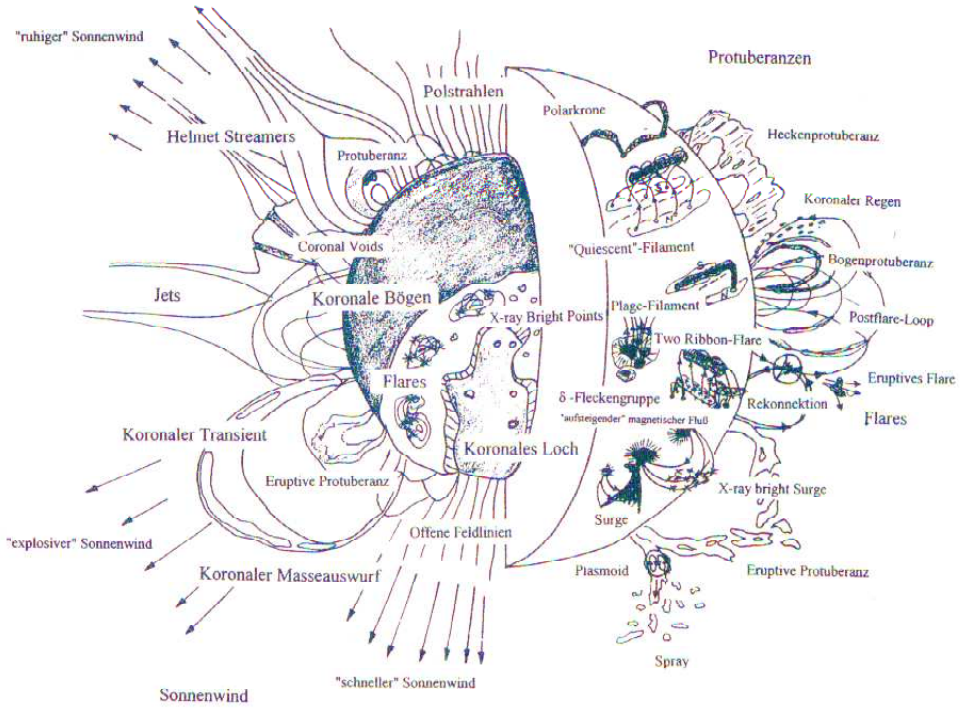
Indizien und Entwicklungs-Szenarien für solare Magnetfelder

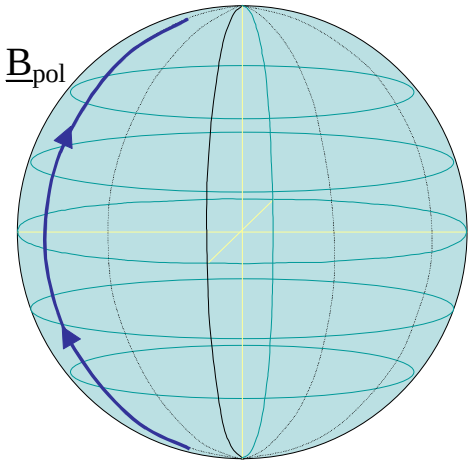
Ulrich v.Kusserow

Welche **Indizien** sprechen eigentlich **für das Vorhandensein von Magnetfelder** im Innern und in der Atmosphäre der Sonne? Allein die Tatsache der **Existenz dunkler Sonnenflecken** kann nur einen indirekten Hinweis darauf geben. Tatsächlich sind die in Fleckengruppen aus der Sonnenoberfläche austretenden **Magnetfeldstrukturen** durch lokale Unterdrückung des in Form von Konvektionsströmungen aus dem Sonneninneren erfolgenden Aufstiegs heißer Plasmamaterie für die Abkühlung in diesen Gebieten verantwortlich. Erst Messungen der **Aufspaltung von magnetisch empfindlichen Spektrallinien** im Absorptionsspektrum der Sonne sowie deren korrekte Interpretation sowie quantitative Auswertung **nach dem Zeeman-Effekt** ermöglichen den direkten Nachweis und die Vermessung der in solaren Aktivitätsgebieten im Vergleich zum Erdmagnetfeld bis zu einige tausend Mal stärkeren solaren Magnetfelder. Der Nachweis und die genaue Vermessung schwächerer solarer magnetischer Induktionsflussdichten erfolgt mit Hilfe des sogenannten Hanle-Effektes.
Während einer totalen **Sonnenfinsternis** oder mit Hilfe eines Protuberanzen-Ansatzes und anderer sogenannter Koronographen kann der qualitative **Verlauf** zumindest großskaliger solarer **magnetischer Feldstrukturen** innerhalb **der Sonnenkorona** sichtbar werden. Bekanntermaßen sind Magnetfelder oder magnetische Feldlinien als Elemente eines idealisierten Modellbildes selbst natürlich unsichtbar. Allein der hier dominierende Einfluss ihrer Kraftwirkung auf die in der heißen Sonnenkorona als „freie“ Ladungsträger sich bewegenden und beschleunigten ionisierten Atome und Elektronen ermöglicht einen groben Einblick in die zugrundeliegenden Feldstrukturen. Da die geladenen Teilchen auf Grund der **Lorentzkraft** durch **Gyrationsbewegungen** an die Magnetfeldstrukturen gebunden sind, und das von der Sonnenoberfläche ausgestrahlte integrierte Licht an den Elektronen gestreut wird, **zeichnen** so die Magnetfeld bedingten charakteristischen **Materie-Konzentrationen** und die daraus resultierenden beobachtbaren Helligkeitskontraste **indirekt auch den Verlauf der koronalen magnetischen Feldstrukturen nach**. Vor allem die im Licht der H-alpha-Linie und der mit Hilfe von Satelliten wie SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), TRACE (Transit Region ans Coronal Explorer) und YOH-KOH (japanisch für Sunshine) **in Emissionslinien** verschiedenster weiterer neutraler und ionisierter Atome im Ultravioletten oder im Röntgenlicht **gewonnener hochaufgelöster Bilder spiegeln** mehr als deutlich, in beeindruckender Weise die **Struktur** und die **dominierende Rolle magnetischer Feldstrukturen** in den verschiedenensen Bereichen der Sonnenatmosphäre wider.
Die im Zusammenhang mit solaren Eruptionen beobachteten, als **Flares** bezeichneten plötzlichen Freisetzungen gewaltiger Energiebeträge geben deutliche Hinweise auf das Vorhandensein komplexer magnetischer Feldstrukturen. Durch den als **magnetische Rekonnexion** bezeichneten und in einem einfachen anschaulichen Modellbild als „Zerschneidung“ und gleichzeitige „Neuverbindung“ entgegengesetzt orientierter magnetischer Feldlinien zu sehenden Prozess lassen sich beobachtete bi-direktionale, jetartige Beschleunigungsprozess plausibel auch quantitativ erklären. Die vermessene Ausbreitung **magneto-hydrodynamischer Wellen** sowie erfolgreiche Erklärungsansätze für die starke **Aufheizung der Sonnenkorona** geben weitere **Indizien für die große Bedeutung solarer Magnetfelder** auch im Zusammenhang mit dem Aktivitätszyklus der Sonne.

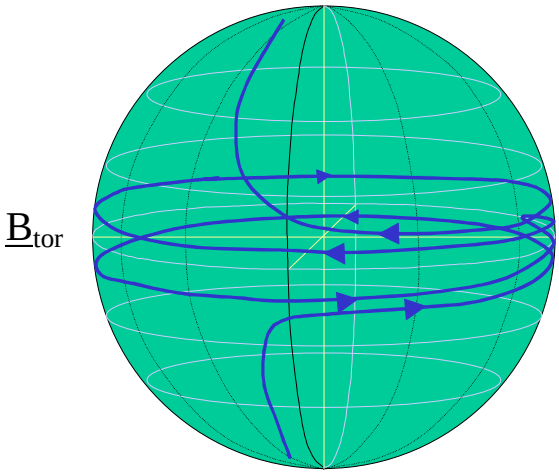


Das **Bild der „Eingefrorenheit“ magnetischer Feldlinien** in Plasmamaterie mit **„unendlicher“ elektrischer Leitfähigkeit** stellt die wesentliche **Grundlage für einfache Modellvorstellungen** zur **Erzeugung solarer Magnetfelder nach dem Dynamoprinzip** dar. Zwar erscheint eine enge wechselseitige Kopplung von Plasmamaterie und magnetischen Feldstrukturen auf Grund der Gyrationsbewegungen geladener Plasmabestandteile auf den ersten Blick recht plausibel. Die Tatsache, dass Magnetfeldstrukturen bei idealisiert hoher elektrischer Leitfähigkeit einen Plasmaballen aber nie verlassen können und mit ihm stets verformt werden, dass die topologische Zugehörigkeit und der magnetische Fluss in einem Raumkörper stets erhalten bleiben, muss aber doch bewiesen werden.
Angenommen, **ein Plasmaballen könnte „ohne Probleme“ bei unendlicher Leitfähigkeit ein magnetische Flussröhre verlassen**. Dann würde **nach dem Induktionsgesetz** in allen den Plasmaballen umschließenden Leiterkreisen eine zumindest kleine Spannung induziert werden, weil sich der magnetische Fluss durch sie (im einfachen Feldlinienbild die Anzahl der sie durchsetzenden Feldlinien) verändert hat. Wegen der Geschlossenheit des Leiters und der unendlichen Leitfähigkeit darin muss nach dem Ohmschen Gesetz bei unendlich kleinem Widerstand gemäß I = U/R ein unendlich starker Strom fließen. In der Plasmamaterie würde so ein Magnetfeld mit unendlicher hoher Energiedichte erzeugt werden. Dies **stellt** sicherlich **einen Widerspruch dar**, der sich nur dadurch aufheben ließe, dass entweder ein unendlich großer Energieaufwand zum Trennen von Plasmamaterie und Feldstrukturen erforderlich wäre, oder aber die Annahme der Möglichkeit des Herauslösens bei unendlicher elektrischer Leitfähigkeit realistisch überhaupt nicht möglich ist, sich die **Feldstrukturen bei Bewegung und Verformung der Plasmamaterie** also wie „eingefroren“ verhalten und sich **den Veränderungen** der Materiestrukturen **„flexibel“ anpassen**.
Die **im Kernbereich der Sonne** erzeugte **Fusionsenergie** sowie die seit Sternentstehung im Sonneninneren enthaltene **Rotationsenergie** stellen die zentrale **Energiequellen** für die im Sonneninneren und in der Sonnenatmosphäre ablaufenden Prozesse dar. Strahlungsprozesse transportieren die vom Zentrum der Sonne ausgestrahlte elektromagnetische Energie durch die im wesentlichen **stabil geschichtete Strahlungszone**. In dem sich nach außen anschließenden kühleren und optisch dichteren, als **Konvektionszone der Sonne** bezeichneten Bereich erfolgt der Energietransport dann notwendigerweise hauptsächlich in Form von **Konvektionsströmungen**. Unter dem Einfluss der Sonnenrotation , dem seit Entstehung des jungen Protosterns schon vorhandenen solaren Magnetfeld sowie der turbulenten konvektiven Strömungen haben **Drehimpulstransport-Prozesse** zeitlich variable, mehr oder weniger periodische **charakteristische Materieströmungs-Strukturen** erzeugt. In einem damit durch nichtlineare Rückkopplungsprozess selbstkonsistent verknüpften Szenarios eines **selbsterregten Dynamos** werden die für den 22.4-jährigen solaren Aktivitätszyklus typischen Magnetfeldstrukturen erzeugt.

Polidale Magnetfelder in der Konvektionszone

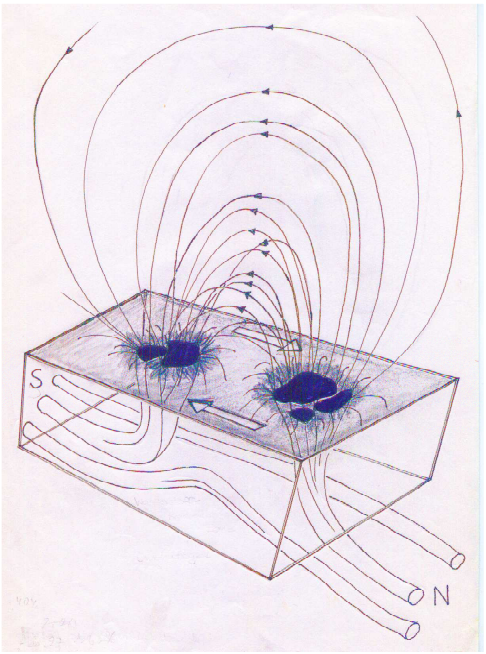


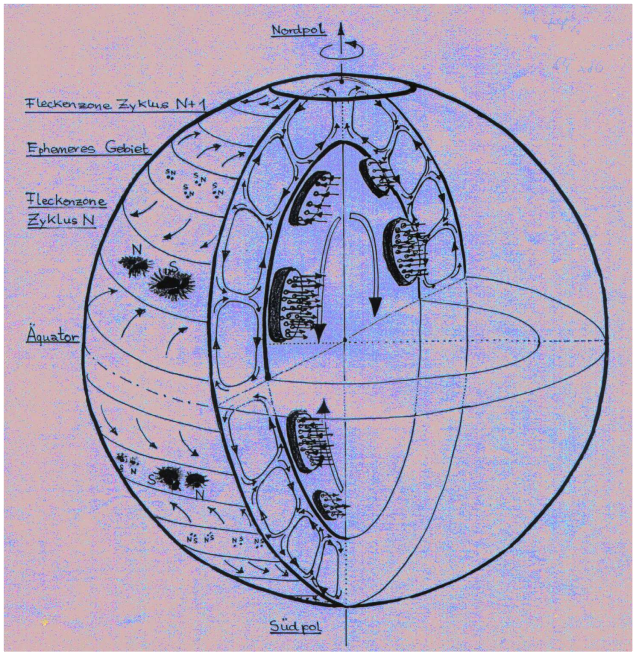
Erzeugung toroidaler Magnetfeldstrukturen



Unter dem Begriff der **differentiellen Rotation** der Sonne versteht man die heute beispielsweise mit Methoden der Helioseismologie bestätigte Tatsache einer charakteristischen räumlichen und zeitlichen Variation der solaren Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der heliografischen Breite und Tiefe im Sonneninneren. Wie auch das Studium der Bewegungen von Sonnenflecken und anderen markanten solaren Phänomene bestätigt, rotiert der solare Äquator mit einer Umlaufszeit von etwa 25 Tagen deutlich schneller als die polnäheren Gebiete mit etwa 32 Tagen. Eine großskalige, in der Meridionalebene gelegene sogenannte **poloidale Feldstruktur**

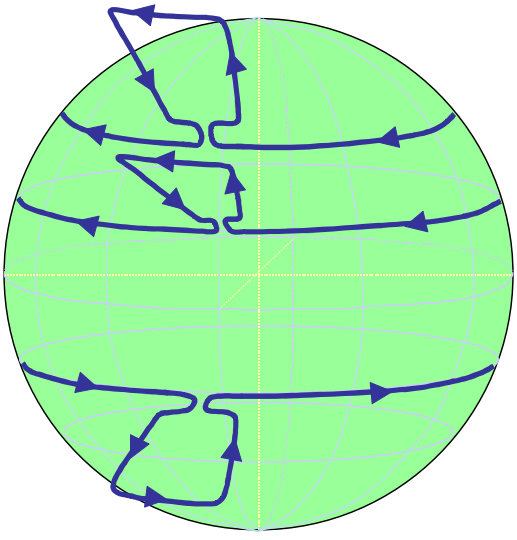
würde auf Grund dieser differentiellen Rotation sowie der **Eingefrorenheit der Feldlinien** bei der im Sonneninneren anzutreffenden extrem hohen elektrischen Leitfähigkeit azimutal **zu einer** sogenannten **toroidalen Feldstruktur aufgewickelt** werden. Nach neuesten Erkenntnissen der Sonnenforschung findet dieser Vorgang tatsächlich in der Grenzschicht zwischen der stabileren Strahlungszone und der turbulenten Konvektionszone, in einer als **Overshoot-Region** bezeichneten Schicht statt. Solange keine Konvektionsströmungen in diese Zone „hineinschießen", „lagern" die hier erzeugten magnetischen Flussröhren relativ stabil. Einsetzende magnetische Instabilitäten (Knick-Instabilität und magnetischer Auftrieb) ermöglichen jedoch immer wieder einen relativ schnellen, „Seeschlangen-ähnlichen" Aufstieg dieser Flussröhren durch die Konvektionszone, den Durchbruch dieser Feldstrukturen in **bipolaren Fleckengruppen** mit den an Hand sogenannter Magnetogramme zu studierenden raum- und zeitabhängigen charakteristischen magnetischen Eigenschaft.



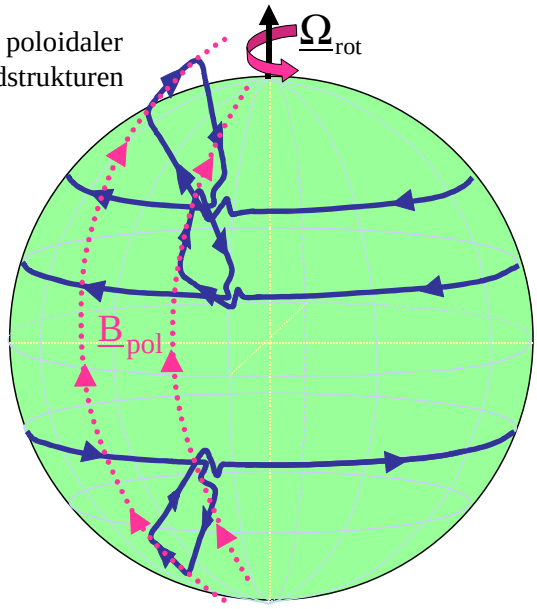


Die **notwendige Regenerierung der ursprünglich als rein poloidal angenommenen Feldstrukturen** erfordert das **Wirken eines weiteren Induktionsprozesses**, der toroidale Feldlinien wieder in die Meridionalebene „zurückdreht". Wiederum auf Grund der Eingefrorenheit der Feldlinien bei hoher elektrischer Leitfähigkeit bewirken dies gerade die auch an der Oberfläche der Sonne in den Granulationsmustern zu beobachtenden **Konvektionsströmungen** unter dem zusätzlichen **Einfluss der Corioliskraft**. Gemeinsam heben sie die toroidalen Felder an, strecken und verdrehen sie in gewünschten Weise in diesem einfachen Modellbild. Die Verknüpfung dadurch erzeugter kleinskaliger poloidaler Feldstrukturen zu **großskaligen poloidalen Feldstrukturen** erfordert die

Magnetokonvektion in der Konvektionszone



Erzeugung poloidaler Magnetfeldstrukturen



Überlagerung und teilweise Auslöschung dieser Strukturen in einem **Rekonnexionsprozess**. Modellrechnungen bestätigen die prinzipielle Wirkungsweise dieses hier skizzierten Szenarios. Materieströmungen verzerren und verformen offensichtlich magnetische Feldstrukturen in plausibler Weise. Wie für einen als **Dynamo** bezeichneten Prozess üblich, wird hierbei **kinetische Energie in magnetische Energie umgewandelt**.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}(\mathbf{x}, t) = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \nabla \times (\alpha \cdot \mathbf{B}) + \eta \cdot \nabla^2 \mathbf{B}$$

Die **Induktionsgleichung** beschreibt die Ursachen und die Entwicklung der sich mit der Zeit t am Ort **x** ändernden magnetischen Flussdichte **B**. Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt über den Geschwindigkeitsvektor **v** den durch die räumliche Änderung der differentiellen Rotation bedingten, auch **ω-Effekt** (der Buchstabe ω kennzeichnet den Einfluss der Winkelgeschwindigkeit) bezeichneten Induktionsvorgang. Der zweite, im oben beschriebenen, sogenannten **αω-Dynamomodell** durch die Wirkung von Konvektionsströmungen und Corioliskraft vermittelten als **α-Effekt** bezeichnete Induktionsvorgang wird durch das Fließen eines Stromes mit einer zum Vektor **B** der magnetischen Flussdichte parallelen Stromdichte α **B** bewirkt. Während beide Induktions-Effekte für die **Erzeugung und periodische Regeneration solarer Magnetfelder** verantwortlich sind, beschreibt der dritte Term die möglichen **Diffussionsprozesse**, durch die das **Magnetfeld abgebaut** wird. Die magnetische Diffusivität $\eta = 1 / \mu\sigma$ ist umgekehrt proportional zur magnetischen Permeabilität und zur elektrischen Leitfähigkeit σ. Bei idealisiert unendlich hoher Leitfähigkeit kann dieser letzte Term in der Induktionsgleichung vernachlässigt werden. Die magnetischen Feldlinien sind dann **in die Plasmamaterie „eingefroren".**

Bei sehr großen Werten von ∇^2 **B** = ∇ (∇ **B**), das heißt bei sehr **starken räumlichen Änderungen des Gradienten** ∇ **B**, der räumlichen Änderung **der magnetischen Flussdichte B,** kann der Abbau des Magnetfeldes bei nicht zu geringen Wertes der Diffusivität η doch sehr effektiv erfolgen. Insbesondere wenn magnetisierte Plasmaelemente mit entgegengesetzt orientierten Feldstrukturen aufeinandertreffen und dadurch ∇^2 **B** in lokal begrenzten Gebiete auf beträchtlich Werte anwächst, wegen dieser räumlich starken Variation bei anwachsender Stromdichte auch der spezifische Widerstand und folglich auch die magnetische Diffusivität von null abweichende endliche Werte annimmt, führen **magnetische Rekonnexionsprozesse** zu **Veränderungen der magnetischen Topologien**, der Verbindungen und Verknotungen der magnetischen Feldstrukturen. Die **Entkoppelung von Plasmamaterie und Magnetfeldern** ermöglicht jetzt eine effektive **Diffusion von Materie**. Die mit dem Prozess der magnetischen Rekonnexion in der Regel einhergehende effektive **Reduzierung der magnetischen Spannung und des magnetischen Druck**s führt zur **plötzlichen Freisetzung** der im Magnetfeld vorher über längere Zeiträume angesammelten und **gespeicherten Energien**. Die in die neugeordneten Magnetfeldstrukturen hineindiffundierte und anschließend wieder an sie gekoppelte Plasmamaterie wird dadurch intensiv beschleunigt. Jetartige bidirektionale Materieströme heizen die Materie auf , regen unterschiedliche Instabilitäten sowie die Ausbildung magnetohydrodynamischer Wellen an, beschleunigen hochenergetische solare Teilchen und bewirken den als Coronal Mass Ejection (CME) bezeichneten Auswurf magnetisierter solarer Plasmamwolken.
Nach neuesten Erkenntnissen transportieren offensichtlich allein in der Meridional-Ebene verlaufende, als **meridionale Zirkulation** bezeichnete Materieströmungen die zum großen Teil auch aus poloidalen Feldstrukturen bestehenden Protuberanzen im Laufe des Sonnenzyklusses polwärts. In hohen heliographischen Breiten sinken diese Feldstrukturen in tiefere Sonnenschichten wieder zurück, werden am Boden der Konvektionszone durch die hier besonders stark ausgeprägte differentielle Rotation wieder in die nach einer Wanderung zum Äquator Fleckenstrukturen erzeugenden toroidalen Feldstrukturen umgewandelt.