**Diss ETH No. 16110**

# Instrumentierung für hochpräzise Vektorpolarimetrie in der Astronomie

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Daniel Gisler

Dipl. Phys. ETH

geboren am
23.6.1967

von
Spiringen, UR

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. J.O. Stenflo
Dr. A. Gandorfer
Dr. H.M. Schmid

2005

Berichte aus der Astronomie

**Daniel Gisler**

# Instrumentierung für hochpräzise Vektorpolarimetrie in der Astronomie

Shaker Verlag
Aachen 2005

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugl.: Zürich, ETH, Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4600-2
ISSN 0947-7756

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

# Inhaltsverzeichnis

**Symbole** . . . . . 9

**Abkürzungen** . . . . . 10

**Zusammenfassung** . . . . . 11

**Abstract** . . . . . 13

**1. Einleitung** . . . . . 15
1.1 Polarimetrie in der Astronomie . . . . . 15
1.2 Formalismus . . . . . 16
1.2.1 Stokesvektoren . . . . . 16
1.2.2 Muellermatrizen . . . . . 16
1.3 Techniken der Polarisationsmessung . . . . . 18
1.3.1 Grundprinzip der Polarisationsmessung . . . . . 18
1.3.2 Begriffserklärungen . . . . . 20

**Teil I ZIMPOL** 21

**2. Grundlagen** . . . . . 23
2.1 ZIMPOL Prinzip . . . . . 23
2.2 Aktuelles ZIMPOL System . . . . . 25
2.2.1 Modulator . . . . . 25
2.2.2 Analysator (Austrittspolarisator) . . . . . 26
2.2.3 Kamera . . . . . 26
2.2.4 Systemumgebung . . . . . 29

**3. Messmethoden und Limiten** . . . . . 31
3.1 Fehler in der Polarisationsmessung . . . . . 31
3.1.1 Äussere Einflüsse . . . . . 31
3.1.2 Instrumentelle Fehler . . . . . 32
3.2 ZIMPOL spezifische Fehlerquellen . . . . . 34
3.2.1 Parasitäres Signal (Streulicht) . . . . . 34
3.2.2 Ladungstransport . . . . . 35
3.2.3 Pixelrauschen . . . . . 36
3.3 Korrekturmethoden . . . . . 40

3.3.1 Methode der nicht modulierten Referenzmessung . . . . . 40
3.3.2 Zweiphasen-Subtraktionsmethode . . . . . 41
3.3.3 Vierphasen-Additionsmethode . . . . . 43
3.3.4 Einschränkungen . . . . . 43
3.4 Messlimiten von ZIMPOL . . . . . 45
3.5 Messung und Datenreduktion mit ZIMPOL . . . . . 46
3.5.1 Messung der Daten . . . . . 46
3.5.2 Reduktion der Rohdaten . . . . . 47

**Teil II Modulatoren für ZIMPOL II** 49

**4. Grundlagen** . . . . . 51
4.1 Einleitung . . . . . 51
4.2 Effizienz des Modulationsschemas . . . . . 51
4.3 Responsematrixformalismus . . . . . 53
4.4 Computersimulationen . . . . . 54
4.4.1 Mathematica . . . . . 54
4.4.2 Z2sym . . . . . 54

**5. Photoelastische Modulatoren** . . . . . 55
5.1 Funktionsprinzip des PEM . . . . . 55
5.2 Einfach-PEM . . . . . 56
5.2.1 Effizienz des aktuellen Systems . . . . . 56
5.2.2 Optimierung der Schiebezeit . . . . . 58
5.2.3 Messmethoden . . . . . 58
5.3 Doppel-PEM . . . . . 62
5.3.1 Modulatorpaket des Doppel-PEM-Systems . . . . . 62
5.3.2 Effizienz des Doppel-PEM-Systems . . . . . 63
5.4 Zusammenfassung . . . . . 63

**6. Ferroelektrische Flüssigkristall-Modulatoren** . . . . . 65
6.1 Grundlagen . . . . . 65
6.1.1 Flüssigkristalle . . . . . 65
6.1.2 Ferroelektrische Flüssigkristalle . . . . . 65
6.1.3 Funktionsweise eines FLC-Elements . . . . . 66
6.1.4 Eigenschaften von FLC-Elementen . . . . . 66
6.1.5 FLC-Elemente als Polarisationsmodulatoren . . . . . 71
6.2 Einfach-FLC-Modulator . . . . . 71
6.2.1 Optischer Aufbau . . . . . 71
6.2.2 Theoretische Effizienz . . . . . 71
6.2.3 Wellenlängenabhängigkeit . . . . . 72
6.2.4 Gemessene Effizienz im Vergleich mit dem Modell . . . . . 74
6.2.5 Praktische Anwendung . . . . . 75
6.3 Doppel-FLC-Modulator . . . . . 77
6.3.1 Modulatorkonfigurationen . . . . . 77

6.3.2 Optimierungen . . . . . 82
6.3.3 Praktische Umsetzung . . . . . 87

**7. Pockelszellen-Modulatoren** . . . . . 95
7.1 Grundlagen . . . . . 95
7.1.1 Funktionsprinzip einer Pockelszelle . . . . . 95
7.1.2 Eigenschaften einer Pockelszelle . . . . . 97
7.1.3 Pockelszellen als Polarisationsmodulatoren . . . . . 99
7.2 Einfach-PZ-Modulator . . . . . 100
7.2.1 Modulationsschema mit zwei Zuständen . . . . . 100
7.2.2 Modulationsschema mit vier Zuständen . . . . . 100
7.3 Doppel-PZ-Modulator . . . . . 101
7.4 Testmessungen mit PZ-Modulatoren . . . . . 103
7.4.1 Versuchsaufbau . . . . . 103
7.4.2 Messungen . . . . . 103
7.4.3 Beschreibung der Resultate . . . . . 104
7.4.4 Schlussfolgerung . . . . . 105

**Teil III ZIMPOL für Anwendungen in der allgemeinen Astronomie** 107

**8. Wissenschaftliche Ziele und Anforderungen** . . . . . 109
8.1 Einleitung . . . . . 109
8.2 Wissenschaftliche Ziele . . . . . 110
8.2.1 Planeten und Monde des Sonnensystems . . . . . 110
8.2.2 Galaktische Objekte . . . . . 110
8.2.3 Extrasolare Planeten . . . . . 111
8.3 Instrumentelle Anforderungen . . . . . 112
8.3.1 Photoneneffizienz . . . . . 112
8.3.2 Anforderung an Kamera und Sensor . . . . . 113
8.3.3 Anforderung an das Modulatorpaket . . . . . 115

**9. CCD-Sensoren mit Mikrolinsen** . . . . . 117
9.1 Grundlagen . . . . . 117
9.1.1 Mikrolinsentechnik . . . . . 117
9.1.2 Montage von Mikrolinsen-Arrays . . . . . 118
9.1.3 Optische Anforderungen . . . . . 119
9.2 Mikrolinsen-Design mit langer Brennweite . . . . . 122
9.2.1 Optisches Design . . . . . 122
9.2.2 Gemessene Eigenschaften der Mikrolinsen . . . . . 123
9.3 Mikrolinsen-Design mit kurzer Brennweite . . . . . 125
9.3.1 Optisches Design . . . . . 126
9.3.2 Test des neuen ML-Designs . . . . . 127

**10. Achromatische Polarisations-Modulatoren** . . . . . 131
10.1 Grundlagen . . . . . 131
10.1.1 Achromatische Verzögerungselemente . . . . . 131
10.1.2 Achromatische Polarisations-Modulation . . . . . 132
10.2 Achromatische Einfach-Modulatoren . . . . . 133
10.2.1 Einzelnes FLC-Element . . . . . 134
10.2.2 Drei FLC-Elemente . . . . . 137
10.2.3 Bau eines Pancharatnam-FLC-Modulators . . . . . 138
10.3 Achromatische Doppel-Modulatoren . . . . . 141

**11. Polarimetrie von Jupiter und Saturn** . . . . . 145
11.1 Einleitung . . . . . 145
11.2 Messungen . . . . . 146
11.2.1 Versuchsaufbau . . . . . 146
11.2.2 Beobachtungen . . . . . 147
11.2.3 Datenreduktion . . . . . 149
11.3 Beschreibung der Messdaten . . . . . 151
11.3.1 Jupiter . . . . . 151
11.3.2 Saturn . . . . . 155
11.4 Schlussfolgerungen . . . . . 155

**A. Reduktionsroutinen** . . . . . 159
A.1 Konzept . . . . . 159
A.2 Programmstruktur . . . . . 162

**B. Modulator Simulationsprogramm** . . . . . 165
B.1 Konzept . . . . . 165
B.2 Programmstruktur . . . . . 169

**Lebenslauf** . . . . . 174

# Symbole

| | | |
|---|---|---|
| $\Delta n$ | Doppelbrechung | 17 |
| $\epsilon_{total}$ | Totale Effizienz | 52 |
| $\lambda$ | Wellenlänge | 17 |
| $\phi$ | Phasenverzögerung | 17 |
| $\sigma$ | Fehler (Standardabweichung) | 32 |
| $E$ | Elektrisches Feld | 17 |
| $F/\#$ | Öffnungsverhältnis | 99 |
| $f$ | Frequenz | 24 |
| $e^-$ | Elektron | 27 |
| $n_o$ | Brechungsindex für den ordendlichen Strahl | 17 |
| $n_e$ | Brechungsindex für den ausserordendlichen Strahl | 17 |
| $P$ | Polarisation | 16 |
| $q$ | Elektrische Ladung | 27 |
| $r$ | Retardation | 17 |
| $S_g$ | Signal | 40 |
| $t$ | Zeit | 27 |
| $\vec{\epsilon}$ | Effizienzvektor | 52 |
| $\epsilon_I$, $\epsilon_Q$, $\epsilon_U$, $\epsilon_V$ | Effizienzen der Stokesparameter | 52 |
| $\vec{E}$ | Elektrischer Feldvektor | 66 |
| $\vec{I}$ | Intensitätsvektor | 27 |
| $\vec{S}$ | Allgemeiner Stokesvektor | 16 |
| $I$, $Q$, $U$, $V$ | Stokesparameter | 16 |
| $\vec{S}_g$ | Signalvektor | 53 |
| $S_I$, $S_Q$, $S_U$, $S_V$ | Signalparameter | 53 |
| $\mathbf{C}$ | Kalibrationsmatrix | 53 |
| $\mathbf{D}$ | Demodulationsmatrix | 52 |
| $\mathbf{M}$ | Allgemeine Muellermatrix | 16 |
| $\mathbf{M}_\alpha$ | Muellermatrix unter dem Winkel $\alpha$ | 18 |
| $\mathbf{O}$ | Modulationsmatrix (Intensitätsmatrix) | 51 |
| $\mathbf{P}$ | Muellermatrix eines Polarisators | 17 |
| $\mathbf{R}$ | Muellermatrix einer Rotation | 18 |
| $\mathbf{S}$ | Streulichtmatrix | 34 |
| $\mathbf{T}$ | Transformationsmatrix | 28 |
| $\mathbf{V}$ | Muellermatrix einer Verzögerungsplatte | 17 |
| $\mathbf{X}$ | Responsematrix | 53 |
| $\mathbf{Z}$ | Signalmatrix (Zeilendifferenzmatrix) | 53 |

# Abkürzungen

| | |
|---|---|
| A/D | Analog Digital |
| ADU | Analog Digital Unit |
| AO | Adaptive Optik |
| AR | Antireflexion |
| CCD | Charge Coupled Device |
| CIPS | Control and Image Processing System |
| CTI | Charge Transfer Inefficiency |
| ESO | European Southern Observatory |
| ETH | Eidgenössische Technische Hochschule |
| FITS | Flexible Image Transport System |
| FLC | Ferro-electric Liquid Cristals |
| HCN | Hardware Connection Network |
| IRSOL | Istituto Ricerche Solari Locarno |
| KD*P | Kalium Dideuteriumphosphat |
| LBT | Large Binocular Telescope |
| LP | Linearpolarisator |
| LPSP | La Palma Stokes Polarimeter |
| ML | Mikrolinsen |
| PEM | Photoelastischer Modulator |
| PZ | Pockelszelle |
| QE | Quanteneffizienz |
| S/N | Signal/Noise |
| TIP | Tenerife Infrared Polarimeter |
| UV | Ultraviolett |
| VLT | Very Large Telescope |
| ZIMPOL | Zurich Imaging Polarimeter |

# Zusammenfassung

Neben den bewährten Standardtechniken wie Photometrie und Spektroskopie ist die Polarimetrie eine weitere wichtige Beobachtungstechnik in der Astrophysik. Aus dem Polarisationszustand der elektromagnetischen Strahlung lassen sich wertvolle Informationen über den physikalischen Zustand und die Geometrie von astronomischen Objekten gewinnen. Oft sind die zu messenden Polarisationssignale jedoch so klein, dass hochpräzise Instrumente gefordert sind. Insbesondere auf der Sonne ändern sich zudem die physikalischen Eigenschaften in Zeitskalen von wenigen Minuten, was ein Polarimeter erfordert, das den gesamten Polarisationsvektor möglichst simultan messen kann. Das Zurich Imaging Polarimeter (ZIMPOL), welches seit vielen Jahren mit grossem Erfolg in der Sonnenphysik eingesetzt wird, eignet sich bestens für diese beiden Anforderungen. Das Hauptmerkmal von ZIMPOL ist die Kombination eines schnellen Polarisationsmodulators mit einem speziell maskierten CCD-Sensor, welcher gleichzeitig zur Detektion der Photonen und zur Speicherung der Modulationszustände verwendet wird. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der instrumentellen Weiterentwicklung und dem Messen mit ZIMPOL, mit Schwerpunkte auf Präzisionsmessungen, Polarisations-Modulatoren und nicht-solaren Anwendungen.

Der erste Teil der Arbeit befasst sich mit der Messmethodik des Polarimeters. Um mit ZIMPOL höchste polarimetrische Empfindlichkeit zu erreichen, ist das Verständnis unerwünschter Effekte, die durch den maskierten CCD-Sensor verursacht werden, und deren Eliminierung von entscheidender Bedeutung. Diverse Experimente und Computersimulationen wurden ausgeführt um die Detektoreffekte besser zu verstehen. Alternativ zur bisherigen Methode der nicht modulierten Referenzmessung wurden zwei neue Korrekturmethoden entwickelt: Die Zweiphasen-Subtraktionsmethode für Einfach-Modulatorsysteme und die Vierphasen-Additionsmethode für Doppel-Modulatorsysteme. Damit können Messungen mit höherer Effizienz und in kürzerer Zeit durchgeführt werden. Beide Methoden wurden in der Praxis vielfach angewendet und haben sich bewährt.

Eine Schlüsselkomponente von ZIMPOL ist der schnelle Polarisationsmodulator. Dieser wird im zweiten Teil dieser Arbeit behandelt. Photoelastische Modulatoren werden seit Jahren mit grossem Erfolg eingesetzt. Das bestehende System wurde auf die Effizienz und Optimierungsmöglichkeiten untersucht. Das simultane Messen des ganzen Polarisationsvektor ist damit nicht möglich, da zwei photoelastische Modulatoren nicht frequenzgekoppelt werden können. Als Alternative werden ferroelektrische Flüssigkristall-Modulatoren eingesetzt. Die Eigenschaften dieses Modulators wurden experimentell untersucht und mittels Computermodellen simuliert. Durch Parameteroptimierung konnte ein Doppel-Modulator-System erstellt werden,

welches im ganzen sichtbaren Bereich des Spektrums Vektorpolarimetrie mit hoher Effizienz ermöglicht. Geeignete Kalibrations- und Messtechniken wurden dazu entwickelt. Im weiteren wurden Pockelszellen als neue mögliche Modulatoren für ZIMPOL untersucht. Dieser Modulatortyp erlaubt zusätzlich Vektorpolarimetrie im UV-Spektralbereich. Mittels Modellberechnungen wurden verschiedene Modulationsschemen simuliert. In Zusammenarbeit mit dem Astronomischen Institut von Potsdam konnte die Funktionsweise und Machbarkeit dieses System in der Praxis gezeigt werden.

Der dritte Teil der Arbeit behandelt nicht-solaren Anwendungen von ZIMPOL. Die instrumentellen Anforderungen für Messungen lichtschwächerer Objekte wurden untersucht. Kritische Komponenten für solche Anwendungen sind der CCD-Sensor mit Mikrolinsen-Array zur Steigerung der Detektorempfindlichkeit und achromatische Modulatoren für Messungen über einen breiten Wellenlängenbereich. Die Eigenschaften von Mikrolinsen-Sensoren wurden theoretisch untersucht und in der Praxis anhand von zwei unterschiedlichen Mikrolinsen-Designs getestet. Auf Basis von ferroelektrischen Flüssigkristall-Modulatoren wurden verschiedene achromatische Modulatorsysteme modelliert. Die technische Umsetzung solcher Systeme wurde in der Praxis anhand eines Pancharatnam-Modulators erfolgreich erprobt. Als eine erste nicht-solare Anwendung von ZIMPOL wurden Polarisationsmessungen von Jupiter und Saturn am McMath-Pierce Teleskop auf Kitt Peak durchgeführt. Bekannte Polarisationseigenschaften dieser Planeten konnten mit grösserer Detailgenauigkeit bestätigt werden und bisher unbekannte Effekte, wie z.B. unterschiedliche Polarisationswerte in den Wolkenbändern des Jupiters, wurden beobachtet.

Im Anhang wird das Konzept zweier Computerprogramme beschrieben, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit entwickelt wurden. Um Messdaten von ZIMPOL schnell und effizient auszuwerten, wurde ein Satz von Reduktionsroutinen programmiert. Ein modularer und verallgemeinerter Aufbau erlaubt einen vielseitigen Einsatz und lässt sich für neue Anwendungen leicht erweitern. Für die Entwicklung von Doppel-Modulatoren und achromatischen Modulatoren wurde das FORTRAN-Programm z2sym entwickelt. Damit können komplexe Modulatorsysteme aus ferroelektrischen Flüssigkristall-Elementen simuliert und optimiert werden.

# Abstract

Besides approved standard techniques like photometry and spectroscopy, polarimetry is another important observational tool in astrophysics. Polarisation of the electromagnetic radiation provides valuable information on the physical state and the geometry of astronomical objects. However, as polarisation signals are often small, high-precision instruments are needed. On the Sun the physical properties vary on time scales of a few minutes, which requires a polarimeter that can measure all components of the full polarisation vector simultaneously. The Zurich Imaging Polarimeter (ZIMPOL), which has been used with great success in solar physics for many years, satisfies very well these two requirements. The main feature of ZIMPOL is the combination of a fast polarisation modulator with a special masked CCD sensor, which detects photons and buffers the modulation states at the same time. The present thesis deals with instrumental developments and measuring techniques of ZIMPOL with emphasis on high precision measurements, polarisation modulators, and non-solar applications.

The first part of the thesis addresses the measuring methodology of the polarimeter. To achieve highest polarisation sensitivity with ZIMPOL, the understanding of unwanted effects caused by the masked CCD sensor and the means to eliminate them is of decisive importance. Various experiments and computer simulations were performed to understand these effects better. As an alternative to the previous method with a non modulated reference measurement, two new correction techniques were developed: The two-phase mode for single modulator systems and the four-phase mode for double modulator systems. They allow measurements with higher polarisation efficiency and in shorter time. Both methods have been used often in subsequent observing campaigns and have proven themselves.

A key component of ZIMPOL is the fast polarisation modulator. It is the topic of the second part of the thesis. Photoelastic modulators have been used with great success for many years. The existing system was analysed with respect to its efficiency and optimisation potential. With this type of modulator it is not possible to measure the full polarisation vector simultaneously, since two photoelastic modulators cannot be coupled. Ferro-electric liquid crystal modulators are used as an alternative. The properties of such a modulator were determined experimentally and simulated by computer models. Through parameter optimisation a double modulator system has been developed, which allows vector polarimetry with high efficiency throughout the whole visible range of the spectrum. Suitable calibration and measuring techniques had to be found as well. Subsequently Pockels cells were examined as a new possible modulator for ZIMPOL. In addition this modulator type permits vector polarimetry in the UV spectral range. By means of model

calculations different modulation schemes were simulated. In cooperation with the Astronomical Institute of Potsdam the functionality and feasibility of this system could be demonstrated in practice.

The third part of the thesis deals with non-solar applications of ZIMPOL. The instrumental requirements for measurements of fainter objects were examined. Critical components for such applications are the CCD sensor with a microlens array for the increase of the detector sensitivity, and achromatic modulators for simultaneous recordings over a broad wavelength range. The properties of microlens sensors were examined theoretically and tested practically for two different microlens designs. Based on ferro-electric liquid crystal modulators different achromatic modulator systems were modeled. The technical feasibility of such systems was successfully tested on a Pancharatnam modulator. As a first non-solar application of ZIMPOL polarisation measurements of Jupiter and Saturn were carried out at the McMath-Pierce telescope on Kitt Peak. Known polarisation features of these planets could be confirmed with higher detail and precision, and unknown previously effects were seen, e.g. different polarisation values in the cloud bands of Jupiter.

In the appendix a conceptual description of two computer programs are given, which were developed for this work. To analyse observing data of ZIMPOL fast and efficiently, a set of reduction routines were developed. Modular and generalised construction permits a versatile use and can easily be upgraded for new applications. For the development of double modulators and achromatic modulators the FORTRAN program z2sym was written. With it complex modulator systems of ferro-electric liquid crystal elements can be simulated and optimised.