

Speckle-Interferometrie für Amateure

Karl-Ludwig Bath

Letzter Änderung 2010-09-23

Liste der Abbildungen erneuern.

Einführung

Das Abbild eines Sterns im Fernrohr wird infolge der Luftunruhe, des sog. Seeings, bei steigender Vergrößerung nicht einfach unscharf, sondern es löst sich in eine äußerst schnell veränderliche Wolke kleiner heller Flecken (engl. speckles) auf. Dabei entspricht jedes einzelne Speckle dem Airy-Scheibchen des Sterns. Erfreulicherweise gibt es Verfahren, aus den Seeingscheibchen oder Specklewolken die volle Information zu rekonstruieren und damit die theoretische Auflösung des Teleskops zugänglich zu machen. In diesem Artikel geht es um die Speckle-Rekonstruktion von Doppelsternen.

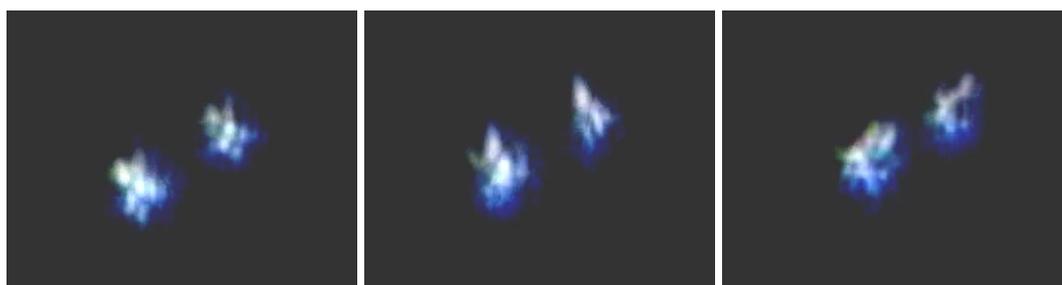


Abb. 1: Specklewolken (Seeingwolken) des weiten Doppelsterns α Crucis ($4''$), Belichtungszeit je $1/250$ Sekunde. Jedes Bild sieht anders aus.

Erste visuelle Untersuchungen zum Thema hat Antoine Émile Henry Labeyrie um 1970 durchgeführt. Inzwischen wurde das Speckle-Interferometrie genannte Verfahren erheblich weiter entwickelt. So kann man die theoretische Auflösung eines Teleskops auch dann erreichen, wenn (a) das Seeing nur mäßig ist oder man (b) mit einem Teleskop größer als etwa 50 cm Öffnung beobachtet, bei dem Bilder mit nur einem einzigen Speckle nicht mehr vorkommen.

Das erste hier zu besprechende Verfahren ist die anschaulich nachvollziehbare beugungsoptische Rekonstruktion eines Einzel- bzw. Doppelsterns. Als zweites soll das mathematische Analogon dazu besprochen werden. Beide gehen auf Labeyrie zurück (s. [1], S. 251). Zunächst also die beugungsoptische Rekonstruktion.

Beugungsoptische Rekonstruktion

Hier soll gezeigt werden, wie man das Airy-Scheibchen eines Einzelsterns aus einem kurzbelichteten Seeingscheibchen (Specklewolke) auf beugungsoptischem Wege rekonstruieren kann. Und wie wir sehen werden, gelingt auf dieselbe Weise auch die Rekonstruktion eines Doppelsterns. Für erste Tests und zum Kennenlernen des Verfahrens wurden zunächst

künstliche, also idealisierte, Specklewolken verwendet.

Künstliche Specklewolke eines Einzelsterns

In der nebenstehenden Abb. 2 wurde mithilfe der Papierplättchen aus einem Locher die Specklewolke eines Einzelsterns simuliert. Diese Specklewolke entspricht der Situation, wie man sie bei einem großen Teleskop erhält oder auch bei einem kleinen Teleskop, aber sehr schlechtem Seeing.

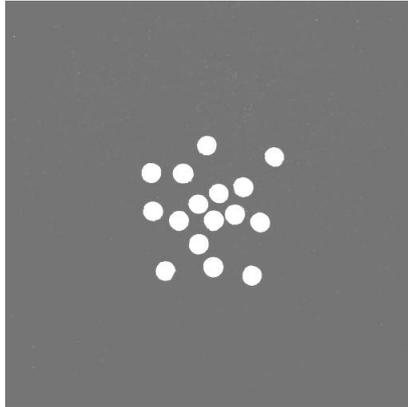


Abb. 2: Künstliche

Specklewolke eines Einzelsterns

Specklewolke eines Einzelsterns

Setzt man das Bild einer Specklewolke wie in Abb. 2 als Diapositiv vor ein Fernrohrobjektiv, so bekommt man bei Beleuchtung mit parallelem Licht in der Bildebene ein Beugungsbild mit einigen Ringen, das dem der einzelnen kleinen Blendenöffnungen (Einzel-Speckle) entspricht, nur mit größerer Helligkeit.

Dieses zunächst überraschende Ergebnis kann man so verstehen: Eine einzelne enge Blende kann man vor dem Fernrohrobjektiv beliebig hin und her schieben, und trotzdem bleibt das Beugungsbild durch die Ablenkung im Objektiv unverändert an seinem Ort stehen. Deshalb kann man auch mehrere solcher Blenden (z. B. das gen. Diapositiv einer Specklewolke) vor das Fernrohr setzen, und immer noch ergibt sich dasselbe Beugungsbild wie bei der Einzelblende, nur eben heller.

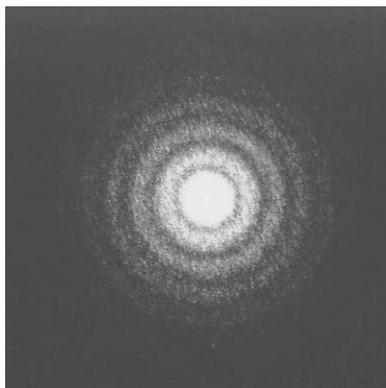


Abb. 3: Beugungsbild einer Einzelstern-Specklewolke

In einem weiteren Schritt setzt man das Beugungsbild aus Abb. 3 als Diapositiv vor das Fernrohr. Dann bekommt man in der Bildebene die nebenstehende Abb. 4, also einen einzelnen kleinen Lichtfleck. Dieses Beugungsbild 2. Ordnung ist das aus der Specklewolke rekonstruierte Airy-Scheibchen des Einzelsterns. Der Schritt von Abb. 3 nach Abb. 4 wird

im nächsten Abschnitt erläutert.

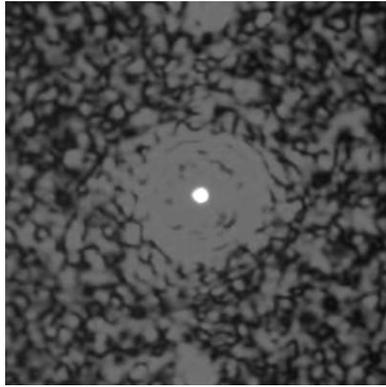


Abb. 4: Beugungsfigur 2. Ordnung

Die Fresnelsche Zonenplatte

In Abb. 5 sehen wir eine sog. Fresnelsche Zonenplatte. Sie ist nicht zu verwechseln mit einer Fresnel-Linse, wie man sie als positive Linse auf Tageslichtprojektoren und als Negativlinse an der Heckscheibe von Kleinbussen finden kann. Fresnel-Linsen bestehen aus schräg abgestuften Ringen und nutzen die Lichtbrechung. Eine Fresnelsche Zonenplatte dagegen besteht aus einer Abfolge dunkler und heller Ringe und nutzt die Lichtbeugung. Auch mit einer Fresnelschen Zonenplatte kann man abbilden. Z. B. lässt sich mit ihr ein aufgeweiteter Laserstrahl auf einen Punkt fokussieren (Abb. 6). Genutzt wird die Fresnelsche Zonenplatte etwa für Abbildungen mit Röntgenstrahlen. Röntgenstrahlen können nicht wie sichtbares Licht gebrochen werden, aber die Absorption und die Beugung funktionieren immer noch.

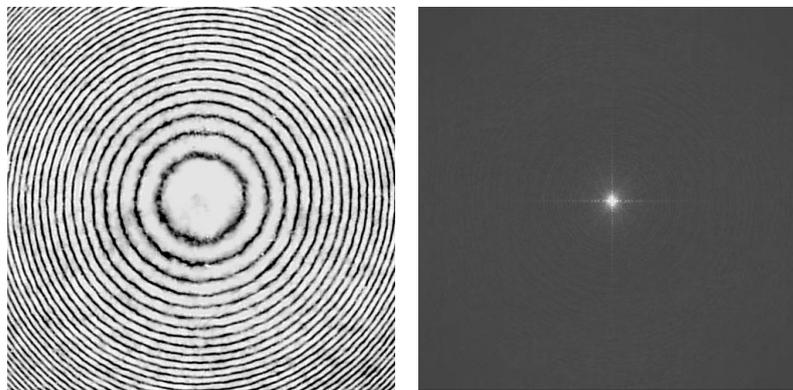


Abb. 5 und 6: Fresnelsche Zonenplatte und eine mit ihr erzeugte Abbildung

Nun entspricht die übliche Beugungsfigur eines Sterns (Abb. 3) genau einer Fresnelschen Zonenplatte, weshalb man auch mit dem Diapositiv der Beugungsfigur aus Abb. 3 ein Bild erzeugen kann (Abb. 4). Das Ergebnis: Man kann das Seeing mit rein beugungsoptischen Mitteln überlisten und aus einer Specklewolke (Abb. 2) das Airy-Scheibchen des Sterns (Abb. 4) rekonstruieren!

Künstliche Specklewolken von Doppelsternen

Was passiert nun, wenn man das beschriebene Verfahren auf die Specklewolke eines Doppelsterns anwendet?

Doppelstern-Specklewolken Beugungsbilder 1. Ordnung Beugungsbilder 2. Ordnung

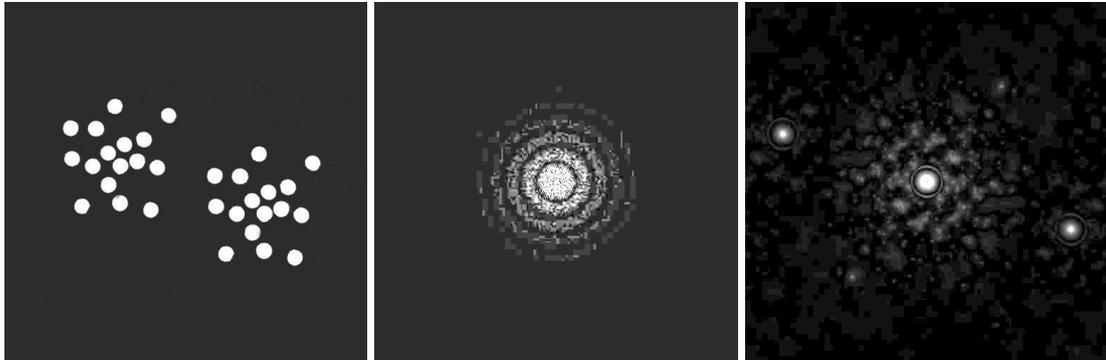


Abb. 7a bis 7c – weiter Doppelstern, ähnlich wie α Crucis im obigen Video

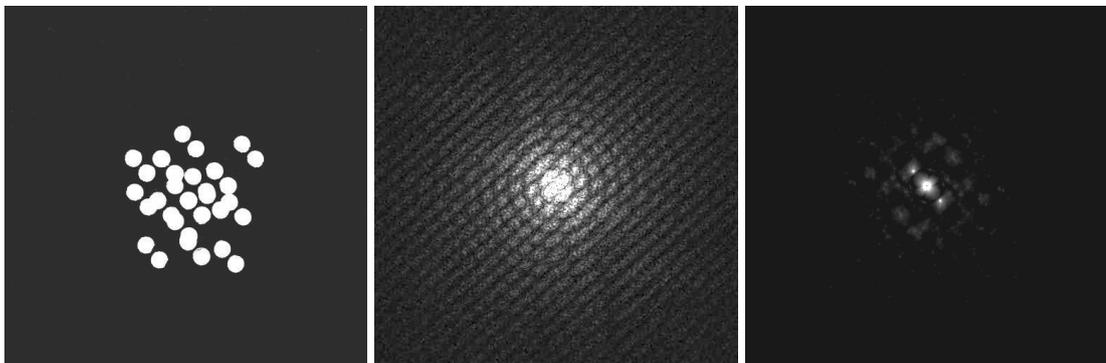


Abb. 8a bis 8c – sehr enger Doppelstern

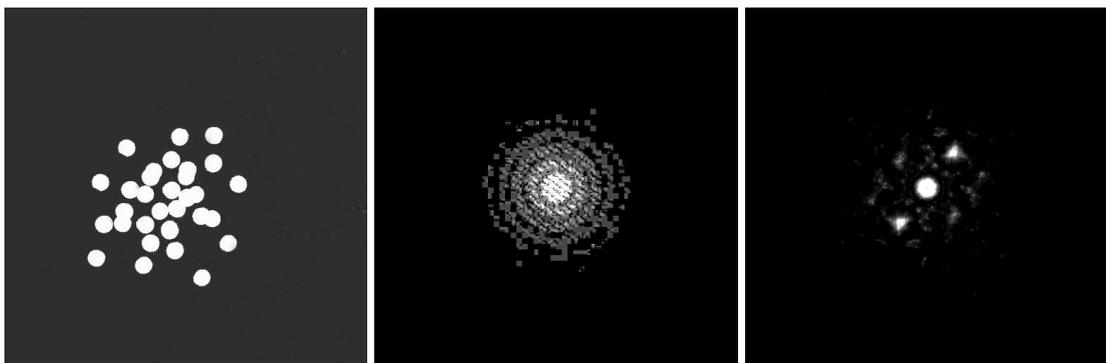


Abb. 9a bis 9c – enger Doppelstern

Jeweils die Abbildungen a, b und c entsprechen den obigen Abb. 2 bis 4.

Dem Beugungsbild 1. Ordnung ist beim Doppelstern ein Muster äquidistanter Streifen überlagert, die senkrecht zur Verbindungslinie der Doppelsternkomponenten verlaufen. Bei einem weiten Doppelstern liegen die Streifen sehr eng beieinander, bei einem engen liegen sie weiter auseinander. Die Streifen entstehen dadurch, dass die je zwei Doppelsternkomponenten wie ein optischer Doppelspalt wirken.

Der Schritt vom Beugungsbild 1. zu dem 2. Ordnung: Das Streifenmuster im Beugungsbild 1. Ordnung kann man als optisches Beugungsgitter ansehen, das ein Spektrum 0. Ordnung in der Mitte erzeugt und rechts und links davon Spektren +1. und -1. Ordnung. Die Verbindungslinie der Punkte liefert den Positionswinkel des Doppelsterns mit einer Unsicherheit von 180° . Der Abstand der Doppelsternkomponenten findet sich als Abstand der äußeren Punkte von der Mitte wieder. In der Praxis wird man den Abstand der äußeren Punkte voneinander messen und halbieren. Das Helligkeitsverhältnis der beiden Komponenten steckt in den Helligkeiten der Punkte.

Jetzt fehlt noch die Information darüber, welche der beiden Doppelsternkomponenten die hellere ist. Mit einigem Glück ist das unproblematisch, weil man das oftmals unmittelbar sehen kann.

Zusammenfassung

Bei mäßigem Seeing oder bei großen Teleskopen erhält man anstatt einer Sternabbildung Specklewolken. Aus den Specklewolken lassen sich mit rein beugungsoptischen Mitteln Positionswinkel und Abstand des Doppelsterns bestimmen. – Nebenbei: Abstand und Positionswinkel stecken natürlich schon im Beugungsbild 1. Ordnung, nur sind sie dort noch verschlüsselt.

Rekonstruktion mit Fourier-Transformationen

Wie zu erwarten lässt sich das beschriebene beugungsoptische Rekonstruktionsverfahren mathematisch nachbilden. Dort heißt das Beugungsbild 1. Ordnung die 1. Fourier-Transformierte (FFT1, FFT steht für Fast Fourier Transform). Das Beugungsbild 2. Ordnung heißt die 2. Fourier-Transformierte (FFT2) oder Autokorrelation.

Die Autokorrelation eines Doppelsterns kann man sich bildlich so vorstellen: Man legt zwei identische Lochmasken wie in Abb. 7a, 8a oder 9a übereinander und misst die durchgelassene Lichtmenge in Abhängigkeit von der gegenseitigen Verschiebung. Natürlich wird bei exakter Passung die maximale Helligkeit auftreten. Daneben werden immer nur zufällig ein paar Löcher fluchten und die durchgelassene Lichtmenge bleibt gering. Bei einem Doppelstern mit den Komponenten A und B gibt es 3 Positionen für größere Helligkeit:

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Exakte Passung | Summe beider Helligkeiten |
| 2. Stern A fällt auf Stern B | Helligkeit des schwächeren Sterns |
| 3. Stern B fällt auf Stern A | Helligkeit des schwächeren Sterns |

Ein Doppelstern erscheint in der Autokorrelation (FFT2) also 3-fach und ohne Unterscheidungsmöglichkeit von „links“ und „rechts“. Die Sternpünktchen sind so klein wie die Speckles.

Eine Laune der Mathematik sorgt dafür, dass die Rechnung schon bei 64×64 Bildpunkten schneller geht, wenn man zweimal die Fouriertransformation berechnet anstatt das beschriebene Verschieben nachzubilden.

Die „Fast Fourier Transform“ FFT ist eine für schnelle Berechnung optimierte Fourier-Transformation. Dabei müssen die Bilder quadratisch sein und die Kantenlänge aus einer Zweierpotenz von Pixeln bestehen, z. B. 128×128 Pixel. Die FFT wird von verschiedenen Programmen zur Verfügung gestellt, etwa von Iris [6], Reduc [7] oder AIP (Astronomical Image Processing) [8].

Die Aufnahmen

Die Specklewolken des zu untersuchenden Doppelsterns werden als Video aufgezeichnet, etwa mit dem freien Programm VirtualDub. Die Belichtungszeit ist $1/250$ s oder kürzer. Die erforderliche Brennweite richtet sich nach der theoretischen Auflösung des Teleskops, also seiner Öffnung, und dem sog. Nyquist-Kriterium. Danach soll das Airy-Scheibchen (ein Speckle) 2 bis 3 Pixel des CCD-Sensors überdecken. Bei 50 cm Öffnung und $10\text{-}\mu\text{m}$ -Pixeln führt das zu einer effektiven Brennweite von ca. 15 Metern. Mit der Philips Webcam SPC 900NC kann man mit ihren maximalen 90 Bildern pro Sekunde sogar eine schöne Zeitlupe anfertigen.

Zwei Arten von Spektren

Bei einer so langen Brennweite werden die Airy-Scheibchen bereits bei 20° Zenitdistanz durch die atmosphärische Dispersion zu Spektren auseinander gezogen (Abb. 10). Um dem entgegenzuwirken, kann man (a) seinen Beobachtungsplan so einrichten, dass man nur in Zenit- oder wenigstens Meridiannähe beobachtet. (b) kann man das Spektrum mit einem Interferenz- oder wenigsten Rotfilter einengen. Das effektivste, wenn auch umständlichste Verfahren ist (c) das Kompensieren der atmosphärischen Dispersion mit einem sog. Risley-Prisma. Das sog. Risley-Prisma besteht aus zwei gegeneinander verdrehbaren Prismen, mit denen man die Stärke des resultierenden Prismas auf das benötigte Maß einstellen kann [9].

Zusätzlich gibt es ein weiteres Spektrum. Nach dem Kompensieren des atmosphärischen Spektrums sieht man im Zentrum der Specklewolke die erwünschten Airy-Scheibchen. Außen herum aber gibt es einen Kranz radial nach außen gerichteter Spektren, die die spätere Analyse ebenfalls beeinträchtigen (Abb. 11). Hier hilft nur das zusätzliche Einengen des Spektrums.

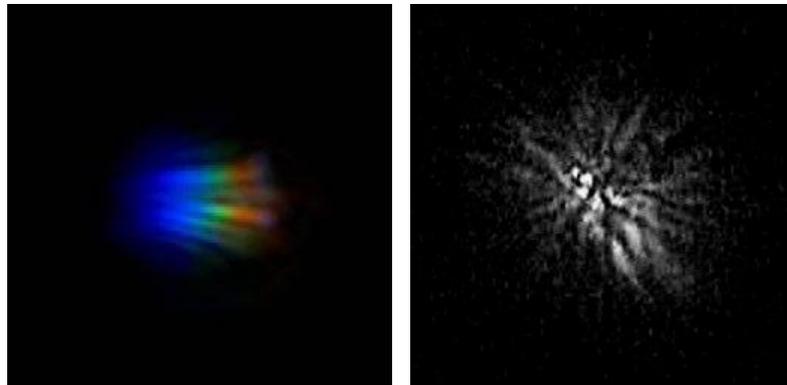


Abb. 10: Atmosphärische Dispersion, Airy-Scheibchen auseinandergezogen
Abb. 11: Radiale Spektren bei kompensiertem atmosphärischen Spektrum,
hier eine Schwarz-Weiß-Aufnahme

Positionswinkelfehler und Driftaufnahme

Die Bildkanten einer Aufnahme sind in der Regel nicht genau genug parallel zu den Himmelskoordinaten ausgerichtet. Um diesen Winkelfehler zu bestimmen, lässt man einen helleren Stern über das Bildfeld wandern, wobei der Stern für eine bessere Statistik an den Endpunkten eine Weile stehen bleiben sollte (Abb. 12). Die Abbildung stammt aus dem freien Programm Reduc [7]. Reduc berechnet den Winkelfehler und verwendet dazu jeden einzelnen Messpunkt, auch wenn sie übereinander liegen.

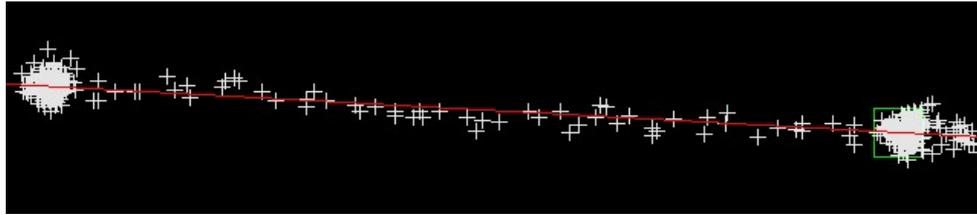


Abb. 12: Strichspuraufnahme zum Korrigieren des Orientierungsfehlers

Maßstabsbestimmung

Für die Abstandsmessung benötigt man den Bildmaßstab in Bogensekunden/Pixel. Am einfachsten erhält man den anhand zweier Sterne eines offenen Sternhaufens oder mithilfe eines weiten Doppelsterns. In beiden Fällen ist der Abstand aus der Literatur bekannt.

Analyseverfahren

Für die Analyse bieten sich zwei Verfahren an, die je nach Seeing und Teleskopöffnung eingesetzt werden können.

1. Lucky Imaging

Bei Teleskopen unter 50 cm Öffnung und akzeptablem Seeing finden sich im Videostrom vereinzelt gute Bilder (vgl. Abb. 13), die sich auch ohne Speckle-Verfahren nutzen lassen. Da das Seeing den Abstand und auch den Positionswinkel beeinflusst, taugt ein solches Einzelbild nur zur Demonstration, und für ein brauchbares Ergebnis müssen viele Bilder gemittelt werden. Für das Ausschuchen der besten Bilder und das Mitteln („Lucky Imaging“) gibt es freie Software wie Giotto, Registax, AviStack oder Reduc. Aus dem Ergebnis werden dann der Positionswinkel der Doppelsternkomponenten und ihr Abstand bestimmt. AIP hat freundlicherweise eine Fangfunktion, mit der ein kleiner Kreis per Mausklick automatisch auf den angeklickten Stern zentriert wird. Hat man beide Sterne erfasst, werden Positionswinkel und Abstand ausgegeben, der Abstand auf 0,1 Pixel genau. Ist auch der kleinste der Fangkreis noch zu groß, muss man das Bild vorher durch Resampling vergrößern, z. B. mit VirtualDub.

Beispiel: Gamma Centauri, 0.6"-Doppelstern, Mai 2006
 In Abb. 13 ist das beste Bild eines 300 Bilder langen Videostroms (IAS-Sternwarte Hakos, C14) wiedergegeben. Bei den schlechtesten Bildern der Aufzeichnung war der Doppelstern völlig verschwunden.

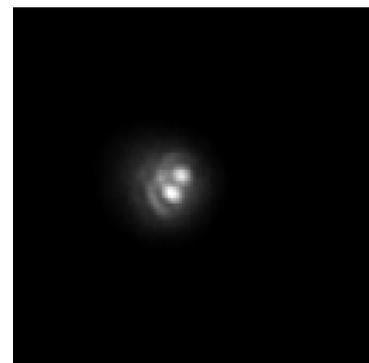


Abb. 13: 0.6"-Doppelstern, gutes Einzelbild

2. Speckle-Interferometrie

Bei großer Teleskopöffnung oder weniger gutem Seeing erhält man immer Seeingscheibchen (Specklewolken), ohne eine Chance auf eine Einzelauswertung. In diesem Fall wird man die oben besprochene Speckle-Analyse anwenden. Die Ergebnisse hängen erstaunlicherweise nur wenig von der Qualität der Specklewolken ab, so dass ein Sortieren oftmals unnötig ist. Man erzeugt also aus 30 oder auch wesentlich mehr Specklewolken die Autokorrelation (FFT²), was Reduc mit einem einzigen Mausklick erle-

digt. Aus der Autokorrelation werden dann wie beschrieben Positionswinkel und Abstand bestimmt. – Wesentlich bei dem Verfahren der Speckle-Interferometrie ist, dass die Fourier-Transformierten FFT1 gemittelt werden und nicht etwa die ursprünglichen Specklewolken.

Beispiele einer Doppelstern-Rekonstruktion

1. Der weite Doppelstern α Crucis (4'')

Die Sequenz von α Crucis wurde im Mai 2007 auf der IAS-Sternwarte Hakos/Namibia am 50-cm-Cassegrain-Teleskop gewonnen. Die Brennweite wurde mit einer Barlowlinse angepasst, Sensor war eine Video-Kamera (Sony-Chip EXView 255). Eine Webcam hätte ebenso zum Ziel geführt. Um den Stern in das kleine 30''-Feld zu bekommen, wurde zusätzlich ein „Langsucher“ mit 50facher Vergrößerung und beleuchtetem Fadenkreuzokular verwendet.



Abb. 14 bis 16: Einzelbilder aus einem Videostrom

Bearbeitung mit dem Programm Iris:

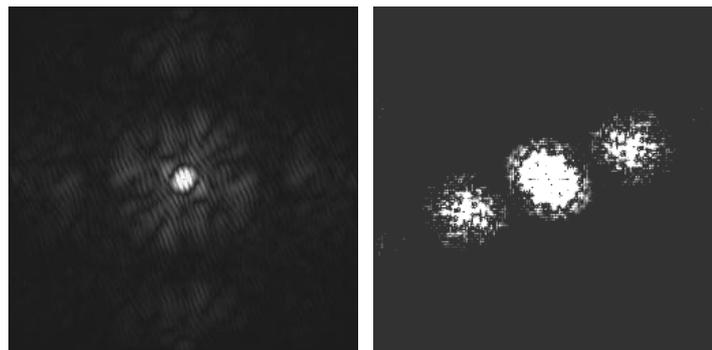


Abb. 17: Fourier-Transformierte FFT1 eines Einzelbildes, beachte die engen Streifen.

Abb. 18: Autokorrelation: FFT2 = Fourier-Transformierte von FFT1

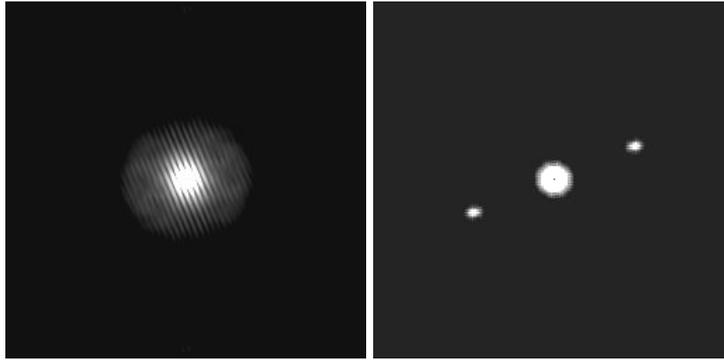


Abb. 19: Mittel von 99 Fourier-Transformierten FFT1

Abb. 20: Die Fourier-Transformierte FFT2 von Abb. 19

2. Der enge Doppelstern 19026-2953 BLM 4Aa (0.24'')

Die Sequenz wurde im Juli 2010 ebenfalls mit dem 50-cm-Cassegrain-Teleskop der IAS-Sternwarte gewonnen.

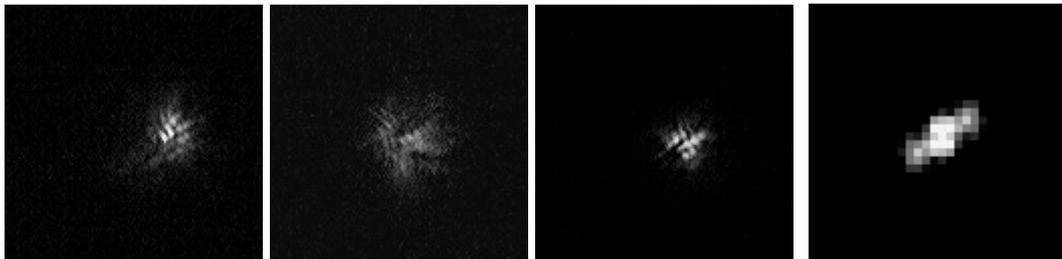


Abb. 21 bis 24: Einzelbilder aus einem Videostrom, Autokorrelation (Reduc)

Aus den Autokorrelationen Abb. 20 bzw. 24 (FFT2) lassen sich nun die Positionswinkel und die Abstände der betreffenden Doppelsterne ermitteln.

Zum Schluss

Hier wurde geschildert, wie weit man mit frei zugänglicher Software Speckle-Interferometrie betreiben kann. Die professionelle Astronomie verwendet heute wesentlich aufwändigere Verfahren, mit denen die vollständige Rekonstruktion von Doppelsternen gelingt, und die sogar auf flächenhafte Objekte angewendet werden kann. Sie wird in dem anschließenden Artikel von Michael Hirsch behandelt.

Hier ging es darum zu zeigen, dass die Speckle-Interferometrie in ihrer einfacheren Form auch jetzt schon für Amateure zugänglich ist, und interessierte Amateure zu eigenen Versuchen anzuregen.

Weitere Hinweise

- [1] M. Reinecke, H. Ruder: Sterne und Weltraum 16, 246 [7-8/1977].
- [2] L. Lohmann, M. Reinecke, H. Ruder, G. Weigelt: SuW 16, 284 [9/1977].
- [3] H. A. McAlister: Sky and Telescope, 346 [5/1977].
- [4] M. Haas: SuW 30, 12 [1/1991].
- [5] M. Haas: SuW 30, 89 [2/1991].

- [6] Christian Buil, Iris, vielseitiges Astroprogramm, u. a. FFT
www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm
- [7] Florent Losse: Reduc, Programm für Doppelsterne, Lucky Imaging & Autokorrelation. www.astrosurf.com/hfosaf/
- [8] AIP: astro-shop Hamburg. www.astro-shop.com/Katalog/Info/3033c0.html
- [9] Risley-Prisma: www.astro-electronic.de/wedge.htm und
www.xs4all.nl/~ppulles/mainframe.html, www.astrosystems.nl
- [10] IAS-Sternwarte Hakos/Namibia, www.ias-observatory.org

* * * * *