



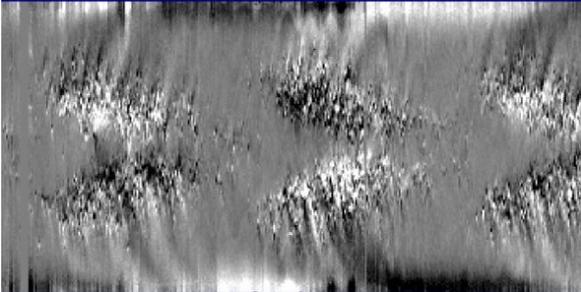
Reto Knaack (Autor)

Global Evolution of Magnetic Fields in the Photosphere of the Sun During Cycles 20-23

Diss ETH No. 15891

Global Evolution of Magnetic Fields in the Photosphere of the Sun During Cycles 20-23

Reto Knaack



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2543>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Abstract

Systematic daily mapping of the Sun's magnetic field by recording the Zeeman effect polarization across the full solar disk has been carried out at the Mount Wilson Observatory (operated by the University of California, Los Angeles) since the 1960s, and at the Kitt Peak Observatory (National Solar Observatory, Arizona) since the 1970s. These magnetic maps or "magnetograms" show a highly complex magnetic pattern with a coexistence of all spatial scales. While the diverse components of this pattern (including the sunspot contributions) have various, limited life times, the global pattern itself evolves in a complex and non-random way with the 22-year magnetic cycle, which is produced by dynamo processes in the interior of the Sun.

Dynamo theories provide a general framework for the generation of macroscopic magnetic fields everywhere in the universe, in planets such as the Earth, in Stars, and galaxies. The oscillating solar dynamo provides a special case that can be explored in great detail and therefore serves as foundation for the application of dynamo theories elsewhere. The underlying notion of the solar dynamo is that the amplification and build-up of macroscopic magnetic fields is the result of the interaction between weak magnetic "seed" fields, convective turbulence and differential rotation. How all this leads to the observed 22-year magnetic cycle of the Sun cannot be properly modeled yet, and the theoretical understanding has to be guided by empirical data.

The purpose of this thesis has been to analyze in detail specific aspects of the vast information contained in the very extensive data sets of full-disk magnetograms available from Mount Wilson and Kitt Peak. We have focused mainly on the temporal evolution of large-scale magnetic fields to shed light on the properties of the underlying dynamo inside the Sun. We have found evidence for distinct north-south asymmetries and regular (quasi-) periodic variations in the magnetic field on time scales

shorter than the 22-year cycle. In particular, a biennial oscillation of 2.3 ± 0.2 yr occurred during the activity maxima of solar cycles 20–22 (1965–1997) and likely also during the current cycle 23 (since 1997). It was strongest for modes that resemble non-linear dynamo waves. Variations with slightly shorter periods of 1.5–1.8 yr were strong during cycles 21 and 23 and much weaker during cycles 20 and 22. A ~ 1.3 yr period occurred during cycles 21–23 and likely also during cycle 20, showing the opposite behavior: it was definitely stronger during cycle 22 than during cycles 21 and 23. Butterfly diagrams of the magnetic flux indicate that this 1.3 yr period is likely to be related to large-scale magnetic surges toward the poles. The 1.3 yr period is of special interest since recent helioseismic studies indicate a similar periodicity in the solar rotation rate at the bottom of the convection zone, where the dynamo is assumed to be located. Furthermore, we have detected an entire set of quasi-periodicities in the range between 100 and 350 days (including the Rieger period around 155 d) that are in good agreement with period estimates for Rossby-like modes (known from geophysics). Finally, the large-scale photospheric magnetic fields are found to rotate almost rigidly with often well-defined rotation periods that may differ not only from cycle to cycle but also between the hemispheres. We assume that this behavior is related to activity complexes (regions with increased flux emergence), which persist for several consecutive rotations.

Although the present analysis is far from being complete, we are confident that it provides a useful overview of the main quasi-periodic oscillations that have occurred in the large-scale magnetic field of the Sun over the last four cycles 20–23, and we hope that it may add a few more missing pieces to the puzzle which our Sun still is.

Zusammenfassung

Systematische tägliche Messungen des Magnetfeldes der Sonne werden mittels des Zeeman-Effekts seit 1966 am Mount Wilson Observatorium (UCLA, University of California, Los Angeles) und seit 1974 am Kitt Peak Observatorium (NSO, National Solar Observatory, Arizona) durchgeführt. Die resultierenden Magnetfeldkarten (oder “Magnetogramme”) zeigen ein sehr komplexes magnetisches Muster, das sich über alle räumlichen Skalen erstreckt. Während die verschiedenen Komponenten dieses Musters (einschliesslich der Sonnenflecken) unterschiedliche, begrenzte Lebensdauern haben, entwickelt sich das globale Muster in einer komplexen und nicht zufälligen Art mit dem 22-jährigen magnetischen Zyklus, welcher durch Dynamo-Prozesse im Innern der Sonne erzeugt wird.

Dynamo-Theorien liefern den allgemeinen Rahmen für die Entstehung von makroskopischen Magnetfeldern überall im Universum, sei es in Planeten wie unserer Erde, in Sternen oder in Galaxien. Der oszillierende Sonnendynamo ist ein Spezialfall, weil er bis in kleinste Details untersucht werden kann und deshalb als Grundlage für die Anwendung von Dynamo-Theorien in anderen Bereichen dient. Die zugrundeliegende Idee des solaren Dynamos ist, dass der Aufbau und die Verstärkung von makroskopischen Magnetfeldern das Resultat der Wechselwirkung von ursprünglich schwachen Magnetfeldern mit konvektiver Turbulenz und differentieller Rotation ist. Wie all dies zum beobachteten 22-jährigen magnetischen Zyklus der Sonne führt, kann jedoch noch nicht zufriedenstellend modelliert werden, und das theoretische Verständnis muss durch empirische Daten unterstützt werden.

Das Ziel dieser Doktorarbeit ist es, einige Aspekte der Informationsvielfalt, die in den sehr umfangreichen Magnetogramm-Datensätzen der Mount Wilson und Kitt Peak Observatorien enthalten ist, genauer zu analysieren. Das Augenmerk richtete sich dabei hauptsächlich auf

die zeitliche Entwicklung der grossskaligen Magnetfelder, um die Eigenschaften des zugrundeliegenden Dynamos im Innern der Sonne besser zu verstehen. Dabei haben wir Hinweise auf ausgeprägte Nord-Süd Asymmetrien sowie gleichmässige (quasi-) periodische Variationen im Magnetfeld gefunden, die kürzer sind als der 22-jährige Zyklus. Speziell ist eine etwa zweijährige Oszillation (mit einer Periode von 2.3 ± 0.2 Jahren), welche während den Aktivitäts-Maxima der Sonnenzyklen 20–22 (1965–1997) und wahrscheinlich auch während demjenigen des aktuellen Zyklus 23 (seit 1997) auftrat. Sie war am stärksten ausgeprägt für Moden, die nichtlinearen Dynamo-Wellen gleichen. Variationen mit etwas kürzeren Perioden von 1.5–1.8 Jahren waren während den Zyklen 21 und 23 stark ausgeprägt und während den Zyklen 20 und 22 sehr viel schwächer. Eine ca. 1.3 jährige Periode trat während den Zyklen 21–23 auf und wahrscheinlich auch während dem Zyklus 20, zeigte aber das entgegengesetzte Verhalten: sie war eindeutig stärker während Zyklus 22 als während den Zyklen 21 und 23. Schmetterlingsdiagramme des Magnetfeldes zeigen, dass diese 1.3 jährige Periode wahrscheinlich mit grossskaligen magnetischen Strömen verknüpft ist, die sich in Richtung der Pole bewegen. Sie ist von speziellem Interesse, da helioseismische Untersuchungen auf eine ähnliche Periode in der solaren Rotationsrate am unteren Ende der Konvektionszone, dem vermuteten Sitz des Dynamos, hindeuten. Zusätzlich haben wir eine ganze Reihe von Quasi-Periodizitäten im Bereich von 100 bis 350 Tagen entdeckt (einschliesslich der Rieger Periode von ~ 155 Tagen), welche sich in guter Übereinstimmung mit den geschätzten Perioden von Rossby-ähnlichen Wellen befinden (welche aus der Geophysik bekannt sind). Was die Rotation der grossskaligen Magnetfelder in der Photosphäre anbetrifft, so rotieren diese beinahe starr mit oft gut definierten Rotationsperioden, welche nicht nur von einem Zyklus zum anderen unterschiedlich sein können, sondern auch zwischen der Nord- und der Südhalbkugel. Wir nehmen an, dass dieses Verhalten verknüpft ist mit sogenannten Aktivitäts-Komplexen (Regionen mit erhöhter magnetischer Aktivität), welche während mehreren aufeinanderfolgenden Rotationen existieren können.

Obwohl die hier präsentierte Analyse alles andere als abgeschlossen sein kann, so sind wir doch zuversichtlich, dass sie einen nützlichen Überblick über die wichtigsten quasi-periodischen Variationen vermittelt, die im grossskaligen Magnetfeld der Sonne über die letzten vier Zyklen

20–23 aufgetreten sind, und wir hoffen, dass sie einige der fehlenden Teile zur Lösung des Rätsels, welches unsere Sonne noch immer darstellt, beifügen kann.