

# Das Protuberanzen- und Chromosphärenspektrum der Sonne

Aufgezeichnet mit dem DADOS Spektrografen  
in der Sternwarte Bülach

Richard Walker, CH-Rifferswil  
richiwalker@bluewin.ch

Version 1.1    Juli 2022

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Auf den Spuren von Angelo Secchi.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Vorgängige Versuche .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Das "Bülacher Secchi Experiment" .....</b>	<b>4</b>
3.1	Positionierung des Spaltes .....	4
3.2	Instrumente und Setup .....	4
3.3	Auflösung des Spektrografen .....	4
3.4	Montage des Spektrografen .....	5
3.5	Aufnahmen.....	6
3.6	Aufbereitung der Aufnahmen .....	7
3.7	Ergebnisse und Diskussion.....	7
3.8	Fazit .....	8
<b>4</b>	<b>Literatur und Internet .....</b>	<b>9</b>



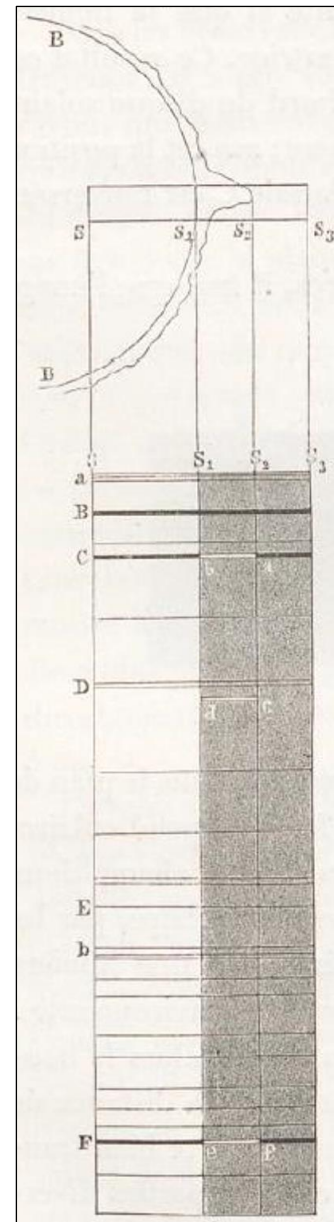
Pater Angelo Secchi, 1818 – 1878,  
Der "Vater der modernen Astrophysik"

## 1 Auf den Spuren von Angelo Secchi

Der Jesuitenpater Angelo Secchi, 1818 – 1878, erforschte als Leiter der Vatikansternwarte nicht nur die Sonnenkorona, sondern entwickelte auch das erste Klassifizierungssystem für Sternspektren. Er wird deshalb oft als Vater der modernen Astrophysik bezeichnet. In seinem französischsprachigen Buch "Le Soleil" [1] von 1875, beschreibt er u.a. mit einer Skizze (Abb. rechts) und dem folgenden Text, wie mit einem Prismenspektrograf am Scheibenrand der Sonne ein Emissionsspektrum der Protuberanzen beobachtet werden kann. Die Ergebnisse hatte er damals nur zeichnerisch festgehalten. Im oberen Teil seiner Skizze ist die halbe Sonnenscheibe (B – B), sowie die Position und Ausrichtung des Spaltes, relativ zu einer Protuberanz, dargestellt (S – S<sub>1</sub> – S<sub>2</sub> – S<sub>3</sub>). Die prominentesten Spektrallinien sind hier ausschliesslich mit den Fraunhoferbezeichnungen A, B, C, D, E, b, und F beschriftet. Der folgende Text ist eine rudimentäre Übersetzung aus dem (Alt) Französischen, mit erläuternden Ergänzungen, gemäss aktuellem Wissensstand (in Rot).

*Falls der (dunkle) Spaltabschnitt S<sub>1</sub> – S<sub>3</sub> (ausserhalb des Sonnenrandes) auf eine Protuberanz im Hintergrund trifft, erscheinen im Streifen von S<sub>1</sub> – S<sub>2</sub> sofort drei helle (Emissions-) Linien. Die erste im roten Bereich des Spektrums, in der Verlängerung von C (H $\alpha$ ), die zweite (D<sub>3</sub>, He) in der Nähe von D (Natrium D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>) und die dritte in der Verlängerung von F (H $\beta$ ). Vielleicht sieht man sogar eine Linie bei G (H $\gamma$ ). Falls es keine Protuberanzen im Hintergrund gibt, werden diese Linien sehr kurz sein und sind so nur schwer zu erkennen. Wenn am Rande der Sonne eine Fackel oder ein Fleck steht, kann man den Spalt auf diese Stelle bewegen, und senkrecht zum Sonnenrand ausrichten. Die Spektrallinien erlauben dann die Charakterisierung der Protuberanz...*

Die weissen Emissionsabschnitte bei C, D und F sind in Secchis Skizze nur schwach zu erkennen. Er beschreibt dann noch weitere Taktiken, z.B. wie man mit tangential zum Sonnenrand ausgerichtem Spalt eine Protuberanz vertikal abscannen kann.



## 2 Vorgängige Versuche

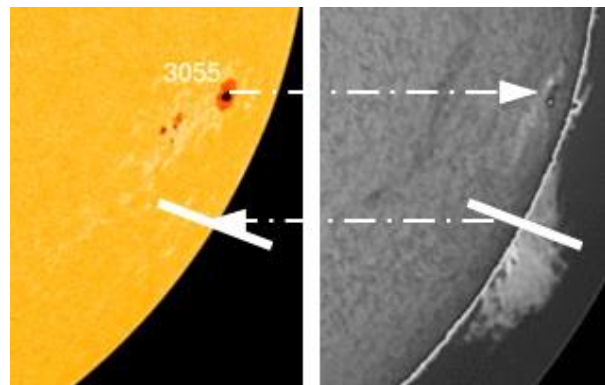
Die Hauptmotivation war der Nachvollzug von Secchis Experiment mit modernen Mitteln des 21. Jahrhunderts. Umso überraschender (und peinlicher) waren deshalb die anfänglichen Misserfolge. Die ersten Versuche wurden, bei allerdings geringer Sonnenaktivität, mit dem niedrig auflösenden 200 Linien/mm Gitter und dem am höchsten auflösenden 25  $\mu\text{m}$  Spalt des DADOS Spektrografen durchgeführt. Die spektrale Auflösung liegt so bei ca.  $R \approx 600$  ( $\lambda/\Delta\lambda$ ). Die Hintergrund-Protuberanzen waren eher klein. Auf den Aufnahmen waren so ausserhalb des Sonnenrandes, keine Emissionen erkennbar. Als Gründe kamen entweder die ungenügende Dichte der Protuberanz, eine ungünstige Position des Spaltes und/oder eine zu niedrige spektrale Auflösung in Frage. Diese Emissionslinien entsprechen den intensivsten des sog. Flashspektrums, welches am Anfang und Ende der Totalitätsphase einer Sonnenfinsternis fotografiert werden kann [3]. So entdeckte der französische Astronom Jules Janssen bereits während der Sonnenfinsternis von 1868 mit der "gelben" Emissionslinie erste Hinweise auf das Element Helium [4]. Gemäss M. Waldmeier entsprechen die Spektrallinien der Chromosphäre, mindestens qualitativ, weitgehend denjenigen der Protuberanzen [2].

### 3 Das "Bülacher Secchi Experiment"

Am Sonntag 17. Juli 2022 trafen sich in der Sternwarte Bülach [5] Stefan Meister, Martin Huwiler, Carsten Ziolk, Jonas Schenker und der Verfasser. Später stiess noch Peter Salvi von der AGZU dazu. Der Zweck war, neben dem Austausch von Erfahrungen, die Sonnenbeobachtung, sowie das Testen und Vergleichen verschiedener Equipments und Zubehörs. Eindrücklich war u.a. die Demonstration des Lunt-Kalzium-K-Filters durch Martin Huwiler und Jonas Schenker. Aber auch im H $\alpha$ - und Weisslichtbereich zeigte sich eine erfreulich aktive Sonne mit diversen Fleckengruppen und Fackelgebieten. Am Nachmittag sollte dann der Versuch zur Aufzeichnung eines Protuberanzenspektrums in "Secchi Manier" stattfinden.

#### 3.1 Positionierung des Spaltes

Als Glücksfall erwies sich eine intensive, grossflächige Protuberanz am SW Rand der Sonnenscheibe. In unmittelbarer Nähe befand sich die Aktivitätsregion AR 3055, welche als Referenz die Positionierung des Spaltes vor der Protuberanz wesentlich erleichterte. Die Grafik rechts zeigt das erforderliche Zusammenspiel von Weisslicht- (Spaceweather.com) und H $\alpha$ -Aufnahme (Gong, Mauna Loa). Dabei müssen noch die Spiegelungseffekte der Optik und des Zubehörs berücksichtigt werden. Der Spalt sollte einigermassen senkrecht zum Sonnenrand und etwa mit seiner halben Länge vor der Protuberanz stehen.



#### 3.2 Instrumente und Setup

Als Teleskop wurde der Apo-Refraktor TEC 140 mit 980 mm-Brennweite verwendet. Er sitzt in der Sternwarte Bülach huckepack auf dem Astrographen Officina Stellare Pro RC 360 [5]. Als Energieschutzfilter wurde dem Dados Spektrographen ein Herschelkeil vorgeschaltet. Der daraus resultierende 90° Montagewinkel verbesserte so nebenbei noch die Hebelverhältnisse am Okularstutzen des Teleskops.

Der dem DADOS sonst vorgeschaltete Klappspiegel musste entfernt werden, weil so keine Fokussierung auf dem Spaltspiegel möglich war. Dies war hier folgenlos, weil in diesem Versuch der "Flip Mirror", weder zum Auffinden des Objektes, noch zur Einspeisung des externen Kalibrierlichts benötigt wurde.

Der Spaltspiegel wurde nicht mit einer separaten Kamera, sondern über ein Okular mit der entsprechenden DADOS Vorsatzoptik beobachtet.

Als Kamera kam die ZWO ASI 1600MM Pro zum Einsatz.

#### 3.3 Auflösung des Spektrographen

Bei der Analyse der ersten Fehlversuche wurde anhand von Secchis Spektralskizze die Auflösung seines Spektrographen abgeschätzt. Die Natrium Doppelabsorption erscheint dort knapp aufgelöst, was beim 200L/mm Gitter nicht der Fall ist. Deshalb wurde jetzt das 900L/mm Gitter montiert, welches die D-Doppellinie ebenfalls aufzulösen vermag und so eine wohl vergleichbare Auflösung generiert. Die damit erzielte, spektrale Auflösung liegt bei  $R \approx 4000$  ( $\lambda/\Delta\lambda$ ). Der Anteil dieser Massnahme am späteren Erfolg des Versuches, ist noch unklar.



### 3.4 Montage des Spektrografen

Iteratives Einstellen des Montagewinkels mit dem Ziel, den Spalt am Sonnenrand schliesslich mit etwa der halben Länge, senkrecht vor die Protuberanz zu bekommen...



...mit wiederholter Kontrolle an der Spaltoptik und der Spektralaufnahme am Bildschirm.



Einstellen des Spektralbereichs über den Gitterwinkel am DADOS Spektrografen. Hier die Kontrolle am Bildschirm im Vergleich zum 900L/mm Sonnenspektrum im Spektralatlas [6].



Abschliessend der aufnahmebereite Setup mit Teleskop, Spektrograf und Kamera. Damit war es mit einer einzigen Aufnahme möglich, den gesamten von Secchi skizzierten Bereich aufzunehmen, d.h. von  $\sim H\alpha$  (C) bis  $H\beta$  (F), entsprechend ca. 4800 – 6600 Å.



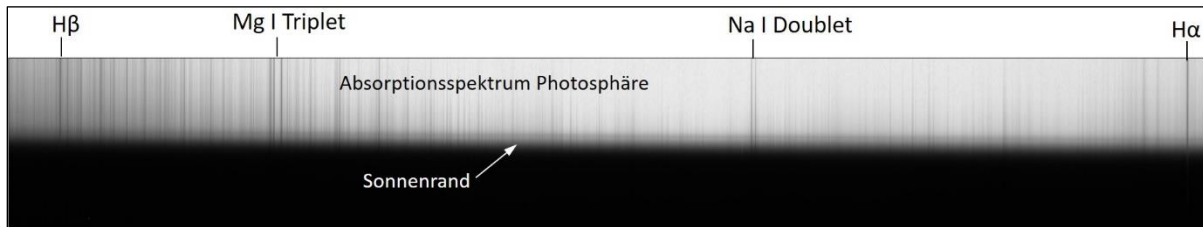
### 3.5 Aufnahmen

Insgesamt wurden 5 Bilder mit Belichtungszeiten von 1.4 – 4.0 s aufgenommen. Das Sampling der Kamera ZWO ASI 1600 MM Pro ist im Grundmodus für die Astrofotografie optimiert, erwies sich aber für die spätere Auswertung mit der IRIS-Software als zu gross (Oversampling). Daher sollte zukünftig bereits in einem Hard- oder Software Binningmode aufgenommen werden. Folglich mussten die Aufnahmen bei der Bearbeitung mit IRIS, zuerst mit der Funktion *Geometry/Resample* in X- und Y-Richtung um den Faktor 0.35 reduziert werden.

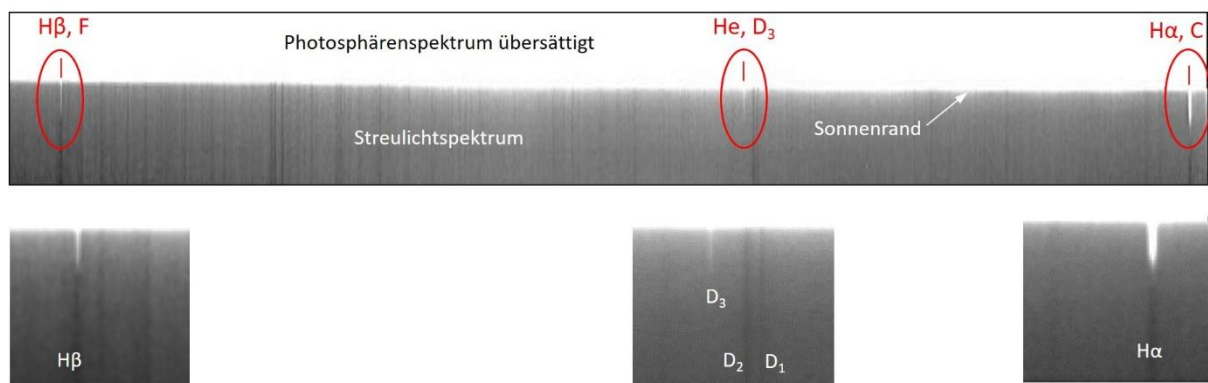
Weitere Empfehlung bei der Wiederholung dieses Versuches: Eine grössere Serie von Aufnahmen mit stark unterschiedlichen Belichtungszeiten, auch mit etwas überbelichteten Bildern, erstellen – zudem noch bei leicht unterschiedlichen Spaltpositionen.

### 3.6 Aufbereitung der Aufnahmen

Die Datenreduktion erfolgte, etwas angepasst, gemäss [8], d.h. ohne Abzug des Streulichtes oder Himmelshintergrundes. Es wurde nur eine Aufnahme bearbeitet, welche die Emissionen am deutlichsten zeigte. Bei normal belichteten Aufnahmen, mit dem solaren Absorptionsspektrum am Sonnenrand, sind die drei "Secchi-Emissionen"  $H\alpha$ , He I und  $H\beta$  nur sehr schwach erkennbar. Interessant ist hier noch der Helligkeitsabfall am Sonnenrand.



Wenn aber mit dem Helligkeitsregler das Sonnenrandspektrum übersättigt wird, erscheint ausserhalb der Sonnenscheibe, quasi als willkommene Referenz, ein Streulichtspektrum, welches mit drei jetzt deutlich sichtbaren Emissionen überlagert ist.

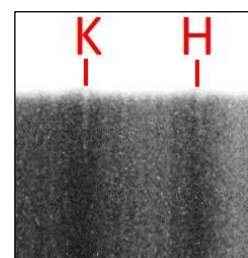


### 3.7 Ergebnisse und Diskussion

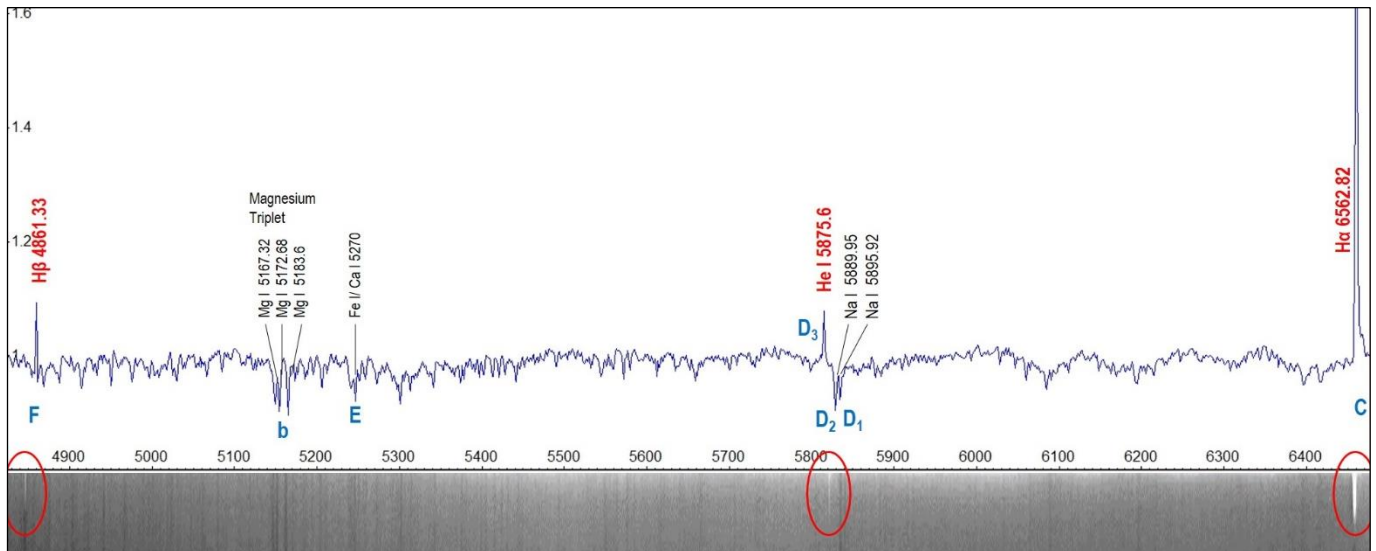
Am intensivsten erscheint die Emission von  $H\alpha$ , gefolgt von  $H\beta$  und He I – Diese Elemente stellen mit  $H \approx 92.1\%$  und  $He \approx 7.8\%$  den Hauptanteil an der Zusammensetzung der Photosphäre. Absorptions- und Emissionslinien sind bei  $H\alpha$  und  $H\beta$  deckungsgleich. Die Heliumlinie erscheint knapp links der Natrium Doppelabsorption, bemerkenswerterweise aber ohne einen entsprechenden Absorptionsabschnitt. Dies sorgte lange Zeit für Kopfzerbrechen, weil noch bis anfangs des 20. Jhd. unbekannt blieb, dass die Temperatur in der Photosphäre mit  $\sim 5800\text{ K}$  für die Absorption der neutralen Heliumlinie He I bei  $5875.6\text{ \AA}$  zu niedrig ist. Aber im äusseren Bereich der darüberliegenden, ca.  $2000\text{ km}$  mächtigen Chromosphäre, wird die notwendige Anregungstemperatur von  $\sim 10'000\text{ K}$  erreicht.

In Unkenntnis dieser Effekte hat man diese Linie und das verursachende Element, nach dem Sonnengott Helios "Helium" benannt, weil diese Signatur damals nur im solaren Chromosphärenspektrum zu sehen war. Weil sie in unmittelbarer Nachbarschaft zur Natrium Doppelabsorption  $D_1/D_2$  auftritt, wurde sie mit  $D_3$  bezeichnet.

Die Länge der in Emission erscheinenden Abschnitte ist bei allen Linien gleich, weil sie ja von der Höhe der Protuberanz im Spaltbereich abhängt. Die von A. Secchi noch erwähnte Emission, die gelegentlich bei  $H\gamma$  (Fraunhofer G) auftreten soll, ist hier nicht nachweisbar. Bei genauer Betrachtung und starkem Zoom können aber sehr schwache Emissionen in den Kernen der ionisierten Kalzium H- und K-Linien gesehen werden ( $Ca\ II\ \lambda\lambda\ 3968.47, 3933.66$ ). Das heisst, dass besonders starke und heisse Protuberanzen auch im Kalziumbereich sichtbar sein müssten.



Zur Ergänzung hier noch das in Visual Spec generierte Profil des Streulichtspektrums mit den drei überlagerten Emissionslinien und begradigtem Kontinuumsverlauf. Die Intensität der H $\alpha$  Emission ist hier aus Darstellungsgründen stark beschnitten. Das Profil ist auf der Basis bekannter Linien kalibriert (H $\alpha$ , D $_2$  und H $\beta$ ). Deshalb entsteht zur originalen, nicht linearen Spektralaufnahme, ein kleiner Versatz. Die prominentesten Linien sind hier noch in Blau mit den Fraunhoferbezeichnungen beschriftet.



### 3.8 Fazit

Mit diesem Setup lässt sich A. Secchis historischer Versuch einfach nachvollziehen, d.h. das Emissionslinienspektrum von Protuberanzen qualitativ darzustellen. Weitere Auswertmöglichkeiten sind momentan nicht erkennbar, abgesehen vom Einfluss der Bedingungen auf der Sonnenoberfläche auf den Auftritt dieser Emissionslinien. Für die Darstellung, Vermessung und Analyse von Protuberanzen stehen heute, z.B. mit den H $\alpha$ -Filtern, wesentlich effizientere Mittel zur Verfügung.



## 4 Literatur und Internet

[1] Angelo Secchi, *Le Soleil, (Seconde Partie" "Chapitre Premier")* Paris 1875 – 77  
<https://www.e-rara.ch/zut/doi/10.3931/e-rara-14748>

[2] M. Waldmeier, *Das Spektrum der Protuberanzen und chromosphärischen Eruptionen im Gebiet 4900 – 6700 Å*. Zeitschrift für Astrophysik 1949, Bd. 26  
<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1948Mizur..17C.305W>

[3] AAS Nova, *Sizing the Sun from a Solar Eclipse*, <https://aasnova.org/2021/10/29/sizing-the-sun-from-a-solar-eclipse/>

[4] Wikipedia, *Helium* <https://de.wikipedia.org/wiki/Helium>

[5] Sternwarte Bülach, <https://sternwartebuelach.ch/>

[6] R. Walker, *Spectral Atlas for Amateur Astronomers - A Guide to the Spectra of Astronomical Objects and Terrestrial Light Sources*, 2017 Cambridge University Press, ISBN: 9781107165908

[7] Marc Trypsteen, Richard Walker: *Spectroscopy for Amateur Astronomers - Recording, Processing, Analysis and Interpretation*, 2017 Cambridge University Press, ISBN: 9781107166189

[8] R. Walker, *Spektroskopische Datenreduktion für Amateurastronomen*  
<https://www.ursusmajor.ch/downloads/spektroskopische-datenreduktion-6.0.pdf>