfeld. Das magnetische Wirbelfeld wiederum erzeugt nach den üblichen Gesetzen der Elektrodynamik einen elektrischen Strom in Richtung der Wirbelachse. Das ist gerade die Umkehrung der jedem Elektrotechniker bekannten Tatsache, dass um einen elektrischen Strom, beispielsweise durch einen Metalldraht, ein magnetisches Wirbelfeld erzeugt wird.

Beim großskaligen Magnetfeld wirkt es dann so, dass in Richtung des Magnetfeldes ein elektrischer Strom fließt – der eingangs bereits genannte Alpha-Effekt.

Als Steenbeck 1965 auf einer Tagung der damals noch gesamtdeutschen Astronomischen Gesellschaft in Eisenach über seine und Fritz Krauses Entdeckung erstmals berichtete, kam es zum Eklat. Der Vortrag, so berichtete Krause 30 Jahre später, sei, obwohl gut organisiert und gut durchdacht, völlig daneben gegangen: Schweigen, keine Reaktion im Auditorium, keine Diskussion. Steenbeck, sichtlich schockiert, habe noch im Abgehen wenigstens aus dem Kollegen Lamprecht von der Universitätssternwarte Jena ein Urteil herauszuquetschen versucht, der habe sich jedoch verlegen gewunden und von einer »persönlichen Insuffizienz« gesprochen. Steenbeck habe den Konferenzraum verlassen, sei in sein Auto gestiegen und abgebraust, zurück nach Jena – Rädler und ihn, Krause, einfach zurücklassend.

Das ist die typische Situation, wenn die Zuhörer nur Bahnhof verstanden haben. Aber mit dem Alpha-Effekt war der fehlende Baustein zur Dynamotheorie der Magnetfelder von Himmelskörpern gefunden.

Was versteht man unter einem kosmischen Magnetfeld-Dynamo? In der Elektrotechnik ist ein Dynamo eine Maschine, die mechanische in elektrische (und leider auch thermische) Energie wandelt. Genutzt wird die Tatsache, dass sich um ein zeitlich änderndes Magnetfeld ein ringförmiges elektrisches Feld aufbaut. Legt man entlang des elektrischen Feldes eine offene Drahtschleife, hat man an den Enden eine elektrische Spannung. Die Spannung kann man durch Drähte wegführen und durch den Anschluss einer Glühlampe oder eines anderen Verbrauchers einen elektrischen Strom fließen lassen. Die Wirkung kann man vervielfachen, indem man mehrere Drahtschleifen zu einer Spule hintereinander legt. Wichtig ist dabei, dass die Drahtschleifen der Spule voneinander elektrisch isoliert sind. Die Magnetfeldänderung in der Spule kann man durch eine Bewegung, insbesondere eine Drehung, erreichen. Elektrodynamisch gesehen handelt es sich hier um eine nicht mehr so einfache geometrische Struktur. Ein Mechanismus zur Wandlung von Zuständen muss eine minimale Komplexität aufweisen; die einzige Ausnahme ist die Erzeugung von Wärme.

Seit Urzeiten ist bekannt, dass die Erde ein globales Magnetfeld hat. Zugvögel, bestimmte Fische, Meeresschildkröten und andere Tiere orientieren sich am Erdmagnetfeld. Über Tausende bis Hunderttausende Jahre ändert sich dieses Magnetfeld kaum, kann innerhalb relativ kurzer Zeit – in eintausend bis höchstens zehntausend Jahren – zerknittern und sich anders wieder aufbauen. Anders ist es bei der Sonne, wie man seit gut hundert Jahren weiß. Aus ihr tritt ein Dipolfeld aus, das in 11 Jahren auf und wieder abgebaut wird, um in den nächsten 11 Jahren in umgekehrter Polung wiederum zu entstehen und zu vergehen. Innerhalb der Sonne, im oberen Drittel, gibt es Ring- bzw. Gürtelfelder beiderseits des Sonnenäquators, deren Symmetrieachse mit der Rotationsachse zusammenfällt. Die Richtung der Gürtelfelder ist in beiden Halbkugelschichten gerade umgekehrt. Die Stärke dieser Felder wechselt ebenfalls im 11-Jahres-Rhythmus, haben ihren größten Wert, wenn die Dipole den kleinsten haben, und umgekehrt. Das Sonnenmagnetfeld schaukelt zwischen Dipol- und Gürtelfeldern also im 22-Jahres-Rhythmus hin und her. Man muss hinzufügen, dass so ein Gürtelfeld nicht ein einheitliches Gebilde ist, sondern durch die Rückwirkung der Magnetfeldkräfte auf die Bewegung in viele dünne Schläuche zerfasert.

Woher weiß man von der Existenz der Gürtelfelder, obwohl man nicht in das Innere der Sonne hineinschauen kann? Die Feldstärke dieser Magnetfeldringe ist sehr hoch, viel stärker als die der Dipole. Das Magnetfeld hat auch einen Druck, der einen Teil des Gases verdrängt, wodurch andererseits diese Schläuche leichter werden. Somit existieren zwei Kräfte in radialer Richtung: Einerseits zieht das Feld die Ringe zusammen, andererseits werden sie durch den Auftrieb Richtung Oberfläche gedrückt, also auseinandergezogen. Das ist ein einigermaßen stabiler Zustand. Wird er jedoch einmal durch eine besonders große aufsteigende Gasblase gestört, gewinnt der Auftrieb die Oberhand, dann bläht sich weiter oben in der dünneren Schicht der Magnetschlauch weiter auf und wird noch leichter. Der gesamte Vorgang wird quasi bis zu einer Explosion beschleunigt, die durch die Sonnenoberfläche hindurch bricht und als Protuberanz bekannt ist. Dort, wo der Magnetfeldschlauch aus der Sonnenoberfläche herausbricht, sieht man einen Sonnenfleck, und man kann von der Erde aus die Stärke des Feldes messen (durch das Maß der Aufspaltung von Spektrallinien). Übrigens war im 19. Jahrhundert das Astrophysikalische Observatorium in Potsdam bei der Entwicklung und Anwendung der dazu nötigen Methoden führend.

Was macht nun ein kosmischer Magnetfelddynamo und wie funktioniert er? Wie ein technischer Elektrodynamo wandelt er mechanische Energie in elektrische und magnetische Felder und elektrische Ströme – aber auf gänzlich andere Weise. Schließlich gibt es im Inneren der Erde und erst recht im Inneren der Sonne, ebenso in den Weiten einer Galaxis, keine Drahtspulen. Und man kann sich denken, dass der Mechanismus auf Grund einer minimalen Komplexität nicht so einfach auszudenken ist. Jahrzehnte zermarterten Astronomen sich darüber ihre Köpfe. Einen Mechanismus fanden sie heraus: wie aus einem magnetischen Dipolfeld die Gürtelfelder entstehen. Dazu muss man wissen, dass eine rotierende Gas- oder Flüssigkeitskugel sich auf Grund der Fliehkräfte nicht nur abplattet. Sie rotiert außerdem un-

gleichmäßig, die inneren Bereiche anders als die äußeren, ebenso die verschiedenen Breitengrade – in der Fachsprache differentielle Rotation. Da ein bewegtes, elektrisch leitendes Medium ein vorhandenes Magnetfeld in bestimmtem Maße »mitnimmt«, wandelt die differentielle Rotation ein Dipolfeld in Gürtelfelder um, die Feldlinien werden quasi aufgewickelt; in beiden Hemisphären jenseits der Äquatorebene in unterschiedliche Richtung.

Und wie entsteht aus den Gürtelfeldern wieder ein Dipolfeld? Da brachten Steenbeck und Krause den Alpha-Effekt ins Spiel. Der Alpha-Effekt hat auf beiden Halbkugeln verschiedene Vorzeichen, da aufsteigende Turbulenzelemente dort entgegengesetzten Drehsinn haben. Das führt dazu, dass entsprechend dem Alpha-Effekt die Magnetgürtelfelder in beiden Hemisphären elektrische Ströme in gleicher Richtung erzeugen. Und hier ist auch dem Laien klar: Diese Ströme bewirken ein magnetisches Dipolfeld. Womit der Ausgangszustand wieder erreicht ist. Beschrieben zu haben, wie das genauer aussieht – auch hinsichtlich eines Gleichfeld- oder eines Wechselfelddynamos –, ist die Leistung des ungleichen Paares Steenbeck-Krause. Bei einem Gleichfelddynamo liegen die Wirkmechanismen differentielle Rotation und Alpha-Effekt räumlich in einem Gebiet, bei einem Wechselfelddynamo sind sie räumlich getrennt. Die Diffusionszeiten der Magnetfelder zwischen beiden ergeben die Zeit einer halben Periode. Krause brachte das ganze in mathematische Form und habilitierte sich damit an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität in Jena im Jahre 1968.

Mit dieser glanzvollen Leistung schloss er seine Tätigkeit bei Steenbeck ab und wechselte zusammen mit Rädler an das Astrophysikalische Observatorium in Potsdam, wo er eine eigene Abteilung bekam und Mitarbeiter einstellen konnte. Noch in Jena nahm das Triumvirat die Unterstützung des Mathematikers H. Hiller in Anspruch, der in Pionierarbeit erste Computerprogramme zur Berechnung der Magnetfelder schrieb und in Dresden am Institut für Datenverarbeitung auf einer englischen »National-Elliot 503« die Rechnungen ausführte. Seitens der Führung der DDR wurde die Leistung der Vier im Jahre 1971 mit dem Nationalpreis für Wissenschaft und Technik erster Klasse gewürdigt. In der Folgezeit wurden die Modelle verfeinert und die Methoden auf andere Gebiete der Astrophysik angewandt. 1977 wurde Fritz Krause vom Akademiepräsidenten zum Professor für Theoretische Physik ernannt, und 1981 wurde er Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher LEOPOLDINA. Bei der Evaluierung 1991 wurden seine Leistungen und die seiner Abteilung als international führend anerkannt. Die weltweite Anerkennung erfolgte spätestens auf dem Symposium der Internationalen Astronomischen Union (IAU) im Jahre 1992.

In den 1990er Jahren entwickelte Krauses Mitarbeiter Detlef Elstner einen magnetohydrodynamischen Scheibendynamo zur Erklärung der Magnetfelder in Galaxien. Da man auf Grund der geringen Dichte in weite Bereiche der Galaxien hineinschauen kann, wurden die Gürtelfelder den Messungen unmittelbar zugänglich, wodurch Krauses Dynamomechanismus auf sichtbare Weise bestätigt werden konnte.