

Diss ETH No. 14034

# High Precision Polarimetry of the Sun

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doktor der Naturwissenschaften

Presented by

Achim Gandorfer

Dipl. Phys. (Universität Würzburg)  
born March 5th 1971  
from Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J.O. Stenflo, examiner  
Prof. Dr. O. von der Lühe and  
Dr. H.P. Povel, coexaminers

Zurich, 2001

## Abstract

This thesis is devoted to the observation of small polarization signals that are produced by scattering processes in the solar atmosphere. These scattering polarization signals reflect the structure of the solar atmosphere and may contribute to the understanding of polarized radiative transfer. More important is however the interpretation of modifications of these polarization signals due to weak magnetic fields via the Hanle effect. The Hanle effect is a promising tool for the investigation of weak or turbulent magnetic fields on the Sun, that fill up to 99 % of the surface of the Sun. This thesis is divided into three parts that try to answer three questions:

How can we measure small polarization signals from the Sun?

What do we see when looking at the Sun with high polarimetric sensitivity?

What can we learn for our understanding of the solar structure and the Sun's magnetic field from these observations?

The first part of this thesis deals with the instrumental and observational aspects of weak solar polarization signals. We present conceptual approaches to high precision solar polarimetry using very specialized instruments. ZIMPOL II is a CCD based imaging polarimeter that uses a masked CCD sensor as part of a synchronous demodulator.

The polarization information is encoded into a time dependent intensity information. This modulation is of crucial importance for the performance of the complete system. Two different approaches are presented, based on piezoelastic modulators as well as using ferroelectric liquid crystal retarders. For both schemes the theoretical and technical details are discussed under the aspect of their suitability for high precision polarimetry.

The second part is devoted to a systematic survey of scattering polarization at the Sun's limb. An atlas of the linear polarization in the vis-

ible part of the spectrum has been recorded and published in the form of a book that can serve as a reference catalogue to guide future observations and to constrain theoretical models dealing with the problem of the formation of the observed spectral features. I describe the data set and give examples of the different physical mechanisms that contribute to the structural richness of this “second solar spectrum”.

The second solar spectrum is a promising tool to investigate the nature of the turbulent background magnetic field of the Sun via the Hanle effect. Before we can use the Hanle effect as a reliable, standard diagnostic tool, various problems have to be solved. In part three of the thesis I present observational material that helped to clarify not only what these problems are, and how they could be solved in future, but also helped to constrain physical models of the formation of prominent lines in the second solar spectrum, such as the Na I  $D_2$ - $D_1$  line pair. This line pair was successfully investigated with full vector polarimetry in regions with varying magnetic activity near the solar limb using ZIMPOL II, demonstrating the enormous observational potential of the instrument.

Together these observations confirm that the magnetic background field of the Sun shows large spatial variations. They also give indications for a temporal variation of the rms field strength which could be correlated with the solar cycle, but this needs further clarification.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Doktorarbeit ist der Messung schwacher Polarisations-signale gewidmet, die durch Streuprozesse in der Sonnenatmosphäre entstehen. Diese Polarisations-signale spiegeln die Struktur der Sonnenatmosphäre wider und erlauben Einsichten in die Problematik des polarisierten Strahlungstransports. Von grösserer Wichtigkeit ist jedoch die Interpretation der magnetischen Beeinflussung dieser Polarisations-signale durch den Hanle Effekt. Der Hanle Effekt ist ein vielversprechender Ansatz in der Untersuchung schwacher Magnetfelder, die bis zu 99% der Sonnenoberfläche bedecken.

Die Arbeit ist in drei Teile gegliedert, die sich mit folgenden Fragen befassen:

Wie können schwache Polarisations-signale gemessen werden?

Welche Signale werden sichtbar, wenn man die Sonne mit hoher polarimetrischer Empfindlichkeit untersucht?

Wie können solche Signale im Hinblick auf die Struktur der Sonne und ihres Magnetfeldes interpretiert werden?

Der erste Teil der Arbeit ist den instrumentellen und beobachtungstechnischen Gesichtspunkten der Messung schwacher Polarisations-signale gewidmet. Konzepte zur solaren Hochpräzisionspolarimetrie mit speziell entwickelten Instrumenten werden vorgestellt. ZIMPOL II ist ein CCD basiertes bildgebendes Polarimeter. Ein speziell maskierter CCD Sensor wird als Teil eines Synchronmodulators genutzt.

Die Polarisationsinformation ist in eine zeitabhängige Intensitätsfluktuation einkodiert. Diese Modulation ist von grundlegender Wichtigkeit für die Funktionsfähigkeit des Systems. Zwei mögliche Ansätze werden diskutiert. Piezoelastische Modulatoren und Ferroelektrische Flüssigkristalle eignen sich als Modulatoren. Beide Modulationsarten werden theoretisch und technisch diskutiert im

Hinblick auf ihre Eignung für solare Polarimetrie.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit der systematischen Erfassung von Streupolarisation am Sonnenrand. Ein Atlas der Linearpolarisation im sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums konnte mit ZIMPOL II erfasst werden. Dieser Atlas wurde als Buch veröffentlicht und dient als Nachschlage- und Referenzwerk für zukünftige Beobachtungen. Diese Datensammlung ist ausserdem hilfreich bei der theoretischen Auseinandersetzung mit dem Problem der Entstehung solcher Polarisations-signale. Eine Beschreibung des Datensatzes erfolgt unter Heranziehung von Beispielen verschiedener physikalischer Mechanismen, die zur strukturellen Vielfalt des "zweiten Sonnenspektrums" beitragen.

Das zweite Sonnenspektrum ist ein vielversprechendes Werkzeug für Untersuchungen des turbulenten magnetischen Hintergrundfeldes der Sonne mithilfe des Hanle Effekts. Bevor der Hanle Effekt jedoch als verlässliche Standarddiagnosemethode gebraucht werden kann, müssen zahlreiche Probleme gelöst werden. In Teil drei dieser Doktorarbeit werden Beobachtungen vorgestellt, die dazu beitragen, diese Probleme zu verstehen, und die helfen, diese Probleme in Zukunft zu lösen. Diese Messungen trugen aber auch zu unserem Verständnis bei, wie komplexe Streupolarisationssignale von starken Linien wie Na I  $D_2 - D_1$  entstehen. Dieses Linienpaar konnte mit ZIMPOL II erfolgreich vektor-polarimetrisch untersucht werden, was das aussergewöhnliche Potential dieses Instruments deutlich belegt.

All diese Beobachtungen bestätigen, dass das turbulente magnetische Hintergrundfeld der Sonne starke räumliche Variationen zeigt. Sie geben ausserdem Hinweise auf zeitliche Veränderungen der rms Feldstärke in Phase mit dem Solaren Aktivitätszyklus. Dies muss aber erst durch weitere Messungen bestätigt werden.