

Astrophysikalische Instrumentierung und Messtechnik für die
Spektroskopie - Theorie, Praxis, Technik und Beobachtung

Daniel P. Sablowski & Lothar F. Schanne

1. Auflage

Daniel P. Sablowski, M.Sc. (Phy)

Erich-Weinert-Str. 19
14478 Potsdam
dsablowski@aip.de
danielsablowski@gmail.com

Dr. Lothar F. Schanne

Feldbergstrasse 62
68163 Mannheim
l.schanne@gmx.de

Astrophysikalische Instrumentierung und Messtechnik für die Spektroskopie - Theorie, Praxis, Technik und Beobachtung
1. Auflage 2018

Alle Rechte vorbehalten.

©Daniel P. Sablowski, Potsdam, 2018 und Lothar F. Schanne, Mannheim, 2018

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-00-058833-4

Dieses Werk unterliegt dem Urheberrechtsgesetz. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Produkthaftung: Für den Gebrauch der dargelegten Informationen, in welcher Form auch immer, kann von den Autoren keine Haftung übernommen werden. Dies gilt insbesondere in der unsachgemäßen Handhabung von Gerätschaften und dem Nachbau dieser auf Grundlage der dargelegten Informationen.

Gedruckt und gebunden durch:
Frick Kreativbüro & Onlinedruckerei e.K.
Brühlstraße 6
86381 Krumbach (Deutschland)

Sablowski & Schanne

Meinen Eltern Henriette und Otto Schanne gewidmet, für die das Wohl ihrer beiden Söhne in Gegenwart und Zukunft immer das Wichtigste war.

Gewidmet meinem Bruder Alexander und seiner Tochter Maria Sablowski, unserem Stern.

Vorwort zur ersten Auflage

Es ist jetzt 200 Jahre her, dass der Glasmacher Josef Fraunhofer im Herbst 1817 seinen Artikel "Bestimmung des Brechungs- und Farbzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten" in den Denkschriften der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu München veröffentlicht hat. Im Anhang zeigt er das erste und verblüffend detaillierte Linienspektrum des Sonnenlichts mit einem Wirrwarr von dunklen Absorptionslinien. Zuerst interessierten sich nur die Optiker dafür, hatten sie doch endlich die Messmarken zur Verfügung, mit denen sie die Wellenlängen des Lichts charakterisieren und damit wellenlängenabhängige Größen wie den Brechungsindex von Gläsern exakt bestimmen und miteinander vergleichen konnten. Die Wissenschaftler vermochten das Durcheinander der Absorptionslinien nicht zu erklären, viele taten sie als Artefakte ab, die man mit fortschreitender Messkunst zukünftig vermeiden können. Die Sache wurde ad acta gelegt. Der immense Wert der gemessenen Spektren und der darin enthaltenen Informationen wurde nicht realisiert. Es dauerte dann noch 42 Jahre, bis die wahre Bedeutung der Linien erkannt wurde (Spektralanalyse von Bunsen und Kirchhoff, 1859) und damit begann eine stürmische, wahrhaft revolutionäre Entwicklung in der Physik, Astronomie und Chemie und der technischen Anwendungen.

In den Naturwissenschaften mag es in betonter Weise zutreffen, doch es zieht sich durch alle Bereiche des Menschenlebens: Am Anfang erscheint ein Thema leicht, doch mit zunehmender Beschäftigung damit wird es komplizierter, wenn all die Details auftauchen, mit denen man sich plötzlich konfrontiert sieht. Die einzige Methode ans Ziel zu gelangen ist akribische und längliche Detailarbeit, welche nicht zuletzt von vielen Fehlversuchen gestaltet wird.

Da sind auch die meisten Lehrbücher oft nicht hilfreich, gehen sie doch bei wichtigen Detailfragen in der Praxis und Ausführung nicht tief genug. Dieses Buch erhebt nicht den Anspruch allumfassend zu sein - ganz im Gegenteil. Insbesondere in seiner ersten Auflage, und dem sind sich die Autoren auch bewusst, werden oft Themen nur angeschnitten. Doch sind die praxisnahen Themen der astronomischen Spektroskopie vertreten, die Schwierigkeiten hoffentlich erkennbar und die Lösungen nachvollziehbar. Letztlich, so wie jedes Sachbuch, spiegelt auch dieses Werk in weiten Bereichen den Kenntnisstand der Autoren wider. Und Menschen sind fehlbar und in vielen Bereichen unwissend. Doch eben das Wissen darum, nicht alles erfassen zu können, nicht alles zu wissen, ja, letztlich sogar nur einen kleinen Teil allen möglichen Wissens sich in einer begrenzten Zeitspanne aneignen zu können, sichert eine selbstkritische Arbeitsweise, welche letztlich auch zum Erfolg führen wird.

Es war ein später Abend, als wir die Idee fassten dieses Buch zu schreiben. Und dieser Abend liegt nun schon viele Jahre zurück. Daher ist es nur zu natürlich, dass die Struktur dieses Buches einen organischen Charakter aufweisen kann. Selbst wenn es auch hier ein erstes Kapitel zur Theorie gibt, so ist das Gesamtwerk doch an der Praxis orientiert. Es sollen die praktischen Erkenntnisse und spezifischen Erfahrungen dem Rat suchenden Leser weiter gegeben werden, die nur durch tätige und jahrelange Beschäftigung mit der Messung von Spektren astronomischer Objekte gewonnen werden kann und die der Leser vergeblich in anderen akademischen Werken sucht. Das größte Ziel ist es, die Leser vor den eigenen Fehlern der Autoren zu bewahren.

Dem ersten Abend - der die Erarbeitung des Inhaltsverzeichnisses, in mehr oder weniger detaillierter Form, zum Inhalt hatte - folgten viele weitere Abende um die Kapitel, Abschnitte, Unterabschnitte, Unterunterabschnitte und Paragraphen mit Leben zu füllen. Wir hoffen, dass wir stets das richtige Maß zwischen Sachbuch und Bericht gefunden haben, sodass wir möglichst die schwierigen Details nicht verschweigen, auch wenn wir dabei unsere eigenen Fehler offen legen müssen. Kein Fortschritt wird ohne Rückschläge errungen, so wie es keinen Tag ohne Nacht gibt. In diesem Sinne möge in jedem von uns ein kleiner Phoenix innewohnen.

Doch zu allerletzt, im Vorwort zur ersten Auflage, hoffen wir, dass der Leser die Information findet, nach der er Ausschau gehalten hat. Und wenn dem nicht der Fall ist, so sind wir über Hinweise zur Ergänzung dankbar. Ebenso für Hinweise zu Fehlern, ob sachlicher oder grammatikalischer Natur. Letztere werden insbesondere deshalb präsent sein, ist es doch ein selbst verlegtes Werk und daher nicht unter die Augen von strengen Lektoren geraten.

Wir möchten uns an dieser Stelle bei Karsten Hansky, Gregor Krannich, Thomas Kremser und Martin Staab für die Erlaubnis bedanken, einige ihrer Abbildungen und Messungen mit dem MiniSpec und dem Alpy verwenden zu dürfen. Ebenso bedanken wir uns bei Daniel Weiss für seine Kommentare zu einigen theoretischen Ausführungen.

Daniel P. Sablowski, Potsdam &

Lothar F. Schanne, Mannheim,

im Frühjahr 2018



Und wenn man in den Details sich verloren hat, lohnt es sich ehrfürchtig zurück zu lehnen und Demut weilen zu lassen gegenüber der Fehlbarkeit und dem Unwissen. Sich der Schönheit der eigentlichen Sache wieder zu erinnern, der Vollkommenheit des Unvollkommenen und der Endlichkeit, der Grenzen und Vergänglichkeit allen Tuns und Seins. Denn nur so ist man wieder frei der Lasten.

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	31
1.1	Geometrische Optik	31
1.1.1	Einführung	31
1.1.1.1	Das optische Spektrum	33
1.1.1.2	Vorzeichenregelung	33
1.1.1.3	Lichtstrahlen	33
1.1.1.4	Strahlenbegrenzung	34
1.1.2	Reflexion	34
1.1.2.1	Ebener Spiegel, virtuelles und reelles Bild	35
1.1.2.2	Gekrümmte Spiegel	36
1.1.3	Brechung	37
1.1.3.1	Linsen	38
1.1.3.2	Das Prisma und die Dispersion	42
1.1.4	Abbildungsrelationen	45
1.2	Wellenoptik	46
1.2.1	Die Beugungstheorie	49
1.2.1.1	Allgemeines	49
1.2.1.2	Das Huygens-Fresnelsche Prinzip	50
1.2.1.3	Kirchhoff's Beugungstheorie	50
1.2.1.4	Fraunhofer Beugung	53
1.2.2	Fourieroptik und Auflösung	56
1.2.3	Das Beugungsgitter	60
1.2.3.1	Allgemeines	60
1.2.3.2	Blaze	62
1.2.3.3	Das Auflösungsvermögen des Gitters	64
1.2.3.4	Effizienz	65
1.2.3.5	Abschattung am Gitterprofil	67
1.2.4	Polarisation	68
1.2.4.1	Einleitung	68
1.2.4.2	Ursprung der Polarisation	69
1.2.4.3	Die Fresnelschen Gleichungen	70
1.3	Abbildungsfehler	73
1.3.1	Die Seidelschen Bildfehler	73
1.3.2	Quellen und Auswirkungen der Bildfehler	76
1.3.3	Schärfefehler	79
1.3.3.1	Öffnungsfehler	79
1.3.3.2	Astigmatismus	79
1.3.3.3	Koma	80
1.3.4	Farbfehler	80
1.3.5	Lagefehler	80
1.3.5.1	Verzeichnung	83
1.3.5.2	Bildfeldwölbung	83
1.3.6	Reduzierung der Abbildungsfehler	83
1.3.6.1	Reduzierung des Farbfehlers	84
1.3.6.2	Reduzierung des Öffnungsfehlers	84
1.3.6.3	Lage der Feldblende	85

1.4	Ray-Tracing	86
1.4.1	Die Merit-Funktion	86
1.4.2	Spot-Diagramm	86
1.4.3	Punktbildfunktion	86
1.4.4	Modulationsübertragungsfunktion	87
1.4.5	Wellenfrontabweichung	87
1.4.6	Geisteranalyse	88
1.4.7	Toleranzanalyse	88
1.5	Lichtwellenleiter	88
1.5.1	Grundlagen	89
1.5.1.1	Lichtführung	89
1.5.1.2	Moden	91
1.5.2	Kenngößen optischer Fasern	93
1.5.2.1	Numerische Apertur	93
1.5.2.2	Durchmesser	94
1.5.2.3	Biegeradius	94
1.5.2.4	Dämpfung	95
1.5.2.5	Transmission	96
1.5.3	Fasertypen	98
1.6	Messtechnik	99
1.6.1	Allgemeines	99
1.6.2	Messfehler	100
1.6.2.1	Systematische Fehler	100
1.6.2.2	Statistische Fehler	101
1.6.2.3	Fehlerbetrachtung und Fehlerrechnung	101
1.6.3	Verteilungen	104
1.6.3.1	Binomialverteilung	104
1.6.3.2	Poissonverteilung	104
1.6.3.3	Gaußverteilung	105
1.6.4	Darstellung des Messergebnisses	105
1.6.5	Exkurs: Lineare Systeme	106
1.6.5.1	Lineare Antworttheorie	106
1.6.5.2	Impulsanregung	107
1.6.6	Rauschen in der Messung	108
1.6.6.1	Streueinflüsse	108
1.6.6.2	Thermisches Rauschen	109
1.6.6.3	Quantenrauschen	110
1.6.7	Das Signal-Rausch-Verhältnis	110
1.7	Teilchen, Atome und Moleküle	111
1.7.1	Teilchen	111
1.7.1.1	Ein Kurzausflug zu den Grundkräften der Natur	112
1.7.1.2	Fermionen	114
1.7.1.3	Bosonen	115
1.7.2	Atome	115
1.7.2.1	Das Bohrsche Atommodell	115
1.7.2.2	Quantenmechanische Ergänzungen	119
1.7.2.3	Kurze Diskussion des Wasserstoffatoms	121
1.7.3	Emission und Absorption	124
1.7.4	Moleküle	126
1.7.4.1	Allgemeines	126
1.7.4.2	Rotation	127
1.7.4.3	Vibration	129
1.7.4.4	Elektronische Übergänge	132
1.8	Spektroskopie	133
1.8.1	Der Zirkelschlag von Atom- und Molekülphysik zur Spektralanalyse	133
1.8.2	Absorption und Dispersion in Gasen	135
1.8.3	Kontinuum und Linienspektrum	137
1.8.4	Linienprofile und linienverbreitende Effekte	139

1.8.4.1	Die natürliche Linienbreite	139
1.8.4.2	Stoßverbreiterung	140
1.8.4.3	Dopplerverbreiterung	141
1.9	Grundlagen der stellaren Physik	141
1.9.1	Allgemeine Eigenschaften Sterne	142
1.9.1.1	Fixsternparallaxe	142
1.9.1.2	Scheinbare und absolute Helligkeit	142
1.9.1.3	Sternmasse & 3. Keplersches Gesetz	143
1.9.1.4	Radien	145
1.9.1.5	Temperaturen	146
1.9.1.6	Spektralklassifikation	147
1.9.1.7	Leuchtkraftklassen	148
1.9.1.8	Rotation	149
1.9.2	Entwicklung der Sterne	151
1.9.2.1	Entstehung	151
1.9.2.2	Entwicklung eines Sterns am Beispiel der Sonne	154
1.9.2.3	Entwicklung $M > 2 M_{\odot}$	155
1.9.2.4	Chemische Zusammensetzung und Kern-Reaktionen	157
1.9.2.5	Evolutionenindikatoren	158
1.9.2.6	Endstadien der Sternentwicklung	160
1.9.2.7	Gammastrahlen-Ausbruch (Gamma Ray Burst, GRB)	167
1.9.3	Veränderliche Sterne	168
1.9.3.1	Allgemein	168
1.9.3.2	Pulsationsveränderliche	168
1.9.3.3	Eruptive Veränderliche	170
1.9.3.4	Pekuliare Sterne	172
1.9.3.5	Sternaktivität	172
1.10	Spektren der Sterne	173
1.10.1	Allgemeines	173
1.10.2	Aus dem Spektrum ableitbare Größen	174
1.10.2.1	Elementzusammensetzung, Elementhäufigkeit und Linienstärke	174
1.10.2.2	Stellare Temperaturen	176
1.10.2.3	Magnetfelder	176
1.10.2.4	Radialgeschwindigkeit	180
1.10.2.5	Orbitalparameter	180
1.10.2.6	Geschwindigkeitsprofil	183
1.11	Glossar Formelzeichen	184
2	Optische Instrumente und Ausrüstung für die Beobachtung	189
2.1	Teleskope	189
2.1.1	Grundlagen der Teleskopoptik	189
2.1.1.1	Bildgröße und Bildhelligkeit im Fokus	189
2.1.1.2	Vergrößerung, Austrittspupille und Gesichtsfeld	190
2.1.2	Spiegelteleskope (Reflektoren)	190
2.1.2.1	Newton-Teleskop	190
2.1.2.2	Cassegrain-Teleskop (klassisch)	192
2.1.2.3	Ritchey-Chrétien-Teleskop RC	192
2.1.3	Linsenteleskope (Refraktoren)	193
2.1.3.1	Chromat	193
2.1.3.2	Achromat	193
2.1.3.3	Apochromat	193
2.1.4	Kombinationsteleskope (katadioptrische Teleskope)	193
2.1.4.1	Schmidt-Teleskop	194
2.1.4.2	Schmidt-Cassegrain- (SC)	194
2.1.4.3	Maksutov-Newton-Teleskop (MN)	194
2.1.4.4	Maksutov-Cassegrain-Teleskop (MC)	194
2.1.4.5	Dall-Kirkham-Teleskop (DK)	194
2.1.5	Teleskopfoki	195

2.2	Objektive	195
2.2.1	Einfache Systeme	195
2.2.2	Fotoobjektive	195
2.2.3	Objektiv-Rekonstruktion	198
2.3	Teleskopmontierungen	201
2.3.1	Azimutale Montierung	202
2.3.2	Parallaktische Montierung	203
2.3.3	Motorisierung einer Montierung	203
2.4	Teleskopsteuerungen	208
2.5	Spektrographen	208
2.5.1	Spektroskopie ohne und mit Spalt	209
2.5.2	Allgemeine Parameter	210
2.5.2.1	Die Dispersion	210
2.5.2.2	Anamorphose-Faktor & Abbildungsmaßstab	212
2.5.2.3	Das Auflösungsvermögen	214
2.5.2.4	Freier Spektralbereich	216
2.5.2.5	Spalt-Kippung	216
2.5.2.6	Nyquist-Shannon Kriterium	216
2.5.2.7	Dispersion-Abtast Kriterium	217
2.5.2.8	Das LR und bR Produkt	217
2.5.3	Klassischer Spektrograph und Littrow	218
2.5.4	Czerny-Turner (CT)	218
2.5.4.1	Als Monochromator	219
2.5.4.2	Als Spektrograph	226
2.5.4.3	Eine Möglichkeit zur Korrektur des Astigmatismus	230
2.5.5	Echelle Spektrograph	231
2.5.5.1	Das Echelleprinzip	232
2.5.5.2	Weiss-Pupillen-Konfiguration	233
2.5.5.3	Klassisches Layout von Echelle-Spektrographen	237
2.5.5.4	Petzval-Objektive für (Echelle-)Spektrographen	239
2.5.5.5	VPH-Grism Cross-Disperser	243
2.5.6	Multikanal-Konfigurationen	244
2.6	Zusatztechniken für die Spektroskopie	244
2.6.1	Lichtwellenleiter und deren Charakterisierung	244
2.6.1.1	Fiber Measurement Apparatus	245
2.6.1.2	Fernfeld	247
2.6.1.3	Transmission	248
2.6.1.4	Focal-Ratio-Degradation	249
2.6.1.5	Modenrauschen	253
2.6.1.6	Scrambling	255
2.6.1.7	Faser-Taper oder konische Faser	256
2.6.1.8	Multi-Kern-Faser	258
2.6.1.9	Einsatzmöglichkeiten von optischen Fasern in der Spektroskopie	258
2.6.1.10	Polieren und konvektionieren eines Faserkabels	268
2.6.1.11	Zusammenfassung Fasern	275
2.6.2	Bildschneider (Image Slicer)	276
2.6.2.1	Bowen-Walraven-Typ	277
2.6.2.2	Zwei-Spiegel-Typ	278
2.6.2.3	Glasplättchen Typ	279
2.6.2.4	Wellenleiter-Typ	281
2.6.3	Double-Scrambler: Ausleuchtung des Beugungsgitters	281
2.6.4	Beugungsstabilisierung	285
2.6.5	Atmosphärische Dispersion & Korrektur	289
2.6.6	Integral-Feld-Einheiten und die 3D-Spektroskopie	290
2.6.6.1	Allgemeines zur 3D-Spektroskopie	292
2.6.6.2	Einheiten zur räumlich-optischen Diskretisierung	292
2.7	Selbstbau eines kleinen Remote-Observatoriums	294
2.7.1	Grundlegende Überlegungen	294

2.7.2	Mechanik und Elektronik	294
2.7.3	Remotesteuerung	296
2.7.3.1	Intermezzo: Elektronische Antriebsmaschinen	297
3	Planung von Spektrographen	301
3.1	Was soll beobachtet werden?	301
3.2	Welcher Spektrograph eignet sich für welche Objekte?	302
3.2.1	Spektroskopie ohne Spalt	302
3.2.2	Spektroskopie mit Spalt	304
3.3	Das ideale Teleskop zum Spektrograph	304
3.3.1	Gewicht und Maße des Spektrographen	306
3.3.2	Teleskopöffnung	307
3.4	Mobile oder fixe Sternwarte?	308
3.5	Kauf oder Selbstbau	309
3.6	Vorhandene und verfügbare Komponenten	309
3.6.1	Optische Komponenten	310
3.6.1.1	Beschichtungen	310
3.6.1.2	Verklebungen	310
3.6.1.3	Sphärische Linsen	311
3.6.1.4	Asphärische Linsen	311
3.6.1.5	Kugel und Stablinsen	311
3.6.1.6	Gradienten-Index Linsen	311
3.6.1.7	Linsenarrays	312
3.6.1.8	Abbildende Spiegel	312
3.6.2	Optomechanische Komponenten	313
3.6.3	Optoelektronische Komponenten	313
3.6.3.1	LED's	313
3.6.3.2	Spektrallampen	313
3.6.3.3	Kontinuierliche Lampen	314
3.6.4	Elektronische Komponenten	314
3.6.4.1	Magnete	314
3.6.4.2	Netzteile	314
3.6.4.3	Elektronik für Remotesteuerung	315
3.6.4.4	Motoren	315
3.6.4.5	Thermische Regelung	316
3.6.5	Mechanische Komponenten	317
3.6.5.1	Gehäuse	317
3.6.5.2	Isolationen	318
3.6.5.3	Optikhalterungen	318
3.7	Der richtige Detektor	318
3.7.1	Ein kurzer Vergleich zwischen CCD und CMOS	319
3.7.2	Pixelabmessungen und andere Kenngrößen	320
3.7.3	Test der Science-Kamera (CCD)	322
3.7.3.1	Statistik der Bias- und Dark-Aufnahmen	322
3.7.3.2	Überprüfung der Linearität des CCD	323
3.7.3.3	Überprüfung der Skalierbarkeit des Dunkelstroms	325
3.7.3.4	Der Gain-Faktor	326
3.7.4	CCD Linear-Arrays	328
3.8	Geometrische Überlegungen	330
3.8.1	Sinnvolle Spaltweite	330
3.8.2	Wahl des optischen Layouts	333
3.9	Erstellen und berechnen eines Layouts	333
3.9.1	Direktgekoppelte Spektrographen	333
3.9.1.1	Spaltbreite	334
3.9.1.2	Kollimatorbrennweite und Auflösung	334
3.9.1.3	Objektivbrennweite und Dispersion	335
3.9.2	Der Einfluss der Faserkopplung	336
3.9.3	Der Einfluss des Image-Slicers	337

3.9.4	Effizienzbetrachtungen	337
3.9.4.1	Der Einfluss einer Faserkopplung	338
3.10	SILENT - Spectrograph sImuLation and EmulatioN Tool	339
3.10.1	Kurze Erläuterung des Programms	339
3.10.2	Beispiel: EasySpecN	340
3.11	Kalibriereinrichtungen	342
3.11.1	Wellenlängenkalibration	344
3.11.1.1	Allgemeines	344
3.11.1.2	Vielstrahlinterferenz & Fabry-Perot-Etalon	345
3.11.1.3	Konfokales Fabry-Perot-Interferometer	353
3.11.1.4	Athermische Montage für FPE	353
3.11.2	Flatfield-Korrektur	354
3.11.3	Beispiel	359
3.11.4	Bemerkung: Echelle	360
3.12	Spaltbeobachtungseinrichtungen	361
3.12.1	Geneigter reflektierender Spalt	361
3.12.2	Strahlenteiler	363
3.12.3	Faserkopplung	363
3.13	Mechanik	367
3.13.1	Materialien	367
3.13.2	Gehäuse	368
3.13.3	Komponentenhalter	373
3.13.3.1	Spiegel- und Linsenhalter	373
3.13.3.2	Gitterhalter	373
3.13.4	Kamera-Befestigung	375
3.13.5	Spalteinheit für direkt gekoppelte Spektrographen	376
3.13.6	Faserankopplung	376
4	Beispiele für Selbstbauspektrographen	379
4.1	Aller Anfang ist schwer!	379
4.1.1	Versuche zum Bau eines fasergekoppelten klassischen Spektrographen: der ErstSpek	379
4.1.2	Versuche zum Bau eines direktgekoppelten Echellespektrographs: der ErstEchelle	381
4.2	Spaltlose Spektrographen	385
4.2.1	Staranalyser	385
4.2.2	EasySpec	388
4.2.3	Mäusevilla	389
4.2.3.1	Konzept und Auslegung	389
4.2.3.2	Wellenlängen und Gittereinstellung	391
4.2.3.3	Meßergebnisse zur Darstellung der Leistungsfähigkeit des Spektrographen	393
4.2.4	MiniSpec	394
4.2.4.1	Mechanik, Layout und Optik	395
4.2.4.2	Justage und Gitterwechsel	399
4.2.4.3	Kamerabefestigung und Fokussierung	400
4.2.4.4	Schiebespalt	400
4.2.4.5	Ergebnisse	400
4.2.4.6	Pläne für den Nachbau	401
4.2.4.7	MiniSpecC	407
4.3	Sonnen-Spektrograph für Schüler (SSS)	407
4.3.1	Off-Axis-Variante	407
4.3.2	On-Axis Variante	409
4.3.3	Vergleichsmessungen	412
4.4	Direkt-Linked Echelle-Spektrograph (Dilines)	414
4.4.1	Mechanik	414
4.4.2	Optik	415
4.4.3	Kalibrationseinheit	418
4.4.4	Handhabung	418
4.5	Ein Echelle in Littrow	418
4.6	Fibre-Linked Image-Sliced Echelle-Spektrograph (FLISES)	420

4.6.1	Thermische Regelung	422
4.6.1.1	Thermoelektrische Kühlung mittels Peltierelement	425
4.6.1.2	Realisierung und Temperaturverlauf	427
4.6.2	Faserkopplung	429
4.6.3	Spektralformat	430
4.7	Beugungsbegrenzter Echelle-Spektrograph	430
4.7.1	Allgemeines	430
4.7.2	Design-Beispiel	432
4.7.3	Geist am Vakuum-Fenster	433
4.8	Zwei 3D-Spektrographen	436
4.8.1	Mini-Integral-Field-Unit-Spectrograph (MIFUS)	436
4.8.1.1	Das Faserbündel	436
4.8.1.2	Optisches Design	438
4.8.1.3	Testmessungen an Sonne und M42	439
4.8.2	H α -Monitoring-Spektrograph (H α MoniS)	439
4.8.2.1	Volume-Phase-Holographic-Gratings (VPHG)	439
4.8.2.2	Layout und optisches Design	447
5	Fit für das Feld	449
5.1	Justage der Spektrographenoptik und -mechanik	449
5.1.1	Kollimierung und Fokussierung des internen Strahlenganges	449
5.1.1.1	Kollimatoreinheit	449
5.1.1.2	Diffraktives Element	450
5.1.1.3	Abbildungseinheit	451
5.1.2	Eichung der Gittereinstellungsskala mittels Spektrallampe	452
5.2	Equipment aufeinander abstimmen	453
5.2.1	Mechanische und optische Adaption des Spektrographen an das Teleskop	453
5.2.2	Peripheres Zubehör	454
5.3	Aufnahmetechnik (Bias, Darks, Flats, Kalibrierlicht, ...)	455
5.3.1	Bias	455
5.3.2	Darkaufnahmen	457
5.3.3	Flataufnahmen	457
5.3.4	Kalibrierlichtaufnahmen	461
5.4	Beobachtungen planen	462
6	Der Spektrograph im Einsatz	465
6.1	Das Spektrometer am Teleskop	465
6.1.1	Justage der optischen Achsen von Suchern, Teleskop und Spektrograph	465
6.1.2	Beispiel: Spaltloser Eigenbauspektrograph am 5"-Maksutov-Newton (Intes-micro MN 58)	466
6.1.3	Beispiel: Spaltspektrograph Lhires III von Shelyak am Celestron C14	467
6.1.4	Beispiel: MiniSpec am 10" Newton	468
6.1.5	Beispiel: Remote FLISES	468
6.1.6	Beispiel: SSS (fasergekoppelter Eigenbau-Czerny-Turner-Spektrograph an einem einfachen Refraktor zur Sonnenbeobachtung)	470
6.2	Nachführtechniken	471
6.2.1	Nachführung mittels Leitrohr	472
6.2.2	Nachführung mittels einer integrierten Spaltbeobachtungsoptik	472
6.2.2.1	Fokussierung des Objekts auf dem Spalt	473
6.2.2.2	Halten des Objekts auf dem Spalt	473
6.2.2.3	Spaltbeobachtungskameras	473
6.2.2.4	Autoguiderprogramme	475
6.3	Praxistipps	475
6.3.1	Kritische Prüfung der ersten Aufnahmen einer Beobachtungssession	475
6.3.2	Gründe für Artefakte in Spektren	476
6.3.3	Handhabung und Reinigung von Beugungsgittern	479

7	Früchte der Nacht	481
7.1	Aufnahmen sichten, prüfen, beurteilen, auswählen	481
7.1.1	Spaltlose Aufnahmen	481
7.1.2	Aufnahmen mit Spalt	481
7.2	Prinzipielles Vorgehen beim Auswerten (Datenreduktion)	482
7.2.1	Extraktion des Spektrums & Himmelshintergrund	484
7.2.2	λ -Kalibration des 1D-Spektrums	484
7.2.3	Kontinuums-Normalisation	486
7.2.4	Fluxkorrektur	487
7.2.5	Entfernung terrestrischer Linien	488
7.2.6	Besonderheiten bei spaltlos aufgenommenen Spektren	490
7.3	Verschiedene Freeware-Programme und ihre Nutzung	492
7.3.1	IRIS	492
7.3.1.1	Mitteln einer Sequenz (Darks)	493
7.3.1.2	Darkkorrektur einer Aufnahme	494
7.3.1.3	Flatfieldkorrektur	494
7.3.1.4	Spektrumstreifen ausrichten	494
7.3.1.5	Himmelshintergrund subtrahieren	496
7.3.1.6	2D -> 1D	496
7.3.1.7	Spektren mit spaltlosen Spektrographen	496
7.3.2	VSpec	497
7.3.3	ESO-Midas	500
7.3.3.1	Vorbereitung der Rohdaten	500
7.3.3.2	Reduktion von Langspalt-Spektren	501
7.3.3.3	Der MIDAS-Kontext OPA für spaltlos gemessene Spektren und Objektivprismenspektroskopie	503
7.3.3.4	Der MIDAS-Kontext SMS zur Datenreduktion für Langspaltspektrographen	504
7.3.3.5	Der MIDAS-Kontext BACHES zur Datenreduktion von Echellespektren	506
7.4	Datenarchiv	509
8	Wissenswertes rund um Spektren	515
8.1	Einfluß der Auflösung auf das Spektrum	515
8.1.1	Spektren niedriger Auflösung	515
8.1.1.1	Spaltlose Aufnahmen mit dem EasySpecN	515
8.1.1.2	Aufnahmen mit dem MiniSpec mit Spalteinheit	517
8.1.1.3	Messungen mit dem Alpy	517
8.1.2	Spektren mittlerer Auflösung	519
8.1.3	Spektren hoher Auflösung	521
8.1.4	Spektren sehr hoher Auflösung	524
8.2	Das Signal- zu Rausch-Verhältnis SNR (signal noise ratio)	525
8.2.1	Grundsätzliches zum SNR	525
8.2.2	Beispiele zur Illustration des Einflusses des SNR auf die Qualität von Spektren	528
8.2.3	Das SNR und die Präzision der Messungen	530
8.2.4	Messung des SNR	531
8.3	Artefakte	532
8.3.1	Cosmics	532
8.3.2	Fringes	532
8.4	Fremde Linien in Sternspektren	533
8.4.1	Emissionsnebel-Linien	533
8.4.2	Terrestrische Linien	535
8.4.2.1	Sauerstoffbanden	536
8.4.2.2	Wasserlinien	537
8.4.3	Linien interstellarer Materie (ISM)	538
8.4.3.1	Natrium und andere Metalle mit niedrigem Ionisierungspotential	538
8.4.3.2	Partikel (DIB)	539
8.5	Spezielle Effekte in Sternspektren	540
8.5.1	WR 140	540
8.5.2	ϵ Aur	543

8.5.3	Mizar (ζ Urs M)	543
8.5.4	P Cyg	553
8.5.5	α^2 Canum Vanaticorum Veränderliche	554
	8.5.5.1 Alpha Andromedae	554
	8.5.5.2 Beta Coronae Borealis	554
	8.5.5.3 Epsilon Ursae Majoris	557
	8.5.5.4 Literatur	557
8.5.6	Beta Cep Typ	557
	8.5.6.1 Alpha Virginis	557
	8.5.6.2 Beta Canis Majoris	557
	8.5.6.3 Beta Cephei	558
	8.5.6.4 Literatur	558
8.5.7	Delta Scuti Veränderliche	558
	8.5.7.1 Gam Boo	559
	8.5.7.2 Literatur	559
8.5.8	Algol-Bedeckungsveränderliche	559
	8.5.8.1 Literatur	561
8.5.9	Klassische Cepheiden	561
	8.5.9.1 Alpha Ursae Minoris	561
	8.5.9.2 Literature	561
8.6	Vergleich mit Literaturspektren	561
8.7	Aufbereiten der Daten und Publikation	563
9	Zusammenstellung weiterführender Informationen	567
9.1	Gruppen (Vereine, Foren, Emaillisten)	567
9.2	Literatur, Datenbanken & Software	568
9.3	Ausrüster & Lieferanten	571
9.4	Physikalische Konstanten	574
9.5	Praktische Hilfsmittel	574
	9.5.1 Neonspektrum zum Kalibrieren	574
	9.5.2 Häufig verwendete Linien zur internen Wellenlängenkalibrierung von Spektren	575
	9.5.3 Messung der Spaltbreite mittels einer roten Laserdiode	575

Abbildungsverzeichnis

1.1.1	Bildkonstruktion und Definitionen	34
1.1.2	Bezeichnungen am ebenen Spiegel.	36
1.1.3	Gekrümmter konkaver Spiegel und Bezeichnungen.	36
1.1.4	Skizze zum Brechungsgesetz zwischen zwei Medien unterschiedlicher Brechkraft.	37
1.1.5	Nomenklatur zur Linsengleichung an einer dünnen Linse.	38
1.1.6	Bezeichnungen an einer sphärischen Fläche.	39
1.1.7	Skizze eines verklebten Achromaten und die zugehörigen Radien und Brechungsindizes.	41
1.1.8	Prisma mit gleichen Winkeln und die entsprechend im Text verwendeten Größen.	44
1.1.9	Abbildungsrelationen der dünnen Linse.	45
1.1.10	Barlowlinse (links): Ein schneller Lichtkegel wird durch eine zerstreuliche Linse verlangsamt. Shapleylinse (rechts): Ein langsamer Kegel wird von einer fokussierenden Linse beschleunigt.	46
1.2.1	Zum Hygenschen Prinzip: Jeder Punkt der Wellenfront ist Ausgangspunkt einer "neuen" Kugelwelle.	50
1.2.2	Zum Hygens-Fresnel-Prinzip und die im Text verwendete Geometrie.	51
1.2.3	Zum Helmholtz-Kirchhoffschen Integraltheorem.	51
1.2.4	Beugung an Apertur A.	52
1.2.5	Winkel am Punkt Q.	53
1.2.6	Zur Fraunhofer Beugung.	53
1.2.7	Geometrie der rechteckigen Apertur.	54
1.2.8	Beugung am Gitter: Beugung am Einfachspalt, Interferenz der Spalte, Gitterfunktion.	57
1.2.9	Sammellinse als Fouriertransformator.	59
1.2.10	Foto eines Echellegitters in Trägermechanik aus einem Perkin Elmer Optima.	60
1.2.11	Das Beugungsgitter und die Winkel, sowie der Blazewinkel.	62
1.2.12	Zur Betrachtung der Verschiebung des Blazepack.	64
1.2.13	Amplituden- und Intensitätsverteilung der Beugungsfigur an einer rechteckigen Apertur für zwei Wellenlängen.	65
1.2.14	Effizienzkurven zu Reflexionsgittern (Thorlabs).	66
1.2.15	Effizienzkurven zu Transmissionsgittern (Thorlabs).	66
1.2.16	Intensität am gebrochenen Beugungsgitter mit 1200 1/mm.	67
1.2.17	Geometrie am Beugungsgitter für den Fall deutlicher Abschattung.	67
1.2.18	Abschattung am Gitterprofil für Einfallswinkel größer und kleiner als der Furchenwinkel.	68
1.2.19	Abschattung am Gitterprofil für den Fall $\alpha < \theta$	68
1.2.20	Polarisation des Lichts: Linear, zirkular und elliptisch polarisiertes Licht.	69
1.2.21	Filterwirkung zweier überkreuzter Polarisationsfilter.	70
1.2.22	Brechung und Reflexion an der Grenzfläche zwischen zwei Medien.	71
1.2.23	Amplitudenverhältnisse für $n = 1,5$ und $n' = 1,0$	72
1.2.24	Wie 1.2.23, jedoch für $n = 1,0$ und $n' = 1,5$	72
1.3.1	Zur Herleitung der Bildfehler.	75
1.3.2	Abbildung am Kugelspiegel.	78
1.3.3	Abbildung an einer Sammellinse.	78
1.3.4	Formen für Menisken.	78
1.3.5	Astigmatismus Spotdiagramm.	80
1.3.6	Zur Entstehung des Astigmatismus.	81
1.3.7	Koma in Meridional- und Sagittalschnitt.	81
1.3.8	Koma in Meridionalschnitt.	81

1.3.9	Entstehung der Koma.	82
1.3.10	Ausschnitt aus einer Aufnahme des Th/Ar-Kalibrationsspektrums, links mit dejustierter, rechts mit justierter Querzerlegereinheit.	82
1.3.11	Farbfehler an einer einfachen Linse.	82
1.3.12	Farbfehlerkurve einer Sammellinse.	83
1.3.13	Verzeichnung; links: tonnenförmig, rechts: kissenförmig.	83
1.3.14	Reduktion des Öffnungsfehlers durch Aufteilung der Brechkraft.	84
1.3.15	Zur Auswirkung der Position der Feldblende.	85
1.4.1	Punktbild des HST vor Korrektur (Fußnote 18).	86
1.4.2	Beispiel für ein OPD-Diagramm.	87
1.5.1	Lichtführung im Wellenleiter.	89
1.5.2	Totalreflexion im Lichtleiter.	89
1.5.3	Numerische Apertur in Abhängigkeit des Brechungsindexverhältnisses.	90
1.5.4	Geometrie an der Kern-Mantel-Fläche.	90
1.5.5	Meridional- und Skew-Strahlen.	91
1.5.6	Zur Selbstkonsistenz von Wellen (Wellenleitermoden).	91
1.5.7	Klassifizierung von Wellenleitermoden.	93
1.5.8	Intensitätsverteilung einiger LP-Moden.	94
1.5.9	Gekrümmte Faser.	95
1.5.10	30 m Fiber in Pachkabel.	96
1.5.11	SMA-Stecker, die rote Kappe dient als Schutzabdeckung der Ferrule.	96
1.5.12	Geometrie zur Berechnung der Anzahl der Reflexionen in einem Wellenleiter.	97
1.5.13	Anzahl der Reflexionen in einem Wellenleiter mit 1 m Länge.	97
1.5.14	Optische Weglänge eines Wellenleiters in Abhängigkeit des Einfallswinkels.	98
1.5.15	Anschlussgewinde (links) und Ferrule (rechts) des SMA-Steckers.	98
1.5.16	Fiberbündel mit am Ein- und Ausgang vertauschten Fasern.	99
1.6.1	Messfehler.	100
1.6.2	Hooksche Feder; für kleine Auslenkungen s gilt (1.6.28).	107
1.6.3	Lineares System.	107
1.7.1	Bohrsches Atommodell.	116
1.7.2	Energieschema des H-Atoms für die ersten drei Serien.	118
1.7.3	Termschema zum Beispiel $l = 1$ nach den Auswahlregeln für j und m	120
1.7.4	Rohaufnahme eines Echellespektrums von P Cygni.	125
1.7.5	Profil der $H\alpha$ -Linie von P Cygni.	126
1.7.6	Zur Rotation eines zweiatomigen Moleküls um zwei Achse mit nicht-verschwindenden Trägheitsmoment.	127
1.7.7	Mögliche Schwingungen dreiatomiger linearer Moleküle.	129
1.7.8	Molekülschwingung; Grund- und die ersten beiden Oberschwingungen zweiatomiger Moleküle.	130
1.7.9	Molekül-Potential und harmonischer Oszillator.	130
1.7.10	Schematisches Fortrat-Diagramm.	132
1.7.11	Zum Franck-Condon-Prinzip.	133
1.8.1	Prinzip einer Absorptionmessung.	134
1.8.2	Schematisches Absorptionsspektrum eines einzelnen Übergangs.	135
1.8.3	Prinzip einer Emissionsmessung.	135
1.8.4	Schematisches Emissionsspektrum eines einzelnen Übergangs.	135
1.8.5	Verlauf der Dispersionsrelationen.	137
1.8.6	Charakterisierung einer Spektrallinie.	139
1.9.1	Schematische Lichtkurve eines bedeckungsveränderlichen Doppelsterns.	145
1.9.2	Interferometer zur Messung von Sternradien.	146
1.9.3	Spektraltypen der Sterne.	147
1.9.4	Schematisches Hertzsprung-Russell-Diagramm.	148
1.9.5	Fluchtgeschwindigkeit gegen Sternmasse bei Verwendung der Masse-Radius-Beziehung von Hauptreihensternen [11].	150
1.9.6	Ein bump im Linienprofil wird durch einen Sternfleck hervorgerufen.	150
1.9.7	Schematischer Aufbau eines sonnenähnlichen Sterns.	154
1.9.8	Schematischer Aufbau eines Neutronensterns.	162
1.9.9	Schematischer Aufbau eines schwarzes Lochs.	166

1.10.1	Stärke der Balmerlinien in Abhängigkeit der Temperatur unter Berücksichtigung der Ionisation.	175
1.10.2	Äquivalentbreite einer Linie.	176
1.10.3	Radialgeschwindigkeitskurve mit kleiner Bahnexzentrizität.	181
1.10.4	Radialgeschwindigkeitskurve mit hoher Bahnexzentrizität.	181
1.10.5	Graphische Lösung für die exzentrische Anomalie.	182
2.1.1	Strahlengang im Newton-Teleskop.	191
2.1.2	Abbildung durch leicht dejustieren Newton am Beispiel von M5.	191
2.1.3	Cassegrain-Teleskop mit parabolischem Haupt- und hyperbolischen Fangspiegel.	192
2.1.4	Schematischer Aufbau eines einfachen Linsenteleskops (Chromat).	193
2.2.1	Schnitt der Optik im Sigma 135 1,8 DG HSM.	196
2.2.2	Layout des Visionar 1,9/141 (oben) und Foto von der 1,6/92- und 1,9/119-Version.	198
2.2.3	Spotdiagramme für ein 1,9/141 Visionar Projektionsobjektiv.	199
2.2.4	Layout eines Doppel-Gauss-Objektivs.	199
2.2.5	Einige Objektiv-Typen	200
2.2.6	Layout eines rekonstruierten Sigma Sigmatel 1,8/135.	200
2.2.7	Zur Bestimmung des Radius einer Linse aus einer vorhandenen Zeichnung.	201
2.3.1	Azimutale Montierung mit Nasmyth-Fokus.	203
2.3.2	Parallaktische Montierung.	203
2.3.3	Lagerung der DE-Schnecke.	205
2.3.4	RA-Getriebe.	205
2.3.5	DE-Getriebe.	206
2.3.6	Lagerung einer Welle mit Los- und Festlager.	206
2.3.7	Setup des Autors: Motorisierte Rupp-Montierung mit LFEP-Steuerung, 10 Zoll SC-Teleskop und angebrachtem Echellespektrograph.	207
2.4.1	Platine der LFEP mit durchgebrannten Motortreiber.	209
2.5.1	Skizze einer Spaltbeobachtungseinheit.	210
2.5.2	Zur Herleitung der spektralen Dispersion eines Spektrographen.	211
2.5.3	Dispersion MiniSpec und Mäusevilla	212
2.5.4	Ebener Spiegel zur Verdeutlichung der Anamorphose.	212
2.5.5	Anamorphose des Strahldurchmessers verdeutlicht durch Footprintdiagramme.	213
2.5.6	Anamorphose eines Objektes verdeutlicht durch Footprintdiagramme.	213
2.5.7	Zur Herleitung des Auflösungsvermögens.	214
2.5.8	Auflösung MiniSpec und Mäusevilla.	215
2.5.9	HgD-Linie aufgenommen mit einem Monochromator für unterschiedliche Auflösungen.	215
2.5.10	Skizze eines Czerny-Turner-Monochromators.	219
2.5.11	Linienprofil bei gleicher Ein- und Austrittsspaltbreite.	219
2.5.12	Linienprofile bei unterschiedlichen Spaltbreiten.	220
2.5.13	Faltung zweier Rechteckfunktionen zu einer Dreiecks- bzw. Trapezfunktion, siehe Text.	220
2.5.14	Abbildung am sphärischen Spiegel ohne Off-Axis-Winkel.	221
2.5.15	Abbildung am sphärischen Spiegel mit Off-Axis Winkel.	221
2.5.16	Allgemeine Abbildung am sphärischen Spiegel.	222
2.5.17	Beispiel einer on-Axis Wadsworth-Anordnung.	228
2.5.18	Beispiel einer symmetrischen Wellenfront (links) und einer asymmetrischen (rechts).	229
2.5.19	Winkel am Kameraspiegel.	229
2.5.20	Nomenklatur am Glas-Keil.	231
2.5.21	Zum prinzipiellen Aufbau eines Echelle-Spektrometers.	231
2.5.22	Zum Spektralformat des Echelle mit Gitter-Cross-Disperser und Prisma-Cross-Disperser.	233
2.5.23	Vergleich des Echellogramms für ein Gitter mit 31 l/mm (links) und 79 l/mm (rechts).	234
2.5.24	Layout fünfer Hauptkollimator-Einheiten für Echelle-Spektrographen.	235
2.5.25	On-Axis Spot für die fünf vorgestellten Anordnung, in selber Reihenfolge.	236
2.5.26	Gesamtes Layout der vorgestellten Konfigurationen.	237
2.5.27	Spotdiagramme der vorgestellten Anordnungen.	238
2.5.28	Klassisches Layout eines fasergekoppelten Echelle-Spektrographen für ein Auflösungsvermögen bis ca. 35.000.	238
2.5.29	Klassisches Layout eines Echelle-Spektrographen (siehe Abschnitt 4.4) mit Eingangsspalt für ein Auflösungsvermögen bis max. 20.000.	239

2.5.30	Zur Entwicklung eines Petzval-Objektives: Startanordnung für den Optimierungsprozess.	240
2.5.31	Petzval-Objektiv moderater Öffnung aus zwei achromatischen Linsengruppen.	240
2.5.32	On-Axis und Off-Axis ($1,5^\circ$) Spotdiagramm zum Petzval-Objektiv.	242
2.5.33	Petzval-Objektiv moderater Öffnung aus zwei achromatischen Linsengruppen.	242
2.5.34	Spotdiagramm des im Text erwähnten Petzvals F/2,2.	243
2.5.35	Geometrie am VPH-Grism mit symmetrischem Strahlengang für eine Wellenlänge.	243
2.5.36	Beispiel Layout für einen mehrkanaligen klassischen Spektrographen.	245
2.6.1	Köhlersche Beleuchtung aus zwei sphärischen Hohlspiegeln.	246
2.6.2	Foto von "Fibre Measurement Apparatur"	246
2.6.3	Normierte Intensitätsfluktuationen des Beleuchtungssystems von FMA.	247
2.6.4	Zur Messung des Fernfeldes einer optischen Faser.	248
2.6.5	Querschnitt eines polychromatischen Fernfeldes.	248
2.6.6	Monochromatisches Fernfeld einer oktagonalen Quarzfaser, welche über eine Mikrolinseneinkopplung verfügt.	249
2.6.7	Makrobending a) und Mikrostrukturen in der Kern-Mantel-Grenzschicht b).	250
2.6.8	FRD Messungen für runde und oktagonale Fasern mit $100 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser.	252
2.6.9	Wie Abb. 2.6.8, jedoch mit $200 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser.	252
2.6.10	Wie Abb. 2.6.8, jedoch mit $300 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser.	252
2.6.11	Rohspektrum eines stark durch Interferenz strukturieren Spektrums einer breitbandigen Lichtquelle.	253
2.6.12	Gemessenes SNR verschiedener Fasern in Abhängigkeit der Eingangs-F-Zahl.	254
2.6.13	Modenrauschen in Abhängigkeit des Faserkerndurchmessers für zirkulare und oktagonale Fasern.	255
2.6.14	Exzenter als mechanischer Scrambler.	255
2.6.15	Modenrauschen mit angeschaltetem Exzenter.	256
2.6.16	Skizze und Nomenklatur eines Fiber-Taper.	257
2.6.17	Schematische Skizze einer Multikernfaser mit beidseitiger Konversion zu Multimodefaser.	258
2.6.18	CCD-Aufnahme eines Neonspektrums mit zwei Emissionslinien im abgebildeten Wellenlängenfenster, bei einer Dispersion von $0,11 \text{ \AA}/\text{Pixel}$	259
2.6.19	Foto einer Hohlkathodenlampe.	260
2.6.20	Innenansicht eines Selbstbau-Netzteils zum Betrieb der Hohlkathodenlampen.	261
2.6.21	Schaltplan für ein HKL-Netzteil nach Wolfgang Arnold.	261
2.6.22	Screenshot der Bildaquisitionsoftware bei der Aufnahme eines Spektrums einer ThAr-Hohlkathodenlampe.	262
2.6.23	Vergleich des ThAr- (oben) und des Neon-Spektrums (unten).	262
2.6.24	Aufsatz für die HKL zur Einspeisung des Kalibrierlichts in die Faser.	263
2.6.25	Der in das einklappbare Röhrchen eingeklebte Umlenkspiegel für das Kalibrierlicht.	264
2.6.26	Der Eintritt der Faserabbildungsoptik gegenüber dem Umlenkspiegel über dem Spalt.	264
2.6.27	Die von außen in den Lhires eingeführte und abnehmbare Anpassungsoptik am Ende der Faser bildet das Faserende auf den Spalt ab.	265
2.6.28	Vergleich zweier Neonspektren, erzeugt durch direkte Beleuchtung des Spalts mit der Neonlampe bzw. durch Einspeisung des Lichts über den LWL.	266
2.6.29	Tageslichtspektrum (schwarz), mit 10 ThAr-Linien (blau) kalibriert.	266
2.6.30	Vierfach Klappspiegel.	267
2.6.31	Möglichkeiten für Fibernkopplungen.	268
2.6.32	Fibereinkopplung.	269
2.6.33	Schematischer Aufbau eines Fibernkabels.	269
2.6.34	Kevlarschere, zwei einstellbare Zangen zum Ablängen des Fiber Tubings und Crimpzange zum Befestigen des Steckers am Tubing.	270
2.6.35	Polierscheibe mit Kalibrierstift für SMA Konnektor.	270
2.6.36	Fibertubing, Rohfaser und Faser-Stripper.	271
2.6.37	5 Minuten Epoxydharz zum ankleben der Rohfaser an den Zugfaden, Faserkleber und Dosierspritze.	272
2.6.38	Zwischenschritte bei der Fertigung einer SMA-Stecker-Verbindung.	273
2.6.39	Reinigungstücher, Druckluft und Reinigungsalkohol.	273
2.6.40	Plane Glasplatte als Polierunterlage.	274
2.6.41	Polierpapier, von links nach rechts: weiss $0,3 \mu\text{m}$, grün $1 \mu\text{m}$, braun $3 \mu\text{m}$, schwarz $5 \mu\text{m}$	274

2.6.42	Querprofil und Bild eines polychromatischen Faserfernfeldes; links: stressfreie Verklebung, rechts: nicht-stressfreie Verklebung (Milky-Way Profil).	275
2.6.43	Prinzip eines Bildschneiders in der Spektroskopie.	276
2.6.44	Skizze zum Bowen-Walraven-Typ.	277
2.6.45	Schnittbilder des Bowen-Walraven-Typs.	278
2.6.46	Skizze zum Zwei-Spiegel-Typ.	278
2.6.47	Zum Bildschneider des Glasplättchen Typs.	279
2.6.48	Geometrie am schrägen Glasplättchen.	280
2.6.49	Versatz an Glasplatte nach (2.6.24) für $t = 1$ mm und $n = 1,5$	280
2.6.50	Test des Slicers an einem Echelleprototypen von FLISES (vgl. 4.6), rechts ein Bild der geteilten Faser.	280
2.6.51	Zum Bildschneider des Glasplättchen Typs mit zwei Glasplatten.	280
2.6.52	Abbildungen von Bildschneidern. Links ohne Bildschneider, rechts mit einer Glasplatte, mittig mit zwei Glasplatten.	281
2.6.53	Skizze eines Waveguide Image Slicer	281
2.6.54	Flatspektren und die zugehörigen Faser-Fernfelder bei zentralern Abschattung.	283
2.6.55	Fernfelder verschiedener Fasern, gemessen an einem Newton-Teleskop.	284
2.6.56	Flatfields mit Abschattung quer und parallel zu den Gitterfurchen.	284
2.6.57	Double-Scrambler aus einem asphärisierten Achromaten und einer Mikrolinse.	285
2.6.58	Kugellinse im Zwischenfokus der F-Anpassung des Spektrographen-Eingangs zum Nah-Fernfeld-Wechsel.	286
2.6.59	Test-Resultate des in Abb. 2.6.57 gezeigten Double-Scramblers.	287
2.6.60	Vergleich zwischen dem Verlauf des Brechungsindex der Luft in einem geschlossenen Gehäuse und nach Gl. (2.6.27).	289
2.6.61	Geschwindigkeitsdispersion der Wellenlänge in Abhängigkeit der Gitterkonstante und des Brechungsindex der Luft von der Temperatur.	290
2.6.62	Atmosphärische Dispersion aufgetragen als Differenzen zur Wellenlänge von 400 nm in Abhängigkeit der Zenitdistanz.	291
2.6.63	Korrektur (beispielhaft) für atmosphärische Dispersion.	291
2.6.64	Die drei hier diskutierten Einheiten zur Zerlegung der Bildebene und Aufspaltung in ein Spektrum.	293
2.7.1	Foto der fertig aufgebauten Sternwarte.	294
2.7.2	Skizze der Drehvorrichtung aus Führungsring (FR) und Drehring (DR).	295
2.7.3	Der Frequenzumrichter (links) und der Antrieb des Drehringes (rechts).	295
2.7.4	Übersicht der PC- und Steuerelektronik.	296
2.7.5	Links: Stern- und Dreieckschaltung Mitte: Steinmetzschtaltung Rechts: 1-Phasen Motor mit Anlauf- und Betriebskondensator.	298
3.2.1	Der Orionnebel, aufgenommen mit einem spaltlosen Spektrographen im Bereich der $H\alpha$ -Linie.	303
3.2.2	Der Orionnebel, mit einem Spaltspektrographen aufgenommen.	303
3.2.3	Zusammenhang zwischen Seeing, Teleskopbrennweite und resultierendem Durchmesser des Seeingscheibchens im Teleskopfokus zur Bestimmung der sinnvollen Spaltbreite.	305
3.3.1	Das Teleskop wirkt als Lichtsammleinrichtung.	305
3.3.2	Ein zu schwerer und großer spaltloser Selbstbauspektrograph klassischen Typs an einem 5"-Maksutov-Newton-Teleskop auf einer überforderten HEQ-5 Montierung.	307
3.3.3	C14 auf 100 kg Montierung mit direkt im Fokus gekoppeltem Lihres III Spektrograph.	308
3.5.1	Spaltloser Spektrograph in eine käufliche Holzkiste eingebaut (Mäusevilla).	309
3.6.1	Layout zur Pupillenabbildung mit einer Mikrolinse.	312
3.6.2	Abbildung mit einer Gradienten-Index-Stablinse.	312
3.6.3	Isolations- und Abschirmaufbau eines thermische stabilisierten Instrumentengehäuses.	316
3.7.1	Monolithische CCD mit 112 Mio. Pixeln mit 9 μ m.	319
3.7.2	Spektrum von ϵ Aur im NIR bei 7700 \AA zeigt die stark variable KI Linie in der O2 Bande.	321
3.7.3	Informationsgehalt eines Spektrums in Abhängigkeit von der Lineardispersion (Pixelgröße).	321
3.7.4	Temperaturfunktion des gemittelten Dunkelstroms einer Atik 383 -CCD-Kamera.	324
3.7.5	Linearität der Response einer CCD.	325
3.7.6	Mittelwerte der Pixel-Counts in Abhängigkeit von der Belichtungszeit.	326
3.7.7	Histogramm unterschiedlich lang belichteter Darkaufnahmen.	327

3.7.8	Zunahme des Dunkelstroms individueller Pixel mit der Belichtungszeit.	327
3.7.9	Beispiel für die Messung des Gain-Faktors.	329
3.7.10	Links die OEM Platinen der Zeilenkamera in einem Aluminiumgehäuse. Rechts die Zeilenkamera am MiniSpec.	329
3.7.11	Testaufnahmen von Alpha Boo, kalibriert, aber nicht normiert, für einige Fasern.	331
3.8.1	Zusammenhang der sich ergebenden geometrischen Effizienz am Spalt und Pinhole bei unterschiedlichen Verhältnissen von Spaltweite und Seeingscheibchendurchmesser.	332
3.9.1	Zur Bestimmung des korrekten Faserdurchmessers unter Berücksichtigung der FRD und Effizienzeinflüssen.	339
3.10.1	SILENT - Hauptfenster.	340
3.10.2	Fenster zum plotten und speichern der Parameter eines Echellespektographen.	341
3.10.3	Fenster zum plotten eines emulierten Echelle frames, hier Th/Ar.	341
3.10.4	Screenshot des Fensters von SILENT zur Berechnung von EasySpec.	342
3.10.5	Ergebnisse aus der Berechnung des EasySpecN mit SILENT.	343
3.11.1	Vier Bauformen von Hohlkathodenlampen.	344
3.11.2	Halogenspektren durch ein Fabry-Perot-Etalon mit einem Czerny-Turner.	345
3.11.3	Übersichtsspektren von Hohlkathodenlampen.	346
3.11.4	Übersichtsspektren von Hohlkathodenlampen.	347
3.11.5	Übersichtsspektren von Hohlkathodenlampen.	348
3.11.6	Übersichtsspektren von HF-Hohlkathodenlampen.	349
3.11.7	Spektren von Starterlampen.	350
3.11.8	Spektren von Starterlampen.	350
3.11.9	Vielstrahlinterferenz	351
3.11.10	Reflexion und Transmission an einer plan-parallelen Platte	352
3.11.11	Transmission eines FPE.	353
3.11.12	Prinzip der athermischen Montage zweier Optiken.	354
3.11.13	Echelle-Spektren der Halogenlampen ohne Korrektur des Blaze, nur extrahiert und die Ordnungen wurden zusammengefügt.	355
3.11.14	Transmissionkurven der Hoya-Farbfiler.	356
3.11.15	Wie Abb. 3.11.13, jedoch mit Hoya-Filter LB-120.	357
3.11.16	Spektren der in Tabelle 3.5 gelisteten LEDs.	358
3.11.17	Beispiel einer Kalibrationseinheit mit Halogenlampe, mehrere LED Kanäle und Spektrallampe.	359
3.11.18	Footprint Diagramme am CD für jeweils drei Wellenlängen einer Beugungsordnung und zwei Strahldurchmesser.	360
3.11.19	Schematischer Verlauf der Vignettierung am CD.	361
3.11.20	Mißratene Blaze-Korrektur eines Spektrums von eps Cas, aufgenommen mit dem FLISES.	362
3.12.1	Spalteinheit mit schräg gestelltem Spaltträger.	362
3.12.2	Spaltbeobachtungseinheit auf Basis eines Strahlenteilerwürfels.	364
3.12.3	Geometrie an einer Mikrostablinse zur Pupillenabbildung.	364
3.12.4	Abhängigkeit des Krümmungsradius von der Teleskop-F-Zahl der Mikrolinse für Pupillenabbildung.	366
3.12.5	Polierscheibe für SMA-Stecker mit einem 10° Winkel.	366
3.13.1	Kräfte am Spektrographen.	368
3.13.2	Zur Biegung: Infinitesimales Balkenlängsstück.	368
3.13.3	Zur Biegung eines Kragbalkens.	369
3.13.4	Infinitesimale Elemente zur Berechnung der Biegung.	369
3.13.5	Querschnitt eines Balkens.	371
3.13.6	Querschnitt eines Vierkantrohrs.	371
3.13.7	Vorschlag für die Konstruktion eines Gehäuses.	373
3.13.8	Spiegelhalter in Draufsicht, Seitenansicht und Vorderansicht.	374
3.13.9	Käfig-Gitterhalter, der ebenfalls an eine L-Basis über eine Flachfeder angebracht werden kann.	374
3.13.10	Skizze einer Rotationsplattform für das Beugungsgitter.	375
3.13.11	Foto des Gitterhalter im SSS.	375
3.13.12	Eine "Kameraklemme" zur drehsicheren Montage der CCD an den Spektrographen.	376
3.13.13	Beispiel einer Faserkopplung mit Strahlteilerplatte, Kalibrationsanschluss und Guiderkamera.	377

3.13.14	Optisches Layout der Faserkopplung in Abb. 3.13.13.	377
4.1.1	Bilder des "ErstSpec", ein gescheiterter Versuch.	380
4.1.2	Vom ErstSpec erzeugte Bilder einer Energiesparlampe und der Sonne.	380
4.1.3	Das für ErstSpec nachträglich erstellte Ray Tracing.	381
4.1.4	Zeichnerischer Entwurf des geplanten Echellespektrographen.	382
4.1.5	Skizzen zur Funktion der SBE.	382
4.1.6	Innenansicht des Erst-Echelle.	383
4.1.7	Der Erst-Echelle am Teleskop (C14).	383
4.1.8	Aufnahmen mit dem Erst-Echelle.	384
4.1.9	Aufnahmen mit dem Erst-Echelle am Teleskop (C14).	385
4.1.10	Spaltenprofile durch die Aufnahmen in 4.1.9, oben Flat, unten α Aur.	386
4.1.11	Spektrum einer ThAr-Hohlkatodenlampe, aufgenommen mit dem Erst-Echelle.	386
4.1.12	Erst-Echelle, aufgebaut auf einer Karbonfaserplatte.	387
4.2.1	Spektrumsgrößen für verschiedene Abstände. Die Farben der Punkte entsprechen den RayTracing-Strahlen unterschiedlicher Wellenlängen.	387
4.2.2	EasySpecG: Ein Grism zur prefokalen Zerlegung des Lichts in ein Spektrum.	388
4.2.3	Spektrengößen für unterschiedliche Abstände vom Teleskopfokus für EasySpecG.	388
4.2.4	Neon-Spektrum gewonnen mit einem GRISM.	389
4.2.5	EasySpecN: Ein spaltloses Transmissionsgitter-Spektralgerät.	390
4.2.6	Ausbaustadien des spaltlosen klassischen Spektrographen "Mäusevilla" von Lothar Schanne sowie der Einsatz am Teleskop.	390
4.2.7	Berechnungstableau für die Mäusevilla.	392
4.2.8	Neonspektren erzeugt mit einem künstlichen Stern im Fokus des Kollimators.	392
4.2.9	Extrahierte Neonspektren werden mit den Neonemissionswellenlängen verglichen und identifiziert.	393
4.2.10	Wellenlängenkalibriertes Neonspektrum eines künstlichen Sterns.	393
4.2.11	Emissionslinienspektrum des Be-Sterns γ Cas im roten Licht.	394
4.2.12	Emissionslinienspektrum des Be-Sterns γ Cas im blauen und violetten Licht.	394
4.2.13	Emissionslinienspektrum des blauen Riesen P Cyg.	395
4.2.14	Photo des MiniSpec.	396
4.2.15	Das Innenleben des MiniSpec.	396
4.2.16	Optisches Layout des MiniSpec.	397
4.2.17	Transmission der MiniSpec Optiken für s- und p-polarisiertes Licht.	397
4.2.18	Transversale Strahl-Aberrationen in der Bildebene des MiniSpec.	398
4.2.19	Simulationsergebnisse aus SILENT für den MiniSpec.	398
4.2.20	Einige Ergebnisse für die Parameter des MiniSpec aus der Simulation.	399
4.2.21	Schiebespalt am MiniSpec Prototypen mit einsteckbarer LED zur Beleuchtung des Spaltes.	400
4.2.22	Rohaufnahmen mit dem MiniSpec in Verbindung mit einer Faserkopplung.	401
4.2.23	Einige extrahierte Spektren von Be-Sternen aufgenommen mit dem MiniSpec.	402
4.2.24	Weitere Spektren von Be-Sternen wie in Abb. 4.2.23.	402
4.2.25	Gehäuse des MiniSpec.	403
4.2.26	Seitenansichten des MiniSpec.	404
4.2.27	Zeichnungen der Einzelteile für MiniSpec.	405
4.2.28	Fotocollage eines Nachbaus von Karsten Hansky.	406
4.2.29	MiniSpecC: links am Newton-Teleskop und rechts mit abgenommenem Deckel.	407
4.2.30	Daten des hier verwendeten konkaven Beugungsgitters.	408
4.2.31	Testspektren von Vega aufgenommen mit dem MiniSpecC.	408
4.3.1	Off-Axis-Anordnung für den Sonnen-Spektrographen für Schüler.	409
4.3.2	Spot durch den Fokus für die off-axis Anordnung.	409
4.3.3	On-Axis-Anordnung des Sonnenspektrographen für Schüler.	410
4.3.4	Spot-Diagramme für die on-axis Variante des SSS.	411
4.3.5	Innenansicht der on-axis Variante des Sonnenspektrographen für Schüler.	411
4.3.6	Modifizierte off-Axis Variante des Sonnen-Spektrographen für Schüler.	412
4.3.7	Vergleich der Spots beider Varianten des Sonnenspektrographen für Schüler: oben ohne zusätzliche Optiken, unten mit Achromat und Zylinderlinse.	412
4.3.8	Vergleich einiger Ausschnitte des Sonnenspektrums mit zwei Varianten des SSS aufgenommen.	413

4.4.1	Foto des Echelle-Spektrographen Dilines.	415
4.4.2	Spotdiagramm und transversale Strahl aberration des im Dilines verwendeten Achromaten.	415
4.4.3	Layout des Echelle-Spektrographen Dilines.	416
4.4.4	Spotdiagramm für den Echelle-Spektrographen Dilines für eine blaue, mittlere und rote Ordnung.	417
4.4.5	Halogen mit Blaufilter und Thorium/Argon-Kalibrationsspektrum.	419
4.5.1	Layout des Littrow-Echellespektrographen.	420
4.5.2	Spotdiagramm zum Littrow-Echelle.	421
4.6.1	Bild der Objektiv- und CCD-Halterung von FLISES.	422
4.6.2	Innenleben des FLISES bei einem Testaufbau.	423
4.6.3	FLISES im Isolationsgehäuse mit dem Peltier Luft-Luft Wärmetauscher.	423
4.6.4	Rohaufnahme der Th/Ar-Kalibrationslampe mit FLISES.	424
4.6.5	Das Auflösungsvermögen von FLISES ohne Image Slicer.	424
4.6.6	Zeichnungen und Wärmewiderstand dreier ausgewählter Kühlkörper.	426
4.6.7	Leistungsdaten eines Peltierlements.	426
4.6.8	Temperaturverlauf im äusseren Gehäuse von FLISES.	428
4.6.9	Temperaturverlauf im inneren Gehäuse von FLISES während einer Beobachtung.	428
4.6.10	Layout der Faserkopplung für FLISES und Spot auf der Faser und im Guider für den Rückreflex.	429
4.6.11	Die Faserkopplung von FLISES an einem 10" SC-Teleskop.	430
4.6.12	Spektralformat auf der CCD mit ZEMAX für einige Ordnungen.	431
4.7.1	Layout eines beugungsbegrenzten Echellespektrographen.	432
4.7.2	Spotdiagramm und Encircled Energy für den Entwurf in Abb. 4.7.1.	433
4.7.3	Modifizierter Entwurf zur Reduktion der Abmessungen und mit Vakuumfenstern.	434
4.7.4	Vereinfachung des in Abb. 4.7.3 gezeigten Entwurfs.	435
4.7.5	Testaufbau des beugungsbegrenzten Echelle-Spektrographen.	436
4.7.6	Geist am Vakuum-Fenster.	437
4.8.1	Foto des Faserbündels für MIFUS mit 38 Fasern.	437
4.8.2	Layout des 3D-Spektrographen MIFUS.	438
4.8.3	Spotdiagramme für On-Axis- und Off-Axis- Abbildung.	438
4.8.4	Gemessene PSF für MIFUS.	439
4.8.5	Testaufnahmen mit MIFUS. Oben: Sonnenspektrum, unten Spektrum der Zentralregion von M42.	440
4.8.6	Alle 38 Spektren von M42 nach Abzug des Dunkelfelds und Kalibration.	441
4.8.7	Mögliche Konfigurationen der DCG-Schicht eines VPH Gitters.	442
4.8.8	Effizienzen für das VPH Gitter 2.000 1/mm @ 600 nm.	443
4.8.9	Dickson-Grating: VPHG Spezialfall.	444
4.8.10	Effizienzen für das VPH Gitter 1.800 1/mm @ 532 nm.	444
4.8.11	Effizienzen in Abhängigkeit des Bragg-Winkels für alle drei hier diskutierten VPH Gitter.	445
4.8.12	Effizienzen in Abhängigkeit der Durchstimmwellenlänge für alle drei hier diskutierten VPH Gitter.	446
4.8.13	Effizienzen für gegebene Gitter bei anderen Zentralwellenlängen.	446
4.8.14	Layout des 3D-Spektrographen H α MoniS.	447
4.8.15	Spot-Diagramme des 3D-Spektrographen H α MoniS für die Zentralwellenlänge und Felder und für alle Wellenlängen und Felder.	448
5.1.1	Beispiel mit Lochblende und Neonspektrum.	453
5.1.2	Eichkurve für die Mikrometerschraube für einen Lhires III-Spektrographen.	454
5.3.1	Biasaufnahme eines KAF 1603ME Chips.	456
5.3.2	Biasaufnahme eines KAF 1603ME Chips, Pixelintensitäten der Pixel-Zeile N° 500.	456
5.3.3	Wirkung des Abzugs des mittleren Biaswertes auf eine Aufnahme.	457
5.3.4	Flataufnahmetechnik: Verwendung einer Halogenleuchte und eines Diffusors.	458
5.3.5	Flataufnahmetechnik: Verwendung einer Leuchtfolie.	459
5.3.6	Drei Flataufnahmen nach Methode 1 (links), Methode 2 (Mitte) und Methode 3 (rechts).	459
5.3.7	Methode 4: Flat aufgenommen unter Verwendung einer Leuchtfolie.	460
5.3.8	Flatzeilen eines Leuchtfolien-Flats bei leicht unterschiedlicher Gitterstellung.	460
5.3.9	Große Neonglimmlampe ("Bienenkorblampe").	461
5.3.10	Spektrum der Neonglimmlampe.	461

5.4.1	Beispiel für ein Sichtbarkeitsdiagramm.	463
6.1.1	Jupiter auf dem horizontal abgebildeten reflektierenden Spalt des Lhires III.	465
6.1.2	Extrahierte Einzelspektren einer Aufnahmeserie an ζ Tau vor und nach Korrelation mit Giotto.	466
6.1.3	Cosmics in einer CCD-Aufnahme des Spektrums von ζ Tau.	467
6.1.4	Spaltspektrograph Lhires III angekoppelt über einen Spiegelkasten im Fokus eines C14.	468
6.1.5	λ Cep auf dem horizontal verlaufenden, auf 38 μ m eingestellten Spalt des Lhires III.	468
6.1.6	MiniSpec Prototyp am 10" Newton.	469
6.1.7	M31 durch die 0. Ordnung einmal ohne (links) und einmal mit eingeschobenem Spalt (rechts).	469
6.1.8	Darkkorrigiertes 2d Frame der O ₂ Bande bei 690 nm und ausgewertetes Spektrum dazu.	471
6.1.9	Vergleich des Tageslichtspektrums, gemessen mit dem LHIRES III (R=23.000) und dem Sonnenspektrograph für Schüler (R=10.000).	472
6.2.1	Webcam Philips Pro II PCVC840K mit anschraubbarer 1,25-Steckhülse (rechts) als Ersatz für das Originalobjektiv (links liegend).	474
6.2.2	ALCCD5 (rechts oben) als Spaltbeobachtungskamera an einem Spaltspektrographen (Lhires III), rechts unten die science-Kamera (Sigma 1603ME).	475
6.3.1	Flat eines Spaltspektrographen mit wenigen Staubschatten, aber starkem Helligkeitsgradienten.	477
6.3.2	Der gleiche Spalt mit mehr Staubstreifen und Schatten von Fettschlieren auf dem CCD-Chip.	477
6.3.3	Ölschlieren auf der CCD die durch die Wärmeleitpaste zwischen Chip und Peltierelement bei hohen Temperaturen erzeugt wurden.	478
6.3.4	Spektren von ϵ Aur, links korrekt, rechts mit Artefakt, der eine zusätzliche Absorptionslinie vortäuscht.	478
6.3.5	Spektrestreifen von ϵ Aur und zugehöriges Flat mit Staubkorn als Ursache für ein Artefakt.	478
6.3.6	Ein verschmutztes Echellegitter vor (links) und nach (rechts) der Reinigung.	480
6.3.7	Mit Lösungsmittel benetztes Beugungsgitter, welches druckfrei mit einer Watte gereinigt wird.	480
7.2.1	Schematischer Ablauf der vorab-Bildbearbeitung mit fakultativer Flatkorrektur.	483
7.2.2	Beispiele für die Definition des Spektrums auf der CCD.	485
7.2.3	Beispiel einer Dispersionsrelation, erhalten aus vier Kalibrationslinien.	485
7.2.4	Vergleich zwischen Division mit Flatfield direkt und mit an das Flat angefitteten Spline.	486
7.2.5	Beispiel eines auf das Kontinuum normierten Spektrums.	487
7.2.6	Zur response-Korrektur eines Wega-Spektrums.	488
7.2.7	Terrestrische Linien im optischen Wellenlängenbereich.	489
7.2.8	Spektrum der H α -Linie von Mizar A mit atmosphärischen Wasserlinien.	489
7.2.9	Berechnung eines Modells der terrestrischen Linien durch Faltung mit dem Apparateprofilmodell (Gaußprofil).	490
7.2.10	Vergleich von Originalspektrum und von terrestrischen Linien befreitem Spektrum.	491
7.3.1	IRIS Startbildfenster.	492
7.3.2	Mitteln einer Sequenz in IRIS.	493
7.3.3	Darkkorrektur einer Aufnahme in IRIS.	494
7.3.4	Flatfieldkorrektur einer Aufnahme in IRIS.	495
7.3.5	Ausrichten des Spektrums in IRIS.	495
7.3.6	Himmelshintergrund subtrahieren mit IRIS.	496
7.3.7	2D Spektrum extrahieren mit IRIS.	497
7.3.8	VSpec Startfenster.	498
7.3.9	VSpec - Extraktion der Spektren.	498
7.3.10	VSpec - Extraktion des Referenz-Spektrums.	499
7.3.11	VSpec - Kalibration des Referenz-Spektrums.	499
7.3.12	VSpec - Extraktion und Übertragen des Objektspektrums.	500
7.3.13	Einzelne Rohspektren von Alkaid (links) und rechts nach stacken mittels CORREL/OPA	503
7.3.14	Mit OPA reduzierte Sternspektren, spaltlos gemessen.	505
7.3.15	Weitere Spektren, siehe Abb. 7.3.14.	506
7.3.16	Zur n-Identifikation, 62 Ordnungen wurden gefunden und werden durch den Fit auch gut extrahiert.	507

7.3.17	Linienidentifikation zur Wellenlängenkalibration im BACHES-Context.	508
7.3.18	Bestimmung der Auflösung mit dem BACHES-Context.	508
7.3.19	Links: Sonnenspektrum nach LED-Flatfield. Rechts: Sonnenspektrum nach Normierung .	509
7.3.20	Details aus dem Sonnenspektrum. Links: H α -Linie Rechts: Mg-b-Triplet. Unten: Region um die Li 6104 Linie.	510
7.3.21	Spektrum des Sterns p-Cygni und zwei Details aus diesem.	511
7.4.1	Struktur der Ordnerablage für die originalen Messungen (Rohdaten).	512
7.4.2	Ordnerstruktur für die Rohdaten (Originalaufnahmen) einer Meßnacht.	513
7.4.3	Ordnerstruktur für die ausgewerteten Daten (Spektren) der Objekte, Grafiken, statistische Daten etc.	513
8.1.1	Mit dem EasySpecN aufgenommene Spektren.	516
8.1.2	Emissionslinienspektren von Gasentladungslampen, gemessen mit dem MiniSpec.	517
8.1.3	Wellenlängenkalibrierte 1D-Spektren, gemessen mit der Spaltversion des MiniSpec.	518
8.1.4	Spektrum von Alpha Aurigae (Capella) 26.01.2016 20:08 MEZ.	519
8.1.5	Ausschnitt des Spektrums von P-Cygni (3800 bis 5400 Å) mit markierten P-Cygni-Profilen	520
8.1.6	Spektrum von Wega, 12.08.2015 23:18 MESZ.	520
8.1.7	Spektrum von Gamma Cassiopeiae, 13.08.2015 00:47 MESZ.	521
8.1.8	Emissionsspektrum des WR-Sterns WR140 mit eingebetteten Absorptionslinien des begleitenden O-Sterns und interstellarem Natrium.	522
8.1.9	Übersichtsspektrum von WR140 mit R \approx 500.	522
8.1.10	Vergleich eines Ausschnitts des auf das Kontinuum normierten Sonnenspektrums bei unterschiedlichen Auflösungen. Abszisse in Å, Ordinate in relativen Intensitätseinheiten, das obere Spektrum um ein offset von 0,4 verschoben.	523
8.1.11	Sauerstoffbande bei 690 nm, gemessen mit dem Lhires III.	523
8.1.12	Messungen mit dem Lhires III im nahen Infrarot. Beobachtet wurde das Anwachsen der Resonanzlinie von KI bei 7699 Å während der Eclipse von eps Aur in 2009.	524
8.1.13	Eisenlinien der Sonne in links- und rechts-polarisiertem Licht.	525
8.2.1	Einfluß der Belichtungszeit auf das SNR.	528
8.2.2	Verbesserung des SNR durch Addition von Einzelaufnahmen zu einem Summenspektrum.	529
8.2.3	Beispiel für ein verrauschtes Spektrum von 23 Tau (SNR \approx 69).	529
8.2.4	SNR gegen die Standardabweichung der Schwerpunktkoordinaten einer an die Daten gefitteten Gaußkurve für unterschiedliche Samplings.	530
8.2.5	1d-Spektrum von bet Lyr vom 10.12.2005, benutzt zur Messung des SNR.	531
8.3.1	Extremes streifendes cosmic in einer Spektrumaufnahme.	532
8.3.2	Rohaufnahme des Tageslichts im Bereich des Magnesiumtripletts mit deutlichen fringes (mit freundlicher Genehmigung von Martin Staab).	533
8.3.3	Einfacher Selbstbau-Spaltspektrograph (mit freundlicher Genehmigung von Martin Staab).	533
8.3.4	1d-Spektrum, extrahiert aus der Aufnahme in Abb. 8.3.2.	534
8.3.5	Fringes im 1d-Spektrum einer Glühlampe, verursacht durch das Deckglas einer CCD-Kamera (Nova 1602).	534
8.4.1	Der Orionnebel M42 mit dem Trapez im Zentrum, aufgenommen spaltlos in nullter Ordnung (Mäusevilla).	535
8.4.2	Emissionslinien des Orionnebels in einem Spektrum von θ 1 Ori C, aufgenommen mit Spalt (Lhires III).	535
8.4.3	Extrahiertes Spektrum von θ 1 Ori C aus Abb. 8.4.2. Ohne Himmelshintergrundkorrektur.	536
8.4.4	Aufnahme der Sauerstoffbande des Taghimmels bei 690 nm mit einem Spaltspektrographen (R \approx 20.000) und extrahierte Pixelzeilen als nicht kalibriertes Spektrum.	536
8.4.5	Spektrum von ϵ Aur um die O ₂ -Bande bei 630 nm.	537
8.4.6	Spektren mit ausgeprägten atmosphärischen Wasserlinien.	538
8.4.7	Spalt-Spektrum des Jupiter im Bereich um die H α -Linie (rechts), Jupiterbild auf dem Spalt (links).	538
8.4.8	Spektrum von ϵ Aur mit deutlicher DIB bei 6614 Å.	539
8.4.9	Spektrum von ϵ Aur mit DIB bei 5.797 Å.	540
8.4.10	Spektren verschiedener Sterne um die NaD-Linien mit DIB's.	541
8.5.1	Spektrum von WR 140.	542
8.5.2	Spektren von WR 140 bei höherer Auflösung (R=10.000).	542

8.5.3	WR 140, Zusatzemission in der CIII 5696-Linie durch die Schockfront der Sternwinde nahe dem Periastron.	542
8.5.4	Variable Linienprofile der H α -Linie von eps Aur mit Auffüllung der Absorption im April und Mai 2005.	544
8.5.5	Auswahl einiger wichtiger Daten zu Mizar.	544
8.5.6	Zeitreihe der H α -Linie von Mizar A im Februar 2008 aufgenommen.	545
8.5.7	Definition der geometrischen Bahnelemente eines Doppelsternsystems. (entnommen aus Schweickhardt 2000)	546
8.5.8	Auftragung der Doppleraufspaltung der ausgemessenen Linien gegen das Julianische Datum der Messungen (Linien H6563, Fe6455, Si6370, Si6348, Messungen aus 2007 und 2008).	548
8.5.9	Periodenanalyse der Zeitreihe der Linienaufspaltungen mit dem Programm Peranso, Methode ANOVA.	548
8.5.10	Phasendiagramm der gemessenen Doppleraufspaltungen (Linien H6563, Fe6455, Si6370, Si6348 aus 2007 und 2008).	549
8.5.11	Phasendiagramm mit eingezeichnetem berechneten Verlauf (optimierte Bahnelemente).	549
8.5.12	Zeitreihe der gemessenen Linienaufspaltungen, dem berechneten Kurvenverlauf gegenübergestellt.	550
8.5.13	Phasenplot der gemessenen absoluten Radialgeschwindigkeiten ausgewählter Absorptionslinien im optischen Spektrum von Mizar A.	551
8.5.14	Phasenplot für Mizar A und Best Fit von Messwerten des Zeitraums 1931 bis 2008.	552
8.5.15	Spektrum von P Cyg im Bereich der H α -Linie.	553
8.5.16	Spektrum von P Cyg im Bereich der H β -Linie.	554
8.5.17	FWHM bzw. Auflösung für rotationsdominierte Linienprofile für drei Wellenlängen (4000, 5500 und 6500 Å).	555
8.6.1	Vergleich eines selbst gemessenen Spektrums von P Cyg mit einem Spektrum aus der ELODIE-Datenbank.	562
8.7.1	Spektrum von The1 Ori C mit Wechsel von Absorption und Emission in der breiten H α -Linie.	565
9.5.1	Beschriftetes gerechneten Neonspektrum.	574
9.5.2	Zur Messung der Breite eines Spaltes mittels einer Laserdiode. Links: Schema, rechts Beugungsordnungen bei verschiedenen Spaltbreiten.	575