

Inhaltsverzeichnis:

1. Mechanisches Design	2
1.1 Materialien	2
1.2 Gehäuse	3
1.3 Halter für optische Komponenten	6
1.3.1 Spiegelhalter und Linsenhalter	6
1.3.2 Gitterhalter	8
1.3.3 Spalt	9
2. Justage	12
3. Peripherie	13
3.1 Darks	13
3.2 Flat	14
3.3 Kalibration	14
4. Schlussbemerkung	15
5. Anhang	17

1. Mechanisches Design

1.1 Materialien

Für die Mechanik (Gehäuse, Halter, Montierungen, ...) des Spektrographen stehen verschiedene Materialien zur Auswahl. In den folgenden Unterpunkten wird auf die Auslegung der einzelnen mechanischen Komponenten eines Spektrographen eingegangen. Hier sollen zunächst einige grundlegenden Eigenschaften der am häufigsten verwendeten Materialien dargelegt werden.

Die folgende Tabelle gibt einige wichtige Eigenschaften dieser Stoffe wieder.

Stoff	Dichte [kg/dm ³]	Längenausdehnungs- koeffizient [1/K]	Wärmeleit- fähigkeit bei 20 °C [KW/m]	Elastizitäts- modul bei 20 °C [kN/mm ²]
Aluminium	2.7	$2.38 \cdot 10^{-5}$	204	70
CuSn-Legierung	7.4 ... 8.9	$1.75 \cdot 10^{-5}$	46	
CuZn-Legierung	8.4 ... 8.7	$1.85 \cdot 10^{-5}$	105	
Eisen	7.87	$1.2 \cdot 10^{-5}$	81	
Stahl legiert	7.9	$1.6 \cdot 10^{-5}$	14	190 ... 215
Stahl unlegiert	7.85	$1.15 \cdot 10^{-5}$	48 ... 58	190 ... 215
Glas (Quarz)	2.4 ... 2.7	$5 \cdot 10^{-6}$	0.81	
Kupfer	8.96	$1.68 \cdot 10^{-5}$	384	100 ... 130
Titan	4.5	$4.5 \cdot 10^{-6}$	15.5	105
HT Kohlenstofffaser	1.8			230
UMS Kohlenstofffaser	1.8			395

Tab.1 Einige Materialeigenschaften¹

Setzt man die Dichte ρ und den E-Modul eines Stoffes i ins Verhältnis,

$$q_i = \frac{\rho_i}{E_i}$$

so erhält man ein Maß für das Gewicht und die Elastizität des Materials. Vergleicht man diesen Quotienten einmal für Aluminium mit Stahl, erhält man

$$q_{Al} \approx q_{Stahl}$$

Lässt man also Temperaturschwankungen außer Acht, wird man auf Aluminium als das Material für die mechanischen Komponenten zurückgreifen.

Als Nachteil von Aluminium ist dessen schlechte Schweißbarkeit (nur mit Inertgas Argon), sowie, wegen der geringen Festigkeit, die leichte Beschädigung von Gewinden zu nennen.

Stahl ist hingegen wesentlich fester und mit einfacher Ausrüstung zu schweißen.

Uns interessieren hier in erster Linie Spektrographen zur direkten Ankopplung, weswegen wir Stahl nicht als Möglichkeit in Betracht ziehen wollen. Jedoch ist die Fertigung von Haltern aus Stahl für optische Komponenten durchaus überlegenswert.

¹ Erstellt mit [Tabellenbuch der Metallbautechnik, J Hohnstein u.A.]

Ein mancher Hobbybastler wird hier den Werkstoff Holz vermissen. Die Dichte von Holz erstreckt sich von 0.5 kg/dm^3 (Fichte) bis 1.1 kg/dm^3 (Azobé) und der E-Modul von 10 kN/mm^2 (Fichte) bis 17 kN/mm^2 (Azobé). Fichte würde sich also durchaus mit Aluminium vergleichen lassen.

Welchen Werkstoff man letztlich auswählt ist dem Konstrukteure überlassen. Doch sollte der Quotient q nicht überbewertet werden. Es gibt weitere wichtige Eigenschaften von Materialien. Es kommt immer darauf an, was man mit dem Spektrographen messen möchte und natürlich darauf, was man für Werkzeuge zur Verfügung hat.

Die Möglichkeit der (sinnvollen) Kombination von verschiedenen Werkstoffen sollte dabei nicht aus den Augen verloren werden. So ist es zum Beispiel möglich die Seite für Kameraadaption, Teleskopanschluss und Grundplatte aus Aluminium und den Rest aus Holz herzustellen.

1.2 Gehäuse

Für einen direkt angekoppelten Spektrographen ist die Auslegung des Gehäuses ein sehr wichtiger Schritt. Das Gehäuse muss sowohl mechanischer Verformung durch Drehmomentsänderungen, als auch den optischen Komponenten eine solide Basis bilden.

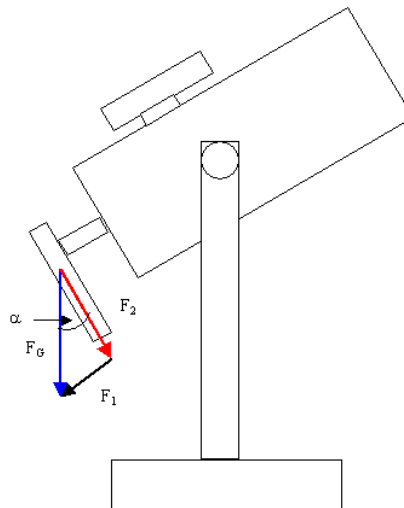


Abb. 1 Drehmomente am Spektrographengehäuse

F_G (blauer Pfeil) steht für die Gravitationskraft und zeigt in Richtung Erdmittelpunkt. Betrachtet man F_1 (schwarzer Pfeil). Bei einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ verschwindet dieser, bei $\alpha = 90^\circ$ ist er maximal groß. Er ergibt sich zu:

$$F_1 = F_G \sin(\alpha)$$

Die Definition des Drehmomentes

$$\vec{D} = \vec{r} \times \vec{F} ,$$

wobei wir für den Fall r senkrecht F

$$D = r F$$

schreiben können, liefert uns einen Zusammenhang zwischen dem Hebelarm r und der angreifenden Kraft. Bei homogener Massenverteilung (Ankopplung an einer Endseite) im Spektrographen kann $r = \sin(\alpha)L/2$, wobei L die Länge des Spektrographen heißt, angenommen werden. Schreibt man beispielsweise den Ausdruck für die Kraft F_1 aus und bildet die totale zeitliche Ableitung, ergibt sich:

$$\begin{aligned} \dot{D} &= \frac{d}{dt} \left[\frac{mgL}{2} (\sin(\omega t))^2 \right] \\ &= mgL\omega \sin(\omega t) \cos(\omega t) \end{aligned}$$

Dies bezeichnet die zeitliche Änderung des Drehmomentes bezogen auf die Kraft 1. Neben der Kraft 1, welche ein Drehmoment erzeugt, existiert noch eine weitere Kraft 3. Diese Kraft erzeugt ebenfalls ein Drehmoment, wobei hier die Spektrographendicke b und bei homogener Massenverteilung eben $b/2$ als Hebelarm fungiert. Da in den meisten Fällen $b \ll L$, kann man diese vernachlässigen. Dennoch erfährt dieses Drehmoment eine zeitliche Änderung.

Weiterhin kann man den Spektrographen noch im Okularstutzen oder eben durch die Nachführung drehen. Was dazu führen würde, dass der Spektrograph noch ein weiteres Drehmoment erfahren würde. Beispielsweise ein Drehmoment, das ihn aus der Papierebene ziehen möchte, wenn wir ihn uns nach Innen verdreh vorstellen würde.

Um die Drehmomentsänderung während einer Beobachtung zu ermitteln, kann man die Gleichung für die zeitliche Änderung des Drehmomentes integrieren

$$\begin{aligned} D &= mgL\omega \int_{t_0}^t \sin(\omega t) \cos(\omega t) dt \\ &= \frac{mgL}{2} \sin^2(\omega t) \Big|_{t_0}^t \end{aligned}$$

Dies hätte man natürlich auch unmittelbar aus der Ausgangsgleichung für das Drehmoment erhalten können. Setzt man für $\omega = 2\pi/24h$, $t_0 = 0$ und für t die Dauer der Beobachtung in s , kann man die Drehmomentänderung errechnen

$$D = \frac{mgL}{2} \sin^2(2\pi/(24 \cdot 3600) \cdot t) .$$

Für t_0 muss man normalerweise jedoch den Startzeitpunkt einsetzen (Anfangsbedingungen). Nun wäre man eigentlich an der Stelle, an der man nach der Biegung des Spektrographen in Abhängigkeit der Winkel α und β , bzw. der Zeit t fragen könnte. Um die Biegekurve eines Körpers zu errechnen bedarf es der Variationsrechnung. Darauf wollen wir hier nicht eingehen (weiter unten fällt eine einfache Formel dafür vom Himmel). Vielmehr betrachten wir die Kraft F_2 und nehmen an, dass der Spektrograph nur in der Abbildung 1 gezeichneten Lage verdreht ist. Die Kraft F_2 führt zu einer Dehnung des Spektrographen in der zur Kraft paralleler Richtung. Für den Druck gilt bekanntermaßen $P = F/A$. Bezieht man dies auf den E-Modul, so darf man schreiben:

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L}$$

Diese Gleichung sagt uns, dass bei größerem E-Modul und Fläche die Dehnung abnimmt, bei größerem L und F die Dehnung hingegen zunimmt, was auch für die Durchbiegung gilt. Mit dieser Gleichung kann man auf einfache Weise die Dehnung des Spektrographen bestimmen.

Die Dehnung und Biegung des Spektrographengehäuses hat zur Folge, dass sich die Distanz zwischen den optischen Komponenten ändert. Befindet sich der Spektrograph beispielsweise bei der Justierung in horizontaler Lage, dann sind alle Elemente entsprechend für diese Lage justiert. Hängt er dann vertikal an einem Teleskop, so ändert sich die Fokusebene und auch die Spalt – Kollimator Distanz. Eine Ausnahme bildet der spaltlose Spektrograph, bei diesem macht sich „nur“ eine Verschiebung der Bildebene bemerkbar.

Diese Verformungen können einmal zu unschärferen Spektren und zum anderen zu einer Verschiebung des Spektrums auf dem CCD während der Beobachtung führen.

Machen wir eine Abschätzung der Dehnung, um herauszufinden, ob wir uns darüber Gedanken machen müssen:

Wir nehmen einen rechteckigen Aluminiumkasten ($b = 7 \text{ cm}$, $a = 12 \text{ cm}$, $L = 40 \text{ cm}$) mit einer durchschnittlichen Wandstärke von 4 mm. Die Querschnittsfläche ist dann, $14,56 \text{ cm}^2$. Nach der Tabelle 1 ist der E-Modul für Aluminium 70 kN/mm^2 . Nach Berichtigung der Einheiten setzen wir in die Gleichung

$$\Delta L = \frac{FL}{EA} = 164 \text{ nm}$$

ein. Das Ergebnis unterstreicht die Vernachlässigbarkeit der Dehnung. Für Fichtenholz hätte man 270 nm, bei einer Wandstärke von 10 mm. Dabei wurde aber nur das Gewicht des Gehäuses berücksichtigt. Die Biegungen sind also die größte Schwachstelle des Gehäuses. Daher wollen wir versuchen eine einfache Methode zur Abschätzung dieser herzuleiten. Aus der Statik eines Trägers ist bekannt, dass

$$I = \frac{ql^3}{8} a$$

ist. Dabei bezeichnet I das Flächen-Trägheitsmoment (zur Berechnung des Trägheitsmomentes siehe Anhang) des Trägers, q die Streckenlast und l die zu überbrückende Länge, also senkrecht zur Gravitationskraft, a den vom Aufliegefall, Material und gewünschter maximaler Durchbiegung abhängigen Sicherheitsfaktor (Anhang). Der Belastungsfall des Spektrographen wäre einseitig eingespannt.

Aus der genauen Berechnung der Biegung findet man nach langer Rechnung:

$$g = \frac{25}{48} \frac{ql^3}{IE}$$

Aus dieser Gleichung lässt sich die Durchbiegung bei bekanntem I direkt berechnen. Hier bezeichnet l die effektive Länge des Trägers und nicht den effektiven Hebelarm.

Daraufhingewiesen werden sollte an dieser Stelle, dass diese Rechnung nur für einfache geometrische Träger gilt. Ist die Massenverteilung und der Querschnitt nicht einfach zu bestimmen, dann kann man versuchen Symmetrieannahmen zu treffen, um das Problem zu vereinfachen.

Für kleine Spektrographen empfiehlt sich ein fertiges Aluminiumdruckgussgehäuse, die man beispielsweise im Elektronikhandel bekommen kann. Diese Gehäuse sind sehr stabil und leicht zu bearbeiten.

Neben der Stabilität muss der Spektrograph auch lichtdicht sein. Abbildung 2 zeigt, wie man das prinzipiell machen kann.

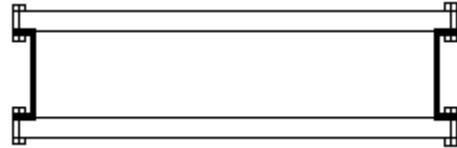


Abb. 2 Gehäuse

Auf die Bodenplatte schraubt man einen Rahmen, dessen Kanten abgekantet sind. Die abgekanteten Seiten werden zur Verschraubung benutzt, außerdem kann man dort einen Schaumstoff aufbringen, der dann evtl. Lücken schließt. Die Seite, an der die Kamera und die Teleskopankopplung hin kommen sollen, sollten aus etwas stärkerem Material sein, und fest mit der Bodenplatte verbunden sein. Weiterhin sollte die Kamera möglichst nahe bei der Ankopplung angebracht sein, sodass sich die Kamera keinem all zu großen Hebelarm bedient.

Ein Spektrograph, der diese Anforderungen schon vom optischen Layout erfüllt, ist der Czerny Turner oder auch der Littrow. Daher hilft es, sich an diesen Layouts grob zu orientieren.

Die temperaturbedingte Ausdehnung eines Materials lässt sich mit dem linearen Längenausdehnungskoeffizienten α durch

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L$$

berechnen. Wobei L die Länge des Körpers bezeichnet.

Wenn man nun das Gehäuse erstellt hat, ist es Zeit sich über die Halterungen für die optischen Komponenten Gedanken zu machen.

1.3 Halter für die optischen Komponenten

1.3.1 Spiegelhalter und Linsenhalter

Wichtig bei den Haltern ist, dass sie justierbar sind. Daher sagt man auch kinematisch dazu. Außerdem ist eine Belastung der Elemente durch mechanische Kräfte dienlichst zu vermeiden. Kleine Optiken (ca. 50 mm Durchmesser) können auch auf eine Platte mit Epoxyd geklebt werden. Es muss auch die Größenänderung durch Temperaturschwankungen berücksichtigt werden. Also insbesondere Winter – Sommer Unterschiede. Beim aufkleben sollte nur ein Punkt (ca. 5 mm Durchmesser) aufgetragen werden. Da durch die Temperaturänderungen sonst eine Verbiegung stattfinden könnte. Größere Optiken, oder auch, wenn man die Optiken auswechselbar halten will, werden in speziell gefertigten Käfigen gefasst.

In Abbildung 3 sieht man einen solchen kinematischen Spiegelhalter. Im Grunde handelt es sich um ein L. Der vordere runde Schlitz dient zum justieren des Winkels zwischen der optischen Achse des einfallenden Strahls und der optischen Achse des Spiegels. Außerdem ist der Käfig senkrecht dazu durch eine Rändelschraube auf der Rückseite einstellbar. Bei den Verbindungsstreifen zwischen Spiegelkäfig und L handelt es sich um kleine Edelstahlblechstreifen. Diese biegen sich beliebig bei der Justierung.

Linsenhalter können analog gefertigt werden. Dabei wird jedoch die Linse in einen Ring eingeklemmt. Den Ring kann man dann wieder in eine L-Halterung einbauen und entsprechen justieren. Natürlich muss der L-Halter ein entsprechendes Loch auf der Rückseite haben. Bei Linsen ist eine leichte Dejustage nicht ganz so schlimm, weswegen sich in vielen Fällen auch starre Halter eignen. Zum Beispiel bieten die Tubussysteme der Optikhändler eine gute Lösung dafür.

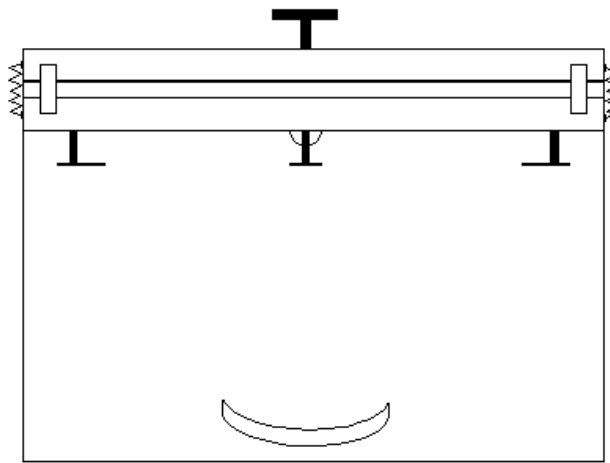


Abb. 3 Spiegelhalter Draufsicht

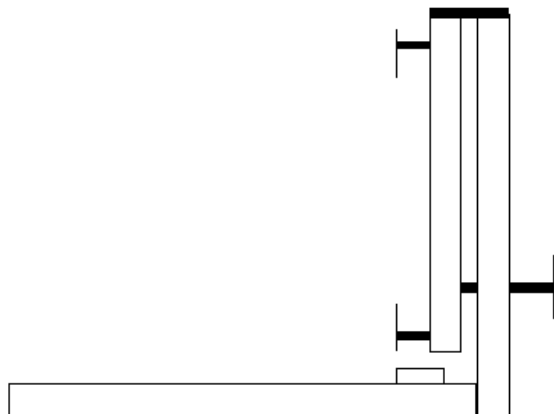


Abb. 4 Spiegelhalter Seitenansicht

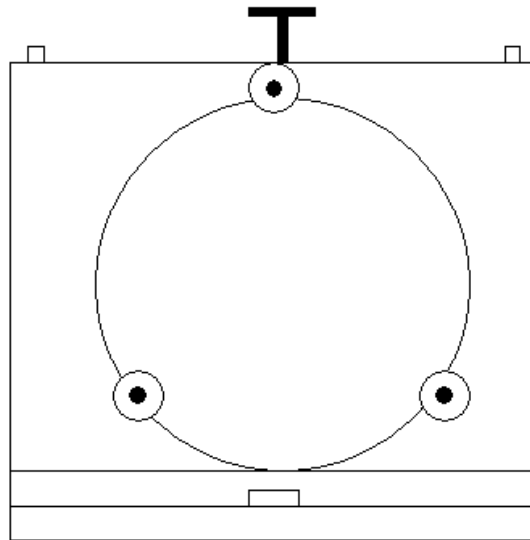


Abb. 5 Spiegelhalter Vorderansicht

In Abbildung 3 ist hinten mittig ein Halbkreis zu sehen. Dabei handelt es sich um eine Schraube. Diese muss mittig unter der Spiegeloberfläche sein, sodass sich der Abstand des Spiegels zum nächsten Element nicht ändert. Dies ist vor allem beim Kollimator zu beachten.

1.3.2 Gitterhalter

Der Halter für das Gitter kann ähnlich der Spiegelhalter angefertigt werden. Grundlage ist wieder der L-Halter, an dem der Gitterkäfig einstellbar angebaut werden kann. Abbildung 6 zeigt einen solchen Käfig.

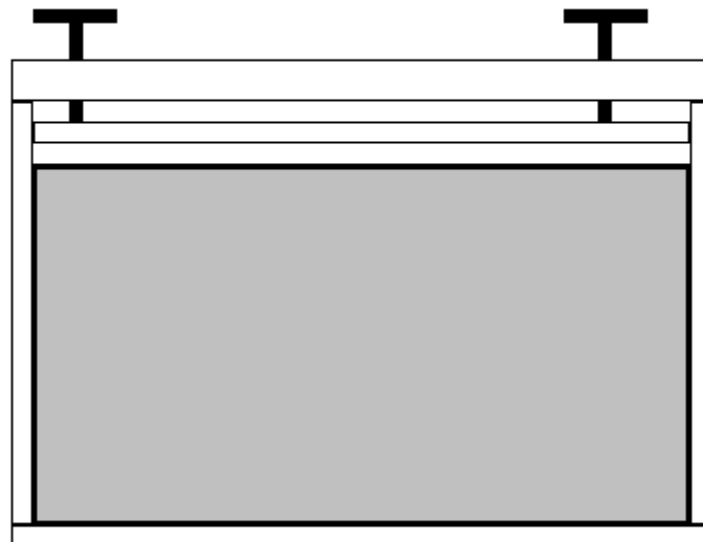


Abb. 6 Gitterhalter

Mit den beiden oberen Rändelschrauben wird eine Kunststoff Leiste auf das Gitter mit leichtem Druck angepresst. An den Rändern ist etwas Schaumstoff, zur Kompensierung der Temperatur bedingten Ausdehnung. Diese Halterung eignet sich eben dazu, dass Gitter ohne weiteres wieder heraus zu nehmen. Natürlich kann man ein Gitter auch auf einen Wechselträger

aufkleben. Sollte das Gitter jedoch mal in einem anderen Spektrographen verwendet werden ist das dann etwas schwierig, wenn nicht die gleiche Gitteraufnahme vorhanden ist.

Mit dem Gitter sollte größte Vorsicht walten. Daher empfiehlt es sich bei größeren Umbauten im Spektrographen, das Gitter heraus zu nehmen, oder wenigstens mit einer Kunststoffkappe abzudecken. Dies sollte man mit allen empfindlichen Oberflächen tun. Sollte es dennoch einmal zu Verunreinigungen auf dem Gitter kommen, dann erst mal nichts daran machen. Die meisten Verschmutzungen führen zu keinerlei bemerkbaren Veränderungen.

Weiterhin ist bei einem Gitter nötig, dass man es drehen kann. Dazu kann man sich eine Rotationsplattform vom Händler kaufen, oder man baut sich auch dies selbst. Dabei ist eine feine und reproduzierbare Einstellung von Vorteil. Abbildung 7 zeigt einen einfachen Aufbau dazu. Auf der Kreisscheibe wird der L-Halter in die beiden Löcher angeschraubt. Mit der Mikrometerschraube kann das Gitter gedreht werden, die Feder zieht es zurück, und verhindert eine ungewünschte Verdrehung des Gitters. Die Schraube mittig durch den L-Halter und Rundtisch dient auch als Rotationsachse und sollte entsprechend drehgelagert an der Grundplatte angebracht sein.

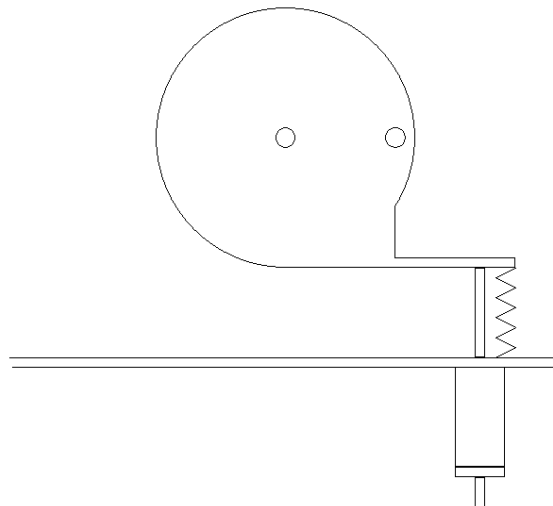


Abb. 7 Rotationsplattform

1.3.3 Spalt

Wir sind jetzt an einem sehr schwierigen Punkt angekommen, den Spalt. Der Spalt bestimmt das Auflösungsvermögen unseres Spektrographen ganz maßgeblich. Außerdem müssen wir ja dafür sorgen, dass auch wirklich der Stern unseres Interesses durch den Spalt fällt. Soll heißen, wir müssen den Stern am Teleskop, vor dem Spektrographen beobachten können und ihn sicher auf den Spalt setzen und dafür sorgen, dass er auch da bleibt. Versuche mit einem normalen Spalt und einem davor geschalteten Kippspiegel (Flip Mirror) hat sich als weniger gut erwiesen.

Es gibt natürlich auch die Möglichkeit ohne Spalt zu arbeiten. Bei einigen Teleskopen ist das Sternscheibchen nicht gerade groß und ein Spalt ist nicht nötig. So hat beispielsweise ein Newton Teleskop 254 x 1200 bei 4'' Seeing ein Sternscheibchen von ca. 25 μm . Vorteilhaft ist dabei, dass man das Gitter bis zur nullten Ordnung drehen kann, sodass man das Sternfeld sieht. Dann kann man den gewünschten Stern auf die Mitte des Gitters bringen. Dabei sollte man bei der Planung des Spektrographen, das durch den Kollimator und Teleskop gegebene beobachtbare Gesichtsfeld beachten und entsprechend berücksichtigen.

Mit einem spaltlosen Spektrographen lässt sich auf diese Weise ein gewinnbringender Einstieg realisieren (siehe dazu auch den Erfahrungsbericht von Lothar Schanne über die Mäusevilla, <http://www.astrospectroscopy.eu/OSSV/Einstieg/Einstieg.html>)

Das Problem bei einem spiegelnden Spalt ist das kleine Loch, das man irgendwie in den Spiegel bringen muss. Versuche von Lothar Schanne gingen dahingehen, eine winzige Stelle der Reflexionsschicht des Spiegels unter Zuhilfenahme eines Mikroskops abzukratzen und darauf eine Lochblende mit definierter Spaltgröße zu kleben. Beobachtet wird hier von der Rückseite des Spiegels her. Leider verursacht dieses rückseitige einbauen des Spiegels Reflexionen, die neben dem Spektrum ein weiteres produzieren. Jedoch in der Intensität nur wenige Prozent ausmacht. Für einen Echellespektrographen durchaus ein Problem. Außerdem ist das Glas in sich rau. Diese Rauheit liegt in der Größenordnung des Sternscheibchens, somit kann es passieren, dass das Sternscheibchen zu einem „kometenähnlichen“ Fleck wird.

Eine weitere Möglichkeit wird von mir verfolgt. Dabei wird in den Spiegel ein kleines ein Millimeter messendes Loch gebohrt. Darauf wird dann eine kleine reflektierende Lochblende geklebt. Als geeignet haben sich Goldlochblenden von Plano herausgestellt. Bei sehr schwachen Sternen kommt es jedoch auf die Empfindlichkeit der Guidingkamera an. Versuche mit der Alccd5 lassen darauf hoffen, bis 7 mag beobachten zu können. Als wesentlich bessere, aber auch teure Blenden haben sich die Dünnschichtblenden von Plano herausgestellt. Diese sind poliert und haben am Loch eine Dicke, die dem Radius des Loches entspricht.

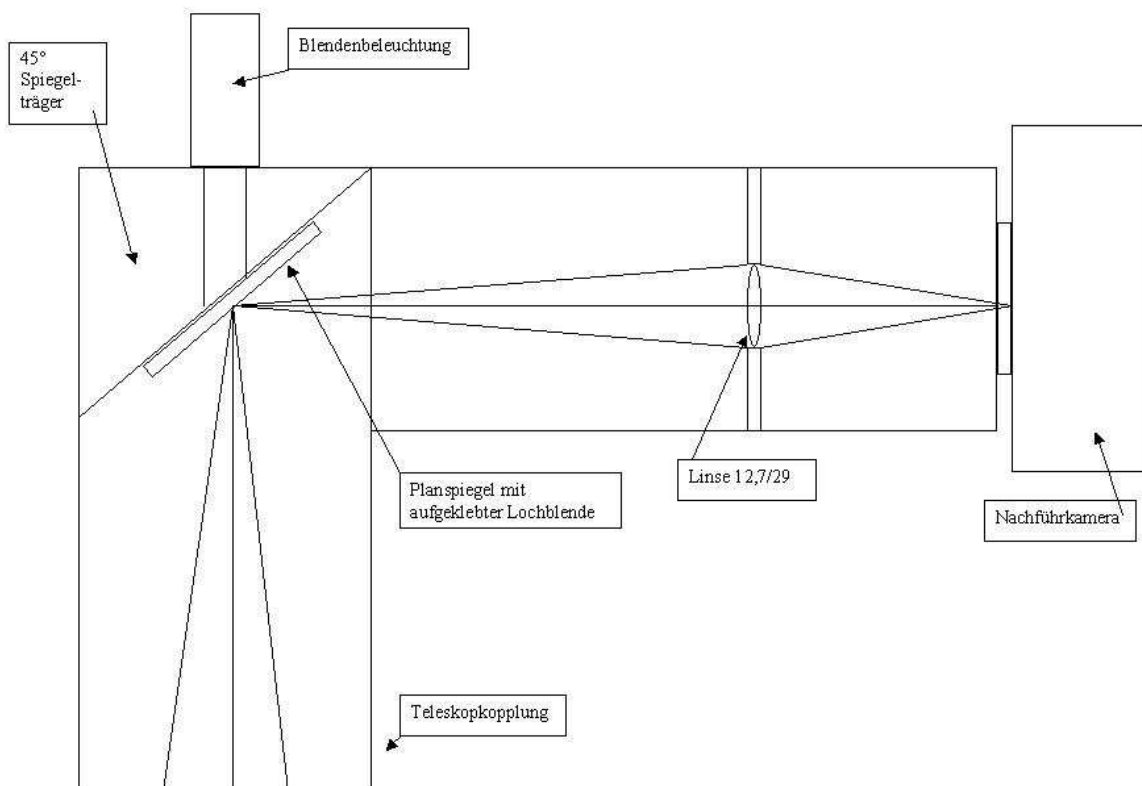


Abb. 8 Erster Prototyp

Die Abbildung 8 zeigt den ersten von mir hergestellten Prototypen. Hierbei wurde lediglich getestet, ob sich die Idee mit der aufgeklebten Goldlochblende auch in der Praxis bewährt. Außerdem war dies der erste Schritt in Richtung einer Lichtwellenleitereinkopplung.

Bei einer solchen Konstruktion ist auch die Dicke der Blende zu Berücksichtigen. Diese schattet das Loch zusätzlich, wegen der Schrägstellung des Spiegels ab. Aus dem Loch in der Blende wird dabei etwas ellipsenförmiges. Wenn man es geschickt anstellt, dann kann man die Verengung in Dispersionsrichtung machen und erhält so einen schmalen Spalt. Beispielsweise wird ein Pin Hole mit einem Durchmesser 50 μm und 25 μm Dicke bei 45° Schrägstellung auf eine Breite von 17,5 μm verjüngt. Steht der Spiegel, auf dem die Lochblende mit einem Pin Hole mit Durchmesser d und Dicke D geklebt ist, in einem Winkel α zur optischen Achse, so kann die effektive Öffnung des Pin Hols durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$d_{\text{eff}} = d \cos(\alpha) - D \sin(\alpha)$$

Die Blendenbeleuchtung in Abbildung 8 diente nur zur Hinterleuchtung der Blende, um das Loch in der Guidingkamera zu erkennen. An dieser Stelle wird der Spektrograph angebracht. Meist wird dahinter gleich ein Planspiegel eingebaut, um das Licht in eine günstigere Richtung umzulenken (wie wir in Abschnitt 1.2 besprochen hatten).

In der Herstellung eines ordentlichen Spalts mit einfachen Mitteln und geringem finanziellem Aufwand besteht zur Zeit am meisten Entwicklungsbedarf und ist im gleichen Maße interessant und herausfordernd.

Um auch mal eine Linse rechnen zu können wollen wir kurz noch die Gaußsche Linsengleichung anschreiben. Sie lautet:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} - \frac{1}{g}$$

Dabei ist f die Brennweite der Linse, b die Bildweite und g die Gegenstandsweite. Mit dieser einfachen Gleichung kann man beispielsweise so eine abbildende Linse wie in Abbildung 8 gezeigt berechnen. Vorsicht, wenn g b gegenüberliegt, dann wird das $-$ zu einem $+$.

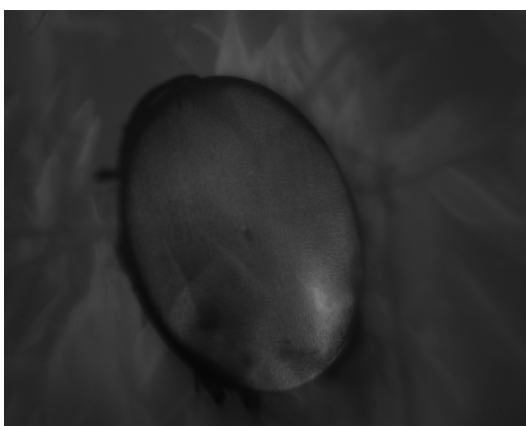


Abb. 9 Lochblende ohne Beleuchtung



Abb. 10 Lochblende mit Beleuchtung

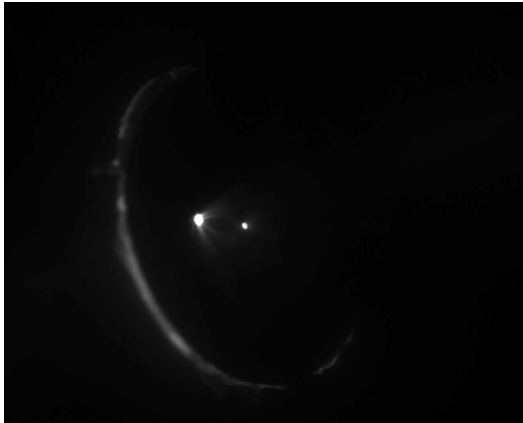


Abb. 11 Lochblende mit Arkturus

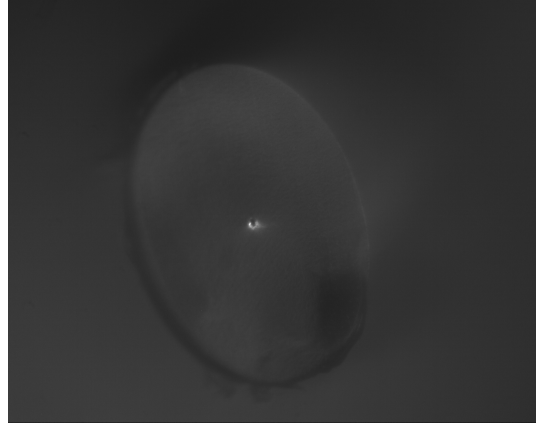


Abb. 12 Lochblende mit Arkturus

Die obigen vier Abbildungen sind Testaufnahmen mit dem ersten Prototypen in Verbindung mit der Alccd5 aufgenommen. Bei den Hintergrundstrukturen in den Bildern 9 und 10 handelt es sich um einen Kirschbaum, es war mal wieder schlechtes Wetter. Schön sieht man auch die elliptische Form der Blende.

2. Justage

Die Justage des Spektrographen ist eine sehr wichtige Sache. Dadurch soll gewährleistet sein, dass alle optischen Komponenten aufeinander abgestimmt sind. Es muss sehr gewissenhaft ausgeführt werden. Ordentliche kinematische Halterungen sind dafür essenziell. Man könnte sich fragen, in welcher Position man die Justierung durchführen sollte. In der Tat werden meistens die Spektrographen in der horizontalen justiert. Aber am Teleskop ist er natürlich in allen Positionen. Daher empfiehlt es sich den Spektrographen nicht in der horizontalen, sondern in einer mittleren Position zu justieren. Außerdem sollte man die Justage immer mal wieder überprüfen.

Zur Abstimmung der Komponenten eignet sich ein Laser sehr gut. Diesen bringt man auf der optischen Achse an und kontrolliert den Strahl mit einer Lehre, die in Abbildung 13 gezeigt ist.

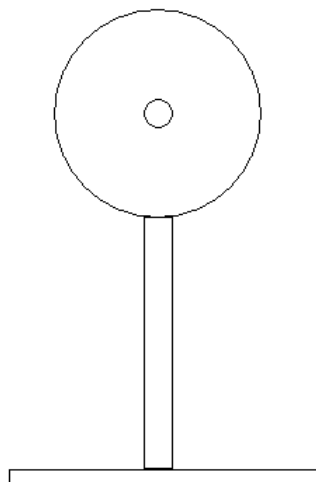


Abb. 13 Justagelehre

Dabei ist darauf zu achten, dass der Strahl immer schön auf der optischen Achse bleibt. An dieser Stelle muss noch eine wichtige Bemerkung gemacht werden. Die optische Achse ist

nicht die mechanische Achse. Soll heißen, dass die optische Achse von dieser abweicht. Das ist zum Beispiel auf Fertigungsgenauigkeiten der Hersteller der optischen Komponenten, zum anderen auf die Genauigkeit der Fertigung der Halterungen zurückzuführen.

Bei der Justage können wir jedoch nur die mechanische Achse als Bezugspunkt hernehmen. Daher sollte diese so genau wie möglich gefertigt sein.

Die Lehre sollte aus Metall hergestellt werden, das Loch ca. einen Millimeter im Durchmesser und genau auf der Höhe der optischen Achse sein. Der Laser wird so am Spalt angebracht, dass der Strahl immer durch das Loch geht, egal wo die Lehre im Spektrographen steht.

Nachdem der Laser parallel eingerichtet ist wird die erste Komponente eingerichtet. Diese ist in den meisten Fällen der Kollimator oder ein Umlenkspiegel. Also setzt man die Lehre nach dieser Komponente und verfolgt den Strahl bis zur nächsten Komponente. Bei Abweichungen wird an der Halterung eingestellt, solange bis alles passt. So wird bei allen Komponenten vorgegangen. Beim Gitter müssen wir aber auch auf die Rotation achten. Egal in welcher Stellung das Gitter steht, es muss immer genau justiert sein. Also wird auch wieder unsere Lehre nach dem Gitter hingestellt und das Gitter gedreht. In jeder Ordnung sehen wir einen Punkt des Lasers und dieser muss durch das Loch in der Lehre. Also wieder so lange justiere, bis alles passt.

Sicherlich ist das eine zeitaufwändige Tätigkeit. Mit etwas Übung wird es aber zur Routine. Außerdem lernt man so sein Messgerät kennen. Das ist sowieso sehr wichtig, dass man wirklich weiß mit was man da arbeitet.

Den Fokus der Kamera stellt man am besten ein, indem man das Gitter in die nullte Ordnung bringt. Man beleuchtet dann den Spalt und beobachtet diesen durch die Kamera. Man stellt den Fokus so lange ein, bis man die Struktur des Spalts scharf abgebildet hat. Dabei darf sich der Fokus nicht ändern, wenn man das Gitter dreht. Da zeigt es sich, ob man genau genug gearbeitet hat.

Die noch durchzuführende Justage ist die des Kollimators, sodass er auch wirklich kollimiert, also den Strahlengang auch wirklich parallel macht. Das ist besonders wichtig, hängt davon doch das Auflösungsvermögen ab. Um diesen einzustellen, beobachtet man den Spalt im parallelen Strahlengang nach dem Kollimator mit einem kleinen Fernrohr (Sucher oder ähnliches). Wichtig dabei ist, dass es auf unendlich gestellt ist. Dazu sucht man sich ein unendlich weit entferntes Objekt (Stern, Fernsehturm etc.) und stellt das Fernrohr scharf. Dann blickt man in den parallelen Strahlengang nach dem Kollimator und stellt den Spalt scharf, indem man den Abstand Spalt – Kollimator verändert, ein.

3. Peripherie

Hier soll etwas darauf eingegangen werden, was prinzipiell bei den peripheren Tätigkeiten zu beachten ist. Genaueres dazu sollte in den Vorträgen über die Reduktionsprogramme ersichtlich werden.

3.1 Darks

Darkframes dienen dazu, das thermische Rauschen und die Hotpixel aus den Aufnahmen zu entfernen. Die meisten CCD Kameras haben eine thermoelektrische Kühlung (Peltierelement und Lüfter). Dadurch wird das thermische Rauschen schon erheblich reduziert. Die Kurve des thermischen Rauschens ist eine abfallende e-Funktion und geht asymptotisch gegen einen kleinsten Wert. Dieser ist bei den CCD Chips etwa bei -25 °C . Also bei dieser Temperatur ist eine noch stärkere Abkühlung kaum gewinnbringend für unsere Tätigkeiten. Was im Sommer ja meist nicht zu erreichen ist. Außerdem ist bei Langzeitbelichtungen dieses Rauschen erhöht,

da natürlich auch Wärme durch den Widerstand der elektronischen Bauteile der Kamera entsteht.

Das Dark muss bei gleicher Belichtungszeit und Temperatur, wie das Bild gemacht werden.

Viele Aufnahmeprogramme machen schon automatisch ein Dark, vor der eigentlichen Aufnahme. Dies erfordert natürlich einen eingebauten Shutter in der Kamera. Wenn kein solcher eingebaut ist, dann muss das Teleskop vor der Aufnahme eines Darks abgedeckt werden mit den Staubschutzdeckeln und jegliches Streulicht vermieden werden. Darks sind für jede Temperatur, Belichtungszeit und Chip unterschiedlich. Daher empfiehlt es sich ein Archiv, vor allem für Langzeitbelichtungen anzulegen. Also für etwa alle drei Grad und jede Minute. Bei dem thermischen Rauschen handelt es sich um einen stochastischen Effekt. Jedes Dark, sei es auch unter gleichen Bedingungen entstanden, ist also anders. Es empfiehlt sich also mehrere Darks zu mitteln. Jeder entwickelt hier im Laufe der Zeit seine eigene Technik und das ist auch von der Kamera abhängig. Man sollte mit dem Mitteln der Darks aber nicht übertreiben. Wichtig ist, dass man von jedem Bild das thermische Rauschen entfernt, bevor man Einzelbilder addiert. An dieser Stelle verweise ich auch auf Bücher der Astrofotografie, die diese Techniken oft sehr ausführlich behandeln.

3.2 Flat

Ein Flatfield dient dazu, das Spektrum zu glätten, sowie Schmutzpartikel und Vignettierung zu korrigieren. Man erkennt in einem Plot des Spektrums, dass es zu den Rändern hin an Intensität verliert. In der Astrofotografie werden Flataufnahmen meist dazu verwendet, um evtl. Vignettierung (Abschattung) zu beheben. Dabei wird eine weisse homogene Lichtquelle aufgenommen und anschließend das Bild mit dem Flat korrigiert. Es ist auch bei Echellespektrographen besonders wichtig. Oder auch, wenn man die Temperatur eines Sterns bestimmen möchte, wobei man hier noch die Wellenlängenfunktion des Chips berücksichtigen muss.



Abb. 14 Flat ohne Filter 30 Sekunden



Abb. 15 Flat mit Filter 120 Sekunden

Beiden obigen Bildern zeigen eine Flataufnahme mit Baches. Dabei wurde eine kleine 3,6 V Xenonlampe verwendet. Man sieht, dass es oft problematisch ist, im Roten (oben) nicht über zu belichten und im Blauen noch genügend Signal zu haben. Ein Problem, das aber bei einem Langspaltspektrographen nicht auftritt, sondern nur eines bei Echelles. Abbildung 15 zeigt ein Flat in Verbindung mit einem Blaufilter. Außerdem sieht man links eine Verschmutzung, auf dem Chip-Fenster der CCD.

3.3 Kalibration

Um die Linien im Sternspektrum zu identifizieren, also eine Wellenlänge zuordnen zu können, braucht man eine Vergleichslichtquelle. Für Spektrographen mit mäßigem Auflösungsvermögen ($R < 15.000$) eignet sich eine Neonquelle. Neon hat jedoch die meisten Linien im roten Spektralbereich. Beobachtet man im blauen, muss man länger belichten, um die schwächeren blauen Linien zu erkennen. Neonglühlämpchen befinden sich in Nacht-orientierungslampen. Das Licht dieser Lampen muss man in den Spektrographen einkoppeln, das macht man am besten mit einer Abbildungslinse. Spaltlose Spektrographen können so nicht kalibriert werden. Hier identifiziert man viel mehr bekannte Linien und verfolgt evtl. Intensitätsschwankungen einzelner Linien, um so auf Mechanismen des Sterns zu schließen.

Für Spektrographen mit hohem Auflösungsvermögen ($R > 15.000$) ist eine Hohlkathodenlampe mit Thorium hervorragend geeignet. Diese Lampen sind leider recht teuer. Abbildung 14 zeigt ein solches Spektrum einer Thoriumlampe mit Argon, mit BACHES aufgenommen. Abbildung 15 zeigt das Spektrum einer Nickellampe mit Neon, ebenfalls mit BACHES aufgenommen.

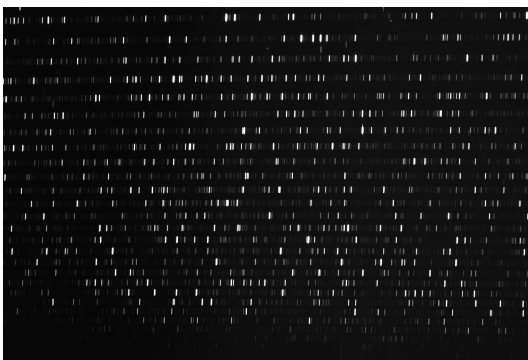


Abb. 16 Spektrum einer Thorium/Argon HKL

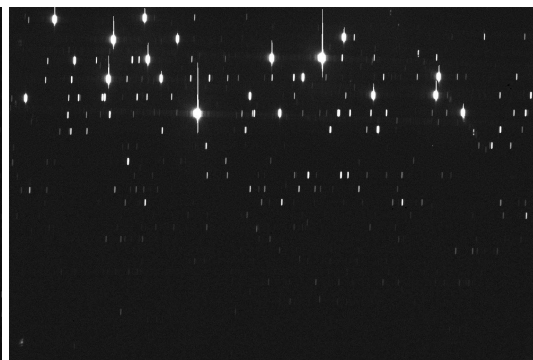


Abb. 17 Spektrum einer Nickel/Neon HKL

Hier wird sofort ein Problem der mit Neon gefüllten Lampen klar. Neon hat sehr starke Emission im roten Spektralbereich. Um die schwachen blauen Linien im Nickelspektrum sichtbar machen zu können muss man die roten Linien stark überbelichten. Dem kann man entgegen, indem man einen Filter anbringt, der im Roten abschwächt und im Blauen möglichst alles durchlässt (siehe 3.2). Bei den beiden obigen Spektren handelt es sich um Spektren durch einen Echellespektrographen (BACHES). Bei den Langspaltspektrographen ist die stark unterschiedliche Intensität der Linien nicht so schlimm, da man hier ja nur einen kleinen Bereich des Spektrums aufnimmt. Dennoch müssen bei Spektrographen mit hohem R genügend viele Linien im Ausschnitt liegen, um eine ordentliche Kalibration vornehmen zu können.

4. Schlussbemerkung

Abschließend möchte ich noch festhalten, dass dieses Skript als grobe Übersicht zu verstehen ist und keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit hat. Ich hoffe damit ein wenig Begeisterung und Motivation zum Selbstbau unter den Lesern verbreitet zu haben.

Vielleicht mag es etwas kompliziert klingen, diese Geschichte über Spektrographen und ist daher eher Abschreckend. Diesen Gedanken sollte man einfach mal beiseite legen. Das Excelsheet auf der Seite der FG-Spektroskopie durchlesen und mit den Werten zu spielen. Rat im Forum zu suchen, wenn etwas unklar. Und dann einfach mit der Konstruktion eines Spektrographen beginnen. Dabei lernt man am meisten und nach eigener Erfahrung kann ich nur sagen, dass es die tollste Schlechtwetterbeschäftigung ist, die man daheim haben kann.

Abschließend bleibt mir nur noch Ihnen einen immer wolkenfreien Himmel und den Mut zum Spektrenmachen zu wünschen – und natürlich ein paar schöne Tage in Heppenheim.

5. Anhang

Das Trägheitsmoment

Das Trägheitsmoment ist definiert als die Summe

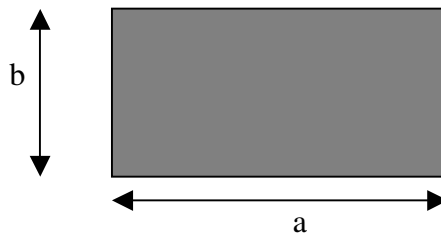
$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

aller Massenteile und zugehörigen senkrechten Abständen zu einer Achse. Diese Rechnung wäre höchstens etwas für den PC, also gehen wir von der Summe über in ein Integral und definieren uns das Trägheitsmoment so:

$$I = \int r^2 dA$$

Dabei haben wir die Masse in Fläche mal Länge mal Dichte aufgeteilt und interessieren uns nur für die Querschnittsfläche, um das Flächenträgheitsmoment zu erhalten. Folgend nun zwei einfache Beispiele, bei denen die y-Richtung die Belastungsrichtung ist:

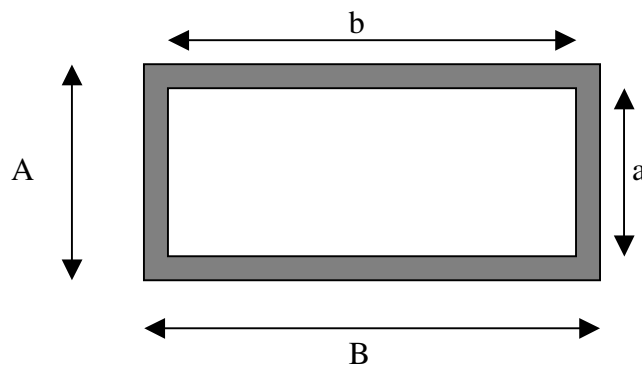
a. Balken



Wir setzen unser rechtshändiges Koordinatensystem in die Mitte und schreiben für I das Integral

$$I_{\text{Balken}} = \int_{-a/2}^{a/2} dx \int_{-b/2}^{b/2} y^2 dy = a \frac{b^3}{12}.$$

b. Vierkantrohr



Hier machen wir uns einfach zunutze, dass es sich einfach um einen Balken (BA) handelt, aus dem ein weiterer Balken (ab) ausgeschnitten ist, und erhalten ohne weitere Rechnung

$$I_{\text{Vierkantrohr}} = \frac{1}{12} (A^3 B - a^3 b).$$

Tabellen

a. Sicherheitsfaktor α

Belastungsfall	1/200	1/300	1/500
Frei aufliegend	9.91 208	14.9 313	24.8 520
Auf einer Seite eingespannt, auf der anderen frei aufliegend	4.12 86.5	6.19 130	10.3 216
Beidseitig eingespannt	2.98 62.5	4.47 93.8	7.45 156
Einseitig eingespannt	23.8 300	35.7 750	59.5 1250

Tab. 2 Belastungsfälle

Jeweils der obere Wert steht für Stahl, der untere für Holz.

Zwei Spaltlose Spektrographen

- Die Mäusevilla von Lothar Schanne²



Abb. 16 Mäusevilla

Daten:

Gitter	Reflexionsgitter 1200 l/mm, 25x25 mm ²
Kollimator	Objektiv F/2.4, f = 135 mm
Fokuslinse	Objektiv F/2.4, f = 135 mm
Auflösungsvermögen	R = 4.000 (abhängig vom Seeingscheibchen)
Kamera	Audine, 9 μ m Pixel
Dispersion	0,4 \AA /Pixel

² Mit freundlicher Genehmigung von Lothar Schanne

- Der MiniSpec von Daniel Sablowski

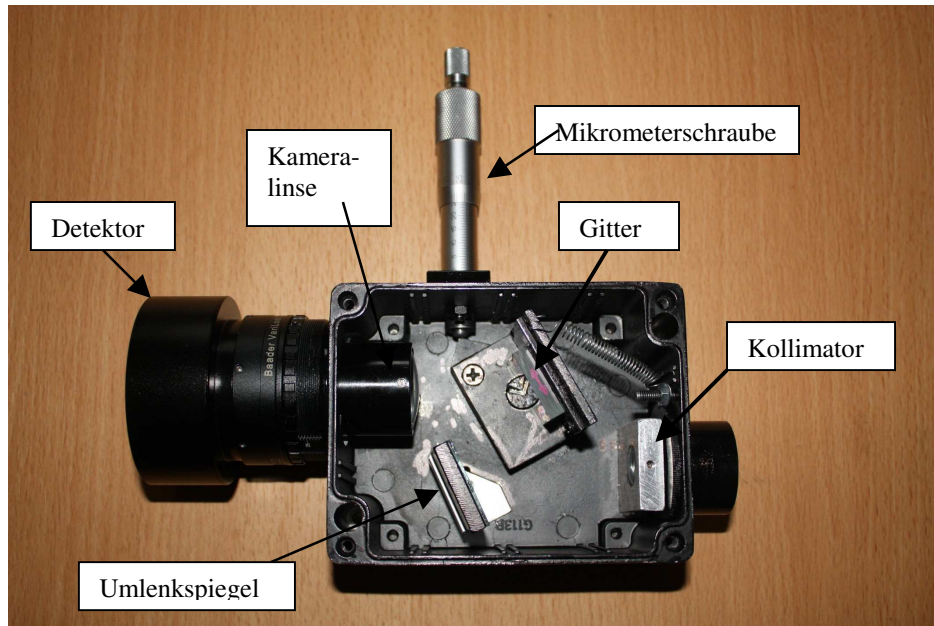


Abb. 17 MiniSpec

Daten:

Gitter:	Reflexionsgitter 1500 l/mm, 25x25 mm ²
Kollimator	Achromat, D = 12,5 mm, f = 50 mm
Kameralinse	Achromat, D = 26 mm, f = 57 mm
Detektor	Meade DSI II (im Bild ALccd5)
Auflösungsvermögen	bis zu 2.400 (abhängig vom Seeingscheibchen)
Dispersion	ca. 1 Å/Pixel

Einige Adressen

Ansprechpartner

Dr. Lothar Schanne
FG-Spektroskopie
Daniel Sablowski

l.schanne@arcor.de

dasab2002@yahoo.de

www.astrospectroscopy.eu

www.spektroskopie.fg-vds.de

www.hobbysternwarteploesen.de

Optische Komponenten

Edmund Optics	-	www.edmundoptics.com
Thorlabs	-	www.thorlabs.com
Op-tection	-	www.op-tection.com
TecOptics	-	www.tecoptics.com
Lenox Laser	-	www.lenoxlaser.com
Optometrics	-	www.optometrics.com
Newport	-	www.newport.com
Light Machinery	-	www.lightmachinery.com
Optikbaukasten	-	www.optikbaukasten.de

Opto-Mechanik

- Opto-Mechanics - www.opto-mechanics.co.uk
- Vision GmbH - www.opik-mechanik.de
- OWIS - www.owis-staufen.de

Fibers und Zubehör

- Swiss Jewel - www.swiss-jewel.com
- Ceram Optec - www.ceramoptec.com
- J-Fibers - www.j-fibers.com

Elektronische Komponenten und Geräte

- SBIG - www.sbig.com
- GetSpec - www.spectrometer.com
- Stellarnet - www.stellarnet.com
- Ocean Optics - www.oceanoptics.com
- Spectronic Devices - www.spectronicdevices.com
- Mightex - www.mightex.com
- Eureca - www.eureca.de
- Telemeter - www.telemeter.de