FOCES

Kurzbeschreibung

(deutsche Version)

Juni 1996

Inhaltsverzeichnis

1 Beschreibung des Instruments

FOCES ist ein **F**aser **O**ptik **C**assegrain **E**chelle **S**pektrograph, der stationär in einem der Coudé-Laboratorien des 2.2m oder 3.5m-Teleskop-Gebäudes aufgebaut ist. Der Spektrograph ist mit dem Cassegrain-Fokus durch optische Lichtleiter verbunden. Die resultierende optische, mechanische and thermische Isolation des Échelle-Spektrographen ist beabsichtigt, um Probleme mit Schwingungen, Instrumentdurchbiegung am Teleskop und Temperatur-Gradienten zu vermeiden, die oft in Teleskopgebäuden auftreten. Die Vor- und Nachteile werden in einer separaten Veröffentlichung beschrieben (Pfeiffer *et al.* 1996). Das Instrument besteht aus fünf Komponenten,

- dem *Échelle-Spektrographen*,
- der *Teleskopeinheit*, die den Fasereingang und eine Anzahl von Kalibrierungslichtquellen trägt,
- dem *optischen Lichtleiter*, mit Faserein- und -ausgang, der das astronomische Licht von der Cassegrain-Fokalebene zum Eingangsspalt des Spektrographen transportiert,
- der *CCD-Kamera*, die zur Aufnahme des zweidimensionalen Échelle-Formats dient, und
- dem *Computer-Kontrollsystem*

Typische Eigenschaften dieser Komponenten werden im folgenden Abschnitt präsentiert. Die Operation wird im darauffolgenden Abschnitt beschrieben.

1.1 Spektrograph

FOCES ist ein mittel- bis hochauflösender Spektrograph, der hauptsächlich für den Einsatz in der Stellarspektroskopie entwickelt wurde. Er kann alternativ am Calar Alto 2.2m- oder dem 3.5m-Teleskop installiert werden; dies wird durch einen Transport des Spektrographen mit einer speziellen Transportvorrichtung erreicht. Der Spektrograph kann entweder mit einer Einzelfaser oder mit einer Doppelfaser versehen werden. Die letztere Konfiguration dient zur Beobachtung mit hintergrundbegrenzten Signalen schwacher Objekte am 3.5m-Teleskop.

Die vorausgesetzten astronomischen Randbedingungen erfordern einen Kompromiß zwischen Échellegröße, Faserdurchmesser und verfügbaren CCDs. Der Échelle-Spektrograph arbeitet somit an beiden Teleskopen mit einer spektralen Auflösung von $R = 37000$ bei einem 2-Pixel-Auflösungselement auf einem 1024^2 Tektronix-CCD (wobei der Pixelabstand 24 μm beträgt). Das volle **Auflösungsvermögen** des Spektrographen am 2.2m-Teleskop ist definiert durch $R\phi = 56000$, wobei ϕ die Spaltbreite in Bogensekunden ist.

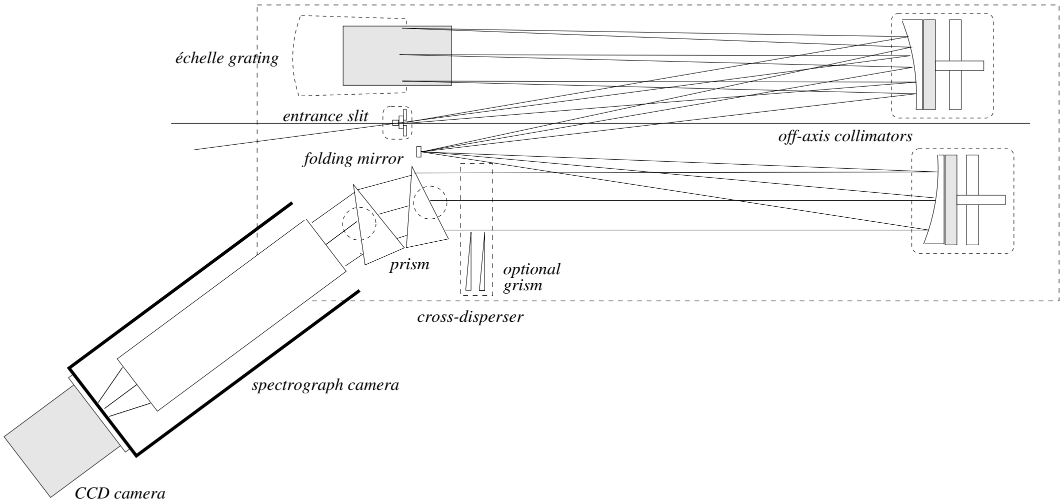

Abb. 1: Optisches Layout des FOCES-Spektrographen mit Eintrittsspalt, Kollimator(en), Échelle-Gitter, Faltspiegel, Prismen-Querdisperser und Kamera

Im Einzelfasermodus wird eine volle **spektrale Überdeckung** über mehr als 300 nm in $\approx$ 70 Ordnungen auf einem 1024^2 Tektronix CCD-Chip erreicht; eine volle **Überlappung** der Ordnungen erstreckt sich allerdings nur bis $\approx$ 550 nm. Der Doppelfaserbetrieb erfordert eine zusätzliche Querdispersion; hier wird eine volle Überdeckung nur für $\approx$ 150 nm gewährleistet. Der gewünschte **Wellenlängenbereich** kann dabei mit dem Querdisperser eingestellt werden. Der Durchsatz der gesamten Teleskop-Instrument-Anordnung im sichtbaren Spektrum liegt bei 0.1 einschließlich der Empfindlichkeit der CCD-Kamera. Bei mäßigem *seeing* mit FWHM 1.5 bis $2.0''$ ergibt sich so ein $S/N \approx 100$ für einen V = 11 mag Stern in einer 60 min-Belichtung am 2.2m-Teleskop, wobei ein Eintrittsblendendurchmesser von $3.5''$ und ein Spektrographen-Eingangsspalt vorausgesetzt wurde, der gerade die volle Auflösung von 37 000 or 2 CCD-Pixeln ergibt. Die Grenzhelligkeit für hervorragendes *seeing* ist dann $\approx$ 0.5 bis 1.0 mag schwächer.

1.1.1 Optisches Design

Das optische Layout des FOCES-Spektrographen folgt einem *white pupil* Design, wie es kürzlich durch Baranne (1988) dokumentiert wurde. Die Vorteile werden dort im Detail diskutiert; es genügt daher die Erwähnung, daß eine der interessanten Eigenschaften für das FOCES-Design die Zwischenabbildung des Spektrums ist, die sehr effizient vom Streulicht befreit werden kann, das vom Échelle-Gitter stammt. Das optische Layout des FOCES ist dem Entwurf für den UV-Visual Échelle-Spectrograph sehr ähnlich, der für das ESO Very Large Telescope gebaut wird (Dekker *et al.* 1992). Die optischen Eigenschaften des FOCES-Designs sind unten in der Tabelle notiert, und das Layout ist in Abb. 1 zu sehen.

Der **Kollimator** besteht aus einem Paar von außeraxialen Parabolspiegeln, die

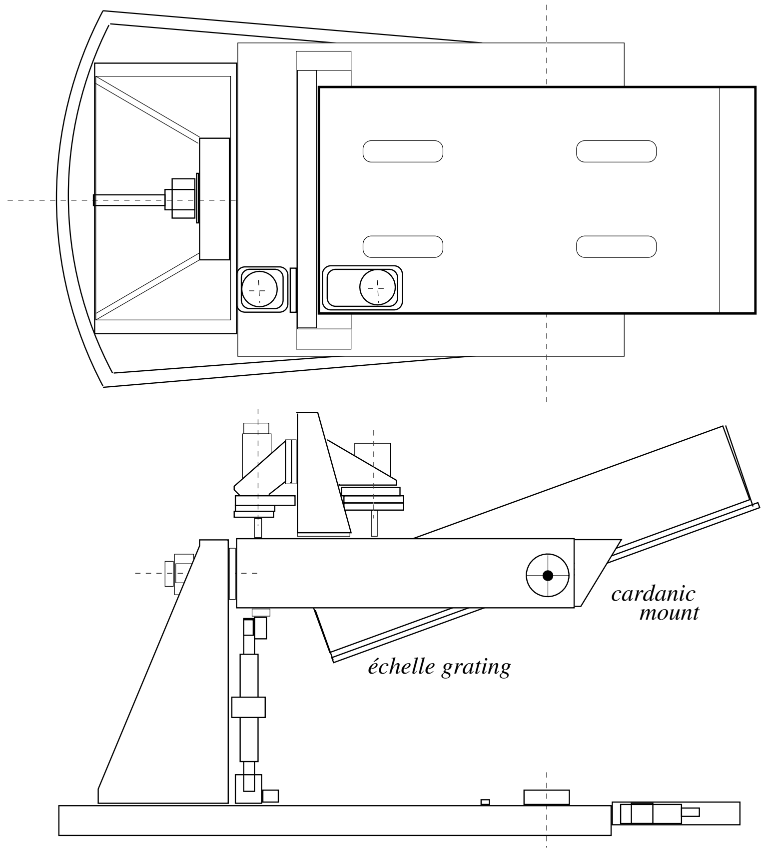

Abb. 2: Échelle-Montierung in Draufsicht (*oben*) und von der Seite (*unten*)

aus einem einzelnen parabolischen $f/2$ Zerodur™-Rohling geschnitten wurden. Die Spiegel sind in Aluminiumgehäusen montiert, die eine Feineinstellung mit Präzisionsschrauben erlauben. Optimale Reflexion im visuellen wird durch eine Silberbeschichtung erreicht, die durch einen speziellen Kunststoffmantel geschützt ist. Der Reflexionsgrad beträgt mehr als 99% am Maximum (bei 600 nm), fällt jedoch bei 400 nm auf 90% ab. Der quasi-symmetrische Aufbau der Parabolspiegel erlaubt eine nahezu perfekte Beseitigung der Koma vom Spaltbild.

Größe der optischen Bank		$2400 \times 900 \times 203$ mm
off-axis Parabolspiegel	Brennweite	1524 mm
	Durchmesser	254 mm
Échelle-Gitter	Größe	$165 \times 320 \times 50$ mm
	Blazewinkel	65°
	Gitterkonstante	31.6 lines/mm
Querdisperser-Prismen	Größe	$190 \times 160 \times 112.6$ mm
	Ablenkwinkel	$\approx 33°$
Spektrographen-Kamera	Brennweite	455 mm ($f/3$)

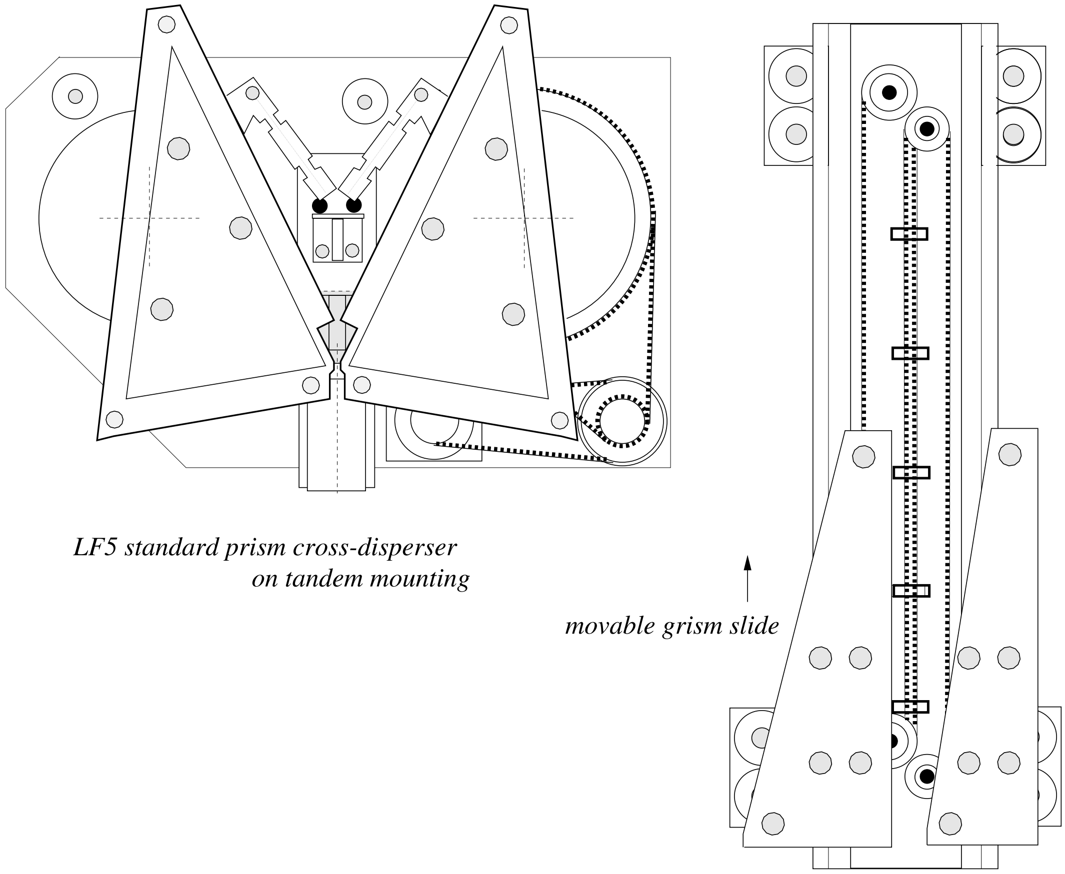

Abb. 3: Montierung der Querdisperser-Tandemprismen

Das **Échelle-Gitter** ist ein Standard R2 Échelle von Milton Roy. Die geritzte Fläche entspricht einer Überfüllung durch den 150 mm-Strahl um 34 mm; diese 11%ige lineare Überfüllung ergibt jedoch nur 4.5% Vignettierung des Strahls, wodurch das Produkt aus Durchsatz und Auflösung optimiert wird. Wie aus Abb. 1 ersichtlich ist, arbeitet der Spektrograph in einer extremen Littrow-Konfiguration des Échelles, die nur durch einen von Null verschiedenen Winkel quer zur Richtung der Dispersion möglich wird, mit $\gamma = 1.4°$. Die offensichtlichen Vorteile der Littrow-Konfiguration (*cf.* Schroeder 1987) liegen in der erhöhten Effizienz des Gitters.

Das Échelle-Gitter ist **kardanisch montiert**, wodurch alle drei Achsen justierbar sind (siehe Abb. 2). Die Gitterfläche ist nach unten orientiert, um Staubablagerungen zu vermeiden. Die Justierung ist auf etwa ± 10 Bogensekunden genau, auf jeder der 3 Achsen. Zwei Achsen werden manuell mit Stellschrauben kontrolliert; die transversale, horizontale Achse kann ausgelesen und mit einem Schrittmotor bewegt werden, wobei ein Absolutencoder benutzt wird. Diese Anordnung erlaubt eine genaue Zentrierung der Blazefunktion auf dem Detektor. Absichtlich wird dadurch auch eine *Dezentrierung* der Ordnungen möglich, sodaß im nahen IR, wo die Ordnungsflanken außerhalb der normalen Überdeckung liegen, bestimmte Wellenlängenbereiche wieder zugänglich gemacht werden.

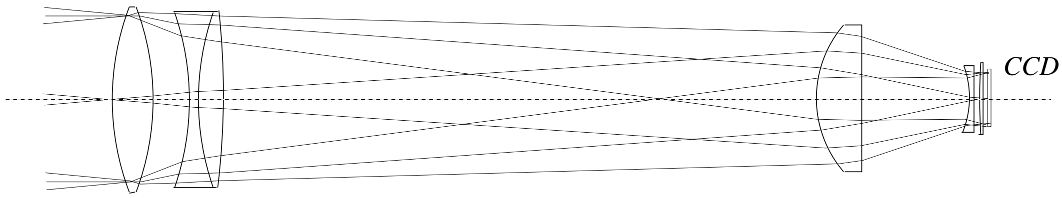

Abb. 4: Spektrographenkamera

Zwischen den beiden Kollimatoren wird der konvergente Strahl auf einen ebenen Zerodur$^{\mathrm{TM}}$-**Faltspiegel** mit der Grösse 100×10 mm abgebildet. In dessen unmittelbarer Nähe findet sich ein intermediäres Bild des Échellespektrums. Daraus ergibt sich die einmalige Möglichkeit, das Spektrum von Streulicht zu befreien, welches vom Échellegitter oder anderen Aperturen stammt. Die damit erzielte Verbesserung des Spektrums entspricht fast einer *double pass*-Anordnung, wie die Ergebnisse zeigen. Nach Verlassen des zweiten Kollimators tritt der Strahl in die **querdispergierenden Tandemprismen** ein (siehe Abb. 3). Die Prismen sind aus LF5 mit einer Basislänge von 160 mm und einer Breite von 112.6 mm. LF5 wurde wegen seiner hohen Transmission im nahen UV gewählt. Die notwendige starke Querdispersion erfordert andererseits das Tandem-Arrangement, um Probleme mit der Totalreflexion an einem einzelnen $55°$-Prisma zu vermeiden. Die symmetrische Position wird mit einer Genauigkeit von 2 Bogenminuten ausgelesen und eingestellt. Der Doppelfasermodus erfordert eine weitere Verstärkung der Querdispersion durch zusätzliche Grisms, die in den Strahl gefahren werden können. Verglichen mit einem Gitter als Querdisperser gewinnt man bei der Prismenanordnung etwa 20 bis 30%. Außerdem wird das Niveau des *lokalen Streulichts* erheblich gesenkt. Das Prisma erlaubt darüberhinaus eine ökonomischere Nutzung der CCD-Fläche, da seine Ordnungstrennung Δy nur $\propto \lambda^{-1}$ variiert. Die Oberflächen sind antireflexionsbeschichtet, mit einer Effizienz besser als 95% über den gesamten Spektralbereich. Die **Spektrographenkamera** ist ein $f/3$-Design von Carl Zeiss Jena. Sie besteht aus zwei Linsengruppen (siehe Abb. 4). 80% der Energie werden innerhalb 24 μm auf dem CCD-Chip gemessen (im gesamten Feld und Spektralbereich). Aufgrund einer Spezialbeschichtung der optischen Oberflächen ist ihre Transmission besser als 85% im visuellen und im nahen IR.

1.1.2 Mechanisches Design und Stabilität

Der Spektrograph wird auf einer $2400 \times 900 \times 203$ mm großen optischen Bank montiert, die aus ferromagnetischem, rostfreiem Stahl besteht (das Gewicht beträgt ≈ 300 kg). Die mechanischen Eigenschaften des Spektrographen sind für Frequenzen unterhalb 50 Hz optimiert, um kleine Schwingungen des Doms zu kompensieren. Die Resonanzen der optischen Bank bei 140 Hz und höher werden pneumatisch mittels eines Systems von Öldruckabsorbern gedämpft, auf welchem der Aufbau ruht. Die mechanische Stabilität ist daher sehr gut und erlaubt besonders genaue Bestimmungen von Radialgeschwindigkeiten.

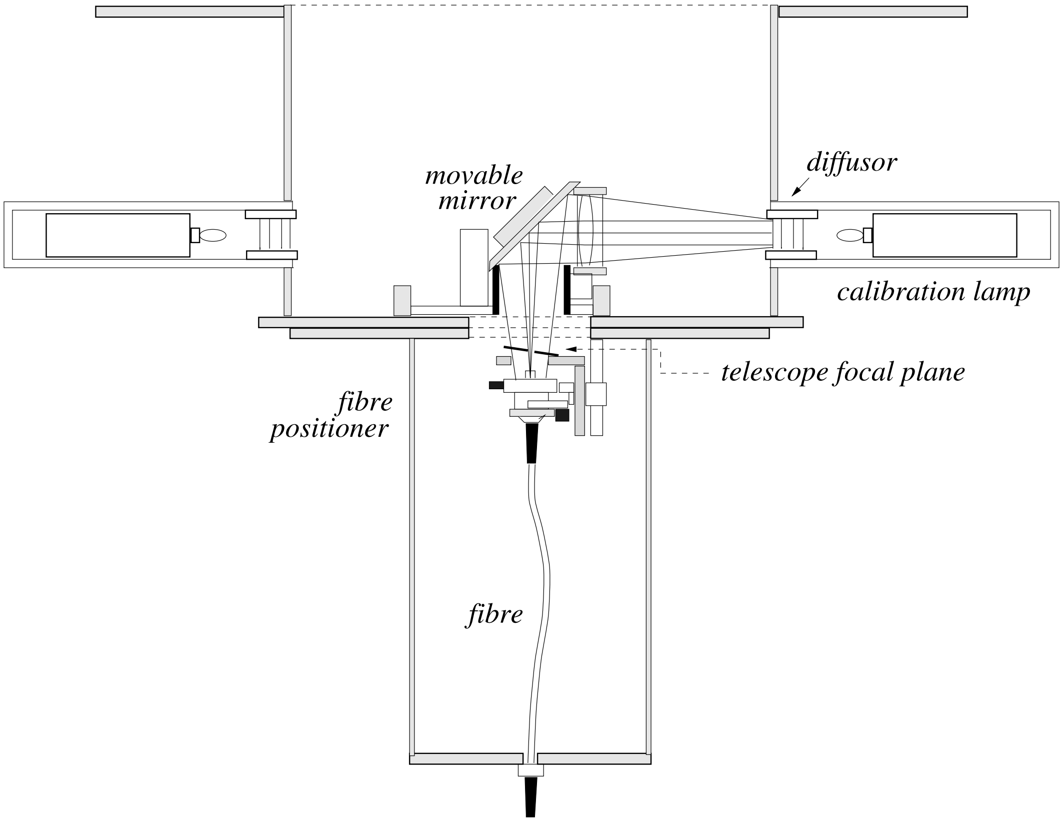

Abb. 5: Teleskopmodul mit Faserkopf und Kalibrierungslampen

Thermische Stabilität wird durch das Design selbst erzwungen. FOCES wird einerseits unter kontrollierten thermischen Bedingungen im Coudé-Labor aufgebaut. Die Temperaturschwankungen sollten damit kleiner als 2 K sein. Zusätzlich ist der Spektrograph durch ein Gehäuse isoliert, welches aus Styropor besteht. *Aktive* Kühlung erscheint daher überflüssig, insbesondere weil die eigene Wärmeentwicklung vernachlässigbar gering ist. Dies wird durch das Ausschalten der Antriebsmotoren sofort nach Einstellung des Spektrographen garantiert.

1.2 Teleskopmodul

Die Schnittstelle zwischen Teleskop und Faseroptikeingang besteht aus dem Teleskopmodul, das am Cassegrainflansch montiert wird (siehe Abb. 5). Das Teleskopmodul trägt den Faserkopf mit einer geneigten, reflektierenden Eintrittsblende, welche den Raumwinkel definiert, der von der Faser aufgenommen wird. Gleichzeitig erlaubt diese Anordnung die präzise Einstellung und Nachführung durch die DSAZ-Fernsehleiteinrichtung. Zusätzlich enthält das Teleskopmodul Kalibrierungslampen für *Flatfield-* und *Vergleichslicht*-Belichtungen.

1.2.1 Eintrittsblende

Das Licht, das durch den Lichtleiter in den Échelle-Spektrographen eintritt, fällt zunächst durch ein kreisförmiges Diaphragma in einem kleinen geneigten Spiegel unmittelbar oberhalb des Faserkopfes. Drei verschiedene solche Eintrittsblenden sind verfügbar, mit entsprechenden Eintrittslichtkegeln und daraus folgender Auflösung,

Durchmesser	Seeing FWHM		Faser f-ratio		Auflösung
(μm)	2.2m	3.5m	2.2m	3.5m	
130	1.5″	0.8″	6.2	7.7	37000
200	2.3″	1.2″	4.0	5.0	25000
300	3.5″	1.8″	2.7	3.3	16000

Das vom Rand der Eintrittsblende reflektierte Licht kann leicht mit der Fernsehleiteinrichtung beobachtet werden.

Im *Doppelfaserbetrieb* besteht die Eintrittsapertur aus 2 Lochblenden gleichen Durchmessers, die 3 mm voneinander getrennt sind. Dies entspricht in der Fokalebene 35 Bogensekunden am 2.2m- oder 18 Bogensekunden am 3.5m-Teleskop. Die Richtungsorientierung kann durch Rotieren der Fernsehleiteinrichtung geändert werden.

1.2.2 Kalibrierungslampen

Das FOCES-Teleskopmodul stellt zwei Kalibrierungslichtquellen zur Verfügung, die sich in Zylindern befinden, jeweils in 90° Abstand. Ihre Strahlen haben ungefähr das gleiche Öffnungsverhältnis wie der Teleskopstrahl, wodurch eine ähnliche Ausleuchtung der Eintrittsblende garantiert wird. Die eigentliche Lichtquelle bildet ein Diffusor, dessen Blendendurchmesser den Lichtkegel bestimmt. Das Licht wird durch einen 45°-Umlenkspiegel auf die Eintrittsblende abgebildet, welcher mit einem Schlitten in das Feld gefahren und in 90°-Schritten rotiert werden kann.

Kalibrierungslichtquellen sind eine Halogenlampe für *flatfield*-Belichtungen und eine ThAr-Lampe für Vergleichslicht-Standards. Beide Lampen und der Feldspiegel werden von der Konsole aus bedient.

1.3 Lichtleiteroptik

Den wahrscheinlich kompliziertesten Teil des FOCES bildet die Lichtleiteroptik, die den Teleskopfokus auf den weit entfernten Spektrographenspalt transferiert. Dem hier benutzten Design gingen ausgedehnte Untersuchungen verschiedener Lichtleiter-Charakteristiken voraus, die in der Auswahl der Polymicro-Fasern FVP, FHP und FLP mit je 100 μm Durchmesser endeten.

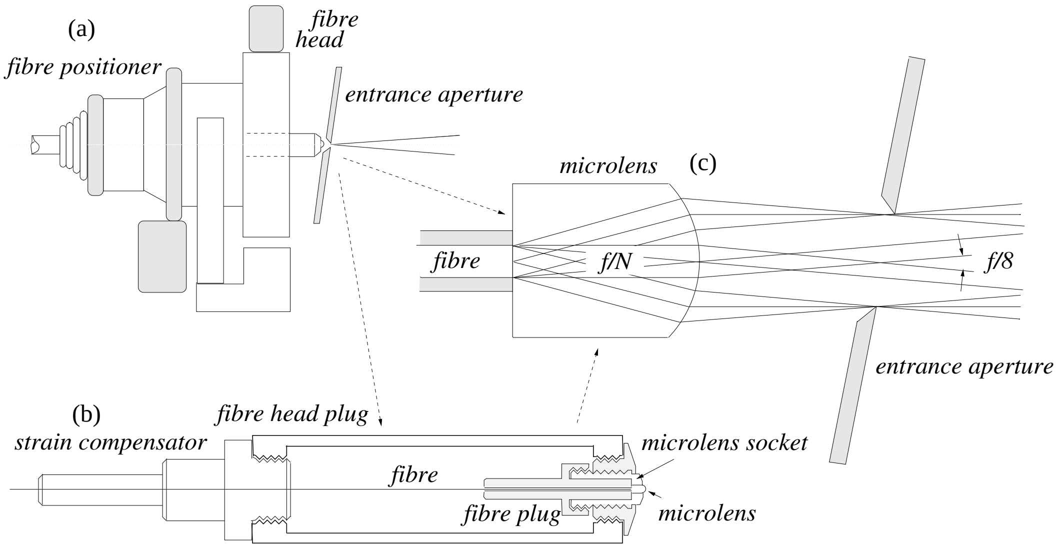

Abb. 6: Lichtleiterkopplung; (a) Faserkopf-Positionierung, (b) Faserkopfstecker mit Lichtleiter und Mikrolinse, (c) Abbildung der Teleskop-Pupille

Bei beiden Teleskopen beträgt die Entfernung zwischen Cassegrain-Fokus und Spektrograph etwa 18 m. Die zur Überbrückung notwendige Lichtleiteroptik enthält den *Faserkopf*, die Lichtleiter selbst, eine spezielle *Zugentlastungs-Vorrichtung* und den *Spektrographen-Eintrittsspalt*.

1.3.1 Faserkopf

Wie in Abb. 5 dargestellt, wird der Faserkopf am Teleskopmodul direkt unterhalb der Fokalebene des Teleskops befestigt. Seine optische Konfiguration ist in Abb. 6 zu sehen. Sie besteht aus einem Faserkopfstecker, der in die Positionierungseinheit gesteckt wird, wonach der Faserkopf durch entsprechende Schlitten justiert werden kann. Der Faserkopfstecker enthält das Ende des Lichtleiters und die Mikrolinse, welche zur Abbildung der Teleskop-Pupille auf den Lichtleiterquerschnitt benutzt wird. Das Abbildungsprinzip ist in Abb. 6(c) dargestellt, wo deutlich zu sehen ist, daß der Durchmesser der Eintrittsblende das Öffnungsverhältnis des Lichtkegels bestimmt, der in den Lichtleiter eintritt. Wie im nächsten Abschnitt beschrieben, sollte die Eintrittsblende daher mit Rücksicht auf das *seeing* bestimmt werden.

1.3.2 Lichtleiter und Zugentlastung

Degradationstests zeigen für alle Lichtleiter deutliche Reaktionen auf Zug und Biegung. Lange, vertikal aufgehängte Lichtleiter leiden grundsätzlich unter ihrem Eigengewicht; allerdings gilt es ebenso sehr, starke Krümmungen zu vermeiden. Die FOCES-Lichtleiter werden daher in mehreren Schläuchen verlegt, die die meisten Kräfte aufheben. Von innen nach außen sind dies der mitgelieferte Polyamidmantel, ein eng anliegender Teflonschlauch und eine ebenso

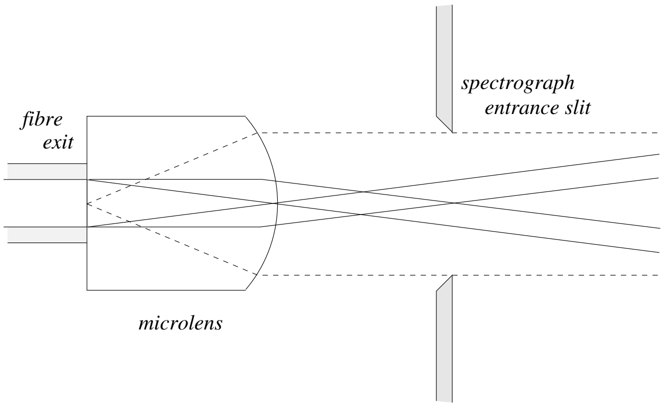

Abb. 7: Faserausgang und Spektrographen-Eintrittsspalt

eng anliegende Stahlspirale. Nicht alle residuellen Eigenschaften der Lichtleiter sind verstanden, sodaß man im Zusammenhang mit FOCES von *experimenteller Optik* sprechen muß. Die letzten Testbeobachtungen (Oktober 95) zeigen ein nicht-graues Rauschen auf einem Niveau von etwa 0.5% des Signals, wenn sich die Faser während der Belichtung bewegt (wie *z.B.* mit dem Teleskop).

Trotz sorgfältiger Konfektionierung wirken immer noch geringe Kräfte auf die Lichtleiter, insbesondere Differenzkräfte durch unterschiedliche Ausdehnung von Lichtleiter und Hülle. Der Lichtleiter wird daher durch eine Zugentlastungs-Vorrichtung gelenkt, die direkt am Spektrographen befestigt ist. Dort läuft der Lichtleiter in einigen Schlingen frei von jeglicher Ummantelung.

1.3.3 Faserausgang und Spektrographen-Eintrittsspalt

Der Faserausgang ähnelt optisch weitgehend dem Eingang. Er wird im gleichen Typ von Positionierungseinheit montiert, wobei auch wieder ein Faserkopfstecker zum Einsatz kommt. Im Eintrittsspalt erzeugt der Faserausgang ein weitgehend *verwischtes Bild* der Eintrittsblende. Das Abbildungsprinzip zeigt Abb. 7. Die Vorrichtung erlaubt eine einfache und effiziente Verbesserung der spektralen Auflösung durch Verengung des Eintrittsspalts. Die entsprechenden *Lichtverluste* sind beträchtlich geringer als bei einem entsprechend dünneren Lichtleiter oder einer kleineren Eintrittsblende (siehe nächster Abschnitt).

Durch den symmetrischen Einsatz optischer Elemente am Eintritt und Ausgang der Lichtleiter wird neben der gleichförmigen Ausleuchtung der Faser garantiert, daß eine ungewollte, zuätzliche Degradation des Lichtkegels *nicht* die Effizienz sondern ausschließlich die spektrale Auflösung des FOCES beeinträchtigt.

1.4 CCD-Kamera

Auf dem Calar Alto wird FOCES mit einer der DSAZ CCD-Kameras betrieben, vorzugsweise einer Kamera mit Tektronix 1024^2-Chip. Andererseits kann mit einem 2048^2 CCD mit 15 μm Pixelabstand die volle 2-Pixel-Auflösung von $R \geq 50\,000$ realisiert werden, vorausgesetzt der Eintrittsspalt des Spektrographen ist entsprechend geschlossen.

Hinweis

Die folgende Benutzungsanleitung für FOCES ist eine deutsche Version der Originaldokumentation, die für Beobachtungen, die Justierung des Spektrographenspalts und die Auswechslung von optischen Fasern und Eintrittsblenden notwendig ist. Eine erfolgreiche Benutzung ist ohne genaue und wohlüberlegte Befolgung der hier angegebenen Hilfen *nicht* möglich. Die nachfolgend beschriebenen Arbeiten und Handgriffe sind zwar alle einfach durchzuführen, erfordern aber ein großes Maß an *Fingerspitzengefühl*. Ein Minimum an Training *vor Beginn der Beobachtungen* ist daher erforderlich, und es wird vorausgesetzt, daß der astronomische Beobachter vorher durch einen Techniker oder einen DSAZ-Astronomen sorgfältig eingewiesen wurde.

Sofern Zweifel bezüglich der Funktion einzelner Komponenten bestehen, ist die (englische) Originaldokumentation maßgeblich.

Achtung ! Die Installation des Echelle-Spektrographen, der Transport zwischen 2.2m- und 3.5m-Teleskop, die optische Justierung und Fokussierung der Komponenten darf nur durch ausgebildetes DSAZ-Personal vorgenommen werden.

2 Einstellung des Instruments

FOCES wird hauptsächlich von einem Konsolterminal aus bedient, das während der Beobachtung über eine Anzahl von elektronischen Steuerungen die für eine Belichtung notwendigen Einstellungen erzeugt. Die entsprechenden Kommandos werden in Abschnitt 3 beschrieben. Unter einigermaßen konstanten Beobachtungsbedingungen ist ein weitergehender Eingriff in den Spektrographen zumeist überflüssig. Allerdings sind gelegentlich Änderungen wünschenswert, die entweder eine Verbesserung der spektralen Auflösung oder des Signals zulassen. Nur drei solcher Eingriffe können durch den astronomischen Beobachter *manuell* durchgeführt werden,

- die Auswechslung des optischen Lichtleiters,
- die Auswechslung der Eintrittsblende am Teleskopmodul, und
- die Feineinstellung von Spektrographenspalt und Decker.

Bevor eine dieser Operationen durchgeführt wird, muß sich der Beobachter darüber klar sein, was FOCES leisten kann, wo seine Stärken und Schwächen liegen. Dies läßt sich sehr gut durch den Einfluß des *seeings* auf die Wahl der Eintrittsblende beschreiben. Hier gibt es zwei Extremfälle: einerseits wird durch eine *zu kleine* Eingangsblende ein großer Teil des Objektsignals (im einfachsten Fall ein Stern) ausgeblendet. Im anderen Fall ist die Eintrittsblende *zu groß* und verursacht einen Verlust an spektraler Auflösung. FOCES besitzt allerdings *zwei* Einstellungen, um eine vorgegebene spektrale Auflösung zu erreichen, die sich durch ihre Effizienz deutlich unterscheiden, die Eintrittsblende und den Spektrographenspalt. Hier unterscheidet sich FOCES wesentlich von anderen Spektrographen.

Um diesen Unterschied zu verstehen, ist es nötig, die Lichtverluste an beiden Öffnungen *quantitativ* zu untersuchen. Der Einfachheit halber wird im folgenden angenommen, daß das zu beobachtende Objekt ein Stern mit einer gaussförmigen *seeing*-Modulation der *vollen Halbwertsbreite* (FWHM) $\sigma = 2r_{1/2}$sei. In diesem Fall wird der durch eine kreisförmige Eintrittsblende vom Durchmesser θ tretende Bruchteil des Gesamtflusses in guter Näherung durch

$$F(\theta)/F(\infty) = 1 - exp\left\{-\ln 2(\theta/\sigma)^2\right\}$$

beschrieben. Der Verlust in Magnituden ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

θ/σ	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50
Δ mag	-2.00	-1.23	-0.75	-0.45	-0.26	-0.14	-0.07	-0.01

Hier wird offensichtlich, daß ein Beobachter *nie* die kleine Eintrittsblende (130 μm) benutzen sollte, sofern nicht die volle *seeing*-Halbwertsbreite besser als 1.0″ (am 2.2m-Teleskop) ist, es sei denn, das Objekt ist so hell, daß Lichtverluste keine Rolle spielen. Da der Spektrograph für das 2.2m-Teleskop optimiert ist, ergeben sich für das 3.5m-Teleskop noch wesentlich einschränkendere Bedingungen. Um am 3.5m-Teleskop hochaufgelöste FOCES-Spektren zu erhalten, ist *hervorragendes seeing* unbedingt erforderlich, da eine schlechte Abstimmung von *seeing* und Eintrittsblende den Vorteil des größeren Hauptspiegels zunichte machen kann.

Auch wenn das *seeing* weniger gut ist, so daß eine kleine Eintrittsblende zu starken Lichtverlusten führen würde, können immer noch Spektren mit voller Auflösung gewonnen werden, ohne zu große Lichtverluste hinnehmen zu müssen. Dazu wird eine *große Eintrittsblende* gewählt und der Eingangsspaltdurchmesser des Spektrographen entsprechend verringert. Als Beispiel sei ein Stern der Helligkeit V = 12 gewählt, für den ein Spektrum mit der Auflösung $R = 37\,000$ belichtetet werden soll. Wegen der notwendigen Photonen ist dafür theoretisch das 3.5m-Teleskop nötig. Die oben berechnete Tabelle zeigt, daß am 2.2m-Teleskop für ein Seeing von FWHM 1.5″ an der 133 μm-Eintrittsblende ein Lichtverlust von 0.75 mag zu erwarten ist, am 3.5m-Teleskop sogar 1.90 mag. Für eine Eintrittsblende von 200 μm ergäben sich die Werte 0.25 *bzw.* 1.15 mag, und für die größte Blende immerhin noch 0.01 *bzw.* 0.50 mag. Selbst unter Aufgabe der hohen Primärauflösung ergäbe sich damit für ein Seeing von 1.5″ nur ein Helligkeitsgewinn von 0.50 mag.

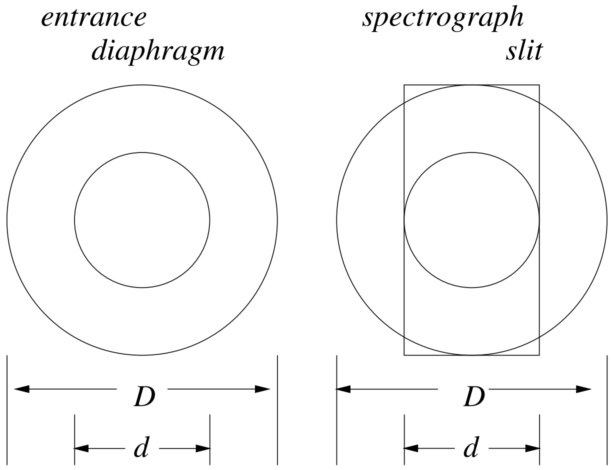

Abb. 8: Strahlengang durch kreisförmige Eintrittsblende mit Durchmesser d oder D und durch den Spektrographenspalt von FOCES

Schließt man den *Spektrographenspalt*, verliert man ebenfalls Photonen, allerdings weniger als in einer entsprechend verkleinerten Eintrittsblende. Der Vorteil gegenüber der kleinen Eintrittsblende, die die gleiche Auflösung erzeugen würde, liegt in der unterschiedlichen Art der *Ausblendung* des Lichtkegels, die an Abb. 8 vereinfacht dargestellt wird. Am Spektrographenspalt ist der Lichtverlust proportional zur Fläche, die durch den Spalt aus einem gleichförmig beleuchteten aus dem Lichtleiter austretenden Lichtkegel herausgeschnitten wird. Fällt dieser Lichtkegel θ durch einen Spalt der Breite ϕ, so ist der Bruchteil des durchfallenden Lichtes

$$F(\phi)/F(\theta) = 1 - \frac{2}{\pi}\left\{\arccos x - x\sqrt{1-x^2}\right\} \quad ,$$

wobei $x = \phi/\theta$. Für das oben gegebene Beispiel bedeutet dies, daß die Kombination von größter Eintrittsblende mit verringerter Spaltbreite gegenüber kleinster Eintrittsblende bei völlig offenem Spalt um ≈ 0.8 mag im Vorteil ist.

In Wirklichkeit werden solche Abschätzungen zusätzlich durch das Degradationsverhalten der Lichtleiter kompliziert. Am 2.2m-Teleskop entspricht die größte Eintrittsblende einem $f/2.7$-Eingangslichtkegel, der kaum unter Degradation leidet; der durch die 130 μm-Eintrittsblende fallende Strahl fällt jedoch auf den Lichtleiter mit $f/6.2$ und verläßt ihn mit $f/5.7$. Für das 3.5m-Teleskop sind die entsprechenden Zahlen $f/3.3$ und $f/7.7$ mit einer Degradation des schmaleren Lichtbündels zu $\approx f/6.5$. Wie man Fig. 7 der Dokumentation entnimmt, entspricht dieser Degradation entweder ein Licht- oder ein Auflösungsverlust. Für maximale Auflösung ergeben sich entsprechende Lichtverluste von 15% (0.18 mag) und 29% (0.37 mag) am 3.5m-Teleskop. Allein durch die Degradationsverluste an der kleinen Eintrittsblende bei maximaler Auflösung wird so der Lichtverlust von 0.8 auf 1.2 mag vergrößert. Ein Vergleich der Ergebnisse vom 2.2m- und 3.5m-Teleskop zeigt damit deutlich, daß der wahre Gewinn zwischen beiden Teleskopen für dieses Beispiel nur ≈ 0.4 mag beträgt, und daß die erfolgreiche Benutzung des 3.5m-Teleskops hervorragendes Seeing erfordert.

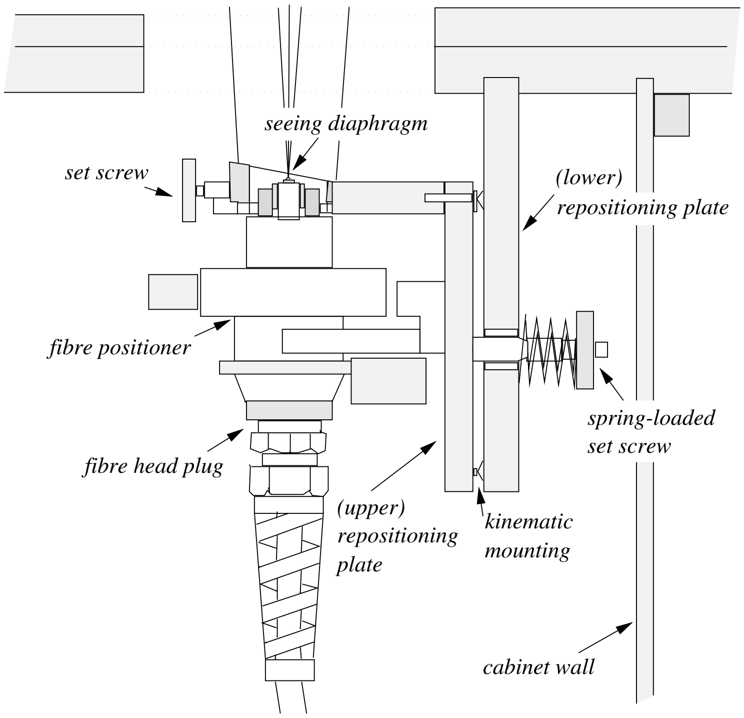

Abb. 9: Detaillierte Darstellung der Lichtleiter-Positioniereinheit und Montierung am Teleskopmodul

Der Einsatz des Lichtleiters (bei vorgegebener Eintrittsblende) richtet sich nach den *spektralen* Anforderungen, gegebenenfalls nach der Notwendigkeit, das Signal des Nachthimmels simultan aufzunehmen. Dies ist höchstens für Objekte schwächer als V = 15 . . . 16 erforderlich, selbst bei hellem Nachthimmel.

2.1 Auswechslung des Lichtleiters

Der Austausch von Lichtleitern sollte vorzugsweise tagsüber durchgeführt werden, da eine Demontage des Teleskopmodul-Kabinetts große Sorgfalt erfordert. Voraussetzung für eine erfolgreiche Installation eines neuen Lichtleiters ist einerseits, daß der Benutzer die erforderlichen Handgriffe beherrscht. Außerdem müssen die die Faserköpfe bereits während der Installation feinjustiert worden sein (so daß ein einfaches Auswechseln der Faserendstecker ausreicht).

Achtung ! Vor einem unprofessionellen Herangehen an den Faserwechsel oder an das Auswechseln der Eintrittsblende muß gewarnt werden. Eine unvorsichtige Behandlung der Komponenten kann in der Zerstörung der Positionierungseinheit enden, die eine weitere Beobachtung unmöglich macht.

Die notwendigen Details sind in Abb. 9 zu sehen. Der Lichtleiterwechsel erfordert zunächst eine vorsichtige Demontage des zylinderförmigen Teleskopmodul-Kabinetts, wofür unbedingt 2 Personen erforderlich sind (siehe Abschnitte

2.1 und 2.2 der Dokumentation). Nacheinander werden die folgenden Schritte durchgeführt,

- Das Teleskop wird in Zenit-Position gebracht. Die Bodenplatte des Zugentlastungs-Zylinders wird vorsichtig in zwei Hälften zerlegt und abgenommen. Kräfte auf den installierten Lichtleiter müssen dabei unbedingt vermieden werden! Die Befestigungsschrauben werden gelöst, das Kabinett entgegen dem Uhrzeigersinn rotiert und vorsichtig abgenommen.

- Die Lichtleiter-Positioniereinheit wird aus ihrer *kinematischen Montierung* an der *unteren* Repositionierungsplatte durch lösen der gefederten Setzmutter entfernt und abgenommen.

- Der neue Lichtleiter wird mitsamt der montierten Positioniereinheit (einschließlich Eintrittsblende und der *oberen* Repositionierungsplatte) in Position gebracht, und der Bolzen in die untere Repositionierungsplatte eingefädelt. Die Feder wird wieder angebracht und die Setzmutter angezogen. Da die Feinjustierung bereits bei der Installation durchgeführt wurde, ist keine weitere Justierung erforderlich.

- Das Kabinett wird wieder angesetzt und festgeschraubt. Der Lichtleiter wird durch die Öffnungen in der Bodenplatte gefädelt, etwas angehoben und die Bodenplatte als Zugentlastung mit den entsprechenden Schrauben befestigt.

Am gegenüberliegenden Ende erfolgt die Auswechslung der Lichtleiter-Positioniereinheit in derselben Weise, nur daß die Repositionierungsplatten mittels zweier Federmechanismen kinematisch miteinander befestigt werden.

2.2 Auswechslung der Eintrittsblende

Die Details sind wieder in Abb. 9 zu sehen, und einige Schritte sind bereits im vorangehenden Abschnitt ausführlich beschrieben,

- Das Zugentlastungs-Kabinett wird entfernt, die Lichtleiter-Positioniereinheit wie oben beschrieben gelöst und abgenommen.

- Die Setzschraube an der oberen Platte der Lichtleiter-Positioniereinheit wird gelöst. Der sehr eng eingesetzte Rahmen mit der Eintrittsblende wird nach oben herausgezogen, ohne die Blendenfläche zu berühren, und in den dafür vorgesehenen Behälter zurückgelegt.

- Das neue Diaphragma wird von oben so eingeführt, daß die vorgesehene Positionen von Nut und Feder übereinstimmen. Der Rahmen wird vorsichtig und ohne Kraftanwendung nach unten abgelassen. Der richtige Sitz wird nach leichtem Anheben und Fallenlassen durch ein Klickgeräusch erkennbar.

Achtung! Die Führung ist so eng, daß der Rahmen leicht verkantet. Die Anwendung von Gewalt ist daher beim Einsetzen unbedingt zu vermeiden.

Das Auswechseln sowohl des Lichtleiters als auch der Eintrittsblende erfordert hohe Konzentration der Beobachter. Bei dem am Calar Alto vorherrschenden *seeing* ist im allgemeinen der Einsatz der 300 μm-Eintrittsblende angebracht. Falls erforderlich, werden Auflösungsverluste besser durch entsprechende Einstellung des *Eintrittsspalts* kompensiert. Die spektrale Transmission der verschiedenen Lichtleitertypen ist zudem nicht so extrem unterschiedlich, daß für verschiedene spektrale Schwerpunkte ein Auswechseln unbedingt erforderlich wäre. Einzig bei Langzeitbelichtungen schwacher Objekte am 3.5m-Teleskop ist der Einsatz der Doppelfaser zur Korrektur des Nachthimmels unvermeidbar. Hier sollte ein notwendiger Lichtleiter-Wechsel tagsüber erfolgen.

2.3 Einstellung von Spalt und Spaltabdeckung

Das Deckblatt zum ersten Abschnitt der Dokumentation (Vol. I) zeigt eine Abbildung der Spalteinheit, die zusammen mit der hinteren Positioniereinheit des Lichtleiters montiert ist. Die Spaltbreite wird mit der Mikrometerschraube eingestellt, die Spaltabdeckung mit dem nach oben herausragenden Schieber. Beide sind von außen durch die geöffnete vordere Tür im Spektrographengehäuse erreichbar.

Die Einstellung von Spalt und Spaltabdeckung ist eine *experimentelle* Aufgabe; beide Einstellungen werden manuell durchgeführt, und beide Einstellungen sind nicht genau reproduzierbar. Die folgenden Schritte sind erforderlich,

- Die Schrauben zur vorderen Eingangstür zum Spektrographengehäuse werden gelöst und die Tür vorsichtig entfernt (siehe Abschnitt 2.1.6 der Dokumentation).

- Unter Beleuchtung der Skala durch eine Taschenlampe kann der schwarze Schieber der Spaltabdeckung leicht nach oben oder unten bewegt werden. Die Skala des Schiebers ist in Einheiten von Millimetern angegeben. Die Abbildung auf 2 Pixel (48 μm bei Tektronix CCD) entspricht gerade 0.160 mm in der Spaltebene. Bei einem Ordnungsabstand von 8 bis 10 Pixeln kann die Spaltabdeckung also ohne Probleme auf 0.3 mm geöffnet werden.

- Die *Spaltbreite* wird durch Drehen der Mikrometerschraube *im Uhrzeigersinn* geöffnet. Hier gibt es 2 Skalen. Die große Skala, die auf der *linken* Seite des Zylinders graviert ist, geht von 0 bis 3 mm, mit 10 Strichen pro Millimeter. Um sie abzulesen, wird ein kleiner Taschenspiegel benötigt, der mit der Taschenlampe beleuchtet wird. Die Feineinteilung kann direkt von einer horizontal angebrachten Noniusskala abgelesen werden, auf der jeder Strich einem Mikrometer entspricht. Volle spektrale Auflösung wird bei einem 2-Pixel-Element gerade bei einer Spaltbreite von 160 μm erreicht. 300 μm entsprechen dann einer Auflösung von $R = 20\,000$.

Die Spalteinstellungen sollten unbedingt notiert und eventuell bei Erstellung des FITS Headers mit eingegeben werden.

3 Beobachtungszustände des Spektrographen

FOCES erlaubt die Benutzung in zwei wesentlich verschiedenen Beobachtungszuständen, dem Einzel- und dem Doppelfaserbetrieb. Der Betrieb mit dem einzelnen Lichtleiter ist der Standard für hochauflösende Stellarspektroskopie. Der Doppelfaserbetrieb ist ausschließlich für extrem schwache Signale am 3.5m-Teleskop vorgesehen und dient der Korrektur des Spektrums für den mitbeobachteten Nachthimmel. Mit dem Doppelfaserbetrieb liegen weltweit kaum Erfahrungen vor, sodaß es sich hier mehr um eine experimentelle Variante der Spektroskopie handelt.

Während die resultierenden Spektren wegen der verschiedenen Querdispersion sehr unterschiedlich erscheinen, ist die Auswahl der Lichtquellen (Objekt, Flatfield oder Vergleichslicht) nicht betroffen. Allerdings ist es wichtig zu berücksichtigen, daß die beiden Lichtleiter des Doppelfaserbetriebs einen *konstanten Abstand* von 3 mm besitzen, was am 3.5m-Teleskop gerade $18''$ entspricht. In Feldern mit hoher Objektdichte kann es dabei zu Problemen mit der Positionierung der (zweiten) Hintergrundfaser kommen. Durch Rotation der DSAZ-Leiteinrichtung kann dieses Problem jedoch aller Wahrscheinlichkeit nach behoben werden.

3.1 Objektspektren mit und ohne Hintergrundkorrektur

Typische Beispiele für Einzel- und Doppelfaserspektren sind als Titelseiten des Kapitels 4 und des Anhangs zu Vol. I der Dokumentation zu finden. Das Einzelfaserspektrum – nur durch das Tandemprisma zerlegt – zeigt deutlich den Anstieg der Ordnungsdichte zum roten Spektralbereich. Gleichzeitig ist der Anstieg der CCD-Empfindlichkeit zu sehen.

Das Einzelfaserspektrum entspricht weitgehend dem eines *direkten* Echellespektrographen (obwohl die meisten zur Zeit im Betrieb befindlichen Instrumente mit einem *Gitter* als Querdisperser arbeiten und daher im blauen Spektralbereich einen Anstieg der Ordnungsdichte zeigen. Das Doppelfaserspektrum (Objekt und Nachthimmel) hat durch die zusätzlich in den Strahlengang geschobenen *Grisms* etwa die doppelte Querdispersion, wobei die Ordnungsabstände über den ganzen Bereich nahezu konstant bleiben. Die Ordnungen enthalten abwechselnd Objekt und Nachthimmel, wobei die jeweils enger zusammenliegenden Ordnungspaare auch zusammengehören.

Die Subtraktion des Nachthimmels erfordert eine sorgfältige Bestimmung der unterschiedlichen Transmission in beiden Lichtleitern, *z.B.* durch Vergleich zweier Flatfield-Aufnahmen (wobei die gleichförmige Beleuchtung beider Eintrittsblenden im Abstand von 3 mm vorausgesetzt wird). Mit diesem Problem besteht noch keine Erfahrung. Zum Vergleich kann auch ein *dome flat* aufgenommen werden. Im allgemeinen wird das Ausgangssignal der beiden Lichtleiter sich um die Funktion $\rho(\lambda)$ unterscheiden, so daß

$$f_a(\lambda) = \rho(\lambda) f_b(\lambda) \quad ,$$

wobei sich f_a und f_b auf die beiden Lichtleiter beziehen. Eine spätere Subtraktion der Hintergrund-Photonen muß diesem Unterschied Rechnung tragen.

3.2 Flatfield- und Wellenlängen-Kalibrierung

Der FOCES-Spektrograph erlaubt die Belichtung *homogener* Flatfields durch einen Streulicht-Schirm direkt vor dem Echellegitter, der in den Strahl hochgeklappt werden kann. In den Spalt einfallendes weißes Licht fällt somit – nur durch die Tandemprismen zerlegt – auf die Kamera und erzeugt eine wellenlängenabhängige, aber homogene Ausleuchtung des CCDs, mit der die Empfindlichkeitsvariation benachbarter Pixel am besten (mit einem Medianfilter) registriert werden kann. Zur Zeit ist dieser Flatfield-Modus jedoch noch nicht in Betrieb, da die Lichtausbeute noch zu gering ist. Auch die automatische Datenextraktion wird daher noch *ohne white flat* durchgeführt. Die in Abschnitt 4 (Vol. I) der Dokumentation beschriebene EDRS-Software greift daher zunächst auf Flatfields zu, die unter gleichen Bedingungen wie das Objekt belichtet wurden. Die Unterschiede zwischen einer solchen *eindimensionalen* Flatfieldkorrektur und einer solchen, die ein *white flat* benutzt, sind für die meisten Anwendungen jedoch marginal und werden möglicherweise überhaupt nur bei extrem geringen Signalen sichtbar. Typische Belichtungszeiten liegen bei 10 Sekunden; längere Belichtungen führen zur Sättigung im roten Spektralbereich, sind aber gelegentlich notwendig, um im blauen ein gutes Signal zu erzeugen.

Wie üblich wird die Kalibrierung der Dispersion durch ein Vergleichslichtspektrum erhalten, das von einer Th-Ar-Lampe stammt. Auch hier liegen die Belichtungen bei typisch 10 bis 20 Sekunden.

4 Rechnerkontrolle

Die FOCES-Rechnerkontrolle wird zur Zeit als VT100-Terminal auf einer DSAZ-Workstation im Kontrollraum emuliert. Sie besteht aus einem Menü, welches die jeweiligen Einstellungen anzeigt und zur Eingabe von *Kommandos* auffordert, welche durch jeweils einen Buchstaben abgekürzt sind. Die Status-Information wird in der folgenden Form dargestellt:

```
                            STATUS

  Lamps : undefined     Select : undefined     Screen : undefined
Grating : undefined      Prism : undefined     Camera : undefined

   File : FOCES_0001    Object : -             Status : inactive

     UT : *              Alpha : *        Hour Angle : *
     ST : *              Delta : *           Airmass : *
```

Darunter werden die entsprechenden Kommandos oder Menüs aufgerufen, die zum Setzen von Spektrographen- oder Objekt-Parametern gedacht sind. Die Liste der verfügbaren Kommandos ist

```
                         FOCES
             ---------------------------------
             (R)    Reset Spectrograph
             (N)    Names of Files
             (I)    Identification of Object
             (E)    Exposure Time
             (O)    Object Exposure
             (F)    Flatfield Exposure
             (T)    Th-Ar Exposure
             (W)    White Flatfield Exposure (not yet available)
             (D)    Dark Exposure
             (S)    Spectrograph Settings
             (Q)    End of Program

Please select item:
```

Zwei der Submenüs verzweigen in weitere Unteraufrufe,

```
                    Set Exposure Time
             ---------------------------------
             (R)    Reset Spectrograph
             (O)    Object
```

```
            (F)    Flatfield
            (T)    Th-Ar
            (W)    White Flatfield
            (D)    Dark
            (X)    Exit Submenu

Please select item:
```

und

```
                   Set Spectrograph
            ---------------------------------
            (R)    Reset Spectrograph
            (M)    Lamp Mode
            (L)    Select Lamp
            (G)    Set Grating
            (P)    Set Prism
            (F)    Camera Focus
            (S)    Set Screen
            (X)    Exit Submenu       .

Please select item:
```

Bibliography

Baranne, A. 1988, in *ESO Conference on Very Large Telescopes and their Instrumentation*, ed. M.-H. Ulrich, Garching, p. 1195

Dekker, H., Delabre, B., Hess, G., Kotzlowski, H. 1992, in *Progress in Telescope and Instrumentation Technologies*, ed. M.-H. Ulrich, ESO, Garching, p. 581

Pfeiffer, M., *et al.* 1996, A&A, in preparation

Schroeder, D.J. 1987, *Astronomical Optics*, Academic Press, San Diego