

Vermisste Sonnenflecken

Der Beginn eines neuen Maunder-Minimums? Über Bedeutung und Vorhersagemöglichkeiten der Entwicklung solarer Aktivitäts-Zyklen (Teil II)

Ulrich v. Kusserow

4. Über die Entstehung der solaren Magnetfelder

Die Frage, wie genau die kosmischen Magnetfelder im Innern der Sonne eigentlich erzeugt werden, wurde bisher noch gar nicht angesprochen. Der ω -Effekt erklärt zwar, wie die azimutal aufgewickelten, so genannten toroidalen Magnetfeldstrukturen auf Grund der differenziellen Rotation aus den meridional verlaufenden so genannten poloidalen Magnetfeldstrukturen entstehen (siehe Abb. 11 in Teil I dieses Artikels in den vorangegangenen Olbers-Nachrichten). Es stellt sich dann jedoch sofort auch die Frage, wie denn eigentlich die poloidalen Felder immer wieder in der Sonne neu produziert werden können, und was mit den stetig, sich mehr und mehr anhäufenden toroidalen Feldern dann anschließend passiert.

Ja, letztere steigen auf Grund des magnetischen Auftriebs durch die Konvektionszone der Sonne auf, durchstoßen die Sonnenoberfläche und führen hier zur Bildung der Sonnenflecken. Aber können diese magnetischen Magnetfeldstrukturen dann die Sonne anschließend auch verlassen, wenn sie auf Grund der Eingefrorenheit der Felder in die elektrisch so gut leitende Plasmamaterie doch eigentlich an die Sonne gebunden bleiben müssten? Irgendwie muss dies aber gelingen, beobachtet man doch häufiger solare Erptionen und mit Magnetfeldstrukturen durchsetzte koronale Massenauswürfe, die in den interplanetaren Raum hinaus strömen, die bei uns auf der Erde unter anderem auch die wunderschönen Polarlichter produzieren!

Magnetokonvektion

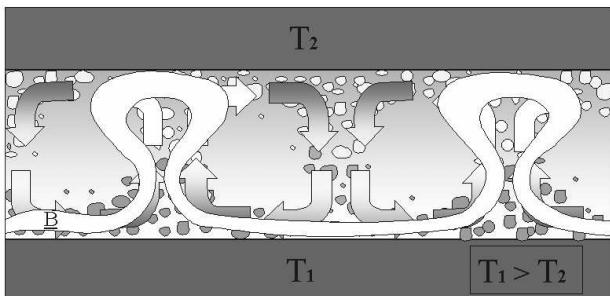


Abb. 14: Aufstieg „eingefrorener“ magnetischer Flussröhren in konvektiven Strömungsstrukturen auf Grund von Temperaturgradienten ($T_1 > T_2$)

© Ulrich v. Kusserow

Tatsächlich gelangen magnetische Feldstrukturen immer wieder in die Sonnenatmosphäre und verlassen unseren Heimatstern. Offensichtlich wird stetig auch magnetischer Fluss von der Sonne abtransportiert. Ein Großteil der erzeugten toroidalen Flussröhren wird jedoch durch einen weiteren, als α -Effekt bezeichneten physikalischen Prozess wieder in poloidale Feldstrukturen zurückverwandelt. Wie im Folgenden erläutert werden soll, könnte dafür möglicherweise vor allem die im äußeren Drittel der rotierenden Sonne den Energietransport übernehmende turbulente Konvektionsströmung verantwortlich sein (siehe Abb. 14). Die Wissenschaftler sprechen deshalb auch zusammengefasst vom Wirken eines so genannten $\alpha\omega$ -Dynamos, der die beobachteten solaren Magnetfelder erzeugen kann. In einer Art Kreislaufprozess produziert in diesem Szenario also der ω -Effekt die toroidalen Felder aus den poloidalen, umgekehrt der α -Effekt die poloidalen Felder aus den toroidalen Feldkomponenten.

Corioliskraft

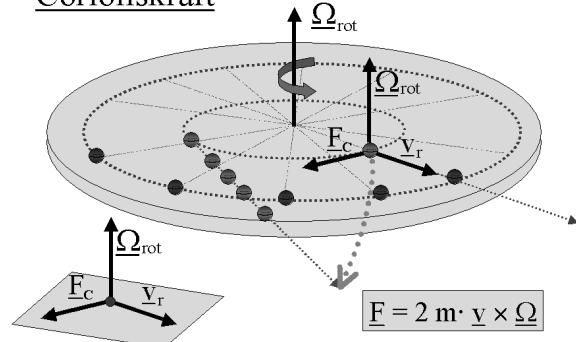


Abb. 15: Wirkung der Corioliskraft F_C auf einen mit der Geschwindigkeit v_r auf einer mit der Winkelgeschwindigkeit Ω_{rot} rotierenden Scheibe nach außen rollenden Ball
© Ulrich v. Kusserow

Dass man in diesem Zusammenhang von einem Dynamo spricht, ist auch verständlich. In einem Dynamo, oder auch Generator genannt, wird ja bekanntlich Bewegungsenergie in elektromagnetische Energie umgewandelt. Und das passiert in der Sonne doch auch! Die tief im Kern der rotierenden Sonne erzeugte Fusionsenergie wird in der – in den äußeren 30 % des Sonneninneren gelegenen – Konvektionszone unter anderem in Bewegungsenergie umgewandelt. Hier treten auf Grund von Trägheitskräften (so genannte Corioliskräfte – man denke an die Wirbelbildung mit charakteristischer Umlaufrichtung in Hoch- und Tiefdruckgebieten innerhalb der Atmosphäre der rotierenden Erde auf der Nord- beziehungsweise Südhalbkugel; siehe Abb. 15) im rotierenden System mit einer Vorzugsrichtung verschene turbulente Konvektionsströmungen auf. Im Bereich

dieser Zone bildet sich auch das Strömungsmuster der differenziellen Rotation aus. Hier beobachtet man darüber hinaus eine weitere, für die im Folgenden beschriebenen Dynamo-Modelle wichtige Strömungsstruktur, die als meridionale Zirkulation bezeichnet wird. Die in all diesen charakteristischen Strömungsprofilen steckende Bewegungsenergie wird in den äußeren etwa 200.000 Kilometern des Sonneninneren, wie oben beschrieben, immer wieder in magnetische Energie umgewandelt.

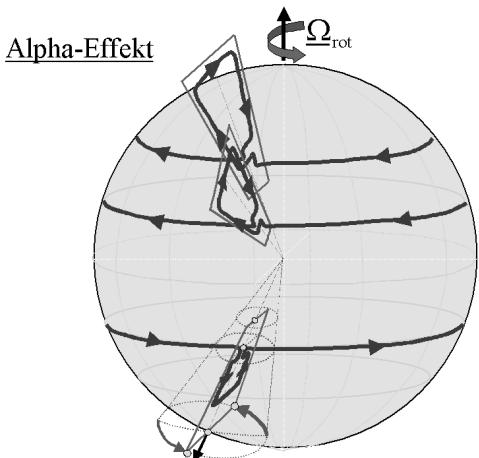


Abb. 16: Entstehung poloidaler Magnetfeldstrukturen aus toroidalen Flussröhren unter dem Einfluss von Konvektionsströmungen und der Corioliskraft (α -Effekt)
©Ulrich v. Kusserow

Abb. 16 veranschaulicht die Ausbildung poloidaler Feldstrukturen durch den α -Effekt. Konvektionsströmungen lassen die ursprünglich toroidalen Flussröhren bogenförmig aufsteigen. Unter dem Einfluss der Corioliskraft wird dabei die Aufstiegsebene verdreht, so dass, räumlich gesehen, kleinskalige poloidale, also in meridionaler Richtung orientierte Feldstrukturen erzeugt werden. Zur Gewinnung großskaliger poloidaler Felder müssten die kleinskaligen Felder geeignet miteinander verschmelzen.

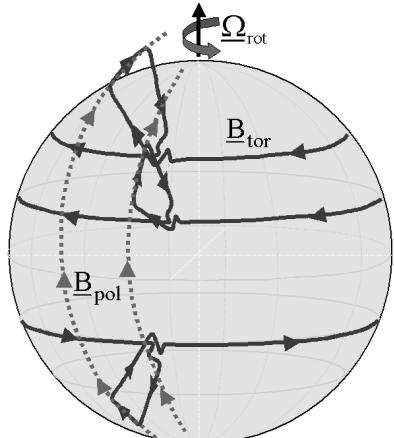


Abb. 17: Darstellung der wechselseitigen Erzeugung von toroidalen und poloidalen Magnetfeldstrukturen
© Ulrich v. Kusserow

Wie Abb. 17 zeigt, sind diese kleinskaligen Felder tatsächlich gleich orientiert, so dass eine solche Verschmelzung gelingen kann. Ein globales poloidales Feld ist entstanden, welches durch den ω -Effekt seinerseits wieder zu einem toroidalen Feld umgewandelt werden kann. Der „Dynamo-Kreislauf“ ist geschlossen.

Heute werden wegen der immer noch begrenzten Computerkapazitäten im Wesentlichen nur so genannte kinematische Dynamomodelle gerechnet. Für vorgegebene Geschwindigkeitsfelder wird darin die so genannte Induktionsgleichung in der beispielsweise hier vereinfachten Form

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \nabla \times (\alpha \vec{B}) - \eta \nabla \times (\nabla \times \vec{B})$$

gelöst. Diese mathematische Formel, die sich aus den nach FARADAY, AMPÈRE, OHM und GAUSS benannten Gesetzen der Elektrodynamik ableiten lässt, soll hier niemanden verwirren. Sie soll vielmehr aufzeigen, wie die Erzeugung der solaren Magnetfeldstrukturen durch die oben beschriebenen α -beziehungsweise ω -Induktionseffekte auch mit Methoden der Mathematik darstellbar ist. Die Rückwirkung des erzeugten Magnetfeldes auf die Strömungsstrukturen auf Grund der Lorentzkraft wird bei diesen kinematischen Modellrechnungen entweder gar nicht oder nur eher pauschal und weniger dynamisch einflussnehmend einbezogen.

Auf der linken Seite dieser Gleichung steht ein Term, der angibt, wie sich die gerichtete (deshalb in der Formel mit einem Pfeil versehene) vektorielle magnetische Flussdichte B im Laufe der Zeit t verändert, ob sie zunimmt oder aber abnimmt. $\partial B / \partial t$ beschreibt die Änderung (das Symbol „ ∂ “ steht für „Differenz“) der Flussdichte B in der vergangenen kurzen Zeitdauer ∂t . Die Erzeugung magnetischer Feldstrukturen auf Grund des Dynamoprinzip klappt natürlich nur, wenn dabei die Größe der magnetischen Flussdichte im Laufe der Zeit zunimmt.

Die ersten beiden Terme auf der rechten Seite ermöglichen die Erzeugung von Magnetfeldern. Im ersten Term gelingt dies durch das Vorhandensein eines geeigneten Geschwindigkeitsfeldes v , insbesondere durch den ω -Effekt auf Grund der differenziellen Rotation, nach neuesten Erkenntnissen aber auch durch die meridionale Zirkulation (siehe unten). Der zweite Term beschreibt den α -Effekt auf Grund helikaler, also schraubenförmiger Turbulenzen mit einer Vorzugsrichtung, wie sie in der Sonne beispielsweise durch Konvektionsströmungen unter dem Einfluss der Corioliskraft erzeugt werden kann. Die Größe α ist dabei ein Maß für die Stärke dieses

Effektes. In beiden Termen misst der durch „ $\nabla \times$ “ beschriebene Operator die so genannte Wirbeldichte. Sie ist von Null nur dann verschieden, wenn die durch das Vektorprodukt von v und B beziehungsweise durch $\alpha \cdot B$ beschriebenen Vektorfelder Eigenschaften einer Verwirbelung aufweisen.

Der dritte Term auf der rechten Seite beschreibt den Prozess des Abbaus von Magnetfeldstruktur durch so genannte magnetische Diffusion. Genauso wie sich ein Gebiet mit hoher Temperatur im Vergleich zur Umgebung im Lauf der Zeit durch Energieabtransport abkühlt, so schwächt sich auch die Größe der magnetischen Flussdichte in einem Gebiet mit im Vergleich zur seiner Umgebung starken Magnetfeldern zeitlich ab. Die Stärke der Diffusion des Magnetfeldes aus diesem Gebiet heraus hängt dabei von der in obiger Induktionsgleichung idealisiert als konstant angenommenen magnetischen Diffusivität η , andererseits von einer Art „doppelter“ Wirbeldichte „ $\nabla \times (\nabla \times B)$ “ der magnetischen Flussdichte B ab. Auf Grund der besonders hohen elektrischen Leitfähigkeit der Plasmamaterie nimmt η in der Sonne überall extrem kleine Werte an. In der Regel ist hier auch die damit multiplizierte Vektorgröße nicht sehr groß, so dass der dritte Term in den Modellrechnungen normalerweise vollständig vernachlässigt werden kann.

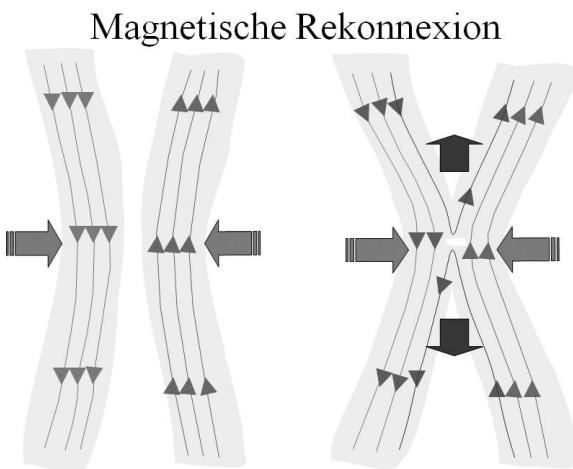


Abb. 18: Veranschaulichung des Prozesses der magnetischen Rekonnexion, © Ulrich v. Kusserow

Dort, wo auf engstem Raum Magnetfeldstrukturen mit entgegengesetzt orientierten Magnetfeldstrukturen aufeinander treffen (siehe unterschiedliche Ausrichtung der magnetischen Flussdichten in Abb. 18), kann der die „doppelte“ Wirbeldichte der magnetischen Flussdichte beschreibende Term in der Induktionsgleichung aber doch lokal sehr hohe Werte annehmen. So kann der Diffusionsterm trotz kleinem η doch sehr groß werden, wechselwirken die Magnetfelder miteinander, werden sie auf engstem Raum

plötzlich abgebaut. Nach den, entsprechend der wirklich zugrundeliegenden magnetischen Verhältnisse, in kurzen Zeitabständen nacheinander gezeichneten magnetischen Feldlinienbildern erscheint es so, als ob die magnetischen Feldlinien zerschnitten worden seien und instantan, also im exakt selben Moment, in veränderter Weise neu verbunden wurden (siehe die mit B_3 bezeichneten, vom Ort x und der Zeit t abhängenden Feldstrukturen in Abb. 18). Wenn man weiß, dass sich in magnetischen Feldstrukturen ebenso wie in einem auseinandergeworfenen Gummiband enorme Spannungen aufbauen können und diese möglichst schnell auch wieder abgebaut werden möchten, dann versteht man auch, dass die neu erzeugten magnetischen Feldstrukturen die nach dem Prinzip der Eingefrorenheit eingelagerte Plasmamaterie (in den beiden unteren Bildern der Abbildung zu sehen) nach oben und unten beschleunigen.

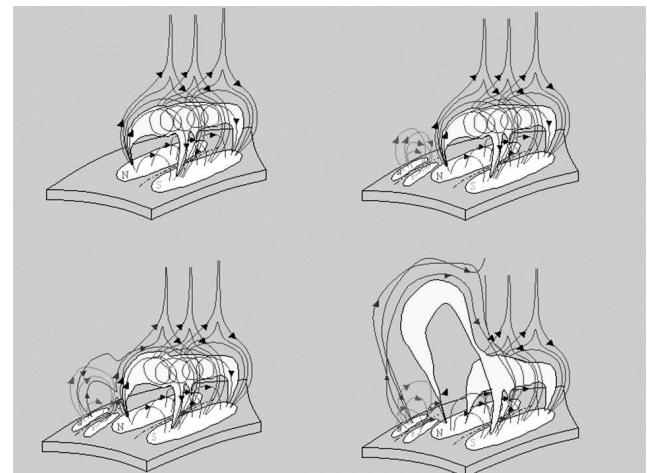


Abb. 19: Entwicklung einer solaren Eruption, ausgelöst durch magnetische Rekonnexion, ©Ulrich v. Kusserow

Dieser als magnetische „Rekonnexion“ (Neuverbindung) bezeichnete Prozess, bei dem kurzfristig die „Eingefrorenheit“ der Magnetfeldstrukturen aufgehoben wird, eine Entkoppelung von Plasmamaterie und Magnetfeldstrukturen stattfindet, Plasmamaterie doch durch die Magnetfelder „schlüpfen“ kann, führt, lokal ausgelöst, häufig auch zu globaler Veränderung der Topologie großer Magnetfeldstrukturen. Auf kleinen Raumskalen werden starke elektrische Felder erzeugt, die die geladenen Partikel der Plasmamaterie stark beschleunigen. Magnetische Rekonnexion ist so unter anderem auch für die Aufheizung der Sonnenkorona mitverantwortlich. Dieser physikalische Prozess bietet zudem eine schlüssige Erklärung für den Entwicklungsprozess solarer Eruptionen. Abb. 19 veranschaulicht, wie eine große, als Protuberanz bezeichnete Gaswolke, die zunächst durch (bei Sonnenfinsternissen gut zu beobachtende) so genannte „helmförmigen Wimpelstrukturen“ vor dem Aufstieg in die Korona geschützt ist, instabil wird, sobald

eine neue magnetische Flussstruktur (vergleichbar einem weiteren „Höcker“ einer Seeschlange) aufsteigt und sich mit der bestehenden Magnetfeldstruktur neu verbindet.

Auf der rechten Seite der Induktionsgleichung taucht in jedem Term die magnetische Flussdichte B auf. Ohne ein anfänglich existierendes, zumindest schwaches Magnetfeld lässt sich also eine zeitliche Änderung $\partial B / \partial t$, eine Verstärkung oder ein mehr oder weniger periodisch in seiner Stärke variierendes Magnetfeld gar nicht erst erzeugen. Nach dem Dynamo-Prinzip können Magnetfelder nur aufgebaut werden, wenn zu Beginn ein Saatfeld mit endlicher Magnetfeldstärke vorhanden ist. Schwache Magnetfelder waren aber schon überall in der Milchstraße vorhanden, als unsere Sonne vor etwa 4,6 Milliarden durch den Kollaps einer interstellaren Gas- und Staubwolke mit einhergehender Verdichtung und damit Verstärkung der Magnetfeldstrukturen entstand. Durch das Wirken der geeigneten Induktionseffekte erregte sich dann anschließend der Dynamo selbst. Im Sonneninneren arbeitet also heute noch ein „selbsterregter Dynamo“.

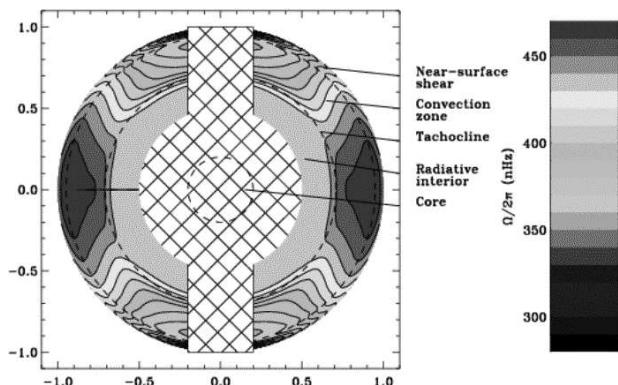


Abb. 20: Veranschaulichung der differenziellen Rotation in der äußeren Hälfte des Sonneninneren
© GONG, SOHO MDI NASA ESA

Wo in der Sonne arbeitet der ω -Effekt eigentlich am effektivsten? Wo werden durch einen α -Effekt aus toroidalen Feldstrukturen wieder poloidale Feldkomponenten erzeugt? Welche Rolle spielt eigentlich die „Meridionale Zirkulation“, deren Strömungsstruktur ja auch wesentlich zur Magnetfelderzeugung beitragen soll? Die Helioseismologie, die Beobachtung, Analyse und Interpretation der Schwingungen der Sonne sowie die genaue Untersuchung der auf der Sonnenoberfläche zu beobachtenden Phänomene haben in den letzten Jahrzehnten wesentlich zur Klärung all dieser Fragen, zu einem tieferen Verständnis der so wesentlichen zugrundeliegenden Prozesse beigetragen.

Abb. 20 veranschaulicht den Verlauf der aus helioseismologischen Messungen gewonnenen Größe der

Winkelgeschwindigkeit in der äußeren Hälfte des Sonneninneren. Dabei fällt auf, dass große Variationen auf die etwa 200.000 km breite Konvektionszone der Sonne beschränkt bleiben. Unterhalb der als Tachocline-Zone bezeichneten Übergangszone rotiert die Sonne in der stabil geschichteten Strahlungszone dagegen offensichtlich mit einer nahezu konstanten Winkelgeschwindigkeit, deren Größe in etwa mit den in 30° heliografischer Breite an der Oberfläche zu beobachteten Werten übereinstimmt. Abb. 21 veranschaulicht diesen Sachverhalt noch einmal sehr viel genauer. Oberhalb des etwa 0,72-fachen des Sonnenradius verändert sich die Rotationsrate in Abhängigkeit von der Breite sehr viel stärker. Der größte Sprung in der Winkelgeschwindigkeit tritt dabei offensichtlich nahe der Tacholine bei höheren Breiten (siehe bei 60°) auf. Hier ist die Ausprägung der differenziellen Rotation am größten.

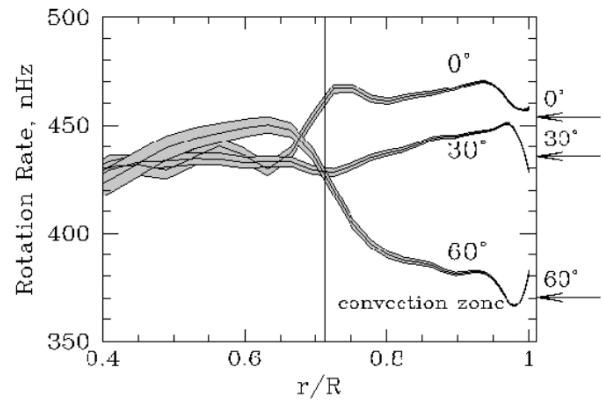


Abb. 21: Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit der Sonnenrotation vom Abstand zum Zentrum ($0.4 R < r < R$) für drei Breitengrade ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$)
© SOHO MDI NASA ESA

Wo genau wirkt eigentlich der α -Effekt in der Sonne? Abb. 22 zeigt, dass in verschiedenen Dynamo-modellen durchaus sehr unterschiedliche Annahmen über dessen Lage, darüber hinaus aber sogar auch sehr verschiedene physikalische Prozesse für die Umwandlung toroidaler Magnetfelder in poloidale Magnetfelder verantwortlich gemacht werden. Instabilitäten im Zusammenhang mit dem Auftreten der differenziellen Rotation nahe der Tachocline-Zone oder im Zusammenhang mit dem magnetischen Auftrieb im tieferen Bereich der Konvektionszone, der im Text weiter oben schon skizzierte Alpha-Effekt in höheren Bereichen der Konvektionszone und vor allem auch der nach seinen „Entdeckern“ BABCOCK und LEIGHTON benannte α -Effekt nahe der Sonnenoberfläche werden heute als mögliche Verursacher der helikalen Verwirbelung toroidaler Magnetfeldstrukturen genannt.

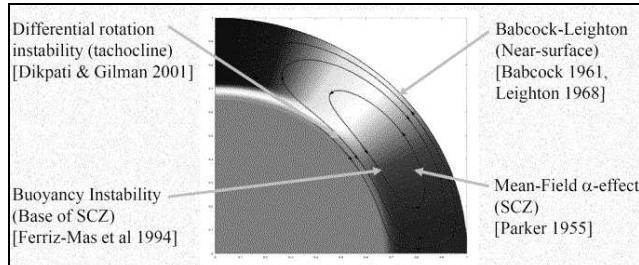


Abb. 22: Lage und Art des Alpha-Effekt für verschiedene Dynamo-Modelle, © D. Nandy, Montana State University

Noch ist heute nicht wirklich endgültig geklärt, wie die wohl etwa 100.000 Gauß starken Magnetfelder durch den Prozess der differenziellen Rotation allein in der sogenannten Overshoot-Region, einer Zone nahe der Tachocline (hier „überschießen“ Konvektionsströmungen immer wieder auch in die stabile Strahlungszone) entstanden sein sollen. Als möglicher Verstärkungsprozess wird in diesem Zusammenhang über einen als „Magnetische Explosion“ bezeichneten Vorgang spekuliert, bei dem sich die magnetische Flussdichte in den durch die Konvektionszone aufsteigenden Flussröhren bei Aufstieg ohne großen Energieaustausch mit der Umgebung zur Aufrechterhaltung eines Druckgleichgewichtes zwischen Innen und Außen in einer bestimmten Höhe z_c derart verringert, dass die Flussröhren „aufplatzen“. Die enthaltene Plasmamaterie „fliegt“ dann in großen Mengen und mit großen Geschwindigkeiten „hinaus“, so dass die tieferliegenden Magnetfeldstrukturen durch den äußeren Gasdruck „zusammengepresst“ und damit wesentlich verstärkt werden können (siehe Abb. 23 rechts unten).

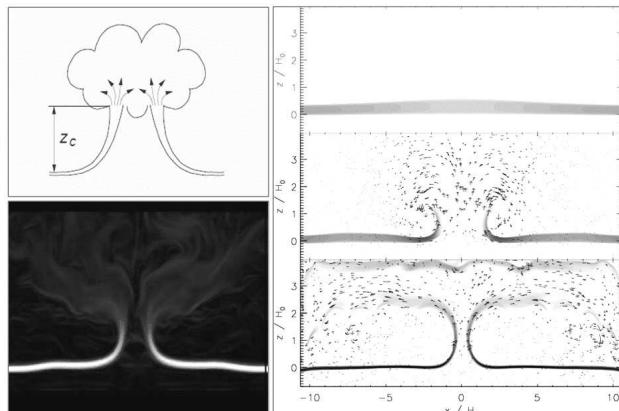


Abb. 23: Modellvorstellungen zur Explosion aufsteigender magnetischer Flussröhren in einer kritischen Höhe z_c
© Rempel & Schüssler (2001)

Im oberen Bereich der Konvektionszone wird ein als „Konvektiver Kollaps“ bezeichneter Prozess für die Verstärkung von Magnetfeldstrukturen angesehen. Wenn sich die Materie im Innern magnetischer Flussröhren zum einen durch Abstrahlung in die Sonnenatmosphäre hinaus sowie zum anderen durch äußeren Vorbeifluss der im Konvektionskreislauf

absinkenden kälteren Materie abkühlt, dann verdichten sich, zusätzlich durch die Konvektionsströmungen zusammengepresst, die magnetischen Flussröhren. So verstärkt sich in ihnen die magnetische Flussdichte. Bei einem weiteren als „Magnetisches Pumpen“ bezeichneten Prozess werden durch magnetischen Auftrieb an die Oberfläche der Sonne getriebene Flussröhren mit nicht zu starker magnetischer Flussdichte in den als Granulen beziehungsweise Supergranulen bezeichneten Zellen der Konvektionsströmung entlang der schmalen Zonen der absinkenden kälteren Materie wieder in Sonneninnere gezogen. Unter „Diamagnetischem Pumpen“ versteht man demgegenüber einen Prozess, bei dem Magnetfelder stets aus Bereichen mit räumlich gesehen großen Schwankungen in der Diffusivität η „vertrieben“ werden.

5. Der Fluss-Transport-Dynamo

Unter anderem mit Hilfe helioseismologischer Messmethoden konnten die Sonnenforscher zusätzlich zur differenziellen Rotation Strömungsmuster nahe der Sonnenoberfläche finden, die aufzeigen, dass die Plasmamaterie mit Geschwindigkeiten um 10 Meter pro Sekunde zumindest oberhalb der äquatornahen Aktivitätsgebiete eindeutig polwärts fließt. In etwa 5 bis 7 Jahren können danach eingelagerte Magnetfeldstrukturen beginnend bei etwa 10° heliografischer Breite bis in die Polgebiete der Sonne wandern. Damit es nirgends einen Stau der bewegten Masse gibt, müssten dann aber auch großskalige Strömungen tiefer im Sonneninneren (gegebenenfalls mit Magnetfeldern durchsetzt) immer wieder Materie durch die turbulenten Konvektionszone hindurch zum Äquator zurückführen, so dass sich der Materiekreislaufprozess hier wieder schließt.

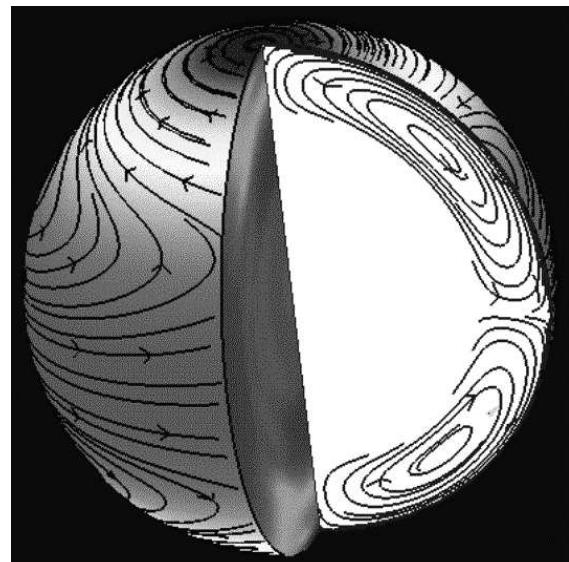


Abb. 24: Veranschaulichung eines möglichen Strömungsprofils einer Meridionalen Zirkulation in der Konvektionszone der Sonne, © SOHO MDI NASA ESA

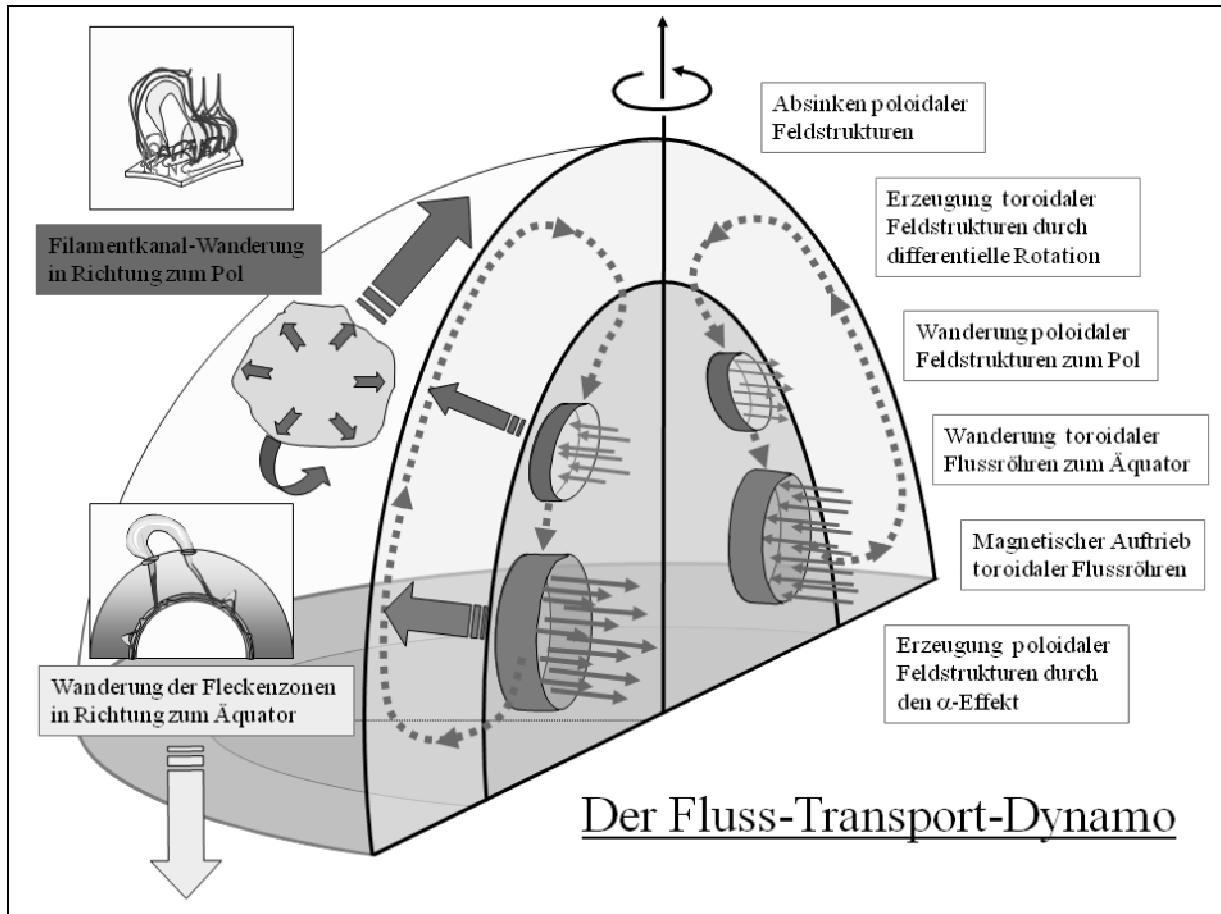


Abb. 25: Darstellung der Entwicklungswege poloidaler und toroidaler Magnetfeldstrukturen im Rahmen von Fluss-Transport-Dynamo-Modellen zur Entstehung solarer Magnetfelder, © Ulrich v. Kusserow

Noch konnte dieser Teil des als „Meridionale Strömung“ bezeichneten solaren Prozesses nicht nachgewiesen werden. Doch geht man heute von dessen Existenz aus und nimmt an, dass die Geschwindigkeit dieser tieferliegenden Strömung in der Meridional-ebene wegen der hier anzutreffenden größeren Materiedichte sehr viel geringer ist. Er liegt vermutlich im Größenbereich von etwa 1 m/s, so dass die Dauer des Rücktransports von Materie und eingelagerten Magnetfeldern zum Äquator hin eher im Bereich von 15 Jahren liegt. Abb. 24 veranschaulicht das mögliche Strömungsmuster der meridionalen Zirkulation in der Sonne. Diese meridionale Zirkulation könnte der „time keeper“, der Zeitnehmer oder „Taktgeber“ für den Sonnendynamo sein. Vielleicht bestimmt sie ja die so charakteristische Länge der solaren Aktivitätszyklen. Anhand von Abb. 25 lässt sich im Folgenden gut erläutern, für wie wesentlich Wissenschaftler heute diesen Prozess in den als Fluss-Transport-Dynamo bezeichneten Modellen zur Erklärung der Entstehung und Entwicklung der Magnetfelder in der Sonne einschätzen.

Die Abbildung 25 zeigt den äquatornahen sporadischen Aufstieg der längere Zeit in der Overshoot-

region gespeicherten und mit hoher Flussdichte versehenen toroidalen magnetischen Flussröhren (*Magnetischer Auftrieb toroidaler Flussröhren*), ausgelöst durch magnetischen Auftrieb und andere Instabilitäten. An der Oberfläche bilden sich zunächst bipolare Sonnenfleckengruppen und anschließend vermehrt Protuberanzen aus, in denen die Feldstrukturen beispielsweise verdreht durch die Corioliskraft poloidale Komponenten aufweisen (*Erzeugung poloidaler Feldstrukturen durch den α -Effekt*). Durch differenzielle Rotation in den Konvektionsströmungen und in Folge magnetischer Diffusion werden die Magnetfeldstrukturen erheblich verformt. Rekonnektionsprozesse können dabei zu einem erheblichen Abtransport von Energie, Impuls sowie magnetischem Fluss führen. Durch meridionale Zirkulation driften die vorwiegend poloidal ausgerichteten Feldstrukturen langsam polwärts (*Filamentkanal-Wanderung in Richtung zum Pol*), wobei davon die magnetische Polarität der nachfolgenden Fleckengruppe bevorzugt betroffen ist. Wenn die Fleckenrelativzahl gerade ihr Maximum erreicht hat, dann kehrt sich polnah die magnetische Polarität um, weil hierhin immer mehr magnetischer Fluss der neuen

Polarität geliefert wurde. Im Verlaufe des solaren Aktivitätszyklus driften die Fleckenzonen bekanntlich immer näher in Richtung zum Äquator (*Wanderung der Fleckenzonen in Richtung zum Äquator*). Insbesondere die vorangehenden Flecken wechselwirken dann hier auch mit dem sich von der anderen Hemisphäre der Sonne dem Äquator nähernden magnetischen Fluss entgegengesetzter Polarität.

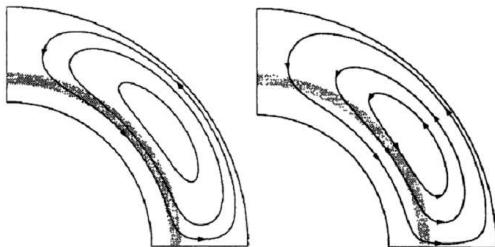


Abb. 26: Veranschaulichung der möglichen Eindringtiefe der Meridionalen Zirkulation bis in die grau markierte Tachocline (links) oder tiefer (rechts) sogar bis in die Strahlungszone, © Dibyendu Nandy 2003

Durch magnetische Diffusion, magnetisches Pumpen, vor allem aber durch die hier vertikale Komponente der meridionalen Zirkulation werden die polnahen Feldstrukturen durch die Konvektionszone hindurch ins Sonneninnere gezogen (*Absinken poloidaler Felder* in Abb. 25). Im Bereich der schmalen Tachocline-Zone, wo ja in Polnähe der größte Sprung in der Winkelgeschwindigkeit auftritt, werden dann auf Grund der differenziellen Rotation die vorwiegend poloidalen magnetischen Strukturen azimuthal aufgewickelt, unter hoher magnetischer Spannung stehende toroidale Feldstrukturen produziert (*Erzeugung toroidaler Feldstrukturen durch differenzielle Rotation*). Die in den Strömungsstrukturen enthaltene Bewegungsenergie wird dabei effektiv in magnetischer Energie umgewandelt. In einigen Modellrechnungen wird angenommen, dass die meridionale Zirkulation noch durch die Tachocline-Zone hindurch tiefer bis in die stabil geschichtete Strahlungszone hineinreicht (siehe Abb. 26). Dies hätte den Vorteil, dass hier magnetische Flussröhren sicher gespeichert werden könnten und nicht schon in hohen Breiten durch magnetischen Auftrieb aufsteigen und Sonnenflecken produzieren würden, was ja in der Realität gerade nicht beobachtet wird.

Die äquatorwärts orientierte meridionale Strömungskomponente im Grenzbereich am Boden der Konvektionszone transportiert toroidalen magnetischen Fluss langsam in Richtung zum Äquator (*Wanderung toroidaler Flussröhren zum Äquator* in Abb. 25). Wegen der geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 1 m/s werden sich hier wohl mehrere im Polbereich abwechselnd mit unterschiedlichen Polaritäten versehene magnetische Flussschichten überlagern (siehe Abb. 27).

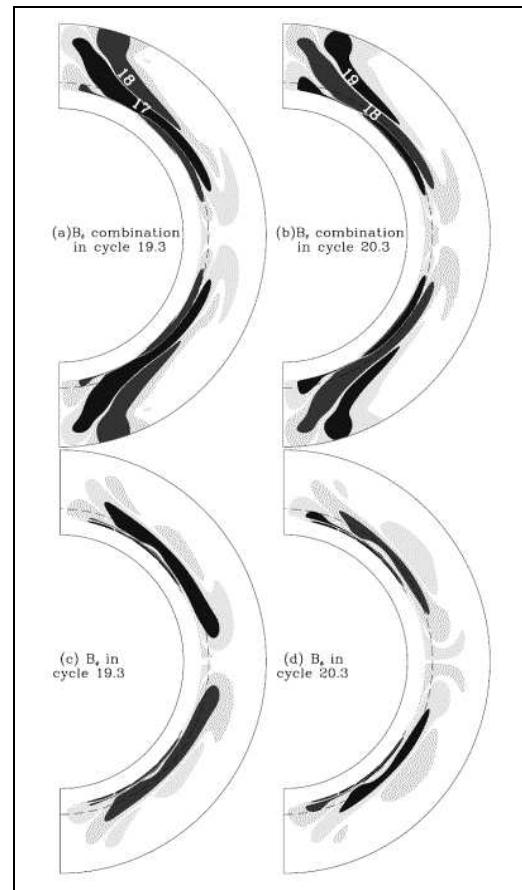


Abb. 27 : Überlagerung poloidaler (oben) und toroidaler (unten) Magnetfelder mehrerer solarer Aktivitätszyklen (17,18,19) in der Konvektionszone (Ergebnisse aus Modellrechnungen), © Mausumi Dikpati 2008

Wenn die am weitesten gewanderte, mit gegenüber dem vorangehenden Aktivitätszyklus entgegengesetzter Polarität versehene magnetische Schicht eine heliografische Breite von weniger als 40° erreicht hat, hier instabil wird und aufsteigt, dann könnten einzelne, etwa durch magnetische Explosions in ihrer Flussdichte verstärkte Flussröhren die ersten Sonnenflecken des neuen Aktivitätszyklus erzeugen (*Magnetischer Auftrieb toroidaler Flussröhren*).

Verschiedene wissenschaftliche Arbeitsgruppen haben eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle zum Fluss-Transport-Dynamo gerechnet. Sie unterscheiden beispielsweise Modelle, in denen der magnetische Flusstransport stärker durch meridionale Zirkulation dominiert ist von denen, bei der die magnetische Diffusion eine wichtigere Rolle spielt. Man unterstellt unterschiedliche Mechanismen, durch die der α -Effekt bewirkt wird. Man variiert den Ort, wo dieser Induktionseffekt wirken soll. Und man gibt verschiedene Parameter ein, die den Einfluss der wesentlichen physikalischen Prozess gewichten. Wie gut ein Modell ist, lässt sich daran ablesen, wie genau die Ergebnisse der Modellrechnungen die auf der Sonne zu beobachtenden Prozessabläufe widerspiegeln.

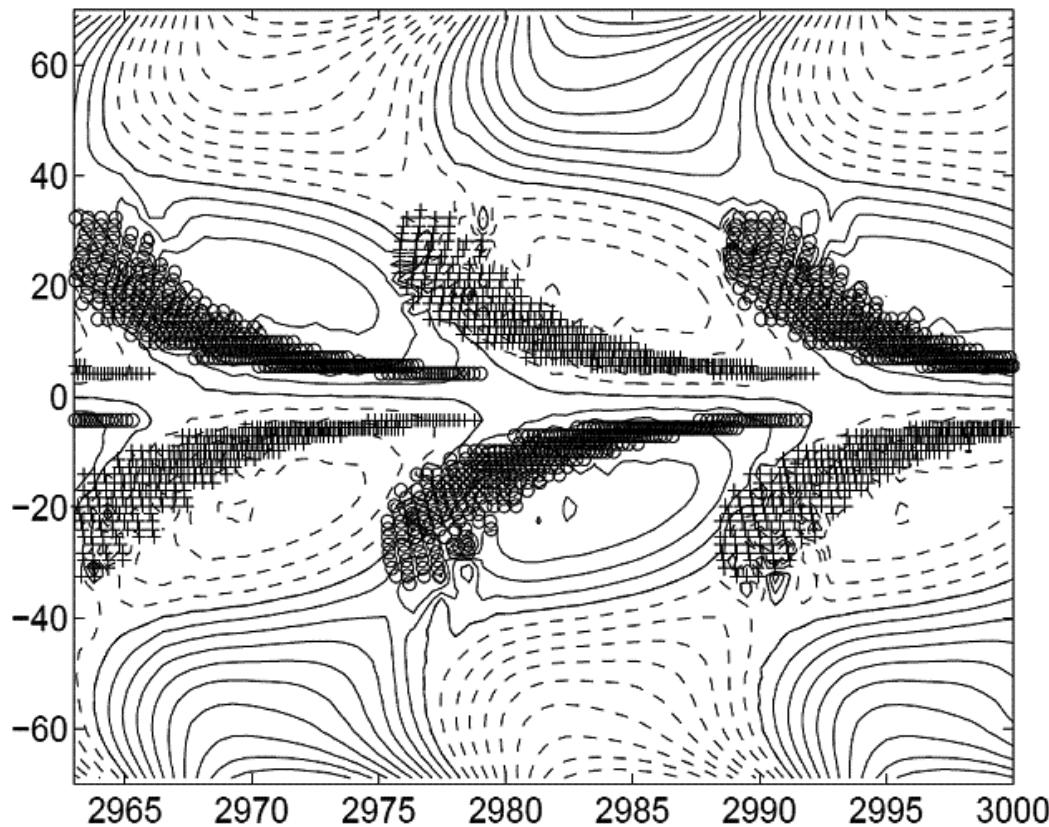


Abb. 28: Theoretisches Schmetterlingsdiagramm, heliografische Breite auftragen gegen die Zeit (in Jahren)
© Chatterjee, Nandy, Choudhuri 2008

So zeigt beispielsweise Abb. 28 ein aus Simulationen gewonnenes Schmetterlingsdiagramm, das schon recht gut mit der Realität übereinstimmt. Zu Beginn des Zyklus entstehen darin die Fleckenzenen bei etwa 35° und wandern im Laufe des Zyklus bis auf ca. 5° an den Äquator heran. Die Zyklen überlappen sich über etwa 2 bis 3 Jahre, die Zykluslänge (der Abstand zwischen den Aktivitätsmaxima) beträgt etwa 12 Jahre.

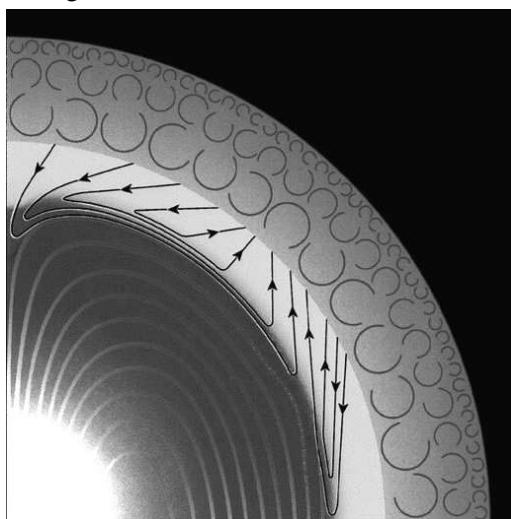


Abb. 29: Schematische Darstellung des solaren Magnetfeldes in der Strahlungs- und Tachocline-Zone
© Gough McIntyre 1998

Zum Schluss noch eine kleine Anmerkung: Nur wenige Sonnenforscher haben sich intensiv überhaupt Gedanken darüber gemacht, ob Magnetfeldstrukturen nicht auch in der stabil geschichteten Strahlungszone anzutreffen sind. Könnten nicht starke Felder, erzeugt durch den Dynamoprozess aus der Overshoot- oder Tachocline-Zone, nach innen diffundiert sein? Die elektrische Leitfähigkeit in der Strahlungszone ist sicherlich hoch genug, so dass hier einmal vorhandene Magnetfelder auch „eingefroren“ bleiben müssten. Außerdem könnten hier auch noch fossile, beim Kollaps der protostellaren Gaswolke verstärkte, ursprünglich nur schwache galaktische Felder vorhanden sein. Das durch möglicherweise starke Gradienzen in der Diffusivität bewirkte diamagnetische Pumpen könnte die Existenz solcher Felder vor einem Hinausdiffundieren außerdem bewahren. Unterstützen vielleicht Magnetfelder in der Strahlungszone gerade deren stabile Schichtung? Sind dann auch sie für die Ausbildung der Tachocline, der Grenzfläche zwischen starrer Rotation im Innern und der differenziellen Rotation in der äußeren Konvektionszone verantwortlich? Und überhaupt: welchen Einfluss könnte ein solches Magnetfeld im tieferen Sonneninneren auf den Sonnendynamo haben (s. Abb. 29)? *(Fortsetzung folgt)*

