

Das Arbeitsprinzip eines Echelle-Spektrografen

von Thomas Eversberg

Spektrografen, insbesondere Echelle-Spektrografen, sind die Arbeitspferde der Astronomischen Forschung und stehen mittlerweile auch dem Amateurastronomen zur Verfügung. Voraussetzung für einen sinnvollen Einsatz als berührungsloses Messinstrument ist ein Grundverständnis zur Funktionsweise. Der folgende Text dient einem prinzipiellen Einblick in diese Technik.

Das Grundprinzip der meisten Spektrografen ist die Beugung von Licht an einem so genannten optischen Gitter sowie die Interferenz der entsprechenden Beugungsstrahlen (Prismen-Spektrografen folgen dem Prinzip der Lichtbrechung). Diese Beugungsgitter sind in der Regel transparente Gläser mit mehreren Hundert Beugungselementen (Linien) pro Millimeter (Abb. 1). Manchmal kommen aber auch Reflexionsgitter zum Einsatz, die eine spiegelartige Oberfläche mit vielen Rillen als Beugungselemente aufweisen.

Eine unter dem Einfallswinkel α einfallende ebene sinusförmige Lichtwelle einer bestimmten Wellenlänge λ wird nach der Beugung bei bestimmten Dispersionswinkeln β sowie den Gitterabständen d zyklisch verstärkt bzw.

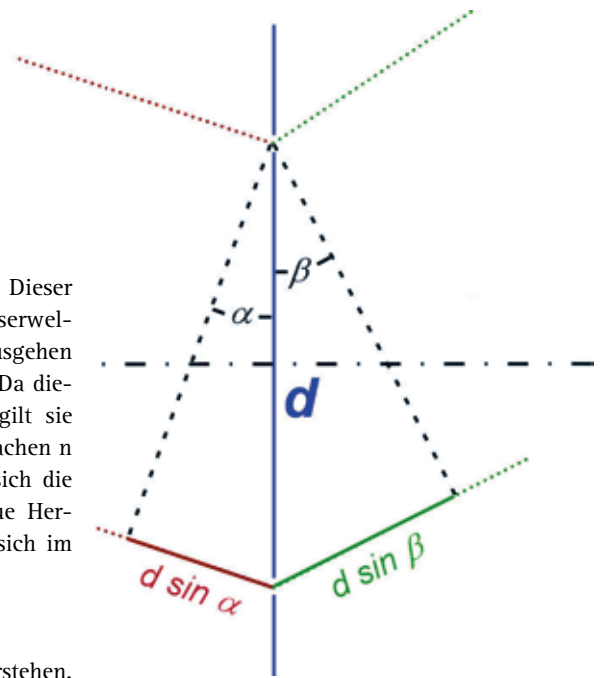
abgeschwächt (sie interferiert). Dieser Prozess ist völlig analog zu Wasserwellen, die von zwei Ursprüngen ausgehen und miteinander wechselwirken. Da diese Interferenz zyklisch erfolgt, gilt sie auch bei dem ganzzahligen Vielfachen n der Wellenlänge. Daraus ergibt sich die berühmte Gittergleichung (genaue Herleitungen der Gleichung finden sich im Internet):

$$n \cdot \lambda = d \cdot (\sin \alpha + \sin \beta)$$

Um diese Gleichung besser zu verstehen, wählen wir das Koordinatensystem so, dass der Einfallswinkel $\alpha = 0$ sei:

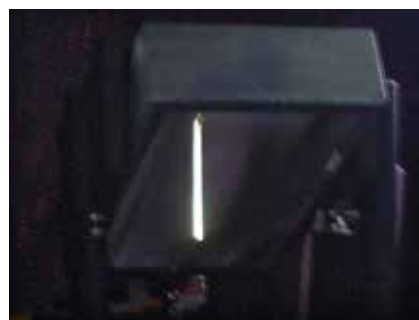
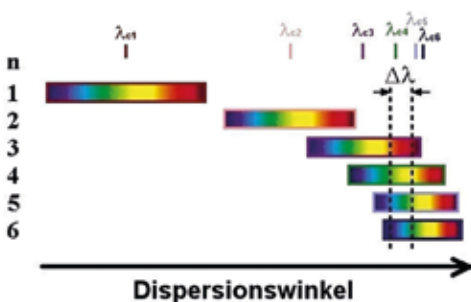
$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin \beta$$

Für jeden Dispersionswinkel β ist das Produkt $n \cdot \lambda$ bei vorgegebenem Gitterlinienabstand d also konstant. Das heißt, dass eine bestimmte Lichtwellenlänge λ innerhalb einer festen Ordnung in genau eine Richtung β gebeugt wird. Bei höheren Ordnungen wächst der Beugungswinkel entsprechend. Bei niedrigen benachbarten Ordnungen (kleine Dispersionswinkel) fällt das nicht auf, da diese dann so weit auseinander liegen, dass die beiden Spektren nicht überlappen. Hier messen die meisten Standard-Spektrografen.



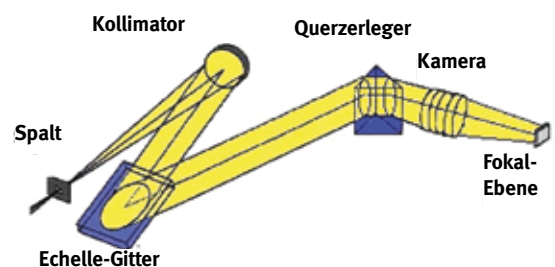
1 Geometrische Interpretation zur Interferenzbedingung eines parallel auf zwei Linien einfallenden Lichtstrahls und dessen Beugung an diesen zwei Linien [1].

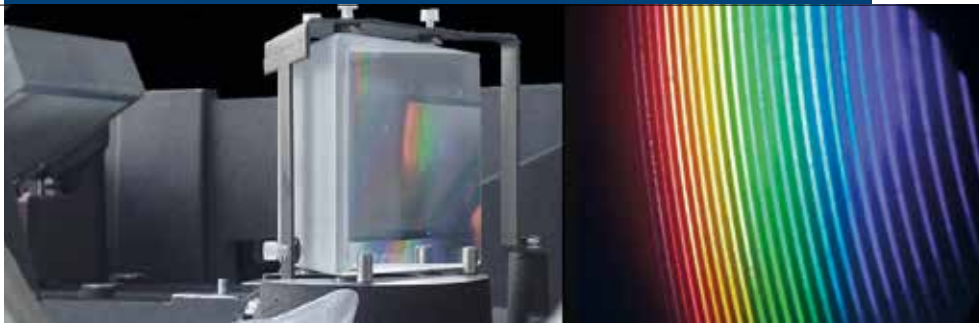
Wechselt man aber zu höheren Dispersionswinkeln, rücken die Spektren der einzelnen Ordnungen weiter und weiter zusammen, bis sie bei hohen n geometrisch überlappen. Ein spezielles Reflexionsgitter, das Echelle (nach Französisch „échelle“: Leiter), kann diese Ordnungen (typischerweise $n > 30$) in hoher Auflösung und hoher Intensität nutzbar machen. Der Echelle-Spektrograf bildet dann in einem schmalen Winkelbereich



3 Rechts: Prinzip eines Echelle-Spektrografen mit Prismen-Cross-Disperser. Das vom Teleskop kommende Licht wird von einem mechanischen Spalt oder einer Faseroptik auf eine einheitliche Länge in Dispersionsrichtung gebracht und von einem Kollimator parallelisiert. Das Echelle-Gitter beugt das Licht in hohe Ordnungen, viele Spektren sind überlagert. Der Cross-Disperser (hier ein Prisma) trennt diese Ordnungen senkrecht zur Dispersionsrichtung des Echellegitters. Die nun zweidimensionale Abbildung aller spektralen Ordnungen wird mit einer Kameraoptik in der Fokalebene abgebildet [1].

2 Links: In höheren Ordnungen n (hier willkürlich gewählt) wächst der Dispersionswinkel β für eine bestimmte Wellenlänge, und die zugehörigen Spektren überlappen sich immer weiter. Ein Echelle-Spektrograf nutzt diese hohen Ordnungen, weshalb die Dispersionsabbildung direkt hinter dem Gitter weiß erscheint [1].





4

Farbige Abbildung vieler Echelle-Spektren unterschiedlicher Ordnung nach dem Durchgang durch einen Prismen-Cross-Disperser [1].

$\Delta\beta$ viele verschiedene Spektralbereiche $\Delta\lambda$ in mehreren hohen Ordnungen n ab. Die geometrische Überlagerung der einzelnen Spektren führt jedoch dazu, dass eine Punktlichtquelle hinter dem Echelle-Gitter als weißer Spektralstreifen abgebildet wird, denn die addierten Einzelspektren in den verschiedenen Ordnungen sind in Dispersionsrichtung gegeneinander verschoben. Die einzelnen Spektren vermischen sich (Abb. 2).

Der „Trick“ eines Echelle-Spektrografen ist nun der so genannte Cross-Disperser (Querzerleger): Ein weiteres Dispersions-

element, beispielsweise ein Prisma, steht im Lichtpfad hinter dem Gitter, mit seiner Dispersionsrichtung senkrecht zur Beugungsrichtung (Abb. 3). Die einzelnen Spektren werden daher geometrisch voneinander getrennt und können über eine Kameraoptik abgebildet werden.

Da die abgebildeten Ordnungen verschiedene Wellenlängenbereiche beinhalten, werden sie am Cross-Disperser unterschiedlich stark gebeugt oder gebrochen und somit geometrisch getrennt. Im Kamerafokus dahinter erscheinen sie dann als viele parallel angeordnete Einzel-

spektren, von denen jedes einen kleinen Wellenlängenbereich abbildet (Abb. 4). Im Verlauf der Datenreduktion kann der Nutzer die Ordnungen miteinander verbinden und erhält schließlich ein ununterbrochenes, hochaufgelöstes Spektrum.

Literaturhinweise:

- [1] Th. Eversberg, K. Vollmann, 2014: „Spectroscopic Instrumentation – Fundamentals and Guidelines for Astronomers“, Springer Praxis Books, Berlin, S. 38, 195, 276, 197, 270, 212