

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

Daniel P. Sablowski & Lothar F. Schanne

1. Auflage

Dr. Daniel P. Sablowski

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

©Daniel P. Sablowski, Potsdam, 2020 und Lothar F. Schanne, Mannheim, 2020

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:
WIRmachenDRUCK GmbH.
Mühlbachstraße 7
71522 Backnang (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 zukünftig mit fortschreitender Messkunst vermeiden wird. Die Sache wurde ad acta gelegt. Der immense Informationsgehalt des Sonnenspektrums wurde nicht realisiert. Es dauerte dann noch 42 Jahre, bis die wahre Bedeutung der Fraunhofer-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 und es könnte noch so viel mehr ausgeführt werden. 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 Rückschlüsse errungen, so wie es keinen Tag ohne Nacht gibt. In diesem Sinne möge in jedem von uns ein kleiner Phoenix innewohnen.

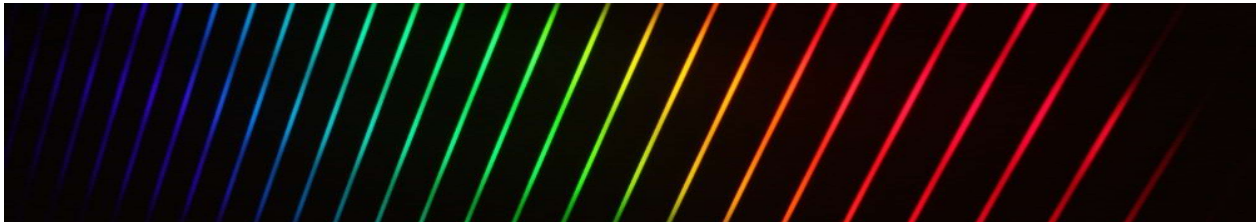
Doch zu allerletzt, im Vorwort zur ersten Auflage, hoffen wir, dass der Leser die Information findet, nach der er Ausschau gehalten hat. Und wenn dem nicht der Fall ist, so sind wir über Hinweise zur Ergänzung dankbar. Ebenso für Hinweise zu Fehlern, ob sachlicher oder grammatikalischer Natur. Letztere 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	Linse	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	81
1.3.4	Farbfehler	81
1.3.5	Lagefehler	83
1.3.5.1	Verzeichnung	83
1.3.5.2	Bildfeldwölbung	83
1.3.6	Reduzierung der Abbildungsfehler	84
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	85
1.4.1	Die Merit-Funktion	85
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	89
1.5.1	Grundlagen	89
1.5.1.1	Lichtführung	89
1.5.1.2	Moden	91
1.5.2	Kenngrößen optischer Fasern	94
1.5.2.1	Numerische Apertur	94
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	100
1.6.2.3	Fehlerbetrachtung und Fehlerrechnung	101
1.6.3	Verteilungen	103
1.6.3.1	Binomialverteilung	103
1.6.3.2	Poissonverteilung	104
1.6.3.3	Gaußverteilung	104
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	109
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	111
1.7.1.2	Fermionen	113
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	118
1.7.2.3	Kurze Diskussion des Wasserstoffatoms	121
1.7.3	Emission und Absorption	125
1.7.4	Moleküle	127
1.7.4.1	Allgemeines	127
1.7.4.2	Rotation	127
1.7.4.3	Vibration	129
1.7.4.4	Elektronische Übergänge	133
1.8	Spektroskopie	134
1.8.1	Der Zirkelschlag von Atom- und Molekülphysik zur Spektralanalyse	134
1.8.2	Absorption und Dispersion in Gasen	136
1.8.3	Kontinuum und Linienspektrum	138
1.8.4	Linienprofile und linienverbreiternde Effekte	139

1.8.4.1	Die natürliche Linienbreite	140
1.8.4.2	Stoßverbreiterung	141
1.8.4.3	Dopplerverbreiterung	141
1.9	Grundlagen der stellaren Physik	142
1.9.1	Allgemeine Eigenschaften Sterne	143
1.9.1.1	Fixsternparallaxe	143
1.9.1.2	Scheinbare und absolute Helligkeit	143
1.9.1.3	Sternmasse & 3. Keplersches Gesetz	144
1.9.1.4	Radien	145
1.9.1.5	Temperaturen	147
1.9.1.6	Spektralklassifikation	147
1.9.1.7	Leuchtkraftklassen	148
1.9.1.8	Rotation	150
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 $M > 2 M_{\odot}$	156
1.9.2.4	Chemische Zusammensetzung und Kern-Reaktionen	158
1.9.2.5	Evolutionsindikatoren	159
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	Spaltbild-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 konfektionieren 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 Erst-Echelle	381
4.2	Spaltlose Spektrographen	385
4.2.1	Staranalyzer	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-Spektrograph (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 aufgenommen 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 die Objektivprismenspektroskopie	503
7.3.3.4	Der MIDAS-Kontext SMS zur Datenreduktion von Langspaltspektren	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.	516
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