

# Ein Stern als Dynamo

von Michael Stix

*Jedermann kennt den Dynamo: Eine Maschine, die den elektrischen Strom der Fahrradbeleuchtung liefert. Oder die, im Kraftwerk, elektrische Energie für Haushalt, Industrie und Verkehr bereitstellt. In der Maschine dreht sich ein Anker, und eine geschickte Anordnung von Spulen sorgt für elektrische Spannung und Strom. Aber ein Stern als Dynamo? Wo dreht sich da etwas? Wo fließt der Strom? Und braucht man das überhaupt, so einen Stern-Dynamo?*

## Stellare Aktivität

Ja, man braucht den Stern-Dynamo. Dazu muss man sich daran erinnern, dass ein elektrischer Strom immer von einem Magnetfeld begleitet wird. Umgekehrt gilt: Jedes magnetische Feld kann auf einen elektrischen Strom zurückgeführt werden. Und dass Magnetfelder auf Sternen vorhanden sind, weiß man seit langem.

Am bekanntesten ist das Magnetfeld der Sonnenflecken. *George Ellery Hale* konnte es schon 1908 mit Hilfe der Zeeman-Aufspaltung der Spektrallinien nachweisen. Aber auch alle anderen Erscheinungen der Sonnenaktivität haben ihren Ursprung im Magnetismus der Sonne: Protuberanzen, plötzliche Ausbrüche von Strahlung und energiereichen Teilchen, die Struktur der Korona, etc. Bei den im **Bild 1** gezeigten Beispielen kann man das Magnetfeld förmlich sehen, da das elektrisch leitfähige Gas sich an ihm orientiert.

Sonnenflecken haben eine Lebensdauer von Wochen, oft sogar Monaten. Über die Beobachtung großer Flecken mit dem bloßen Auge wurde in China schon im Altertum Buch geführt. In Europa werden sie seit der Erfindung des Fernrohres um 1610 systematisch verfolgt. Heute ist für viele Sterne ein Magnetfeld nachgewiesen, und ebenso kennt man die durch das Feld verursachten Erscheinungen, z. B. Flecken, auf Sternen. Allerdings sind die Sterne so weit entfernt, dass man bei

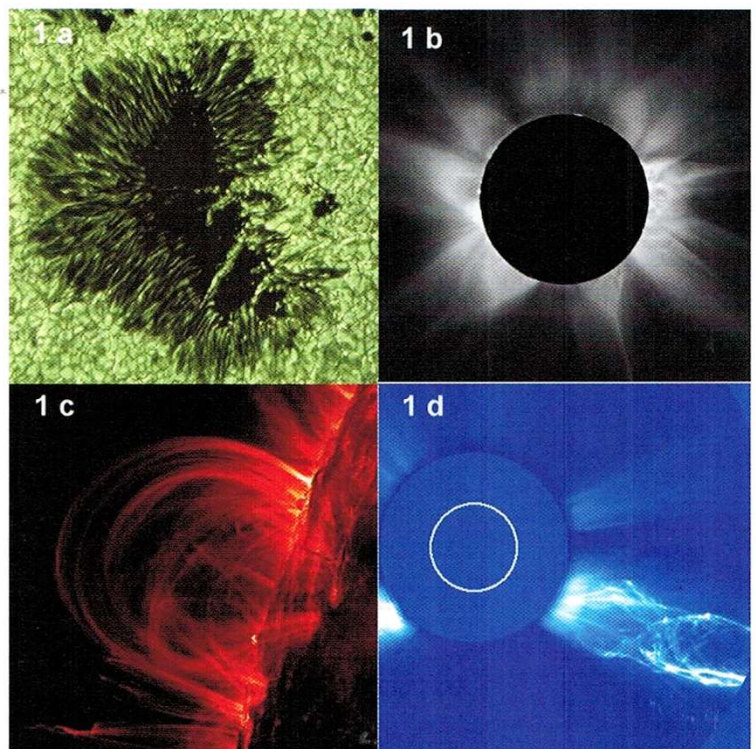
keinem einzigen Details wie in Bild 1 sehen kann. Jedoch zeigen ihre Spektrallinien oft dieselben Eigentümlichkeiten, die bei der Sonne auf das magnetische Feld zurückgeführt werden. Daneben kann sich magnetische Aktivität durch die Röntgenstrahlung einer stellaren Korona sowie durch die Helligkeitsvariation eines Sterns verraten. Für ca. 50 Sterne wurde bisher nachgewiesen, dass sie magnetische Zyklen besitzen (**Bild 2**), ähnlich dem 11-jährigen Sonnenzyklus, der weiter unten besprochen wird.

## Der homogene Dynamo

Sterne bestehen aus Gas. Schon an ihrer Oberfläche sind sie so heiß, dass ein Teil der Elektronen von den Atomen abgetrennt ist, das Gas ist ionisiert. Im Innern der Sterne, wo eine Temperatur von Millionen Kelvin herrscht, ist die Ionisation der häufigsten Elemente, Wasserstoff und Helium, sogar vollständig. Ein ionisiertes Gas heißt auch Plasma. Im Plasma existieren freie Ladungen in großer Zahl; diese fungieren als Träger des elektrischen Stromes ebenso wie die Elektronen in einem metallischen Leiter.

Die Dynamomaschine funktioniert nach dem Prinzip der Induktion: Man bewege einen Leiter quer zu einem Magnetfeld (welches schon existieren muss, aber noch sehr schwach sein darf) und induziere auf diese Weise in dem Leiter einen elektrischen Strom. Gelingt es, den Strom so fließen zu

**1** Magnetisch kontrollierte Sonnenaktivität. a: Sonnenfleck inmitten granular strukturierter Sonnenoberfläche. b: Korona zur Zeit des Flecken-Maximums 1980. c: Feinstruktur der Korona. d: Eruptive Protuberanz mit Materie-Auswurf. (Deutsches Vakuum-Turm-Teleskop, Teneriffa; High Altitude Observatory, Boulder, CO; Satellit TRACE; Koronograph LASCO auf dem Satellit SOHO)





lassen, dass sein Magnetfeld das ursprüngliche Feld verstärkt, so hat man einen selbsterregten Dynamo.

Grundsätzlich könnte im Stern der Induktionsmechanismus wie bei einer Dynamomaschine arbeiten: Man stelle sich vor, ein anfängliches (schwaches) Magnetfeld sei vorhanden; man bewege das stellare Plasma quer zu diesem Feld und induziere auf diese Weise in dem Plasma einen elektrischen Strom. Der Ire *Sir Joseph Larmor* hat dies 1919 als Erster vorgeschlagen. Ob es allerdings gelingt, mit dem Magnetfeld dieses Stromes das Anfangsfeld zu verstärken, das ist die Frage. Im Gegensatz zum maschinellen Dynamo, in welchem eine sinnreiche Anordnung von Leiterwindungen stets den richtigen Stromfluss erzwingt, ist in einem Stern wie der Sonne jede beliebige Stromführung möglich. Es gibt keine voneinander isolierten Leiter, ein „Kurzschluss“ ist jederzeit und überall möglich. Der Stern besteht durch und

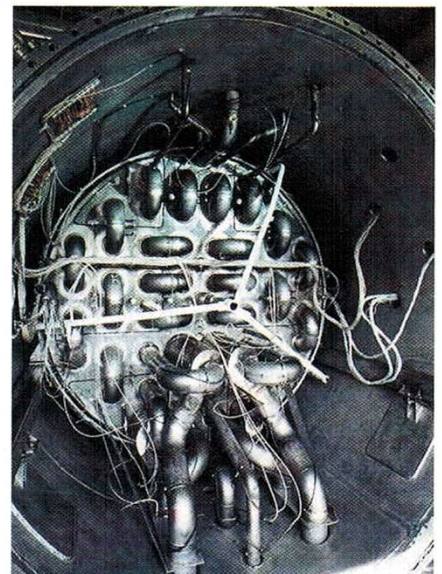
durch aus elektrisch leitfähigem Plasma. Man spricht deshalb auch von einem homogenen Dynamo.

Lange Zeit war es unklar, ob solch ein homogener Dynamo funktionieren kann. Erst etwa 40 Jahre nach *Larmors* Vorschlag konnte man zeigen, dass dies in der Tat möglich ist. Und erst in den letzten Jahren ist es gelungen, homogene Dynamos zu bauen (**Bild 3**). Um deren Wirkungsweise zu verstehen, muss zunächst etwas zur Wechselwirkung zwischen einem Magnetfeld und einem Plasma gesagt werden. Anschließend soll der Dynamomechanismus am Beispiel der Sonne erläutert werden.

### Eingefrorenes Magnetfeld

Für einen guten elektrischen Leiter gilt das Prinzip der „eingefrorenen Feldlinien“, welches besagt, dass der gesamte magnetische Fluss, der den Leiter durchdringt, bei einer Bewegung des Leiters mitgeführt wird. Man stelle sich in dem Plasma eine geschlossene Kurve vor, die durch die Strömung im Laufe der Zeit gedehnt und verformt werden kann, dabei aber eine geschlossene Kurve bleibt. Zu einem gegebenen Zeitpunkt umschließen die Kurve einen magnetischen Fluss, den man durch eine bestimmte Anzahl magnetischer Kraftlinien, die „Feldlinien“, beschreiben kann. Während die Kurve im Plasma „mitschwimmt“, kann der umschlossene Magnetfluss sich aus zwei Gründen ändern: Entweder das Magnetfeld selbst ändert sich, oder es gehen seitlich Feldlinien verloren. Das Induktionsprinzip besagt nun, dass diese beiden Flussänderungen sich gerade kompensieren, wenn die elektrische Leitfähigkeit sehr hoch ist. Der Magnetfluss bleibt also fest mit dem bewegten Plasma verbunden; die Feldlinien verhalten sich so, als seien sie in der Materie „eingefroren“. Im Gegensatz dazu kann ein Isolator durch ein Magnetfeld hindurch geführt werden, ohne dass eine Wechselwirkung stattfindet.

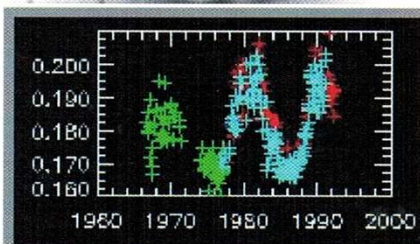
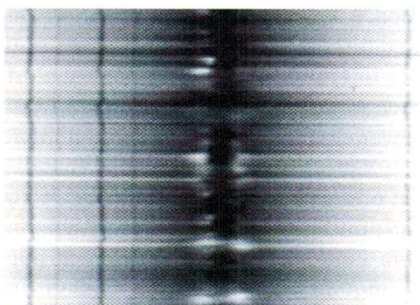
Wenn das Feld im bewegten Plasma einfach mitschwimmt, so sollte es sich in einem ruhenden Medium überhaupt nicht ändern. Man muss daher noch einmal fragen: Braucht man eigentlich einen Dynamo? Das Magnetfeld könnte ja von Anfang an unver-



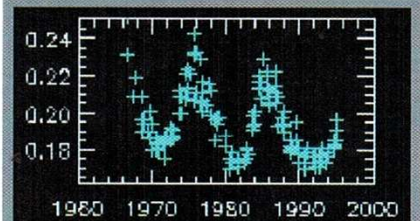
**3** Ein homogener Dynamo. In einem Behälter von 2 m Durchmesser wird flüssiges Natrium durch gewundene Rohre gepumpt. Innerhalb der Rohre bekommt die Strömung durch eingebaute Spindeln eine helix-artige Form (was auf Sternen durch die Corioliskraft geschieht). Als Anfangsfeld dient das Erdmagnetfeld. Durch Induktion wird ein eigenes Magnetfeld erzeugt, obwohl sich der elektrische Strom im Behälter beliebig kurzschließen kann. (Forschungszentrum Karlsruhe)

ändert da sein, d. h. aus der Zeit der Sternentstehung stammen. Dazu ist zu bemerken, dass die Leitfähigkeit  $\sigma$  des stellaren Gases zwar sehr hoch ist, aber nicht unendlich hoch. Deshalb klingt ein elektrischer Strom nach einer, wenn auch langen Zeit ab, ebenso wie in einem metallischen Leiter. Im metallischen Leiter ist die Abklingzeit proportional zum Inversen des Widerstandes, d. h. proportional zum Produkt aus  $\sigma$  und dem Querschnitt. Entsprechend ist in einem Stern die Abklingzeit eines elektrischen Stromes  $T_D \sim \sigma R^2$ , wobei  $R$  der Radius des Sterns ist. Der Index  $D$  steht für „Diffusion“, da man sich vorstellen kann, dass das mit dem abklingenden Strom verknüpfte Magnetfeld aus dem Leiter bzw. Stern herausdiffundiert. Das Prinzip der eingefrorenen Feldlinien ist für Zeiten der Größenordnung  $T_D$  eben nicht mehr gültig.

Für eine Kugel aus Kupfer von der Größe eines Fußballs beträgt  $T_D$  ca. eine Sekunde. Die Erde besitzt einen Kern vom Radius 3500 km, welcher hauptsächlich aus Eisen und Nickel besteht. Für diesen elektrisch leitfähigen Kern beträgt die Abklingzeit ca.  $10^4$  Jahre. Andererseits zeigen Untersuchungen von magnetisierten Gesteinen, dass das Erdmagnetfeld schon sehr



The Sun (G2V) 10.0 yrs



HD 10476 (K1V) 9.6 yrs

**2** Nachweis stellarer Aktivität. Oben: Teil des Sonnenspektrums – Absorptionslinie des Kalzium-Ions bei 393,37 nm mit Emissionsgebieten. Mitte: Kalzium-Emission der gesamten Sonne. Unten: Kalzium-Emission des Sterns HD10476. (Schauinsland-Observatorium, Freiburg; S. Baliunas, CfA Cambridge, MA.)



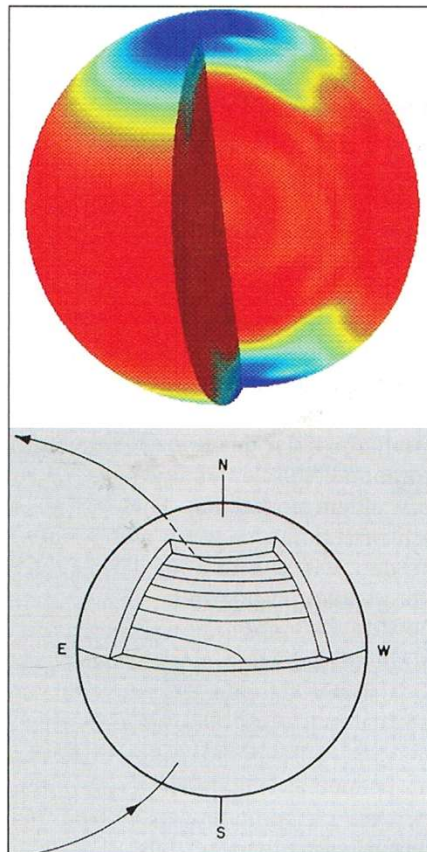
viel länger besteht. Das bedeutet, die Erde benötigt einen Dynamo, der dem Abklingen von Strom und Magnetfeld entgegen wirkt.

Bei Sternen ist es etwas komplizierter. Ihr Radius ist so groß, dass die Abklingzeit  $T_D$  dem Sternalter gleichkommen kann; bei jungen Sternen kann sie dieses sogar weit übertreffen. Dementsprechend gibt es durchaus magnetische Sterne, die ohne einen Dynamo auskommen. Auch für die Sonne ist  $T_D$  ungefähr gleich ihrem Alter, worauf *Thomas Cowling*, einer der Pioniere der Dynamotheorie, schon 1945 hingewiesen hat. Allerdings sind hier zwei Dinge zu berücksichtigen: Erstens haben Sterne vom Typ der Sonne eine ausgedehnte Konvektionszone, in der das Plasma in verwirbelten Zellen auf- und abströmt; man muss hier statt des Sternradius das Ausmaß solcher Zellen einsetzen, was die Abklingzeit  $T_D$  erheblich verkürzt. Zweitens wechselt, wie im folgenden Abschnitt erläutert wird, das solare Magnetfeld sein Vorzeichen mit einer gegenüber  $T_D$  kurzen Periode von 11 Jahren; wie wir sehen werden, kann dies ein Dynamo bewerkstelligen.

### Der magnetische Sonnenzyklus

*Heinrich Samuel Schwabe* aus Dessau zeigte 1844, dass die Häufigkeit der Sonnenflecken zyklisch schwankt – der Abstand zwischen zwei Häufigkeitsmaxima beträgt im Mittel 11 Jahre. Dabei treten Sonnenflecken meist als magnetisch bipolare Gruppen auf, d. h. ein Fleck mit magnetischem Nordpol zusammen mit einem Fleck mit magnetischem Südpol. Die Verbindungslinie der beiden Pole ist stets mehr oder weniger in Ost-West-Richtung, d. h. in Richtung der Rotationsbewegung, orientiert. Nach 15 Jahren Beobachtung konnte *Hale* 1923 für die bipolaren Gruppen folgende Polaritätsregeln formulieren:

- Während eines 11-Jahreszyklus ist die magnetische Orientierung für alle bipolaren Gruppen einer Sonnenhemisphäre dieselbe: Der im Sinne der Rotation vorangehende Fleck ist stets ein Nordpol oder stets ein Südpol.
- Die bipolaren Gruppen der beiden Hemisphären haben entgegengesetzte magnetische Orientierung.



4 Oben: Rotation im Inneren der Sonne, mit Gebieten schnellerer (rot) und langsamerer Rotation (blau), nach Messungen des Michelson Doppler Imager an Bord des 1996 gestarteten Satelliten SOHO. Unten: Produktion eines zum Äquator antisymmetrischen toroidalen Magnetfeldes durch differentielle Rotation, nach *H. W. Babcock*. Von der schnelleren, tieferliegenden Schicht wird das Feld „aufgewickelt“.

- Die magnetische Orientierung der bipolaren Gruppen wechselt von einem 11-Jahreszyklus zum folgenden ihr Vorzeichen. Ein magnetischer Sonnenzyklus dauert also 22 Jahre.

### Toroidales und poloidales mittleres Magnetfeld

Die Hale'schen Polaritätsregeln lassen sich durch ein unter der Sonnenoberfläche verlaufendes mittleres toroidales Magnetfeld deuten, welches zur Äquatorebene antisymmetrisch ist und sein Vorzeichen im 11-Jahreszyklus wechselt. „Toroidal“ bedeutet, dass die Feldlinien einen Ring (Torus) ausfüllen, dessen Symmetrieachse die Rotationsachse der Sonne ist. Sonnenflecken entstehen in dieser Vorstellung als Abweichungen vom Mittel: Einzelne Stränge von Feldlinien beulen sich nach oben aus, treten durch die Ober-

fläche nach außen und bilden dort eine bipolare Gruppe.

Das eben beschriebene toroidale Magnetfeld ist nicht die einzige Komponente des mittleren Feldes der Sonne. Korona-Aufnahmen (Bild 1) suggerieren ein Feld auch außerhalb der Sonne, und in der Tat ist das Magnetfeld in den Polkappen der Sonne nachgewiesen. Ebenso wie das toroidale Feld ist dieses poloidale Magnetfeld antisymmetrisch zum Äquator und unterliegt Umpolungen im 22-jährigen Zyklus.

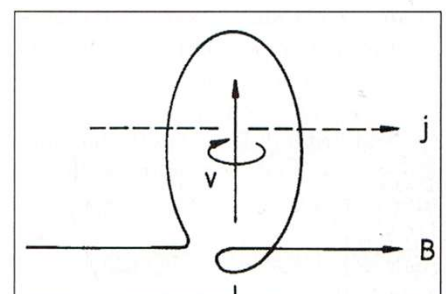
### Der Sonnen-Dynamo

Aus der Doppler-Verschiebung solarer Spektrallinien können wir auf vielerlei materielle Strömungen auf der Sonne schließen. Sowohl auf- und absteigende Gasmassen als auch horizontale Bewegungen des solaren Gases sind nachgewiesen.

### Differentielle Rotation

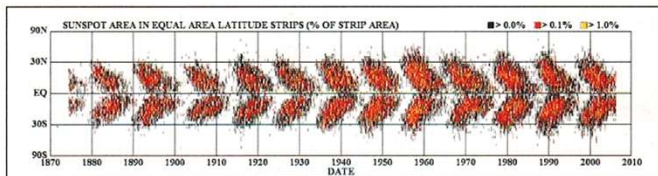
Schon im frühen 17. Jahrhundert bemerkte *Christoph Scheiner*, dass äquatornahe Sonnenflecken in kürzerer Zeit über die sichtbare Sonnenscheibe wandern als Flecken in höheren Breiten. Später leitete man aus der scheinbaren Fleckenbewegung wie auch aus Doppler-Verschiebungen der Spektrallinien das Gesetz der differentiellen Rotation ab: Die Sonne rotiert nicht wie ein starrer Körper, sondern verschraubt sich ständig in sich selbst. Die (siderische) Rotationsperiode nimmt vom Äquator, wo sie ca. 25 Tage beträgt, zu den Polen hin zu: dort überschreitet sie 30 Tage.

Nicht nur die Breitenabhängigkeit der Rotation, sondern auch ihre Tiefenabhängigkeit ist für den Dynamo von Interesse. Hierzu hat die Helioseismologie in den letzten Jahrzehnten schöne



5 Aufsteigende Strömung  $v$  unter dem Einfluss der Corioliskraft und ihre Wirkung auf ein toroidales Magnetfeld  $B$ . Der erzeugten Magnetfeldschleife entspricht ein elektrischer Strom  $j$ .





**6** Schmetterlingsdiagramm: Bedeckung durch Sonnenflecken in Breitenstreifen gleicher Fläche als Funktion der Zeit (D. H. Hathaway, NASA).

Ergebnisse geliefert. Dazu vergewenwärtige man sich, dass die Sonne eine Gaskugel im hydrostatischen Gleichgewicht ist. Störungen dieses Gleichgewichtes, d. h. kleine Verschiebungen und Druckstörungen, breiten sich mit Schallgeschwindigkeit aus. Störungen, die in Rotationsrichtung laufen, sind etwas schneller als diejenigen, die gegen die Rotationsrichtung laufen. Aus dem Unterschied, den man messen kann, wird die Geschwindigkeit der Rotation als Funktion von Breite und Tiefe bestimmt. Ein Beispiel, für welches Messungen des Satelliten SOHO verwendet wurden, zeigt **Bild 4**.

Aufgrund des Prinzips der eingefrorenen Feldlinien sieht man leicht, wie aus einem poloidalen Magnetfeld durch differentielle Rotation ein toroidales Feld erzeugt werden kann. Wie Bild 4 zeigt, wird dabei die gewünschte Antisymmetrie bezüglich des Äquators automatisch mitgeliefert. Das toroidale Feld kann dabei – auch bei schwachem poloidalem Ausgangsfeld – eine beträchtliche Stärke erreichen. Man muss nur die differentielle Rotation hinreichend lange „wickeln“ lassen.

#### Vollendung des Zyklus

Nun möchte ich erläutern, wie aus dem eben beschriebenen toroidalen Magnetfeld ein neues poloidales Feld, mit dem umgekehrten Vorzeichen des Ausgangsfeldes, entstehen kann. Dazu benötigen wir die Induktionswirkung einer weiteren Komponente des solaren Geschwindigkeitsfeldes, der Konvektion. Modellrechnungen des inneren Aufbaus der Sonne zeigen, dass im äußeren Drittel der Abfall der Temperatur nach außen den adiabatischen Temperaturabfall übersteigt. Wie in der irdischen Troposphäre ist dieser Zustand instabil: Die Materie befindet sich in auf- und absteigender Bewegung – in der Tat wird in dieser Zone die aus dem Sonnenkern kommende Energie konvektiv zur Oberfläche befördert. Die auf gut aufgelösten Sonnenaufnahmen sichtbare granulare Struktur (Bild 1) ist ein direkter Beweis hierfür.

Da die Sonne rotiert, ist die konvektive Materiestromung der Corioliskraft unterworfen. Dies führt auf der Nordhalbkugel vorzugsweise zu linkshändig verdrehten Strömungen, auf der Südhalbkugel vorzugsweise zu rechtehändig verdrehten Strömungen. Wir wenden wieder das Prinzip der eingefrorenen Feldlinien an und sehen, dass aus einem toroidalen Feld einzelne Schleifen herausgezogen und verdreht werden, wie in **Bild 5** für den Fall der Nordhalbkugel skizziert.

Die Konvektionsströmung erzeugt fortwährend Schleifen der dargestellten Art. Nimmt man als Ausgangsfeld ein toroidales Magnetfeld, so sieht man, dass die Kombination aller Schleifen ein poloidales Magnetfeld ergibt, welches dem ursprünglichen Poloidalfeld gerade entgegengesetzt ist. Aus dem neuen poloidalen Feld kann die differentielle Rotation das toroidale Feld des nächsten 11-Jahreszyklus erzeugen. Dieses hat das umgekehrte Vorzeichen des vorherigen und genügt damit der Hale'schen Regel c).

Die Entstehung des neuen poloidalen Magnetfeldes kann man sich auch dadurch klarmachen, dass jeder Feldschleife der in Bild 5 dargestellten Art ein elektrischer Strom  $j$  entspricht. Wegen des in den beiden Hemisphären unterschiedlichen Drehsinns summieren sich alle diese Ströme zu einem Gesamtstrom  $\langle j \rangle$ , der auf der Nordhalbkugel in Richtung des mittleren Feldes  $\langle B \rangle$ , auf der Südhalbkugel entgegen dessen Richtung verläuft. Da  $\langle B \rangle$  selbst am Äquator sein Vorzeichen wechselt, haben wir insgesamt einen einzigen ringförmigen elektrischen Strom, mit gleicher Richtung in beiden Hemisphären, dessen Magnetfeld das neue, umgepolte, poloidale Feld ist. Der beschriebene Effekt wurde zuerst in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts von Eugene N. Parker in den USA und von Max Steenbeck und Mitarbeitern in Jena und Potsdam untersucht.

Die Periode des zyklischen Dynamos ergibt sich aus der Zeit, welche differentielle Rotation und Konvektion

benötigen, das jeweils aus dem vorangehenden Halbzyklus vorhandene Magnetfeld abzubauen und umzupolen. Modellrechnungen zeigen, dass dabei auch das Schmetterlingsdiagramm der Sonnenflecken reproduziert wird. Sonnenflecken treten zu Beginn eines 11-Jahreszyklus in mittleren heliographischen Breiten auf; später nähert sich die Zone ihres häufigsten Auftretens dem Äquator (**Bild 6**). Genau dies tut das mittlere toroidale Magnetfeld des hier beschriebenen Dynamos.

Es sollen nicht die Schwierigkeiten verschwiegen werden, welche bei der Berechnung der Entwicklung des mittleren Magnetfeldes bestehen. Speziell die qualitativ so einleuchtende Erzeugung des neuen poloidalen Feldes ist schwer in quantitative Form zu fassen. Der Grund für die Schwierigkeit liegt letzten Endes darin, dass die solare Konvektionsströmung turbulent ist und Turbulenz sich immer noch einer quantitativen Beschreibung entzieht. Eine weitere Frage, die zur Zeit diskutiert wird, betrifft die Wirkung von globalen Strömungen, welche der differentielle Rotation überlagert sind. Auf der Sonnenoberfläche wird eine langsame, vom Äquator in Richtung der Pole gehende Strömung beobachtet, und in tieferen Schichten, wo der Dynamo arbeitet, erwartet man eine entsprechende Gegenströmung. Eine solche wird in manchen Modellen als wesentlich zur Erklärung des Schmetterlingsdiagramms herangezogen.

Es wäre wünschenswert, mehr einschlägige Daten von Sternen zu haben. Der Theorie wäre z. B. sehr geholfen, wenn man die Eigenschaften des magnetischen Zyklus als Funktion der stellaren Parameter wie Radius, Tiefe der Konvektionszone, Rotationsperiode, etc. angeben könnte. Hierzu sind Beobachtungsprogramme angelaufen, z. B. auf Teneriffa im automatischen Observatorium STELLA des Astrophysikalischen Instituts Potsdam.

#### Literatur:

- [1] Kippenhahn, R.: Der Stern, von dem wir leben. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1990
- [2] Stix, M.: The Sun, An Introduction. Springer Berlin, Heidelberg 2002

**Prof. Dr. Michael Stix**  
 Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik  
 Schöneckstr. 6  
 79104 Freiburg