

Magisterarbeit

Asteroseismologie von Praesepe-Sternen mit dem Satelliten MOST

Verfasser

Markus Endl, Bakk. rer. nat.

angestrebter akademischer Grad:

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2010

Studienkennzahl laut Studienblatt: 066861

Studienrichtung laut Studienblatt: Astronomie

Betreuer: Univ. Prof. Dr. Michel Breger

Inhaltsverzeichnis

1. Mission-Overview	5
2. Vorteile eines Satelliten gegenüber erdgebundenen Teleskopen.....	6
2.1. Präzise Detektion.....	6
2.2. Durchgehende Beobachtungen.....	8
2.2.1. Beobachtungen in der Nähe der Erdpole	9
2.2.2. Globale Beobachtungsnetzwerke.....	9
3. Orbit.....	10
4. MOST-System Design und Technik	14
4.1. Satellite-Bus.....	15
4.1.1. Structure	15
4.1.2. Thermal Control.....	15
4.1.3. Power	16
4.1.4. Attitude Control	17
4.1.5. Telemetry & Command	18
4.1.6. On-Board-Computer	20
4.2. Satellite-Payload	20
4.2.1. Instrument.....	20
4.2.1.1. Direct- und Fabry-Imaging.....	22
4.2.1.2. CCD-Detektor.....	25
4.2.1.3. Filter	26
4.2.2. Payload Data Prozessors	27
4.3. Ground-Stations.....	28
5. Delta Scuti Sterne.....	30
5.1. Wieso werden Delta Scuti Sterne beobachtet?	30
5.2. Kurzgeschichte	31
5.3. Definition und Eigenschaften von Delta Scuti Sternen	32
5.4. Pulsation von Delta Scuti Variablen	35
5.4.1. Mathematische Beschreibung.....	35
5.4.2. Anregungsmechanismus der Pulsation	37
6. Frequenzanalyse	38
6.1. Die Fourier-Transformation	39
6.1.1. Allgemeine Fourier-Transformation.....	39
6.1.2. Diskrete Fourier-Transformation	40

6.2.	Harmonische Analyse durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate	41
6.2.1.	Berechnung einer Frequenz	42
6.2.2.	Berechnung von mehreren Frequenzen (Multifrequenzen)	43
7.	Die Software Period04	44
7.1.	Allgemeines	44
7.2.	Ein Tutorial über die Funktionen von Period04	44
8.	Der Praesepe Cluster (M44, NGC2632)	50
8.1.	Ein bisschen Geschichte	50
8.2.	Aktuelle Forschung	50
9.	Vorstellung der Beobachtungsobjekte	54
9.1.	EP Cancr.	54
9.2.	BT Cancr.	56
9.3.	HD 73872	59
9.4.	BS Cancr.	60
10.	Datenreduktion	62
11.	Eine Übersicht über den Datensatz	65
11.1.	Datensatz 2008	65
11.2.	Datensatz 2009	68
12.	Vergleichssterne	70
12.1.	Vergleichssterne 2008	70
12.2.	Vergleichssterne 2009	75
13.	Ansätze zur Eliminierung der Orbitalfrequenzen	77
13.1.	Simple Prewhitening	77
13.2.	Abziehen der Lichtkurve von einem Vergleichsstern	78
13.3.	Berücksichtigung von Amplituden und Phasenvariationen	80
13.4.	Resümee und Empfehlung für MOST-Datensätze	80
14.	Darstellung der Ergebnisse	83
14.1.	EP Cnc	83
14.1.1.	EP Cnc, Datensatz 2008	83
14.1.2.	EP Cnc, Datensatz 2009	87
14.1.3.	EP Cnc-Kombination der Datensätze 2008/2009	90
14.2.	BT Cnc	93
14.3.	HD 73872	98
14.4.	BS Cnc	103
14.4.1.	BS Cnc, Datensatz 2008	103

14.4.2.	BS Cnc, Datensatz 2009.....	110
14.4.3.	Vergleich und Kombination der Datensätze BS Cnc 2008/2009.....	112
15.	Zusammenfassung der Ergebnisse	122
15.1.	Vergleich EP Cnc	122
15.2.	Vergleich BT Cnc	123
15.3.	Vergleich HD 73872	124
15.4.	Vergleich BS Cnc	124
Literaturverzeichnis:		126
Tabellenverzeichnis		133
Abbildungsverzeichnis		134
ANHANG		136
	Abstract	136
	Kurzlebenslauf.....	137

1. Mission-Overview

MOST, die Abkürzung für Microvariability and Oscillations of STars, ist die erste Weltraumteleskop-Mission Kanadas. 1997 wurde die Idee eines kanadischen kostengünstigen Mikrosatelliten von K. Carroll, J. Matthews, S. Rucinski, A. F. J. Moffat und D. Sasselov aufgebracht und bei der kanadischen Weltraumbehörde CSA (Canadian Space Agency) als Projekt eingereicht. Bereits ein Jahr später, 1998, wurde unter der Schirmherrschaft von CSA mit zusätzlicher Unterstützung von Ontario Research and Development Challenge Fund, The Natural Sciences and Engineering Research Council, dem Ontario Center for Research in Earth and Space Technology, der University of Toronto, der University of British Columbia und der Universität Wien mit der Planung und Konstruktion von MOST begonnen (Walker et al. 2003).

MOST sollte die Vorzüge eines leichten, kompakten und somit kostengünstigen Satelliten mit langfristigen Einsatz und hochpräzisen photometrischen Messungen, ermöglicht durch sofort verfügbare und kommerzielle Technologien, vereinen. Die Konstruktion trägt die Philosophie, einen größeren finanziellen Output bei mehreren kostengünstigeren Missionen, als bei einer einzigen und erheblich teureren Mission, zu erreichen. Wurden Mikrosatelliten seit den 60ern als Testobjekte für Kommunikation und technischen Komponenten verwendet, erfolgte mit MOST ein Umdenken. Der Satellit sollte nicht mehr das Experiment selbst sein, sondern aktiv Wissenschaft durch Beobachtungen betreiben (Zee, Grocott & Matthews 2002).

Die gesamte Konstruktion wurde für zwei Missionsziele ausgelegt. Zum Einen zur photometrischen Detektion von Helligkeitsschwankungen von Sternen im Bereich bis 1 ppm (parts per Million), sogenannte Variable Sterne zum Zwecke der Asteroseismologie. Zum Anderen zur Entdeckung von Exoplaneten durch Helligkeitsschwankungen in der Intensität des Sternes, verursacht durch Bedeckungen. Dies wurde durch eine kleine 15 cm - Apertur und eine neue, für Mikrosatelliten revolutionäre, hochpräzise Lageregelung zwecks Punkt-Visierung, ermöglicht (Grocott, Zee & Matthews 2003).

Am 30. Juni 2003 erfolgte schließlich nach fünfjähriger Entwicklungszeit der Start mittels eines Eurocket-Launchers vom Plesetsk Cosmodrome in Rußland (Walker et al. 2003). Der geplante Start im Rahmen des Radarsat-2-Programms wurde abgesagt, da sich die Mission sonst bis 2005 verzögert hätte (Matthews 2001).

2. Vorteile eines Satelliten gegenüber erdgebundenen Teleskopen

Um die Vorteile von satellitengestützter Datengewinnung gegenüber erdgebundenen Teleskopen zu erkennen, müssen die Voraussetzungen für Asteroseismologie und der Suche nach Exoplaneten erläutert werden. Diese wären (Grocott, Zee & Matthews 2003):

- Präzise Detektion von photometrischen Signalen im ppm-Bereich
- Möglichst durchgehende Beobachtungen zur Vermeidung von Lücken

2.1. Präzise Detektion

Einer präzisen Detektion von photometrischen Signalen im ppm-Bereich steht bei erdgebundenen Observatorien die turbulente Atmosphäre entgegen (Grocott, Zee & Matthews 2003). Die Atmosphäre besitzt drei turbulente Schichten. Die oberflächennahe Schicht, primär hervorgerufen durch topografische Unebenheiten, die Wetterschicht bei ca. 4.5 km (variabel nach Wolkentyp/Wasserdampf, Winde) und der oberste Teil der Tropopause bei ca. 10 km. Diese Turbulenzen werden durch temperatur-, dichte- und druckinduzierte Konvektions- und Scherströmungen hervorgerufen.

Generell liegen alle drei turbulenten Schichten in der Troposphäre, eine konvektive Schicht, die sich bis in eine Höhe von 10 km über der Erdoberfläche erstreckt. Die Erdoberfläche bildet eine Wärmequelle, woraus ein vertikaler Temperaturgradient unter Annahme einer adiabatischen Zustandsänderung in einer hydrostatisch geschichteten Atmosphäre, induziert wird. Dieser Temperaturgradient ist jedoch nicht homogen, da Abweichungen durch Freisetzung latenter Wärme (Spurengase wie H_2O) und großräumigen Bewegungsvorgängen, den Gradienten beeinflussen.

Turbulenz liegt somit in der gesamten Troposphäre vor, tritt jedoch verstärkt an den genannten drei turbulenten Schichten auf. Ist die oberflächennahe Schicht, als auch die Wetterschicht leicht verständlich, muss auf die oberste Turbulenzschicht in bei 10km etwas näher eingegangen werden. In dieser Höhe enden die Konvektionsvorgänge, der Temperaturverlauf erfolgt nicht mehr adiabatisch. Statt Konvektion herrschen hier Strahlungsprozesse vor. Dies bedeutet wiederum, dass die Abnahme der Temperatur langsamer erfolgt bzw. die Temperatur nahezu konstant wird. Somit ist die Atmosphäre hier stabil geschichtet (Bergmann et al. 2001). Im Grunde genommen kann dies als Umkehrpunkt von aufsteigenden zu absinkenden Konvektionsströmungen anschaulich

gemacht werden. Konvektionszellen steigen auf, geben an der Grenzschicht bei 10 km Wärme ans Umgebungsmedium ab und sinken danach wieder in Richtung Oberfläche.

Die genannte Troposphäre bildet zwar nur einen kleinen Teil der insgesamt ca. 640 km hohen Atmosphäre, jedoch werden hier, wie bereits mehrmals gesagt die größten und signifikanten Fehler induziert.

Bezogen auf einen eventuellen Teleskopstandort kann die oberflächennahe Schicht weitestgehend durch entsprechende Wahl des Ortes umgangen werden. Dennoch bleiben die turbulenten Schichten bei 4.5 km und 10 km als Fehlerquelle erhalten.

Doch was genau bewirkt nun eigentlich diese Turbulenz, die es uns so schwierig macht, dadurch entstandene Fehler zu eliminieren? Turbulenz führt zu Phasenfluktuationen der ankommenden Wellenfront des Beobachtungsobjektes und somit zur örtlichen und zeitlichen Verringerung der Kohärenz. Dies wiederum führt je nach Teleskopgröße, Wellenlänge und Beobachtungsmethode zu Effekten wie Agitation (Bildbewegung), Speckles, Verminderung des Seeings und Szintillation (Walker 1987 (b)). Als Hauptfehlerquelle ist hier natürlich die Szintillation zu nennen (Grocott, Zee & Matthews 2003), durch Turbulenzzellen verursachte fokussierende und defokussierende Eigenschaften, welche durch unterschiedliche Ausleuchtung der Teleskopfläche zu Helligkeitsveränderungen des beobachteten Sterns führt. Dieser Fehler überlagert sich damit mit den Helligkeitsveränderungen eines Veränderlichen Sternes, als auch mit Lichtkurven verursacht durch Exoplaneten. Da Szintillation deutlich schneller vonstatten geht, als die Helligkeitsveränderung des Beobachtungsobjektes, tritt dieses als Noise im Frequenzspektrum auf.

Der Szintillationsfehler lässt sich mit folgender Formel (Young 1967) abschätzen:

$$\sigma = 0.09 D^{-2/3} X^{1.8} e^{-h/h_0} \Delta t^{-0.5}$$

D...Durchmesser Teleskop

X...Luftmasse

h/h_0 ...Höhe Standort normiert auf $h_0=8000$ m

Δt ...Integrationszeit

Typische Werte für z.B. die APTs in Arizona bei Werten für $D=80$ cm, $X=1.5$, $h=1670$ m, $\Delta t=15$ s ergeben einen Fehler von $\sigma=0.0021$ mag, also 2.1 mmag für eine einzelne Aufnahme. Dies stellt somit eine immense Fehlerquelle für Messungen im mmag- und besonders im ppm-Bereich dar.

Ein weiteres Problem bzw. Erschwernis stellt die Durchlässigkeit der Atmosphäre in Abhängigkeit der Wellenlänge dar. Es handelt sich dabei um die Effekte der Streuung und Absorption. Folgendes Diagramm soll dabei als Illustration gelten:

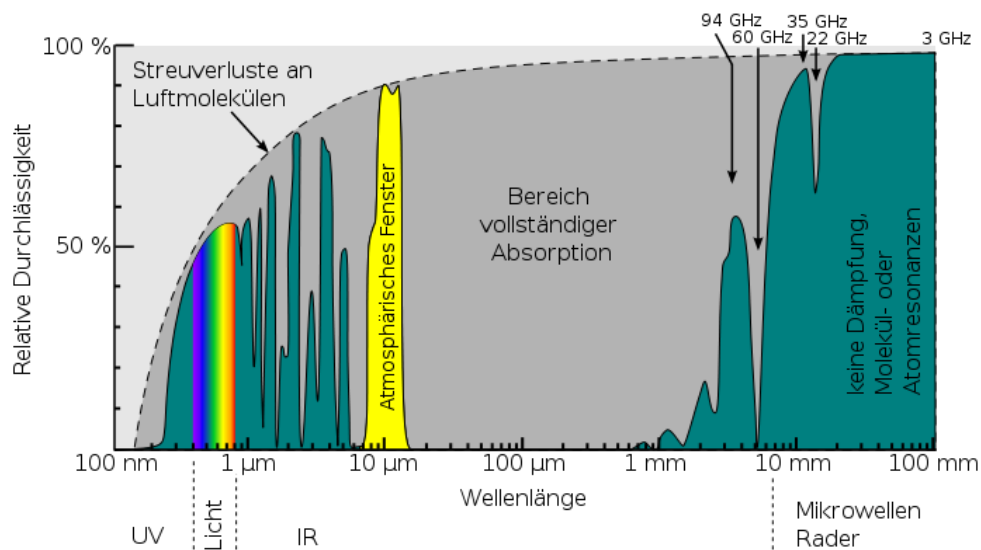


Abbildung 1: Atmosphärisches Fenster (Wissensmagazin 2009)

Im Diagramm ist die relative Durchlässigkeit der Atmosphäre gegen die Wellenlänge geplottet. Gegenüber der herkömmlichen Durchlässigkeit aufgrund Absorption werden hier noch die Streuverluste an Luftmolekülen berücksichtigt. Dabei ist ersichtlich, dass im optischen Bereich (MOST-Filter) bereits ca. 50% der Photonenintensität als Streuverlust gelten, im Weiteren rotes Licht eine andere Intensitäts-Abhängigkeit zeigt, als blaues Licht. Als Beispiel für einen Absorber wäre Ozon zu nennen, welches die Atmosphäre im UV weitestgehend undurchlässig macht (Walker 1987 (a)).

2.2. Durchgehende Beobachtungen

Durchgehende Beobachtungen sind von der Erde, verursacht durch die Erdrotation und den Tag-/Nachtvariationen, quasi unmöglich. Es gibt jedoch zwei Möglichkeiten um möglichst kontinuierliche Beobachtungen, länger als ca. einen halben Tag eines üblichen Teleskopstandortes, über einen gewissen Zeitraum zu ermöglichen. Diese wären, nebst der Voraussetzung idealster Wetterbedingungen (Grocott, Zee & Matthews 2003):

- Beobachtungen in der Nähe der Erdpole
- Globale Beobachtungsnetzwerke

2.2.1. Beobachtungen in der Nähe der Erdpole

Diese Beobachtungen können bis zu sechs Monate während den arktischen Nächten durchgeführt werden. Als immense Nachteile sind die hohen Kosten eines Observatoriums in diesen Gebieten, sowie die schlechten photometrischen Bedingungen, anzuführen.

2.2.2. Globale Beobachtungsnetzwerke

Ziel eines Beobachtungsnetzwerkes ist die Einbeziehung möglichst vieler Observatorien über die ganze Welt, sodass immer ein Teilnehmer das Objekt während einer Nacht beobachten kann. Beispiele solcher Netzwerke sind das DSN (Delta Scuti Network) oder GONG (Global Oscillation Network Group).

Allerdings werden globale Beobachtungsnetzwerke immer durch den Szintillationsfehler limitiert. Sogar, wenn fünf 4m-Teleskope, nach Oszillationen in einem hellen Stern ($V=3$) suchen würden, würden diese bereits am 4ppm-Signal scheitern. Sogar die Detektion eines großen Exoplaneten ist damit nahezu unmöglich (Grocott, Zee & Matthews 2003).

Um nun die unter Kap. 2.1. und 2.2. genannten Nachteile eines erdgebundenen Observatoriums zu vermeiden, liegt es somit nahe, die Atmosphäre vernachlässigend, in einen Weltraumorbit auszuweichen.

3. Orbit

Als Orbit für MOST wurde ein sogenannter „dawn-dusk sun-synchronous orbit“ gewählt, einfach ausgedrückt, ein sonnensynchroner Orbit (SSO) entlang der Tag-Nacht-Grenze der Erde. Die Vorteile dieses Orbits liegen auf der Hand. Zum Einen werden dadurch zu gleichen Ortszeiten gleiche Gebiete überflogen, der Winkel zwischen Sonne-Erde-Satellit bleibt somit konstant. Zum Anderen werden, durch den gleichen Winkel Erde-Sonne-Satellit, winkelbedingte Reflexionsveränderungen ausgeschaltet und die Daten der einzelnen Orbitumläufe können untereinander verglichen werden (Walker et al. 2003).

Die gewählte Inklination von 98.72° hat den Vorteil, dass eine induzierte Präzessionsbewegung die Orientierung der Bahn zur Sonne gleich hält (Walker et al. 2003). Diese beträgt also einen Tag pro Jahr. Physikalisch gesehen ist dies bei Toleranzwinkeln zwischen 96° und 99° möglich, da bei diesen Winkeln die Präzession eine genügende Größe aufweist. 98.72° beschreiben einen um 8.72° gegen eine polare Bahn geneigten Orbit gegen die Rotation der Erde. Dieser Wert ist jedoch ein Maximalwert, da sich dieser Winkel mit den Jahreszeiten entsprechend verändert.

Die Flughöhe über der Erdoberfläche beträgt zwischen Apogäum 839.62 km und Perigäum 825.92 km (Walker et al. 2003), besitzt also eine leicht elliptische Bahn mit der Exzentrizität $e=0.00095$. Dieser Orbit wird als Low Earth Orbit (LEO) bezeichnet und ist der aufgrund seiner niedrigen Höhe am leichtesten erreichbare (vgl. Medium Earth Orbit „MEO“ für GPS Satelliten bei ca. 1000 km bis 36000 km) und somit kostengünstigste. Nachteil eines etwas höheren Orbits wäre dazu die bereits höhere Strahlenbelastung bedingt durch den Van-Allen Gürtel (innerer Gürtel bei ca. 1000 km bis 6000 km Höhe), welcher aus durch das Erdmagnetfeld eingefangenen hochenergetischen Teilchen, mit Energien zw. 10 und 50 MeV, besteht. Diese Teilchen stammen aus dem Sonnenwind oder der kosmischen Hintergrundstrahlung. Hochenergetische Teilchen würden entweder das Noise eines Detektors erhöhen oder bei einer zu hohen Strahlung die Datensätze sogar unbrauchbar machen. Näheres dazu im Kapitel 11.1, wo anhand der Datenpunkte in Abhängigkeit der Satelliten-Phasen beschrieben und illustriert wird, wie durch eine Anomalie im Van-Allen-Gürtel bereits geringere Flughöhen von Satelliten mit dieser Fehlerquelle beeinträchtigt werden.

Je nach Missionsziel im LEO beherbergt der niedrige Orbit aber auch Probleme. Bedingt durch die hohen Geschwindigkeiten, um die gravitative Anziehung der Erde auszugleichen, ist der Kontakt zu einer bestimmten Bodenstation je nach Winkel nur begrenzt möglich. Dies kann durch einfache Berechnung veranschaulicht werden. Da in

diversen MOST-Publikationen diese Thematik nicht angesprochen wird, möchte ich zwecks Vollständigkeit dies kurz berechnen.

Beginnen wir mit der Eruierung der Fluggeschwindigkeit des Satelliten:

Betrachten wir zuerst die 1. Kosmische Geschwindigkeit die auch Kreisbahngeschwindigkeit genannt wird. Diese Größe bezeichnet die Geschwindigkeit eines tangential zu einer Planetenoberfläche bewegten Satelliten, die nötig ist, damit dieser nicht auf den Planeten zurückfällt. Die beiden maßgeblichen Größen für diese Geschwindigkeit sind zum Einen die in Richtung des Planeten gerichtete Gravitationskraft, zum Anderen die entgegen gerichtete Zentripetalkraft.

$$\mathbf{F_{Grav.} = mg}$$

$$\mathbf{F_{Zentr.} = \frac{mv^2}{r}}$$

wobei

m...Masse des Satelliten

g...Schwerebeschleunigung

r...Abstand vom Erdmittelpunkt

v...Geschwindigkeit

Nach Einsetzen der Schwerebeschleunigung

$$\mathbf{g = \frac{GM}{r^2}}$$

M...Masse der Erde

G...Gravitationskonstante

r... Abstand vom Erdmittelpunkt

und Gleichsetzen ergibt sich eine Geschwindigkeit von:

$$\mathbf{v_1 = \sqrt{\frac{GM}{r}}}$$

Durch diese Umformung erzielen wir eine Unabhängigkeit von der Masse des Satelliten. G und M sind konstant, somit fließt nur der Abstand vom Erdmittelpunkt in die

Berechnung ein. Je weiter ein Körper von der Erde entfernt ist, desto langsamer wird die Fluggeschwindigkeit für eine stabile kreisförmige Flugbahn. Bezogen auf die durchschnittliche Flughöhe von MOST ergibt sich somit eine Kreisbahngeschwindigkeit von ca. 7.435 km/s.

MOST befindet sich jedoch auf keiner Kreisbahn, sondern einem leicht elliptischen Orbit. Wird die gerade berechnete Kreisbahngeschwindigkeit überschritten, bildet sich eine Ellipsenform bis zur 2. Kosmischen Geschwindigkeit (Entweichgeschwindigkeit) aus, bei welcher der Satellit einen stabilen Orbit verlassen würde.

Die Entweichgeschwindigkeit für ein Objekt in einem Orbit um die Erde ergibt sich aus der Gesamtenergie

$$E_{\text{Kin}} + E_{\text{Pot}} = E_{\text{Gesamt}}$$

Nehmen wir an, dass sich Fliehkraft und Anziehungskraft für eine konstante Höhe aufheben, so können diese beiden Kräfte gleichgesetzt werden.

$$E_{\text{Kin}} = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_{\text{Pot}} = \frac{GM}{r}$$

v...Entweichgeschwindigkeit

Vernachlässigen wir nun als Vereinfachung die Masse des Satelliten m, da $m \ll M$, ergibt sich daraus

$$\frac{GM}{r} = \frac{1}{2}v^2 \quad \text{und} \quad v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Setzen wir die bekannten Werte der Erde, sowie den Abstand des Satelliten vom Erdmittelpunkt ein, ergibt sich eine Entweichgeschwindigkeit von ca. $v=10.5147$ km/s.

Durch einen Vergleich der Werte v_1 und v_2 kann der Umstand, dass sich die Exzentrizität des Orbits mit der Geschwindigkeit des Satelliten erhöht, erkannt werden. MOST muss also eine Geschwindigkeit zwischen v_1 und v_2 für einen stabilen Orbit um die Erde besitzen. Tatsächlich liegt die Umlaufgeschwindigkeit von MOST aufgrund der kleinen Exzentrizität bei 7.4462 km/s, also etwas höher, als die berechnete

Kreisbahngeschwindigkeit. Dazu nimmt man die Geschwindigkeit auf der Kreisbahn und multipliziert diese mit der Exzentrizität.

Aufgrund dieser Geschwindigkeit ergibt sich ein Zeitfenster zwecks Kontakts (Up-/Download) von maximal 15.5 Minuten, falls die Flugbahn genau über die Bodenstation führt. Ist die Flugbahn geneigt, wird das Zeitfenster dementsprechend kürzer. Dies kann man trigonometrisch über Kreissehne und Bogenlänge (Orbitausschnitt) annähern und berechnen. Im Mittel betragen die Zeiten des Kontaktes daher ca. 5-7 Minuten.

Nimmt man nun den Umfang der Orbit-Ellipse und dividiert man diesen durch die Geschwindigkeit des exzentrischen MOST-Orbits kann die Umlaufzeit zu 6084.9 s bzw. 14.199 c/d berechnet werden. Dieser Wert stellt einen wichtigen Umstand dar, da diese Frequenz und dessen Multiplen in den diversen Sternspektren deutlich zu sehen sind und als Fehlerquelle klassifiziert werden kann.

Als Abschluss zum Kapitel „Orbit“ sollte noch das Blickfeld von MOST kurz angeschnitten werden. Die CVZ (Continuous Viewing Zone) beträgt 48° (Walker et al. 2003). Hier muss dementsprechend ein Kompromiss zu einem höheren Orbit eingegangen werden. Durch diese CVZ ist es MOST dennoch möglich, ein Target bis zu zwei Monate durchgehend zu beobachten. Trotzdem ist der Winkel zwischen Atmosphäre und Target zu berücksichtigen. Ist der Winkel zu gering, erhöhen sich die Fehler durch die Eigenstrahlung der oberen Atmosphärenschichten, sei es durch Airglow oder Lichtbrechung. Die nachfolgende Skizze soll die Geometrie des Orbits zum Abschluss deutlich machen:

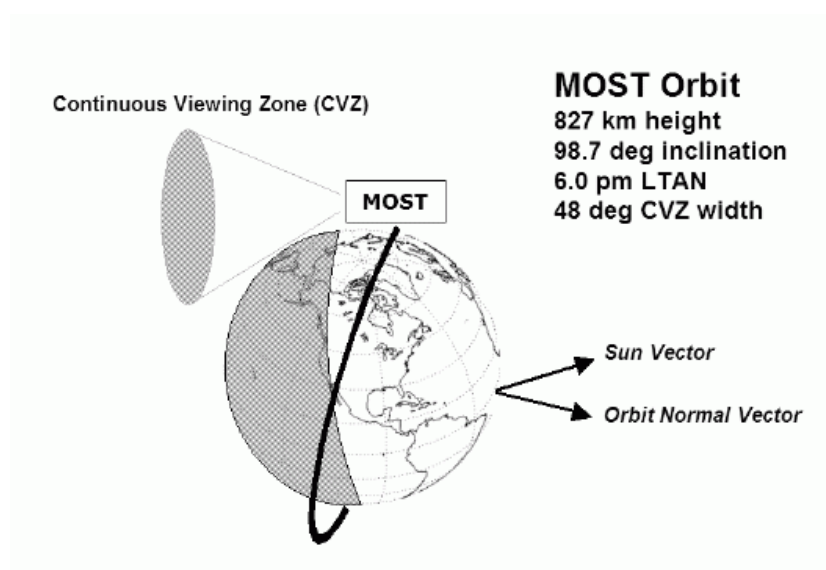


Abbildung 2: Geometrie MOST-Orbit (Walker et al. 2003)

4. MOST-System Design und Technik

Dieses Kapitel soll Einsicht in Aufbau, Funktion und Design von MOST geben, um das Zusammenspiel der einzelnen komplexen Elemente zu erfassen und verstehen zu können. Da bei Mikrosatelliten-Missionen nachträglich im Orbit durchgeführte Reparaturen bei Ausfall einer Komponente unmöglich sind und dies ein eventuelles Missionsende bedeuten würde, ist es Voraussetzung, dass alle Bestandteile zuverlässig agieren. Dies beginnt bei der Auswahl der Materialien und endet mit ausführlichen Tests, um sicherzustellen, dass Missionsziele zu einem hohen Prozentsatz auch erreicht werden können.

MOST basiert auf einem Multi-Mission Microsatellite System Design (Zee & Stibrany 2000). Dies bedeutet, dass die Philosophie des Baus auf dem Grundsatz beruht, bereits erprobte Mikrosatelliten-Designs (AMSAT etc.) von weltweit führenden Wissenschaftlern nur dahin leicht zu verändern, um die jeweils spezifischen Voraussetzungen für die Datengewinnung zu erreichen. Vorteil davon ist eine Kostenreduktion durch Anwendung bereits vorhandener Technologien bzw. Komponenten ohne Neuentwicklungen.

Die Technik von MOST, welche in den folgenden Unterkapiteln behandelt wird, beruht auf zwei Primary Elements, drei Secondary Elements und dazugehörige Subsystems. Diese wären:

Primary Element	Secondary Element	Subsystem
Satellite	Bus	Structure
		Thermal Control
		Power
		Attitude Control
		Telemetry & Command
		On-Board-Computer
	Payload	Instrument
		Payload Data Processors
Ground Segment	Ground Control Stations	Toronto Station
		Vancouver Station
		Vienna Station

Tabelle 1: Satellite und Ground Segment (Zee & Stibrany 2000)

4.1. Satellite-Bus

4.1.1. Structure

MOST wurde als Mikrosatellit ausgelegt. Dies verdeutlichen die geringen Maße von 63 x 58 x 25 cm bei einem Gesamtgewicht von ca. 50 kg. Die Struktur beruht auf Fächern aus Aluminium, welche die Elektronik, Kommunikation, Lageaktuatoren und Batterien beinhalten. Diese Fächer formen aneinandergesetzt die Basis des Satelliten, auch Stack genannt. Auf dieser Basis wurde das 15 cm Maksutov-Teleskop montiert, wobei der Tubus parallel zur Basis montiert wurde. Die folgende Grafik veranschaulicht dies deutlich:

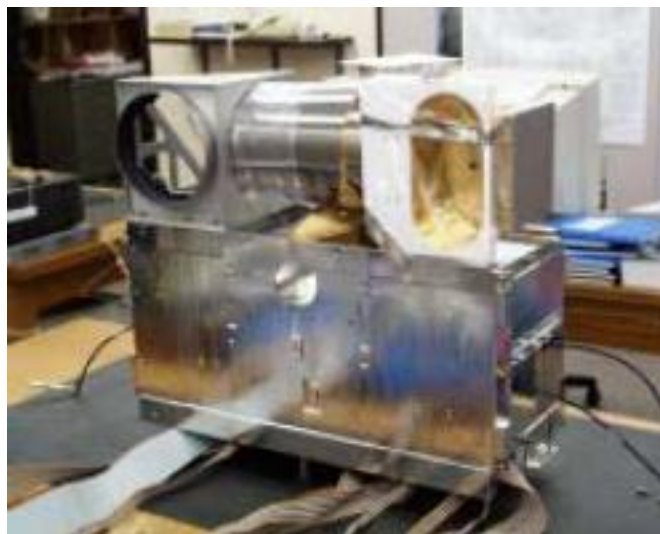


Abbildung 3: Basis/Stack (unten), Teleskop-Tubus (oben) (Zee, Grocott & Matthews 2002)

Die Struktur komplementieren sechs Aluminium-Platten, welche die Solarzellen, als auch Lagesensoren (mehr dazu bei „Attitude Control“) beinhalten (Zee, Grocott & Matthews 2002).

4.1.2. Thermal Control

Da MOST, je nach Lage im Orbit (Erdschatten, Sonnenseite), verschiedenen Temperaturbedingungen ausgesetzt ist, die zum Einen die Instrumentierung nachhaltig schädigen könnten, zum Anderen die Datengewinnung beeinträchtigen würden (Dunkelstrom), erfolgt eine Temperaturregelung. Diese Regelung besteht aus zwei Komponenten.

Die passive Komponente inkludiert die Oberfläche des Satelliten, wobei die Wahl des Materials ausschlaggebend ist. Im Falle von MOST erfolgt dies durch die Aluminiumstruktur, welche mit einer hochreflektierenden goldenen/silbernen Teflonschicht umgeben ist. Aluminium (Zee, Grocott & Matthews 2002), abgesehen vom geringen Gewicht gepaart mit bestmöglicher Stabilität, mit einem hohen Wärmeleitungskoeffizienten von $221 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Demtröder 2005), ermöglicht eine möglichst konstante Temperatur über die gesamte Struktur. Teflon, mit einem kleinen Wärmeleitungskoeffizienten von $0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, (FIZ CHEMIE Berlin 1998) verhindert zum Einen das Auskühlen des Satelliten durch Wärmeverlust, als auch das Überhitzen durch direkte Sonneneinstrahlung. Bei Bedarf kann zusätzlich eine Kühlung durch eine passive Komponente im Fokus des Teleskops erfolgen, um den Dunkelstrom im CCD zu verringern und das S/N und in weiterer Folge das Detektionslimit, zu steigern. Eine Temperatur von minus 40°C mit Schwankungen von $\pm 0.1^\circ \text{C}$ wird damit realisiert (Zee, Grocott & Matthews 2002).

Die aktive Komponente besteht aus sogenannten „Resistive Heaters“. Dies bedeutet Heizung durch Ohmsche Widerstände, welche die Batterien, als auch die verschiedenen Fächer auf Betriebstemperatur halten können (Grocott, Zee & Matthews 2003).

Ist die passive Komponente bautechnisch verständlicherweise immer im Betrieb, wird die aktive Komponente bei Bedarf je nach Orbit im Erdschatten dazu geschaltet.

4.1.3. Power

Die Energie für den Betrieb von MOST stammt aus den hocheffizienten Silizium-Solarzellen, welche an allen Seiten des Satelliten angebracht sind. Eine Überproduktion an Energie fließt in die NiCd-Batterie, um eine Energieversorgung auch im Erdschatten zu gewährleisten. Gesteuert wird dies über den On-Board-Computer (Energieverteilung) und einen Peak-Power-Tracker (Ladecontroller). Der Peak-Power-Tracker verhindert einen Verlust von Energie durch zu hohe Eingangsladungen, welche höher liegen, als die Ladefähigkeit der Batterie (Grocott, Zee & Matthews 2003).

Der Energiebedarf liegt je nach Voll- oder Standby-Betrieb bei 35W oder 9W (Zee, Grocott & Matthews 2002).

4.1.4. Attitude Control

Das Lagekontrollsystem, zur Gewährleistung einer korrekten Ausrichtung des Satelliten, besteht aus Aktuatoren, Lagesensoren und einem Computerelement. Die Aktuatoren beinhalten Schwungräder, sowie eine Spule zur Induzierung eines Magnetfeldes, um ein Drehmoment bei einer gewünschten Lageänderung von MOST, zu erzeugen. Kontrollieren die Lagesensoren, wie Magnetometer, Sonnensensoren und ein Star-Tracker, die korrekte Orientierung, verarbeitet das Computerelement die Daten über Ephemeridenmodelle und verschiedenen Kontrollmechanismen (Zee & Stibrany 2000). Der ebenfalls eingebaute Kalmanfilter ermöglicht es, durch komplexe Gleichungen und Algorithmen, gerätespezifische Fehler zu minimieren (Grocott, Zee & Matthews 2003).

Im Betrieb existieren vier Moden der Lagekontrolle (Zee, Grocott & Matthews 2002):

a) Safe-Hold

Dies stellt einen unkontrollierten Modus dar, die Lagekontrolle ist also deaktiviert. Der Satellit hat eine taumelnde (tumbling) oder beliebige Bahnlage. Es erfolgen Tests oder Operationen zur Wiederherstellung des Setups.

b) Detumbling

Hier werden die am Satelliten angebrachten Magnetometer und röhrenförmigen Magnetspulen verwendet, um die Lagekorrektur nach dem Safe-Hold-Modus zu initiieren. Es erfolgt eine Eruierung der Vektoren des Erd- und Sonnenmagnetfeldes, um ausreichende Lageinformationen zu erhalten. Ist das Magnetfeld vermessen, wird in den Spulen ein Magnetfeld induziert, welches mit dem Erdmagnetfeld interagiert und die Taumelbewegungen verringert.

c) Coarse Pointing

Nach Verringerung der Taumelbewegung erfolgt die Lagekorrektur nun mit den Aktuatoren. Das Zielobjekt wird näherungsweise angezielt, möglichst viele Solarzellen zeigen in Richtung Sonne. Die Magnetspule wird bei Bedarf laufend zur Entladung der Aktuatoren verwendet. Im Weiteren erfolgt eine Kontrolle der Lage mittels Magnetometer und Sonnensensoren.

d) Fine Pointing

In diesem Modus wird der Star-Tracker hinzu geschaltet, um eine hochpräzise Lage bei einer Genauigkeit von 3“ zu erhalten. Auch in diesem Modus werden

die Aktuatoren zur Lagekontrolle eingesetzt und bei Bedarf durch die Spule entmagnetisiert, um eine fehlerlose Funktion zu gewährleisten.

Wissenschaftliche Aufnahmen, wie jene, die in dieser Diplomarbeit behandelt werden, erfolgen ausschließlich im Fine-Pointing-Modus.

4.1.5. Telemetry & Command

Unter dem Oberbegriff Telemetry & Command werden die Kommunikationseinrichtungen (Down-/Uplink), sowie Datenübertragung von MOST zusammengefasst.

Um mit den Bodenstationen Vancouver, Toronto und Wien kommunizieren zu können, werden zwei 0.5 Watt RF output BSPK Transmitter und zwei 2 Watt FM Receiver im S-Band (2.01 bis 4.0 GHz) verwendet (Zee, Grocott & Matthews 2002). Zwecks Verständnisses möchte ich eine kurze Erklärung zu den Instrumenten geben.

Die beiden Transmitter dienen zur Datenübertragung in Richtung Erde (Output), wobei RF für Radio Frequency steht. RF ist ohne nähere Spezifizierung lediglich ein Hinweis auf den Sendefrequenzbereich zwischen 3 Hz und 300 GHz. BPSK steht für Binary Phase Shift Keying und ist eine digitale binäre Phasenmodulation eines sinusförmigen Ausgangssignals. Es existieren zwei Phasenlagen bei 0° und 180° , welche dem binären Zahlen/Zuständen von „1“ und „0“ entsprechen. Diese wiederum werden durch Verschiebung der Phasen (Modulation) erzeugt (DATACOM Buchverlag GmbH 2008). Die folgende Abbildung soll dies verdeutlichen.

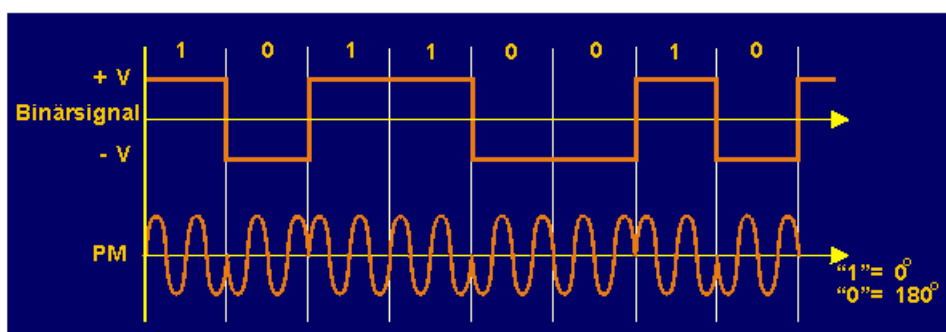


Abbildung 4: BPSK mit zwei festen Phasenlagen (DATACOM Buchverlag GmbH 2008)

Informationen werden somit mittels eines Binärcodes übertragen. Dieses Verfahren wird verwendet, um keine Interferenzerscheinungen mit terrestrischen Systemen zu erzeugen.

Die beiden Receiver (Empfänger) beruhen auf dem Prinzip der Frequenzmodulation (FM) (Zee, Grocott & Matthews 2002). Zur Signalübertragung erfolgt eine Veränderung der Frequenz bei konstanter Amplitude und darf nicht mit der Amplitudenmodulation (AM) verwechselt werden, wo die Frequenz konstant bleibt und das Signal über die Amplitude erzeugt wird. Vorteil von FM ist die vergleichsweise niedrige Amplitude zu AM, um auch hier Interferenzerscheinungen entgegenzuwirken und Übertragungsfehler zu minimieren.

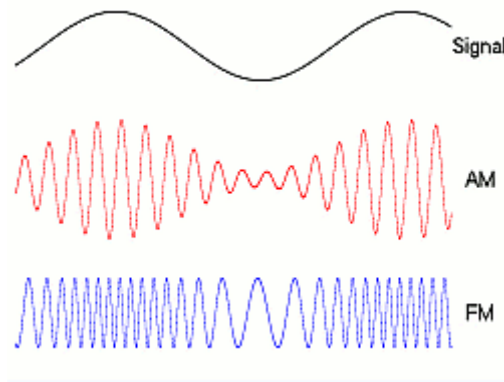


Abbildung 5: Prinzip AM und FM (Berserkerus 2008)

Diese Kommunikationseinrichtungen von MOST sind mit Telemetrie- und Kommandoplatinen verbunden, die die ein- und ausgehenden Daten verarbeiten. Jeweils ein Receiver/Transmitter bilden ein Paar, wobei sich die beiden Paare an jeweils gegenüberliegenden Seiten des Satelliten befinden um in jeder Bahnlage Kommunikation zu ermöglichen. Im Weiteren verwendet jede Komponente eine eigene S-Band-Frequenz und besitzt eine eigene Antenne (Grocott, Zee & Matthews 2003).

Da ein CCD-Science-Frame ein Datenvolumen von 512kb aufweist, im Durchschnitt jede Minute ein solcher Frame angefertigt wird, die Bandbreite der ohnehin ortsabhängigen Datenübertragung (Downlink) aber nur 38400 bps beträgt, muss eine Kompression der Daten erfolgen. Die Daten werden zuerst in zwei SDSs (Science Data Streams) aufgeteilt. SDS1 enthält nur Daten, die unerlässlich für das Beobachtungsziel sind, SDS2 die Pixelintensitäten. SDS2 wird heruntergeladen, wobei SDS1 als Backup im Falle von Sendefehlern dient. Es wird jedoch nicht der ganze Frame heruntergeladen, sondern nur die spezifischen Bereiche, die für die Datenauswertung benötigt werden. Diese sind im Allgemeinen das Fabry-Bild des Zielobjektes, sowie die umliegenden Fabry-Bereiche zur Flat-Reduktion, zusammen mit Regionen für Dark- und Bias-Reduktion. Das Datenvolumen wird anschließend weiter softwaretechnisch komprimiert

und somit auf ein paar Prozent des Ausgangsvolumens reduziert. Auf das System der Fabry-Linsen wird im Kapitel Payload/Instrument noch genauer eingegangen.

4.1.6. On-Board-Computer

Die Basis des On-Board-Computers bildet ein serienmäßig hergestellter V53-Prozessor mit einem 16MB RAM Modul. Dieser wurde auf die Bedürfnisse des Satelliten modifiziert, wobei die Taktfrequenz von 9 MHz auf 29 MHz erhöht wurde. Die Konnektivität zu den jeweiligen Komponenten erfolgt über Interfaces (Grocott, Zee & Matthews 2003). Die Aufgaben beschränken sich auf interne Arbeitsvorgänge, wie Energie- und Telemetrie-Management inkl. Lagekontrolle, sowie Betrieb der Kommunikationseinrichtungen.

4.2. Satellite-Payload

Unter dem Kapitel Payload, welches mit Ladegut übersetzt werden kann, fallen das Instrument (Teleskop, CCD usw.), sowie die Prozessoren zur Verarbeitung der Daten.

4.2.1. Instrument

Das in MOST eingebaute Teleskop ist ein f/6 der Bauart Rumak-Maksutov (Walker et al. 2003). Diese Teleskopart paart eine kompakte Bauweise mit dem Vorteil einer langen Brennweite. Dabei wird ein Hauptspiegel mit einem zentralen Loch verwendet, welcher das einfallende Licht auf einen Sekundärspiegel zurückwirft. Der Sekundärspiegel reflektiert das Licht zurück durch das zentrale Loch im Primärspiegel auf den Okularauszug, wo sich schließlich der Brennpunkt und der Field Flattener, sowie in weiterer Folge der Detektor, befindet. Da das Teleskop in einem Winkel von 90° zur Öffnung liegt, findet ein Periskop-Spiegel Anwendung. Eine Meniskus-Korrektur-Linse gleicht Effekte der sphärischen Aberration, sowie der Koma aus. Zur möglichen Vermeidung von Streulicht befinden sich auf den Spiegeln angebrachte Baffles.

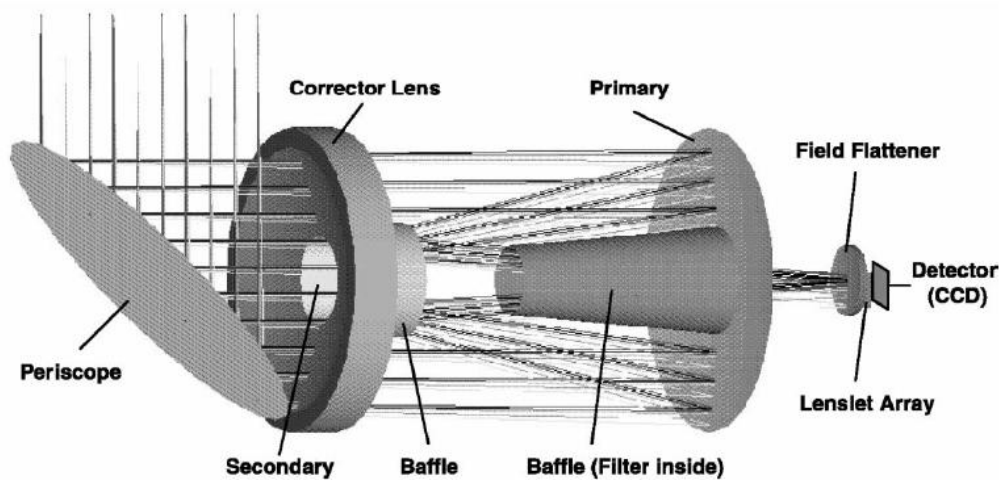


Abbildung 6: Teleskop-Layout (Walker et al. 2003)

Der Primärspiegel hat einen Durchmesser von 173 mm, wobei unter Berücksichtigung der Halterung (aperture stop) ein effektiver Durchmesser von 150 mm verwirklicht wird. Zur Bildkorrektur bzw. Verbesserung kommt ein so genannter Field Flattener zum Einsatz, welcher die Kantenschärfe erhöht und auftretende Verzerrungen minimiert. Der Erfassungs- bzw. Aufnahmeradius beträgt $1^{\circ}.28$, wobei eine gute Bildqualität bis zu 1° und ein unvignettiertes Feld bis zu $0^{\circ}.4$ erreicht wird. Aufgrund der unterschiedlichen Bildqualitäten in den Feldern, wird das unvignettierte Feld bis Radius $0^{\circ}.4$ zur Anfertigung wissenschaftlicher Daten, der Radius von $0^{\circ}.4$ bis $1^{\circ}.28$ fürs Tracking verwendet. Eine leichte Defokussierung von +0.15 mm vergrößert die Sternabbildungen, bezogen auf das FWHM, um zwei bis drei Pixel im Feldradius zwischen $0^{\circ}.4$ und 1° . Unterstützt durch die große Brennweite wird bewusst eine möglichst korrekte PSF (Point Spread Function) des Sternes erzeugt und für das Tracking/Guiding verwendet (Walker et al. 2003). Anzumerken ist, dass die PSF die Rückmeldung des optischen Systems auf die Punktquelle (Stern) ist. Die Konvolution der Punktquelle mit der Rückmeldung des optischen Systems ergibt dann das ausgegebene Bild in der Fokalebene. Ist der Vorgang der Konvolution komplex in der Durchführung, kann diese anschaulich als Interaktion zweier Funktionen (PSF, Punktquelle) verstanden werden, die in Schritten übereinander gezogen und über eine der beiden Funktionen integriert werden. Eine der beiden Funktionen wird also mittels der zweiten moduliert.

Da es trotz der Temperaturregelung einen gewissen Schwankungsbereich zwischen -40° C bis $+20^{\circ}$ C geben kann, muss dies natürlich bei der Wahl des Materials des Teleskops berücksichtigt werden, um die Brennweite konstant zu halten. Dazu wird Invar für den Tubus verwendet. Invar ist eine Eisen-Nickel-Lackierung, die invariant bzgl. der Dehnung bei einem auftretenden Temperaturgradienten ist (Demmer 2005). Die Spiegel bestehen

aus Quarzglas. Zwecks UV-Absorption, um auftretende Fehler durch kosmische Strahlung zu minimieren, findet im Field Corrector (Flattener), als auch im Spiegel vor dem CCD-Detektor ein Schott BK7-Glas Anwendung (Walker et al. 2003), welches eine hohe gleichmäßige Transmission und geringe Absorption im gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich garantiert (präzisions glas & optik PGO GmbH 2009). Darüberhinaus wurden alle durchlässigen und reflektierenden Elemente mit hochtransmitiven Breitbandbeschichtungen überzogen (Walker et al. 2003).

Kommen wir nun zum Hauptbestandteil des Instruments, dem Detektorelement. Das Detektorelement besteht aus den Kernelementen Direct-Imaging/Fabry-Imaging, Filtersystem und zwei CCDs. Zum Verständnis des Systems soll nachfolgende Grafik beitragen.

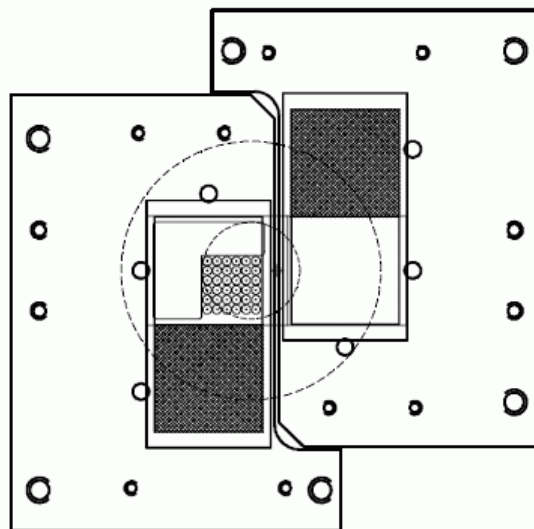


Abbildung 7: Detektorlayout (Walker et al. 2003)

Sichtbar sind die zwei Invar-Platten, über die das gesamte Element auch auf $-40^\circ \pm 0.1^\circ\text{C}$ gekühlt wird. Auf diesen Platten befinden sich die beiden Eintritsöffnungen zu den CCDs (weiße Quadrate). Fungiert der linke Teil als Science-CCD, wird der rechte Teil ausschließlich für das Tracking verwendet (Walker et al. 2003).

4.2.1.1. Direct- und Fabry-Imaging

Zwecks Datengewinnung kann zwischen zwei Moden unterschieden werden:

- a) Direct-Imaging (DI)
- b) Fabry-Imaging (FI)

Ad a) DI wird durch das L-förmige Klarglas betrieben. Die Objekte werden leicht defokussiert, um ein FWHM (Full Width Half Maximum) von ca. 2.5 Pixeln auf dem Science-CCD zu erhalten. Vorteil davon ist, dass die Wahrscheinlichkeit einer Pixel-Saturierung sinkt und weniger Licht durch systematische Fehler verloren geht. Die Genauigkeit der Messung steigt. DI ist jedoch ungenauer als die unter Punkt b) besprochene FI-Methode, da die DI sensibler auf CCD-Kalibrationen und Positionsabweichungen reagiert, sowie lichtschwächere Objekte ($V > 6.5$ mag) beobachtet werden (Rowe, Matthews & Kuschnig 2006).

Da das Guiding-CCD 2006 durch ein hochenergetisches Teilchen getroffen und zerstört wurde, übernahm das Science-CCD diese Aufgabe. Die Objekte am Guiding-CCD wurden ursprünglich kürzer belichtet, da diese nicht als wissenschaftliche Daten verwertet wurden. Es war lediglich wichtig, ob ein Pixel belichtet war oder nicht, um Positionsbestimmungen durchzuführen. Am Science-CCD müssen die Guide-Stars nun jedoch gleich lange, wie die eigentlichen Zielobjekte belichtet werden und deren Datenqualität ist somit ausreichend genug, um Wissenschaft zu betreiben. Der Unterschied ist jedoch jener, dass es sich nicht wie bei DI um ein abbildendes Verfahren, sondern wie gesagt um aufsummierte Pixelwerte (Belichtungswerte) in einem gewissen Bereich handelt. Die in dieser Diplomarbeit behandelten Daten beruhen auf der Guide-Star-Methode.

Ad b) Das FI-System wurde für Messungen von $V < 6.5$ mag konstruiert und besteht aus einem Array von 6x6 Mikrolinsen, welches auf einem 2.5 mm dicken BK7-Glas montiert wurde. Unter den Mikrolinsen wurde das Glas mit einer Metallbeschichtung ausgestattet und mit 0.117mm großen Field-Stops perforiert. Ein Field-Stop ist eine kreisrunde Apertur, welche das Sichtfeld limitiert und somit eine Verbesserung der Genauigkeit bewirkt (Walker et al. 2003). Der Durchmesser eines einzelnen Fabry-Linsen-Bildes beträgt auf dem CCD 44 Pixel für den äußeren Rand, 16 Pixel für den inneren Rand. Das FI-System ist genauer als DI, da der Abbildungsprozess hier invariant gegenüber kleinen aber dennoch auftretenden Positionsabweichungen des Satelliten ist. Bei DI wandert das Bild durch die Positionsabweichungen auf der Detektorfläche. Jeder Pixel des CCD, sprich jede Position auf der aktiven Detektorfläche, hat durch Pixel-zu-Pixel-Variationen aber unterschiedliche Sensitivitäten. Diese können zwar durch Flatfield-Aufnahmen weitestgehend korrigiert werden, dennoch kommt bei sehr vielen kontinuierlichen Aufnahmen ein schwer zu eruiender, aber für Messungen im (sub)mmag-Bereich deutlicher Fehler zustande.

Mit nachfolgender Grafik soll die Positions-Invarianz bei FI deutlich gemacht werden:

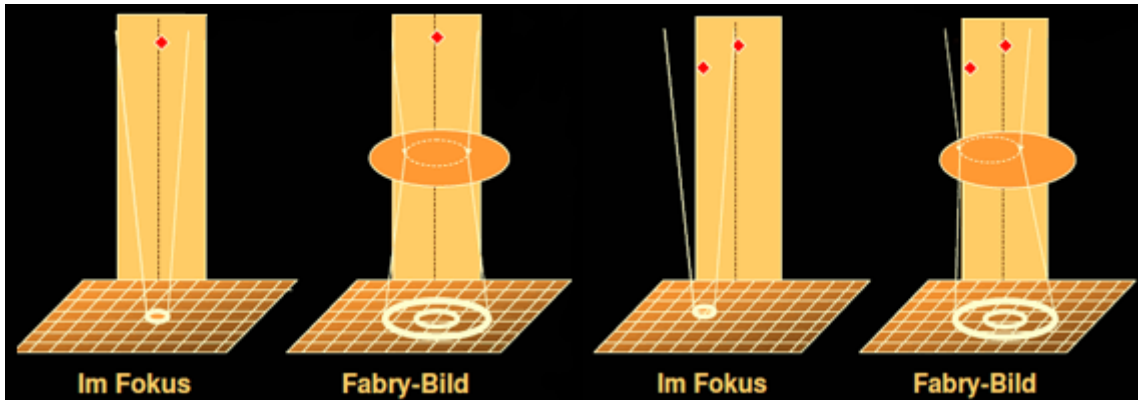


Abbildung 8: Demonstration Positions-Invarianz bei FI (Frast 2004)

Zwecks Vollständigkeit folgt eine Grafik zur Demonstration und Funktionsweise eines Field-Stops gemeinsam mit einer Fabry-Linse:

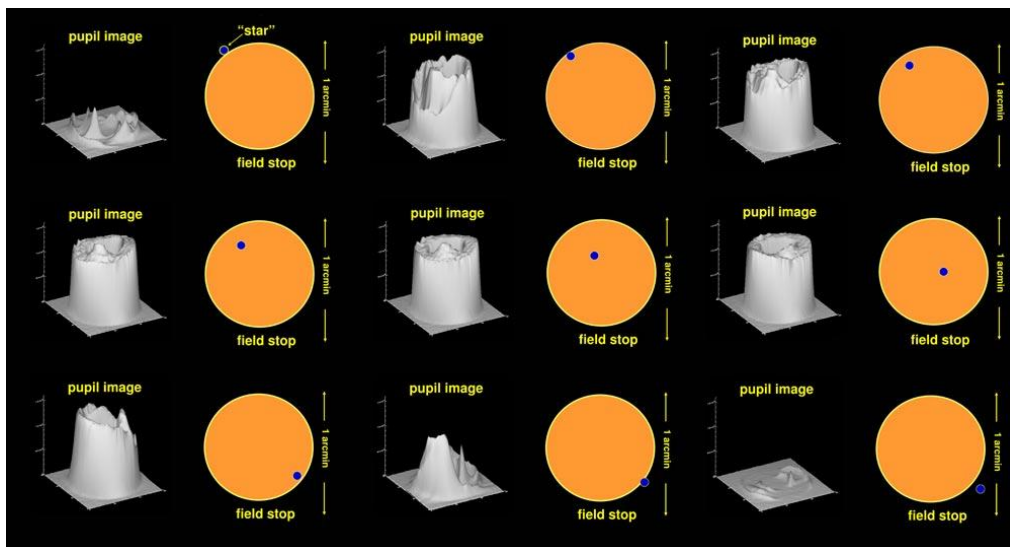


Abbildung 9: Demonstration FI-System (Frast 2004)

Befindet sich der Stern außerhalb des FI-Systems, erfolgt keine Detektion. Sobald sich der Stern in das System bewegt, hat er unabhängig seiner Position verursacht durch Tracking-Varianzen, immer die gleiche Intensität und wird auf den gleichen Pixelbereich des CCDs zentriert. Dies funktioniert in einem Bereich von $1'$, bewegt sich also deutlich über der Tracking-Varianz von ca. 1 Bogensekunde (0.3 Pixel bei DI) (Rowe, Matthews & Kuschnig 2006). Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass sich die Tracking-Varianz vor diversen Software-Updates (durchgeführt 2006) auf ca. 10 Bogensekunden (3 Pixel bei DI) belaufen hat, somit die DI-Methode, verursacht durch Flatfield-Fehler und weniger Stabilität, damals bedeutend fehleranfälliger war (Rowe, Matthews & Kuschnig 2006). Anzumerken ist, dass die in dieser Diplomarbeit verwendeten DI-Daten aus 2008 und 2009 stammen.

4.2.1.2. CCD-Detektor

Zur Bildgebung wurden zwei back-illuminated Marconi 47-20 frame-transfer-CCDs verwendet (Walker et al. 2003). Wie schon erwähnt, wurde eines zerstört und das Science-CCD fungiert nun auch als Tracking-CCD. Ein Back-illuminated-CCD besitzt gegenüber einem Front-Illuminated-CCD ein ausgedünntes dotiertes Halbleitersubstrat von ca. 20 μm Tiefe und wird quasi verkehrt herum im Detektor montiert. Dies bedeutet nichts anderes, als dass das einfallende Licht zuerst das Halbleitersubstrat und nicht die Elektroden passiert. Durch den wegfallenden Schatten- und Absorptionseffekt der Elektroden, die diese auf das darunterliegende Substrat bewirken, wird eine um den Faktor 2.5 bis 3 erhöhte Quanteneffizienz von bis zu 95% bei einem deutlich höheren und zum Filter passenden Spektralbereich erreicht. Der Begriff frame-transfer bezeichnet das Ausleseverfahren der gesammelten Pixelwerte (Elektronenwerte). Hier wird die gesamte CCD-Aufnahme in einem abgedunkelten Bereich verschoben (siehe Abb. 7, schwarz schraffierte Quadrate). Die Auslesegeschwindigkeit muss bei diesem System durch das Fehlen eines Shutters dementsprechend schnell sein, um Smearing-Effekte durch Überlagerung mit neugewonnenen Daten zu verhindern. Diese beträgt im Maximum ca. 5 MHz und würde eine Auslesezeit von Minimum 0.2 Sekunden implizieren (PixCellent 2000).

Die Auflösung pro CCD beträgt 1024 x 1024 aktive Pixel bei einer Pixelgröße von 13 x 13 μm und einer Full-Well-Kapazität (max. Elektronensammelfähigkeit pro Pixel vor Sättigung) von 10^5 Elektronen. Dazu kommen zwei links und rechts der aktiven Pixel angebrachte 16 Pixel breite Spalten und eine drei Pixel breite oberhalb befindliche Reihe zur Eruierung des Dunkelstroms und Overscans bzw. Bias' (Frast 2004). Insgesamt kann damit ein Himmelsausschnitt mit den Maßen 50' x 50' erfasst werden. Durch die konstante Temperatur von $-40^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ kann der Dunkelstrom auf zwei e^- pro Pixel und Sekunde reduziert werden (PixCellent 2000). Nun der Gesamtüberblick der CCD-Regionen und der Bilderzeugung durch DI und FI:

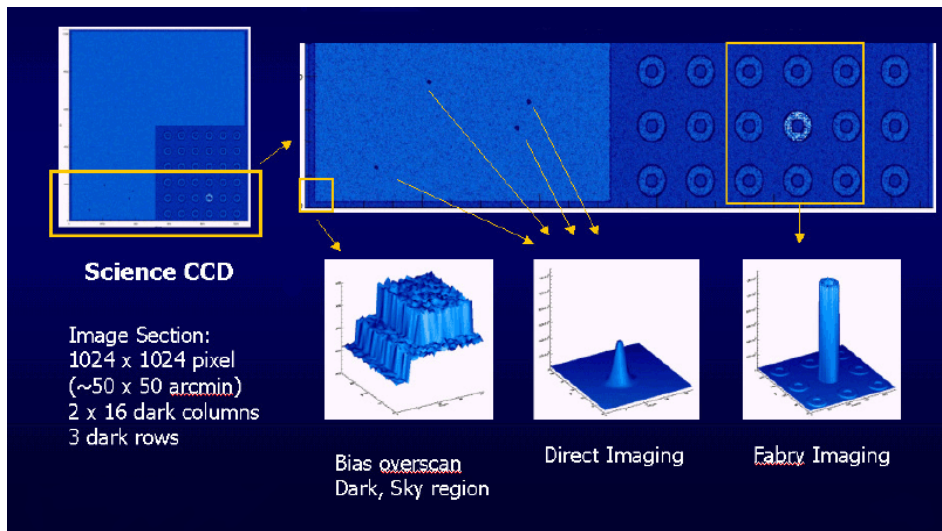


Abbildung 10: CCD-Regionen und Bildgebung (Frast 2004)

Die Sensitivität beläuft sich in einem Spektralbereich zwischen 200 und 1100 nm (PixCellent 2000). Ist das Science-CCD optimiert für Daten mit einem hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit einhergehenden längeren Belichtungszeiten, wurde das Tracking-CCD jede Sekunde ausgelesen. Im Weiteren wurden im Tracking-CCD nur beleuchtete Pixel registriert, welches vollkommen für die Positionsbestimmung ausreichte.

Der Gain beläuft sich auf $6.1 \text{ e}^- \text{ ADU}^{-1}$. Erwähnenswert ist die Beschichtung der CCDs mit einer Mittelband-Schicht, um Reflexionen zu verhindern (Walker et al. 2003).

4.2.1.3. Filter

Der Filter wurde innerhalb des Baffles positioniert, welcher am Primärspiegel angebracht wurde (vgl. Abb. 6). Durch eine zusätzliche leichte Neigung wirkt dies effizient der Bildung von Ghosts entgegen. Diese werden durch interne Reflexionen, vor allem im Bereich des Fabry-Systems, verursacht (Walker et al. 2003).

Die untere Grenze des detektierbaren Wellenlängenbereichs (short-wavelength-cutoff) wurde mit 380 nm bei einer Quanteneffizienz von 30% festgelegt. Es wäre generell möglich gewesen, diesen Bereich zu unterschreiten, jedoch würde die benötigte Auflösung aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Detektors leiden und die Sensitivität im mmag-Bereich abnehmen (Walker et al. 2003).

Die obere Grenze (long-wavelength-cutoff) wurde mit 600 nm bis 700 nm bei einer schlussendlichen Quanteneffizienz von 50% eingeführt. Grund dafür sind Photonenenergien, die geringer sind als die Bandlücke des CCDs (670 nm), da das CCD

hierfür zunehmend durchlässiger wird. Dies wiederum führt zu der Bildung von Fringes, welche mit steigender Wellenlänge in der Amplitude zunehmen. Die Form der Fringes ist abhängig von der Wellenlänge, der Temperatur und der projizierten Geschwindigkeit des Satelliten in Relation zum beobachteten Stern (Wellenlängenverschiebung). Obwohl diese Effekte sehr klein sind, ist es schwierig, entsprechende Korrekturen aufgrund der vielen Abhängigkeiten anzubringen bzw. den Fehler abzuschätzen. Da MOST noch dazu einen dünnen Detektor (back-illuminated) verwendet, um die benötigte Sensitivität zu erreichen, wäre hier eine deutlich erhöhte Fehleranfälligkeit bei größeren Wellenlängen gegeben (Walker et al. 2003). Zwecks Übersichtlichkeit hier nochmals die Zusammenfassung zwischen Filter-Durchlässigkeit, CCD-Sensitivität und der Beschichtung mit Beispiel des Spektrums eines G2V-Sternes.

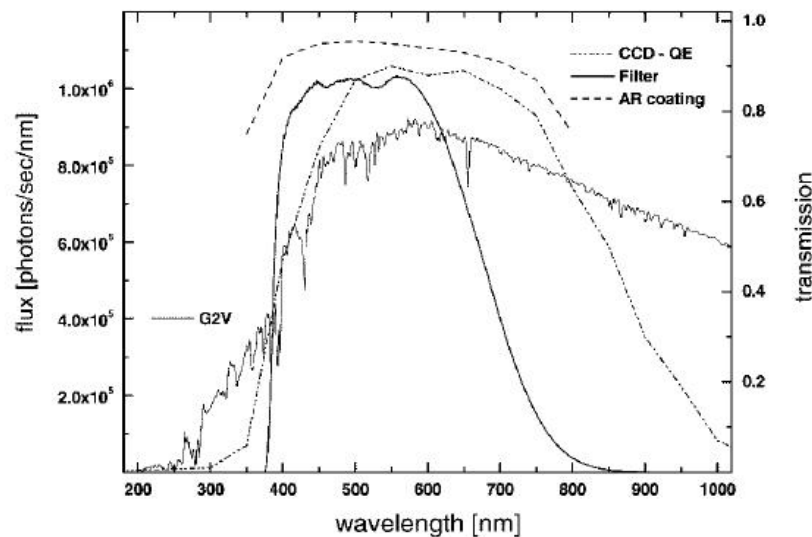


Abbildung 11: Transmission (Walker et al. 2003)

4.2.2. Payload Data Prozessors

Aufgaben des Payload Data Prozessors sind der Betrieb des CCDs, die Steuerung der Belichtungszeiten zwischen 1 s und 60 s, sowie die Datenaufbereitung zur Minimierung des Pointing Errors (Tracking-Varianz) und dem Auslesen und Zuweisung der Daten an den Data-Link. Die Steuerung des Prozessors erfolgt über Kommandos und Programmierung ebenfalls durch den Data-Link (Zee, Grocott & Matthews 2002).

Ein integrierter temperierter Kristall-Oszillator ermöglicht eine primäre Zeitauflösung kleiner als 5 ppm, welches nötig ist, um Photometrie mit ausreichender Auflösung zu betreiben. Durch diverse Prozessorroutinen erlaubt dies eine Genauigkeit der Startzeit

jeder Belichtung auf 1 ms und die Belichtungszeit auf 1 μ s genau zu bestimmen (Walker et al. 2003).

Nachfolgend ein Beispiel für die Regionen am CCD, die vom Prozessor aufbereitet und zu den Bodenstationen gesendet werden:

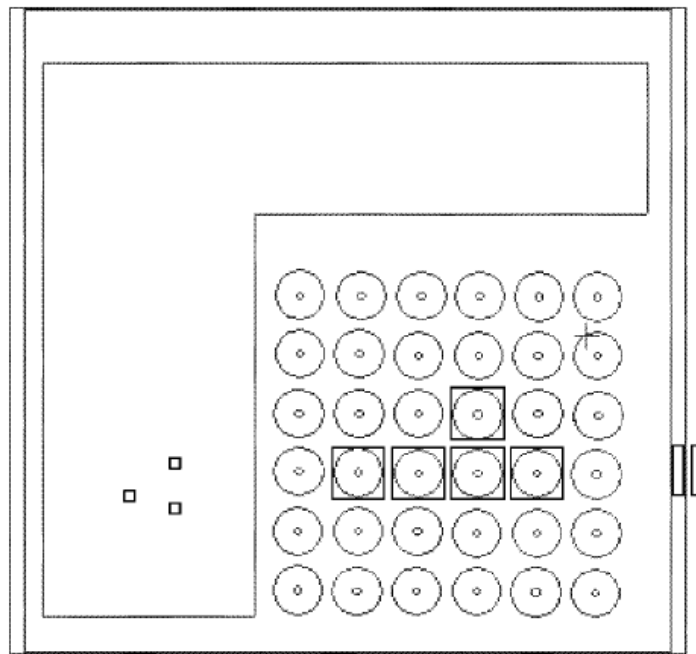


Abbildung 12: Beispiel Ausleseregionen (Walker et al. 2003)

Eingezeichnet sind drei DI-Objekte, fünf FI-Objekte (davon zwei Science-Objekte und drei für die Dark-Korrektur) und zwei Overscan-Bereiche rechts außen für die Feststellung des Bias-Levels. In der praktischen Anwendung werden diese Regionen durch eine definierte Anzahl von Guide-Stars vervollständigt.

4.3. Ground-Stations

Zwecks Kommunikation und Datenaustausches mit MOST werden drei Bodenstationen in Toronto, Vancouver und Wien verwendet. Dabei wird Toronto als primäre Station verwendet, Vancouver und Wien als sekundäre Stationen werden über das Internet hinzu geschaltet bzw. gesteuert. Genügt normalerweise eine Station, haben mehrere global angeordnete Stationen den Vorteil einer erhöhten Kontaktrate pro Orbitumlauf (siehe Berechnung der Kontaktzeit mit MOST unter Kap. 3). So erfolgt eine Erhöhung der Kontaktzeit durch Vancouver und Wien um ca. 140% (partielle Überlappung Toronto/Vancouver) (Grocott, Zee & Matthews 2003).

Die Kommunikation erfolgt mittels einer Parabolantenne für den Downlink, eine Yagi-Antenne findet Verwendung für den Uplink. Der Frequenzbereich liegt bei VHF (Very High Frequency) und UHF (Ultra High Frequency), unterstützt durch einen S-Band-Umrichter (Umwandler) und BPSK –Empfänger. Die Bodenantennen sind mit einem Modem (terminal node controller) verbunden, welches wiederum mit verschiedenen Computer-Terminals interagiert (Zee, Grocott & Matthews 2002). Jede spezifische Komponente des Satelliten besitzt somit ein eigenes softwaretechnisches Interface, welche zusammen koordiniert werden können. Der Benutzer greift somit bei Bedarf direkt auf die benötigte Komponente mittels Interfaces zu (virtual link).

5. Delta Scuti Sterne

Da die in dieser Diplomarbeit behandelten Objekte EP Cancri, BS Cancri, BT Cancri und HD 73872 unter die Klassifikation Delta Scuti Sterne fallen, folgt in den nächsten Abschnitten eine kurze Übersicht der Beobachtungsgeschichte, die Definition, sowie der Eigenschaften dieses Sterntypes.

5.1. Wieso werden Delta Scuti Sterne beobachtet?

Die Frage, wieso es sinnvoll ist, die Variabilität von Delta Scuti Sternen zu beobachten, kann einfach mit einem Analogon auf unserer Erde erklärt werden: Seismische Wellen. Aufgrund der Laufzeiten, Brechung, Streuung, Reflexion, Absorption und Beugung von seismischen Wellen, kann auf den Schichtaufbau unserer Erde geschlossen werden. Ursprung ist zumeist ein Erdbebenherd, welcher radial verlaufende Primär- (longitudinal) und Sekundärwellen (transversal) erzeugt. Durch Brechung an der Oberfläche werden anschließend Oberflächenwellen erzeugt, welche je nach Typ in Love-, Rayleigh- und Scholtewellen unterteilt werden. Wichtig ist für uns jedoch die Untersuchung der radialen Wellen. Diese führt nämlich zur Kenntnis von Diskontinuitäten, Dichte- und Druckschichtungen, sowie die Einteilung von Zonen in „Fest“ und „Flüssig“. Die wohl wichtigste Erkenntnis folgte aus der Entdeckung der Auslöschung von sogenannten S-Wellen/Sekundärwellen im Erdinneren. S-Wellen schwingen wie bereits angemerkt quer zur Ausbreitungsrichtung (Transversalwellen) und können sich nicht im flüssigen und gasförmigen Medium ausbreiten. Dies führte zur Entdeckung, dass der äußere Kern der Erde im flüssigen Zustand vorliegt, welches unter anderem für die Erklärung des Magnetfeldes und Modellrechnungen ausschlaggebend ist.

Doch wie kann Seismik auf der Erde nun auf die Variabilität von Delta Scuti Sternen umgelegt werden? Auch bei den hier vorliegenden Pulsationen bzw. Oszillationen handelt es sich quasi um seismische Wellen. Über die Feststellung der Frequenzen der Pulsation, sowie daraus in weiterer Folge der radialen und nichtradiellen Pulsationsmoden können physikalische Parameter, Massen, Temperaturen, Leuchtkräfte und Sternzusammensetzungen modelliert werden. Analog zur Erde durchlaufen diese Oszillationen verschiedenen Schichten des Sternes und bieten über deren Verhalten Aufschluss über dessen Aufbau. So können z.B. Grenzen und Übergangsgebiete von konvektiven und radiativen Zonen modelliert werden. Die wohl wichtigste Erkenntnis, die man sich bei der Betrachtung von vielen Sterntypen erhoffen kann, ist die Modellierung der stellaren Evolution (Garrido 2000).

5.2. Kurzgeschichte

Die 1. Erwähnung von Delta-Scuti-Variabilität wurde durch Wright im Jahre 1900 getätigt. Wright befand die Radialgeschwindigkeit des Sternes Delta Scuti als variabel. 1935 folgten durch Colacevich und Fath relativ präzise Messungen der Radialgeschwindigkeit und der photometrischen Lichtkurve zur Feststellung der Periode. Der Stern Delta Scuti wurde daraufhin in die zu dieser Zeit bekannte variable Beta-Canis-Majoris-Gruppe eingegliedert. Erst 1956 konnte durch Eggen eine separate Klassifizierung als Delta-Scuti-Gruppe postuliert werden. Bedingt durch die zu dieser Zeit vorhandene Detektortechnik konnte zuerst nur Variabilität mit sehr hohen Amplituden festgestellt werden, erst seit 1965 und verbesserter Technik auch zunehmend im Millimag-Bereich (mmag). Durch die Suche im mmag-Bereich war es möglich, eine systematische Suche nach Delta Scuti Sternen durchzuführen. Vorreiter waren hier Breger (1969a, 1969b, 1969c, 1969d), Danzinger & Dickens (1967), Millis (1967) und Jorgensen, Johansen & Olsen (1971). Wurde zuerst der Fokus auf Modellrechnungen mit radialen Pulsationen gelegt, fand Mitte der 70er ein Umdenken in Richtung nichtradialer Modelle statt. So konnte im Laufe der Zeit selbst der Stern Delta Scuti als nichtradialer Pulsator identifiziert werden (Templeton 1997).

Erwähnenswert sind zwei Hypothesen, welche in den 60ern und 70ern zur Erklärung der Variabilität und Unterschiedlichkeit bzgl. der Eigenschaften von Delta Scuti Sternen aufgestellt wurden.

Zum Einen ist die „Tidal Hypothesis“ zu nennen. Diese wurde von Fitch (Fitch 1967) postuliert und beschreibt die theoretische Interaktion in Form von Gezeitenkräften zwischen dem beobachteten variablen Stern und einem stellaren Begleiter. Grundlegend wurden radiale Moden hierbei durch einen Begleiter in elliptischer Bahn um das Objekt erklärt (Impuls durch nahen Vorbeigang), nichtradiale Moden durch eine kreisförmige Bahn (klassische Gezeiten). Es gelang zwar komplexe Lichtkurven von einigen Delta Scuti Sternen zu erklären, jedoch wurde diese Hypothese aufgrund des Fehlens von Begleitern bei den meisten Objekten als grundlegende Erklärungsmöglichkeit für Variabilität wieder verworfen. Der Stern 14 Aurigae A ist jedoch der Beweis für den Einfluss eines Begleiters in nichtradiale Moden (Fitch & Wisniewski 1979). Dieser Effekt ist vor allem bei einer geringen Entfernung der beiden Objekte zu berücksichtigen. Nichtsdestotrotz ist auch bei größeren Entfernungen der Objekte der Fehler durch unterschiedliche Lichtlaufzeiten verursacht durch die Bahnen einzubeziehen.

Zum Anderen muss die USPV Hypothese angesprochen werden. Eggen (Eggen 1970) untersuchte neun Delta Scuti Sterne in den Hyaden und stellte durchgehende Perioden

$P \leq 0.2$ Tage fest. Aus diesem Grund nannte er diese Sterne Ultrashort-Period Cepheids or Variables (USPV). Da kein Hinweis auf eine eindeutige Periode-Leuchtkraft-Beziehung gegeben war, wurde angenommen, es handelte sich um zwei separate Gruppen von Variablen bei Helligkeiten von $M_V=0.6$ und 1.9 mag. Erst Jahre später (Breger 1979) wurde diese Annahme durch ein größeres Datensample widerlegt.

In den 70ern keimte die Diskussion auf, ob Delta Scuti Sterne stabile Pulsationsfrequenzen aufweisen oder schlicht irreguläre/apperiodische Variationen vorliegen. Umfassend diskutiert, wurde erst 10 bis 20 Jahre später der eindeutige Beweis für einzelne Delta Scuti Sterne mit ausgedehnten Datensätzen erbracht, dass eindeutig multiperiodische und reguläre Frequenzen vorliegen. In weiterer Folge wurden um die Jahrhundertwende auch erste Anzeichen einer hohen Zahl (vermutlich hunderte) von Pulsationsmoden in einigen Beobachtungsobjekten entdeckt. Zu nennen sind hier Tau Peg untersucht durch Kennelly (Kennelly 1998) mit 30 eindeutig detektierten und einer Vielzahl von weiteren vermuteten Moden, sowie FG Vir von Breger (Breger et al. 1998). Bezogen auf das Paper wurden für FG Vir 650 Stunden an photometrischen Daten analysiert und Moden für $l=0-3$ gefunden. Unter Berücksichtigung, dass nur niedrige Moden photometrisch detektierbar sind, müssten somit buchstäblich hunderte Pulsationsmoden mit kleinen Amplituden vorhanden sein. Modellrechnungen von Dziembowski zeigten schließlich einen sogenannten Mixed-Mode-Character, einen p-mode-character (Pressure/Druck-Mode) in der stellaren Hülle, sowie einen g-mode-character (Gravitationsmode) im stellaren Kern (Dziembowski 1995).

5.3. Definition und Eigenschaften von Delta Scuti Sternen

Delta Scuti Sterne sind pulsierende Sterne (Variable) der Population I auf/nahe der Hauptreihe innerhalb des klassischen Cepheiden-Instabilitätsstreifen mit einem Spektraltyp von A bis F und einer Leuchtkraftklasse zwischen III und V, sowie Massen zwischen 1.5 und 2 Sonnenmassen. Die Energieproduktion stammt aus dem Wasserstoffbrennen im Kern oder bei weiterer Entwicklung aus Wasserstoffschalenbrennen. Die Perioden sind in einem Bereich zwischen 0.02 Tagen und 0.25 Tagen, mit einer Amplitude kleiner als 1 Magnitude, angesiedelt. Die meisten Delta Scuti Sterne verfügen jedoch über sehr kleine Amplituden. Die Zahl der Variablen steigt mit kleinerer Amplitude. Statistisch gesehen sind ungefähr 30% aller Sterne zwischen den Spektralklassen A2 bis F0 auf der Hauptreihe Veränderliche. Dieser Prozentsatz könnte sich mit steigender photometrischer Präzession deutlich erhöhen,

man geht einstweilen davon aus, dass sogar alle Sterne im klassischen Instabilitätsstreifen Veränderliche sind (Rodriguez & Breger 2001).

Nun eine Demonstration aller zurzeit bekannten Typen von veränderlichen Sternen:

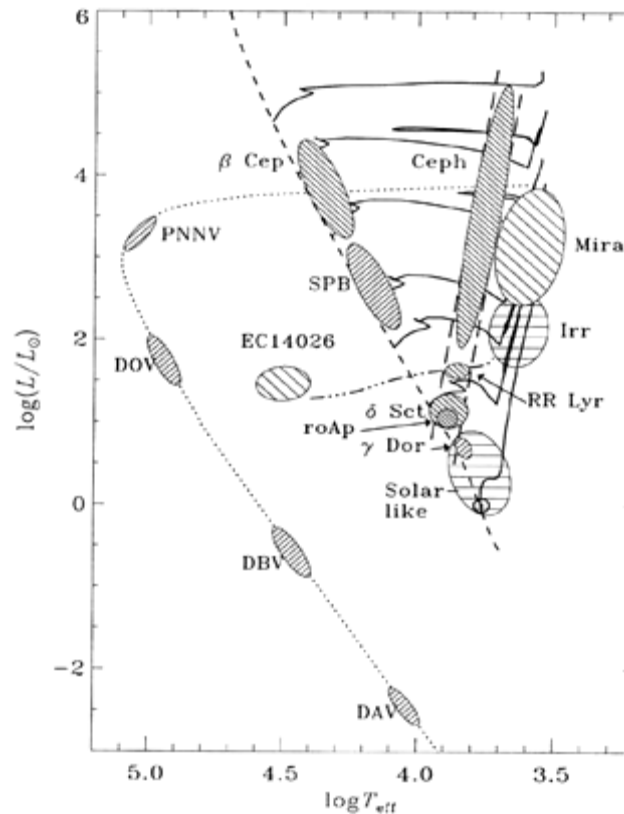


Abbildung 13: Lage der Delta Scuti Sterne im HRD

Ersichtlich ist, dass verschiedene Gruppen von veränderlichen Sternen im HRD teilweise überlappen. Betrachten wir nun jedoch ausschließlich die direkte Umgebung der Delta Scuti Variablen. Geht man den klassischen Instabilitätsstreifen nach oben, trifft man auf RR Lyrae-Sterne, welche weiter entwickelten Objekte der älteren Pop. I oder Pop. II angehören. Diese Objekte befinden sich bereits in der Helium-Brennphase mit Massen um $0.8 M_{\odot}$ und Perioden unter einem Tag. Noch weiter oben im Instabilitätsstreifen befinden sich schließlich die Cepheiden, welche höhere Massen zwischen 5 und 15 Sonnenmassen, sowie deutlich längere Perioden von Tagen bis Monaten besitzen. Da es sich auch hier um weiterentwickelte Objekte handelt, befinden sich auch diese in der Helium-Brennphase. Am „kühlen“ Ende des Instabilitätsstreifens sind γ Doradus Sterne mit Massen zwischen 1.4 und $1.8 M_{\odot}$ anzutreffen (Lenz 2009).

Astrophysikalisch betrachtet, müssen jedoch zwei zusätzliche Arten von Delta Scuti Sternen bzw. Ähnlichkeiten unterschieden werden. Zum Einen entwickelte Pop. II Sterne innerhalb des Instabilitätsstreifens mit für Delta Scuti Sternen charakteristischen Perioden (z.B. SX Phe). Zum Anderen massereiche Sterne, deren Entwicklungsweg diese durch den Instabilitätsstreifen führt. Dabei kreuzen massereiche Sterne mit mehr als zwei Sonnenmassen, auf deren Entwicklungsweg von der Hauptreihe in den Riesenbereich auf nahezu horizontalem Wege das HRD. Das Entwicklungsstadium identifiziert diese zwar nun als Delta Scuti Sterne, jedoch ist die Masse und Leuchtkraft im Durchschnitt deutlich höher. Dies impliziert längere Perioden bis zu einem Tag. Dadurch erfolgt eine Überlappung der Periode mit den RR Lyrae Sternen, welche sich in der späten Roten-Riesen-Phase befinden und kleine Massen unter einer Sonnenmasse aufweisen. Jedoch können langperiodische Delta Scuti Sterne von RR Lyrae Sternen durch deren Rotationsgeschwindigkeit unterschieden werden. Entgegen Delta Scuti Sternen besitzen RR Lyrae Sterne nämlich nicht detektierbare Rotationen und damit Werte $v * \sin(i)$ (Rodriguez & Breger 2001).

Anzumerken ist, dass einige der Delta Scuti Sterne rein radiale Pulsationen besitzen, andere pulsieren gleichzeitig mit nichtradialen Moden. Bei den Moden handelt es sich um je nach Ordnung und Grad mittels Kugelflächenfunktion beschreibbaren Druck- und Gravitationsmoden (Rodriguez & Breger 2001), mit dem zugrundeliegenden κ -Mechanismus als Anregungsmechanismus.

Im Weiteren existiert, wie bei den Cepheiden auch bei den Delta Scuti Sternen, eine sogenannte PLCR (Period-Luminosity-Color Relationship), welche von Breger (Breger 1979) für Population I zu

$$M_V = -3.05 * \log(P) + 8.46 * (b - y)_0 - 3.12$$

M_V ...visuelle Helligkeit

P ...Periode in Tagen

$(b - y)_0$...Farbwerte, Strömgrenfilter

eruiert wurde.

Zur Vollständigkeit dieses Kapitels soll auch eine astrophysikalisch relevante Einteilung dieser Sternklasse in Untergruppen besprochen werden (Rodriguez & Breger 2001):

a) High-Amplitude Delta Scuti Stars (HADS)

Diese Unterteilung betrifft Delta Scuti Sterne mit V-Amplituden ≥ 0.3 mag. Auch unterscheidet sich die Pulsationskurve vom klassischen Typ.

b) SX Phe Variable

Dieser Kategorie gehören Delta Scuti Sterne der Pop.II und älteren Scheibenpopulation bei Temperaturen von um 8500 Kelvin an. Die V-Amplituden können auch mehr als 0.3 mag erreichen und gelten somit gleichzeitig als HADSs.

Zu beachten sind die bereits angesprochenen Gamma Doradus Variablen. Diese Gruppe wurde erst während des letzten Jahrzehnts ausfindig gemacht. Charakteristisch sind hierbei längere Perioden, als bei Delta Scuti Sternen, nahe ein oder zwei Tagen, wobei Ursache der Pulsationen non-radiale g-Moden sind. Die Amplituden befinden sich in einem Bereich von 0.1 mag mit einer Periode von ca. 0.5 bis 3 Tagen (Rodriguez & Breger 2001).

5.4. Pulsation von Delta Scuti Variablen

In Weiterer Folge wird die Pulsation der Delta Scuti Variablen mathematisch, als auch physikalisch besprochen.

5.4.1. Mathematische Beschreibung

Wie bereits angemerkt, pulsieren Delta Scuti Sterne in radialen, als auch in nichtradialen Moden. Radial bedeutet, dass die sphärische Form/Symmetrie des Objektes gleich bleibt, sich jedoch der Radius ändert. Bei nichtradialen Oszillationen bewegen sich gleichzeitig Teile der Oberfläche nach innen, andere nach außen. Oszillationen können über drei Parameter (Quantenzahlen) beschrieben werden, die radiale Ordnung n , die azimutale Ordnung m , sowie den Knotenlinien l . l repräsentiert die Anzahl der Knotenlinien auf der Sternoberfläche, m die Anzahl der Knotenlinien durch die Pole (Rodriguez & Breger 2001). Nachfolgend zwei Beispiele zur besseren Verständlichkeit.

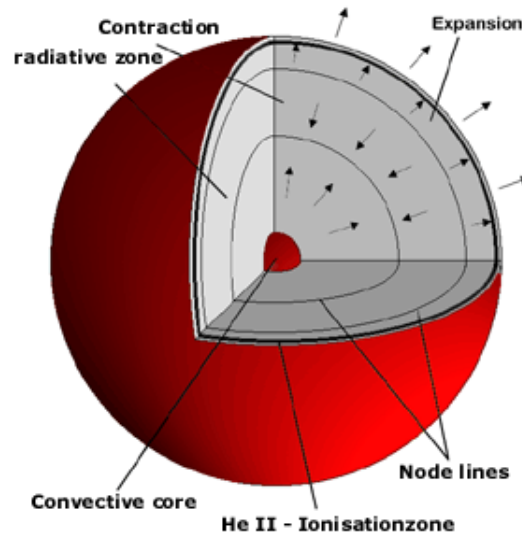


Abbildung 14: Radiale Oszillation der Ordnung $n=2$ (Zima 1999)

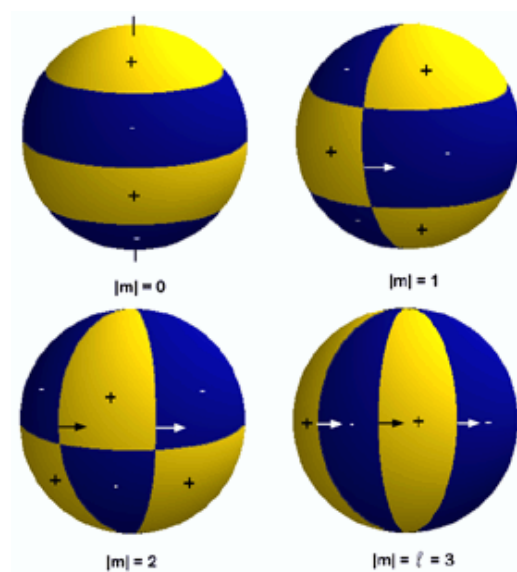


Abbildung 15: Illustration der nichtradialen Werte l und m (Zima 1999)

Ist $m = 0$ sprechen wir von zonaler, bei $|m| < l$ von tesseralen und bei $|m| = l$ von sektoralen Moden. Durch die Konvention ist ersichtlich, dass immer $|m| \leq l$ folgen muss. Im Weiteren wird der Betrag von m verwendet, da für die Vorzeichenkonvention $m < 0$ eine retrograde und für $m > 0$ eine prograde Rotation gilt.

Für eine mathematische Beschreibung der nichtradialen Moden dient als Ausgangspunkt ein Stern im hydrostatischen Gleichgewicht und in sphärischer Symmetrie, also ohne Magnetfeld und ohne Rotation. Störungen und somit Veränderungen in Druck, Dichte und Potential lassen sich über den Auslenkungsvektor $\zeta = (\zeta_r, \zeta_\theta, \zeta_\phi)$ beschreiben.

Dieser ist die Lösung eines Gleichungssystems, bestehend aus der Poissongleichung, Bewegungsgleichung, Kontinuitätsgleichung und der Adiabatangleichung in sphärischer Symmetrie (Zima 2005). Über die Eigenwertgleichung des Laplace-Operators in Kugelkoordinaten kann schließlich die Kugelflächenfunktion

$$Y_l^m(\vartheta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{2l+1}{2} * \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} * P_l^m(\cos \vartheta) \exp(im\varphi)$$

beschrieben werden. Hierbei ist

$$N_l^m = \sqrt{\frac{2l+1}{2} * \frac{(l-m)!}{(l+m)!}}$$

der sogenannte Normierungsfaktor und P_l^m die zugeordneten Legendrepolynome. Die Kugelkoordinaten werden bezeichnet als φ (Azimutwinkel), welcher für den Winkel zwischen der positiven x-Achse und r_{xy} , gezählt von 0 bis 2π (0° bis 360°) in Richtung gegen den Uhrzeigersinn, steht, sowie ϑ (Polarwinkel), der Winkel zwischen der positiven z-Achse und r , gezählt von 0 bis π (0° bis 180°) (Reineker, Schulz & Schulz 2007). Daraus folgt:

$$Y_l^m: [0, \pi] \times [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{C}$$

5.4.2. Anregungsmechanismus der Pulsation

In einem nichtvariablen Stern herrscht ein Kräftegleichgewicht zwischen Gravitationskraft und Strahlungsdruck, letzteres verursacht durch Kernbrennen. Ist dieses Gleichgewicht aus welchem physikalischen Grunde auch immer, nicht mehr gegeben, führt dies dazu, dass der Stern seinen Radius verändert. Oszillationen entstehen schließlich durch Masseträgheit, da der Stern sich dadurch über den Punkt des Gleichgewichtes ausdehnt und schließlich die Rückstellkraft dominiert. Durch Dämpfung würden die Amplituden der Oszillationen jedoch immer kleiner werden und schließlich ganz verschwinden. Es liegt also nahe, dass ständig Energie in die Oszillationen gesteckt werden muss, um diese aufrecht zu erhalten. Die Lösung liegt in der Tatsache, dass thermische Energie in mechanische Energie umgewandelt wird.

Der für Delta Scuti Sterne relevante Anregungsmechanismus ist der κ -Mechanismus. Im Sterninneren wird durch Kernfusion Gammastrahlung erzeugt. Diese Strahlung entweicht jedoch nicht direkt, sondern wird durch Kollision mit Gasteilchen mehrfach

gestreut. Diese „Undurchlässigkeit“ wird als Opazität κ bezeichnet. Opazitätswerte sind jedoch nicht konstant, sondern hängen von Druck, Temperatur und Wellenlänge ab. Oszillationen entstehen, falls die Opazität mit der Temperatur zunimmt. Wird also der Stern durch einen Einfluss komprimiert, steigen durch diese Kompression Druck, Temperatur und Opazität an. Gesteigerte Opazität bedeutet, dass weniger Strahlung durch eine gewisse Schicht dringen kann. Dieser „Strahlungsstau“ bewirkt einen erhöhten Strahlungsdruck, die betroffene Schicht dehnt sich damit aus. Durch adiabatische Expansion sinkt die Temperatur und somit die Opazität, die Strahlung kann entweichen. Die Gravitationskraft nimmt nun wieder überhand und der Zyklus wiederholt sich. Der Stern oszilliert. Signifikante Anomalien und somit Anregungsursachen in der Opazitätskurve entstehen durch Ionisation. Diese sind bei ca. 14000 K (neutrales H und He), bei 45000 K (He II) und 200 000 K (Fe) angesiedelt und bewirken ein schnelles Ansteigen der Opazität. Anzumerken ist, dass die durch die Ionisation bei 14 000 K verursachte Anregung auch nach dem derzeitigen Stand der Technik, aufgrund deren kleinen Amplituden in Modellrechnungen oft vernachlässigt wird (Dziembowski 1980).

6. Frequenzanalyse

Die Bestimmung der Frequenzen bzw. der Perioden eines Sternes gehören zu den fundamentalen Aufgaben der Asteroseismologie. Um anschließend eine Modellierung des Sternes durchführen zu können, gilt es herauszufinden, durch welche Moden diese Frequenzen hervorgerufen werden. Dies geschieht entweder durch Mehrfarbenphotometrie oder hochauflösender Spektroskopie und Linienprofilvariationen. Da für die in dieser Diplomarbeit vorliegenden Daten nur einfarbige photometrische Werte vorliegen, beschränkt sich die Datenauswertung auf die Frequenzanalyse.

Doch wie erfolgt nun die Analyse des Datensatzes eines veränderlichen Sternes? Größtes Problem ist wohl, dass die photometrischen Messungen nicht immer gleichmäßig verteilt sind, kurz gesagt, es treten Lücken auf. Klassische mathematische Theorien beruhen aber auf der Vorgabe eines vollständig durchgehenden Datensatzes. Diese Lücken treten bei bodengebundenen Teleskopen durch die Tag-Nacht-Variationen auf. Bei satellitengestützter Datengewinnung, wie bei MOST, überwiegen die Probleme der Sichtbarkeit des Beobachtungsobjektes. Beispiele hierzu sind ein zu naher Stand des Objektes bei der Sonne, das Verschwinden des Objektes hinter dem Horizont oder auch eine Beeinträchtigung des S/N durch Fehlerzonen, wie die Südatlantik-Anomalie im Magnetfeld der Erde.

In den folgenden beiden Kapiteln 6.1. und 6.2. werden die beiden gängigsten Methoden zur Frequenzbestimmung vorgestellt. Im Grunde sind sowohl die Fourier-Analyse, als auch die harmonische Analyse durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Squares) eigenständige Vorgangsweisen. Ist die Least-Square-Methode die genauere, erfordert diese jedoch sehr viel Rechenleistung. Dementsprechend bedient man sich bei Period04 beider Methoden. Zur Frequenzbestimmung findet die deutlich schnellere Fourier-Methode Anwendung. Über Least-Squares erfolgt anschließend die Verbesserung des durch die Fourier-Methode angenäherten Wertes.

6.1. Die Fourier-Transformation

Da hier eine Unterteilung in die allgemeine, als auch diskrete Fourier-Transformation notwendig ist, erfolgt eine getrennte Darstellung in den folgenden Unterkapiteln.

6.1.1. Allgemeine Fourier-Transformation

Bei der Fourier-Analyse findet die Eigenschaft Anwendung, dass eine Funktion nach Anwendung der Fourier-Transformation in eine Summe von Sinusschwingungen zerlegt werden kann. Die Grundformel hierzu lautet (German Center for Infrared and Optical Interferometry 2001 und Bulla 2003)

$$\mathbf{F(v)} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{x(t)} \mathbf{e^{-i2\pi vt}} \mathbf{dt}$$

und

$$\mathbf{x(t)} = \sum_{k=1}^N \mathbf{A_k e^{i2\pi vt}}$$

$$\mathbf{e^{i2\pi vt}} = \mathbf{cos(2\pi vt)} + \mathbf{isin(2\pi vt)}$$

x(t) ... zeitabhängige Funktion

v ... Frequenz

t ... Zeit

k = 1, ..., N Anzahl der Sinusschwingungen

Daraus folgt nach Umformung

$$F(v) = \sum_{k=1}^N A_k * \delta(v - v_k)$$

wobei als Vereinfachung die Dirac'sche Delta-Funktion Anwendung findet. Diese wird mit

$$\delta(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i2\pi vt} dt$$

bezeichnet (Spahn 2009).

$F(v)$ stellt hierbei die Fourier-Transformierte der Variablen $x(t)$ dar. Voraussetzung hierbei ist nach der Definition die Integrabilität von $x(t)$ und dass die Funktion höchstens abzählbar unendlich viele Nullstellen und Unstetigkeiten besitzt. Der Euler-Term ermöglicht eine harmonische Zerlegung, wobei der Realteil der Kosinustransformierten und der Imaginärteil der Sinustransformierten der Funktion $f(x)$ entsprechen. Ist in der Funktion $x(t)$ eine Sinusschwingung mit v_k gefunden, ist $F(v)$ größer oder kleiner als 0, falls $v=v_1$ bzw. $v=-v_1$. Da es sich beim dem Ergebnis um eine komplexe Zahl handelt, findet entweder der Begriff Amplituden $|F(v)|$ oder die Leistung $|F(v)|^2$ Anwendung. Betrachtet man die Grundformel, liegt es auf der Hand, dass diese Transformation nur eindeutig funktionieren kann, falls unendliche und lückenfreie Daten zur Anwendung kommen. Dies ist jedoch in der Astronomie, durch bereits besprochene Ursachen, nicht der Fall. Aus diesem Grund findet die diskrete Fourier-Transformation Anwendung (German Center for Infrared and Optical Interferometry 2001 und Weisstein 2004).

6.1.2. Diskrete Fourier-Transformation

Überleitend aus dem letzten Abschnitt, ist die diskrete Fourier-Transformation auch bei lückenbehafteten und endlichen Datensätzen anwendbar ist. Die diskrete Transformation

$$F_N(v) = \sum_{k=1}^N x(t_k) * e^{-i2\pi vt_k}$$

beruht auf dem Prinzip, dass $F_N(v)$ nicht genau gleich $F(v)$ sein muss, jedoch ähnliche Eigenschaften an der Stelle v_k besitzt und somit von 0 verschieden ist (Arfken 1985). Es

existiert jedoch eine mathematische Verbindung zwischen $F_N(v)$ und $F(v)$ (Rife & Vincent 1970), die mit folgender Formel illustriert werden soll:

$$\mathbf{F}(v) * \mathbf{W}_N(v) = \mathbf{F}_N(v)$$

$W_N(v)$ ist hierbei die Fourier-Transformation der Fensterfunktion auch spektrales Fenster genannt und wird folgendermaßen beschrieben (Rife & Vincent 1970 und Harris 1978):

$$W_N = \sum_{k=1}^N e^{i2\pi v t_k}$$

Dieses Fenster muss bei der Datenanalyse herangezogen werden, da es Aufschluss über Alias- und Artefaktfrequenzen gibt. Existieren zum Beispiel im Spektralfenster Frequenzwerte von $1/2/3$ c/d, induziert durch Lücken im Datensatz, so ist mit Aliasfrequenzen mit diesen Werten um die realen Werte zu rechnen.

6.2. Harmonische Analyse durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Wie sich aus der Bezeichnung der harmonischen Analyse bereits ableiten lässt, stellt dies ein Verfahren zur Auffindung einer bestimmten Anzahl an harmonischen Stern-Schwingungen dar. Eine Approximation erfolgt über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Square-Fitting). Dabei ist die Annahme einer bestimmten Anzahl von Messungen N zu unterschiedlichen Zeiten t wobei gilt:

$$\mathbf{x}(t_i) \equiv \mathbf{x}_i \text{ wobei } i = 1, \dots, N$$

Es existieren einige auf die jeweilige Problemstellung angepasste mathematische Ansätze, wobei gemäß dem Analyseprogramm Period04 (siehe dazu Kapitel 7) folgender Ansatz für die Frequenzanalyse Verwendung findet (Lenz & Breger 2004), basierend auf Theorie von Bevington (1969):

$$x(t_i) = \sum_{k=1}^N A_k * \sin(2\pi(v_k * t_i + \delta_k)) + c_k$$

$v_k \dots k - te \text{ Frequenz}$

$A_k \dots Amplitude \text{ der Frequenz } k$

$\delta_k \dots Phase \text{ der Frequenz } k$

t_i ... Zeitpunkt der Messung i

c_k ... Nullpunktverschiebung der Frequenz k

Der Term der Summe von $k=1, \dots, I$ gibt die Gesamtheit der Frequenzen k bis zu N an.

6.2.1. Berechnung einer Frequenz

Angenommen wird eine harmonische Oszillation mit der Frequenz ν_1 , Amplitude A_1 und Phase δ_1 . Im Rahmen der Approximation werden Testfrequenzen ν ermittelt und die Amplituden und Phasen mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angenähert. Als beste Annäherung gilt jene, bei welcher die Abweichungen zwischen den Fehlerquadraten (beobachtet und errechnet) ein Minimum ist. Dabei wird eine Likelihood-Funktion definiert als

$$L = \sum_{i=1}^N \{x_i - A * \sin(2\pi * (\nu * t_i + \delta)) + c\}^2$$

Die Likelihood-Funktion ist normalerweise eine bewährte Methode zur Abschätzung der Parameter von Regressionsmodellen, als auch von ökonometrischen Modellen. Die Werte der allgemeinen Schätzfunktion werden so gewählt, dass die Wahrscheinlichkeit, genau die Beobachtungspunkte der Stichprobe zu erhalten, maximal wird. Das bedeutet im Grunde nichts anderes, als dass die Schätzwerte die Likelihood-Funktion maximieren (Long 1997).

Da man bei der Likelihood-Funktion auf der Suche nach einem Maximum ist, wird zur Berechnung der Amplitude und der Phase differenziert und gleich Null gesetzt (Long 1997):

$$\frac{dL}{dA} = 0 \quad \frac{dL}{d\delta} = 0 \quad \frac{dL}{dc} = 0$$

Anschließend kann mit den nunmehrigen Lösungen der erwartete Wert für die Testfrequenz ν über den mathematischen Ansatz (siehe Kap. 6.1.) zu

$$x_i^{Test}(\nu) = A * \sin(2\pi(\nu t_i + \delta)) + c$$

eruiert werden. Nun wird das Residuum durch die Differenzenbildung aus dem gemessenen Wert und dem erwarteten Wert x_k^{Test} gebildet durch (Grundformeln aus: Mathworld 1999 und Bartsch 2004):

$$\mathbf{R}_i(\mathbf{v}) = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^{\text{Test}}(\mathbf{v})$$

Der finale Schritt liegt schließlich in der Suche nach dem Minimum in der Summe der Quadrate aller Residuen (Bartsch 2004).

$$\mathbf{R}^2(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^N \mathbf{R}_i^2(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^{\text{Test}}(\mathbf{v}))^2$$

Dieses Minimum entspricht der höchstwahrscheinlichen Frequenz $\mathbf{v}$.

Ist dies theoretisch gesehen eine sehr gute Methode zur Feststellung und Extrahierung einer Frequenz, können sich bei der praktischen Anwendung Probleme ergeben. Verfügt der Datensatz über eine kleine Anzahl von Datenpunkten oder besitzt dieser große Datenlücken, kann auch eine andere bzw. falsche Frequenz hineininterpretiert werden, die eine harmonische Frequenz der Ursprungsfrequenz darstellt.

6.2.2. Berechnung von mehreren Frequenzen (Multifrequenzen)

Da die meisten pulsierenden Sterne mehrere Frequenzen aufweisen, muss auf die Multifrequenzanalyse eingegangen werden. Dabei wird eine Frequenz ν_1 eruiert und anschließend Prewhitened. Prewhitening ist nichts anderes, als dass die eruierte bzw. berechnete Frequenz vom Datensatz abgezogen wird. Erst nach diesem Vorgang erfolgt die neuerliche Suche nach weiteren Frequenzen ν_2 und Folgende. Um das Ergebnis zu verbessern, wird nach jeder aufgefundenen Frequenz der originale Datensatz gefittet (Vanicek 1971).

7. Die Software Period04

In den jeweiligen Unterkapiteln wird auf die für diese Diplomarbeit verwendete Software, Period04, näher eingegangen werden.

7.1. Allgemeines

Die Auswertungssoftware Period04 ist eine überarbeitete und erweiterte Version der Versionen PERIOD/PERDET (Breger 1990) und Period98 (Sperl 1998) und liegt als Open Source zum Download unter <http://www.univie.ac.at/tops/Period04/> für die Plattformen Linux, MacOS und Windows bereit. Period04 verfügt über die Möglichkeit, individuelle Frequenzen aus Zeitreihen der Lichtkurven von veränderlichen Sternen zu extrahieren. Dazu werden die im letzten Kapitel beschriebenen Methoden, die diskrete Fourier-Analyse, sowie die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Square-Fitting) angewendet. Fourier findet Anwendung zur Auffindung und Annäherung der Frequenz, die Fehlerquadrate zur Verbesserung des Ergebnisses. Ziel ist ein Fit der Lichtkurve mit einer Multifrequenzlösung mit der zusätzlichen Möglichkeit zur Auffindung von Amplituden- und Phasenvariationen und unter Minimierung der Residuen. Ein Residuum impliziert hierbei den Abstand zwischen dem Datenpunkt und der Annäherung der Lösungsgleichung (Lenz & Breger 2004 und Lenz & Breger 2005).

Zur Programmierung kam Java und C++ zur Anwendung, wobei Java zur Gestaltung des User Interfaces diente und C++ zum Datenmanagement und der Berechnung (Lenz & Breger 2004). Im folgenden Abschnitt wird die Oberfläche und Funktionsweise des Programmes erläutert.

7.2. Ein Tutorial über die Funktionen von Period04

Nach Einstieg ins das Programm öffnet sich die grafische Oberfläche mit dem Standardtab „Time String“. Über den Button „Import Time String „ wird die zeitabhängige Lichtkurve eines Sternes in Period04 importiert. Column #1 gibt hierbei die Zeit an, Column #2 bezieht sich auf die Intensitätswerte. Sind mehrere Timestrings des Objektes vorhanden, können diese über den Button „Append Time String“ an den bestehenden angefügt werden. Dabei werden sofort statistische Daten wie „Start time“, „End time“ und Datenpunkte angezeigt.

Auf der nächsten Seite wird dies illustriert:

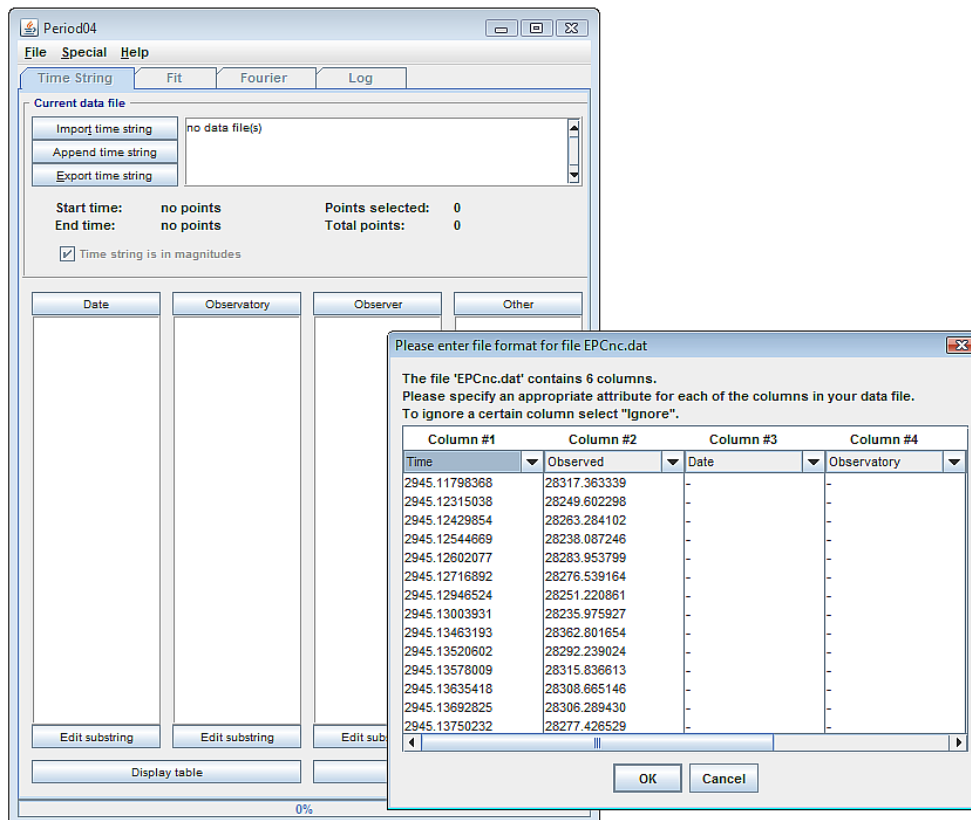


Abbildung 16: Illustration "Import Timestring"

Ist der Timestring nun importiert, folgt der nächste Schritt, die Berechnung des spektralen Fensters und der eigentlichen Frequenzen. Dazu begibt man sich in das Tab „Fourier“ Abbildung 17. Sichtbar sind der selbstbestimmbare Name der Frequenz „Title“, die Frequenzregion, in welcher gesucht werden soll, die Schrittweite der Abtastung und die Nyquist-Frequenz. Die Schrittweite gibt die Größe des Gitters während der Fourier-Analyse an, sprich die Genauigkeit. Die Nyquist-Frequenz ist die höchst detektierbare Frequenz im gesamten Frequenzspektrum. Diese lässt sich relativ einfach berechnen.

Ausgangspunkt hierbei ist die Zeitgröße ΔT über welche N Messpunkte verteilt sind. Die Zeit zwischen zwei Datenpunkten kann über

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{N - 1}$$

berechnet werden. Über das Sampling-Theorem (Görne 2008), welches besagt, dass ein Signal aus einem Datensatz nur eindeutig rekonstruiert werden kann, falls dieses keine Frequenzen über der halben Abtastfrequenz besitzt, berechnet sich schließlich die Nyquist-Frequenz zu:

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t} = \frac{N-1}{2\Delta T}$$

Frequenzen größer als die Nyquist-Frequenz führen also ebenfalls zu den nachteiligen Aliasfrequenzen. Problematisch kann dies werden, falls die Nyquist-Frequenz nicht besonders hoch ist. Betrachten wir ein Beispiel eines kurzperiodischen roAp-Sternes mit einer Periode von 8 Minuten bzw. 180 c/d. Bei einer Zeitauflösung $\Delta t=6$ min. haben wir eine Nyquist-Frequenz von 120 c/d. Somit tritt Aliasing durch Kombinationen bei 60/180/300 c/d auf.

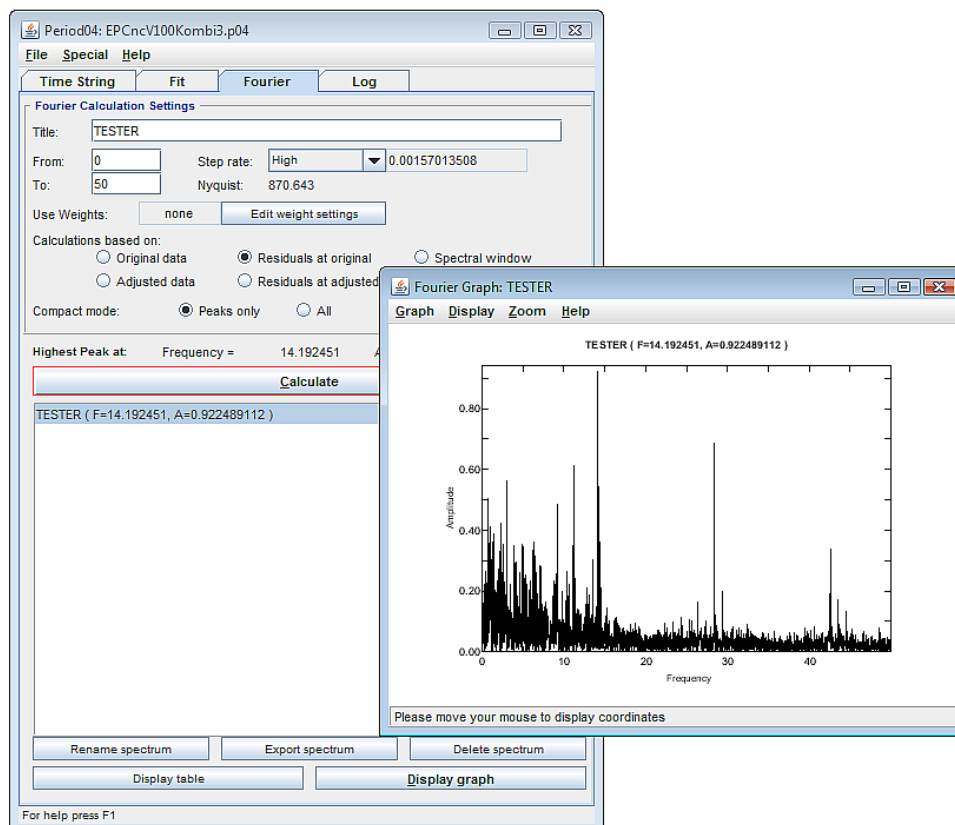


Abbildung 17: Illustration des Tabs Fourier

Ein wichtiger Punkt befindet sich unter „Calculations based on“. Zuerst wird ein „Spectral Window“ angefertigt, um die durch die Datenlücken im Datensatz implizierten Artefakte und Aliases zu rekonstruieren. Wird anschließend die erste Frequenz extrahiert, geschieht dies aus dem Originaldatensatz durch „Original Data“, „Residuals at Original“ folgt bei den nachfolgenden Frequenzen, da der Datensatz ja bereits durch Abzug von den vorhergehenden Frequenzen modifiziert wurde. Die beiden Punkte mit dem Zusatzvermerk „Adjusted“ finden Anwendung, falls der Originaldatensatz durch eine

Zusatzfunktion von Period04 angepasst wurde. Ein Beispiel hierbei wäre eine Berücksichtigung von Amplituden- und Phasenvariationen oder Nullpunktkalibration.

Über den Button „Calculate“ wird die Fourier-Transformation und Berechnung der Frequenz gestartet. Über den Punkt „Display Graph“ kann anschließend das berechnete Frequenzspektrum mit der eruierten Lösungsfrequenz angesehen werden. Geplottet werden die Frequenz (x-Achse) gegen die Amplitude (y-Achse) in Einheiten des importierten Timestrings (ADU, mag, mmag).

Wurde eine Frequenz extrahiert, begibt man sich ins Tab „Fit“.

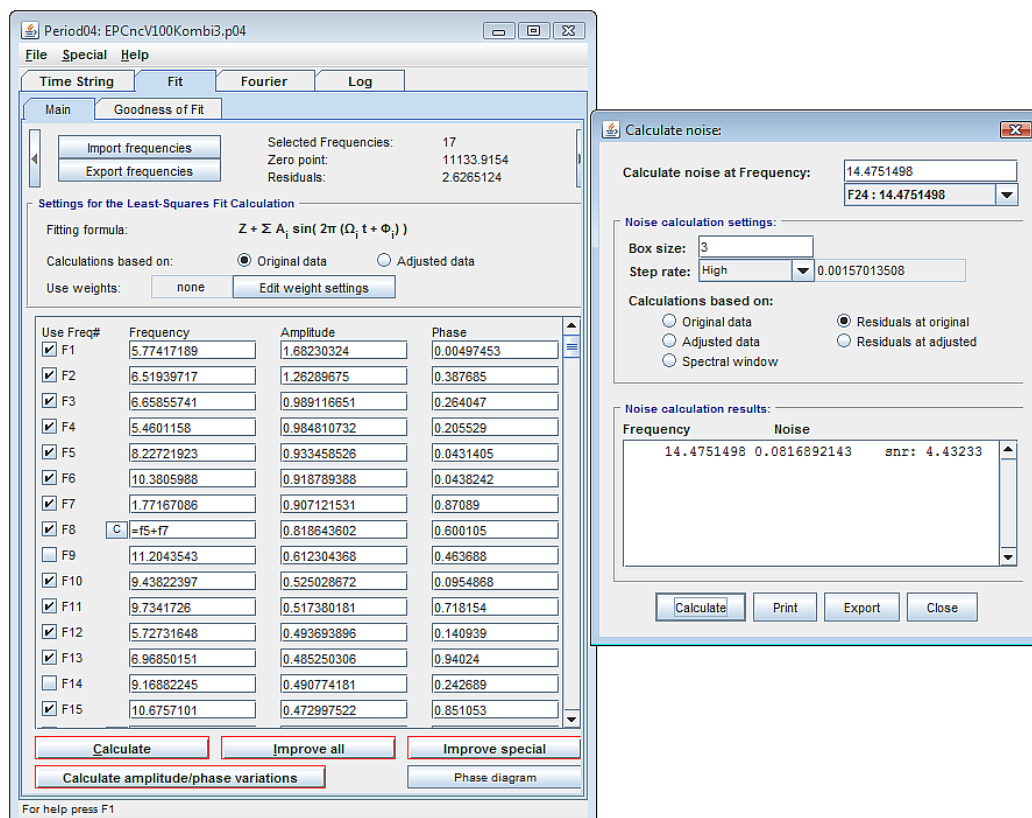


Abbildung 18: Illustration Tab Fit

In diesem Tab befinden sich die Frequenzliste, sowie die statistischen Daten (Zahl der Frequenzen, Nullpunkt und Residuen). Der Nullpunkt wird am Beginn der Berechnung abgezogen und gibt den Mittelwert aller Intensitätswerte der Datenpunkte an. Wurde nun also die 1. Frequenz mittels Fourier-Transformation berechnet, befindet sich der Frequenzwert unter der Zeile F1. Über den Button „Calculate“ und „Improve All“ können Amplitude und Phase kalkuliert werden und diese Werte unter Minimierung der Residuen weiter verbessert und angepasst werden. Da normalerweise alle mit einem Häkchen markierten Frequenzen verbessert werden, kann dies unter „Improve Special“ auch nur

für eine einzelne Frequenz durchgeführt werden. Im Grunde genommen geht man nun wieder ins Tab „Fourier“ und extrahiert eine neue Frequenz, welche dann im Tab „Fit“ gemeinsam mit den bereits eruierten Frequenzen verbessert wird. Dies wird solange durchgeführt, bis eine keine signifikanten Frequenzen mehr aufgefunden werden. Signifikant bedeutet empirisch gesehen, mit einem S/N von >4 bei Frequenzen und S/N>3.5 bei Kombinationsfrequenzen (Breger 1993a). Dieses S/N kann über den Menüpunkt „Special“ → „Calculate Noise at Frequency“ überprüft werden. Ein S/N von 4 bedeutet somit eine Amplitude des Frequenzpeaks 4x höher als das Durchschnittsrauschen in dieser Frequenzregion. Über die Box-Size kann der Bereich des zu eruiierenden Rauschens um den untersuchten Peak festgelegt werden. Der Bereich wird wie folgt festgelegt:

$$[Frequenz - \frac{Boxsize}{2}, Frequenz + \frac{Boxsize}{2}]$$

Da die ausgewerteten MOST-Daten eine relativ hohe Auflösung bei ca. 50000 Datenpunkten besitzen, wurde die Boxsize auf 2 festgelegt. Zu berücksichtigen ist, dass benachbarte Frequenzpeaks das S/N deutlich senken können. Diese Eigenschaft macht es schwierig, signifikante Frequenzen in der Nähe von Aliasing oder Artefakten aufzufinden.

Wurden Kombinationen von Frequenzen gefunden, können diese ebenfalls in die Tabelle mittels des Befehls „=F_x±F_y“ für die Addition oder Subtraktion von zwei Frequenzen, „=F_x±F_y±F_z“ für drei Frequenzen, „=XF“, für harmonische Frequenzen oder „X*F_x±Y*F_y“ für Kombination von harmonischen Frequenzen, implementiert werden. Im Weiteren gibt es für die Berechnung vom Amplituden- und Phasenvariationen einen eigenen Button „Calculate Amplitude/Phase Variations“.

Unter dem Menüpunkt „Special“ finden sich noch einige nützliche Tools, welche die Software abrunden. „Subdivide Timestring“ ermöglicht eine Teilung des Datensatzes in frei definierte oder lückenabhängige Zeitabschnitte. Dies kann z.B. nützlich sein, falls verschiedene Nullpunkte in einem String vorhanden sind oder Amplituden- und Phasenvariationen berechnet werden sollen. Der Punkt „Combine Timestring“ ist das Gegenstück dazu. „Show Time Structuring“ bietet einen statistischen Überblick über die verwendeten Daten. „Show Analytical Uncertainties“ dient zur Berechnung der Standardabweichung σ der Werte Frequenz, Amplitude und Phase.

Abschließend soll noch angemerkt werden, dass die Ergebnisse bzw. Frequenzen über den Menüpunkt File → Export in eine *.dat-Datei exportiert werden können. Graphen/Plots können im JPG- oder EPS-Format abgespeichert werden.

Anmerkung:

Zur Eruierung der Fehler für Frequenz, Amplitude und Phase wurde die Technik von Kallinger et al. (Kallinger, Reegen & Weiss 2008) angewandt. Dies darum, da die mittels Period04 ermittelten Fehler durch die Betrachtung eines idealen Falles zu gering ausfallen und die Methode von Kallinger bereits erfolgreich für große MOST-Datensätze Anwendung findet. Die Fehler werden wie somit wie folgt definiert bzw. berechnet (Kallinger, Reegen & Weiss 2008):

$$\sigma(f) = \frac{1}{T\sqrt{\text{sig}(a)}} \sim \frac{2}{T * \frac{S}{N}(a)} * \frac{1}{\sqrt{\pi * \log e}}$$

$$\sigma(a) = \frac{a}{\sqrt{\text{sig}(a)}} \sim \frac{1}{\frac{S}{N}(a)} * \frac{2}{\sqrt{\pi * \log e}} * a$$

$$\sigma(p) = \sqrt{\frac{\log e}{2\text{sig}(a)}} \sim \sqrt{\frac{2}{\pi}} * \frac{1}{\frac{S}{N}(a)}$$

Hierbei sind

$\sigma(f)$, $\sigma(a)$, $\sigma(p)$... Fehler für Frequenz, Amplitude, Phase

T ... Länge des Datensatzes in Tagen

sig (a) ... Signifikanz eines Peaks mit Amplitude a

S/N (a) ... Signal to Noise eines Peaks mit Amplitude a

a ... Amplitude eines Peaks

Zu beachten ist die Umrechnung von Signal to Noise (S/N) in Signifikanz (sig) mittels der Formel (Reegen 2007)

$$\text{sig}(a) \sim \frac{\pi * \log e}{4} * \left(\frac{S}{N}\right)^2$$

8. Der Praesepe Cluster (M44, NGC2632)

Die untersuchten Objekte dieser Diplomarbeit sind Mitglieder des Praesepe Clusters, weswegen auf diesen etwas näher eingegangen werden soll.

8.1. Ein bisschen Geschichte

Der Praesepe Cluster, auch genannt M44 für Messier 44, oder Beehive Cluster ist mit freiem Auge sichtbar und deswegen seit prähistorischen Zeiten bekannt. Griechen und Römer assoziierten das Gebilde als eine Art Futterkrippe (diffuser unaufgelöster Nebel), von welcher zwei Esel essen. Diese Esel wurden dabei mit den Sternen Gamma Cnc und Delta Cnc bezeichnet. Der griechische Gelehrte Eratosthenes von Kyrene berichtete im 3. Jahrhundert vor Christus, dass dies auch jene Tiere gewesen seien, auf denen die Götter Silenus und Dionysos in die Schlacht gegen die Titanen geritten sind. Die Titanen fürchteten sich so vor den unbekannten Tieren, dass sie aufgaben und schließlich die Schlacht verloren. Silenus und Dionysos waren so erfreut über den glücklichen Ausgang, dass sie die Tiere gemeinsam mit der Futterkrippe als gottgleich in den Himmel erhoben. Auch Hipparchus, im 2. Jahrhundert vor Christus, und Ptolemäus, im 1. Jahrhundert nach Christus erwähnten Praesepe in ihren Aufzeichnungen als diffus nebeliges Objekt. Galileo Galilei konnte mit seinem Fernrohr im 16. Jahrhundert erstmals das diffuse Objekt auflösen und 40 Sterne identifizieren. Nach Beobachtungen durch Peiresc 1611 und Simon Marius 1612 wurde Praesepe schließlich am 4. März 1769 von Messier zu seinem Katalog hinzugefügt (Frommert & Kronberg 2007).

8.2. Aktuelle Forschung

Der Praesepe Cluster, ein offener Sternhaufen, besteht nach neuesten Forschungsergebnissen, durch N-Körpersimulationen, aus 1010 Sternmitgliedern bei einer Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit >80% und sogar 1030 Sternen mit >50%. Aufgrund der verwendeten Auswertungsmethoden und Sensitivität der verwendeten Detektoren, im Bereich der Sternklassen F0-M5, geht man von einer Vollständigkeit der Daten von >90% aus. Die Gesamtmasse des Clusters beläuft sich auf $550 \pm 40 M_{\odot}$. 68% der Sterne sind Zwerge der Klasse M, 30% sonnenähnliche Sterne der Spektralklassen F/G/K und 2% der Spektralklasse A (Kraus & Hillenbrand 2007). Im Weiteren konnten 11 Weiße Zwerge (Dobbie et al. 2006) und 5 Riesensterne identifiziert werden (Abt & Willmarth 1999).

Der Kernradius beträgt 3.5 ± 0.4 pc (Adams, Stauffer & Skrutskie 2002), der Radius, welcher die halbe Masse des Cluster beinhaltet 3.9 ± 0.4 pc (Adams, Stauffer & Skrutskie 2002) und der Gezeitenradius 16 ± 1 pc (Adams, Stauffer & Skrutskie 2002) bzw. nach neueren Surveys 11.5 ± 0.3 pc (Kraus & Hillenbrand 2007). Den Kernradius bezeichnet dabei den Abfall der Flächenhelligkeit um 50%, der Gezeitenradius die Entfernung vom Zentrum, ab welcher der gravitative Einfluss der Galaxie größer ist, als jener der Sternkomponenten im Cluster.

Praesepe unterliegt einer für Sterncluster typischen dynamischen Massensegregation (Kraus & Hillenbrand 2007). Diese kann bei Betrachtung des Newton'schen Gravitationsgesetzes sehr einfach mathematisch begründet werden.

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = -G * \frac{M_1 M_2}{r^2} * \mathbf{e}_r$$

G ... Gravitationskonstante mit $6.67428 * 10^{-11} m^3 kg s^2$

M_1, M_2 ... Massen von Körper 1 und 2

r ... Abstand der beiden Körper

$\mathbf{e}_r$... Einheitsvektor in radialer Richtung

Grundsätzlich gilt demnach, dass je massereicher ein Objekt ist, desto stärker zieht dieses andere Objekte an. Die Anziehungskraft wird nun umso größer, je größer die Massenterme M_1 und M_2 sind. Bei der Bildung eines Clusters aus einer ursprünglichen Molekülwolke sind die Massen (Sterne) anfangs zufällig verteilt. Nach deren Ausbildung beginnen diese sich jedoch aufgrund des Newton'schen Gesetzes durch die Anziehungskraft gegenseitig zu beeinflussen. Diese Phase wird als primordiale Massensegregation bezeichnet. Tritt nun der Fall eines Zusammentreffens oder eines knappen Vorbeifluges ein, wird kinetische Energie zwischen den beteiligten Objekten ausgetauscht. Ist theoretisch der Energieaustausch in alle Richtungen möglich, existiert eine statistische Tendenz zur Anpassung zu gleichen Energiewerten (Bonnell & Davis 1998). Das bedeutet:

$$E_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} \quad E_2 = \frac{m_2 v_2^2}{2}$$

E_1, E_2 ... kinetische Energie Objekt 1 bzw. 2

m_1, m_2 ... Massen Objekt 1 bzw. 2

v_1, v_2 ... Geschwindigkeiten der Objekte

Durch Angleich der Energien folgt:

$$E_1 = E_2 = \frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_2 v_2^2}{2}$$

$$m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2$$

Daraus folgt, dass massereichere Sterne kleinere Geschwindigkeiten aufweisen und der Gravitationskraft weniger entgegenzusetzen haben, als masseärmere. Es bildet sich somit ein Zentrum mit massereichen Sternen und niedrigen Geschwindigkeiten und Orbits aus. Nach außen hin befinden sich masseärmere Sterne mit dementsprechend höheren Geschwindigkeiten und Orbits (Bonnell & Davis 1998). Ist die Geschwindigkeit eines Objektes höher als die Fluchtgeschwindigkeit des Clusters, ist eine gravitative Entkopplung und Flucht aus dem System möglich. So lösen sich die meisten offenen Sternhaufen in einigen Millionen Jahren auf, weit bevor deren Mitgliedssterne das Ende ihres Brennzyklus erreicht haben (Khalisi, Amaro-Seoane & Spurzem 2007).

Die Entfernung von Praesepe wird bis jetzt diskutiert, wobei die Werte 160 pc (Pinfield et al. 2003) bis 170 pc (Hambly et al. 1995), 177 pc von HIPPARCOS (Mermilliod et al. 1997) und 187 pc (VanLeeuwen 2009) in Kalkulationen Verwendung finden. Die Genauigkeit der Ergebnisse beläuft sich im Mittel auf ca. ± 10 pc, wobei HIPPARCOS wohl als zuverlässigster Messwert zu betrachten wäre. Das Alter beträgt 625 Myr (Dobbie et al. 2006) bzw. 600 Myr (Hambly et al. 1995). Eine Anfrage über SIMBAD ergibt weitere nachfolgende Eckdaten (Epoche J2000.0):

Deklination [°]	08 40.4
Rektaszension [h]	+19 41
Helligkeit [mag]	B 3.4
	V 3.10

Tabelle 2: Eckdaten Praesepe Cluster M44 (Kharchenko et al. 2005)

Praesepe beherbergt 14 zurzeit bekannte Delta Scuti Sterne, davon wurden 9 bis jetzt asteroseismologisch untersucht. Von den vier in dieser Diplomarbeit untersuchten Objekten sind einige Frequenzen von EP Cancrī, BT Cancrī, BS Cancrī bekannt, für HD 73872 liegen bis dato noch keine Daten vor (Frandsen et al. 2001). Anzumerken ist, dass HD 73872 bis dato nicht als variabel bekannt war und zusätzlich, aufgrund der in

dieser Diplomarbeit gefundenen eindeutigen Variabilität, zu den 14 bekannten Objekten dieser Klasse zu zählen ist.

9. Vorstellung der Beobachtungsobjekte

Insgesamt liegen Daten für vier Delta Scuti Sterne EP Cnc, BT Cnc, BS Cnc und HD73782 vor. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine Übersicht über deren Eckdaten und Informationen bzgl. bereits vorliegender Forschungsergebnisse. Bei den Sternpositionen handelt es sich jeweils um die Epochen J2000.0.

9.1. EP Cancri

Die von Simbad ausgegebenen Basisdaten für EP Cancri, EP Cnc in Kurzform, KW 348 (Praesepe) geschrieben, sind:

Deklination	08 40 56.2995
Rektaszension	+19 34 49.218
Spektraltyp	A6Vn
Helligkeiten	B 6.91
	V 6.76
	J 6.368*
	H 6.330*
	K 6.280*

Tabelle 3: Basisdaten EP Cancri (Perryman et al. 1997)

Anzumerken ist, dass die mit „*“ markierten Daten vom Two Micron All Sky Survey stammen, auch 2MASS genannt (Cutri et al. 2003). Neben EP Cnc sind die wichtigsten Identifier BD+20 2175 (Bonner Durchmusterung), HD 73819 (Henry Draper Catalogue), HIP 42600 (The Hipparcos and Tycho Catalogues) und SAO 98032 (SAO Star Catalog J2000).

Die Variabilität von EP Cnc wurde 1989 während einer Multi-Site Campaign festgestellt. EP Cnc sollte ursprünglich als einer von zwei nichtvariablen Vergleichssterne für den benachbarten Delta Scuti Stern HD 73756 dienen. Durch den relativ kurzen Datensatz des 0.5 m Devon Astronomical Observatories von 30h über 7 Tage konnten multiple Frequenzen um die Periode von ca. 5.82 c/d abgeschätzt und das Objekt als Anwärter für den Delta Scuti Typ identifiziert werden (Martin & Hube 1989). Die gesamte Kampagne umfasste 19 Tage Beobachtungszeit mit fünf global verteilten Observatorien, wobei folgende Pulsationsfrequenzen festgestellt werden konnten:

Frequency		Amplitude millimag	Signal/ Noise	Epoch (HJD) 244 0000 +
cycles d ⁻¹	mHz			
f_1 , 5.466	0.0633	3.8	14.5	7572.9826
f_2 , 6.511	0.0754	2.3	8.8	7572.9682
f_3 , 5.786	0.0670	1.8	6.8	7572.9209
Residuals		± 2.2		

Tabelle 4: Pulsationsfrequenzen EP Cnc (Breger et al. 1994)

Eine 4. Frequenz wurde bei 6.30 c/d und eine 5. Frequenz bei 2.18 c/d vermutet. Vermutet deshalb, da das S/N von 3.3 für beide Frequenzen unterhalb des Kriteriums von $S/N \geq 4$ liegt und somit zu niedrig für eine sichere Aussage ist (Breger et al. 1994).

Bei einer 5 Nächte andauernden, von der Kampagne unabhängigen Beobachtung im Jahre 1991 durch B. Martin am Devon Astronomical Observatory, konnte die Periode von 5.46 c/d verifiziert werden. Ein zweiter Peak bei 5.51 ist aufgrund der geringen Auflösung von 0.2 c/d zwar im Frequenzspektrum vorhanden, aber mathematisch nicht unterscheidbar (Breger et al. 1994).

Die Effektivtemperatur T_{eff} und die Schwerebeschleunigung g konnte durch Schmalband-Photometrie zu $T_{eff} = 8000K$ und $\log g = 3.67$ modelliert werden (Kurucz 1991). Der Wert für die bolometrische Helligkeit $M_{bol} = 0.58 mag$ (Breger et al. 1994) dient neben der jeweiligen Periode P_i mithilfe der Formel (Breger et al. 1990)

$$\log Q_i = -6.454 + \log P_i + 0.5 \log g + 0.1 M_{bol} + \log T_{eff}$$

zur Berechnung der Pulsationskonstanten und wird im Rahmen der Auswertung Verwendung finden. Liegt nur die absolute Helligkeit M_V auf, muss diese zur Feststellung der bolometrischen Helligkeit noch korrigiert werden. Dazu dient die Formel:

$$M_{bol} = M_V - BC$$

M_{bol} ... absolute bolometrische Helligkeit

M_V ... absolute Helligkeit

BC ... bolometrische Korrektur

Eine Liste der Korrekturen BC in Abhängigkeit der Temperatur wurde unter anderem von G. Habets und J. Heintze (Habets & Heintze 1981), P. Flower (Flower 1996) oder M.

Bessel et al. (Bessell, Castelli & Plez 1998) erstellt. Die referenzierten Datensätze von Pena et al. (1997) wenden die bolometrische Korrektur von K. Lang (Lang 1991) an.

Eine Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit ergab einen Wert von $v \sin i = 145 \text{ km s}^{-1}$ (Uesugi & Fukuda 1982). Zwecks Vollständigkeit sollten noch die Werte

$$b - y = 0.091$$

$$m_1 = 0.915$$

$$c_1 = 1.075$$

$$\beta = 2.818$$

erwähnt werden (Breger et al. 1994).

9.2. BT Cancri

Die in Simbad ausgegebenen Basisdaten für BT Cnc, auch 38 Cancri oder KW 204 (Praesepe) sind:

Deklination	08 39 42.6548
Rektaszension	+19 46 42.440
Spektraltyp	F0III
Helligkeiten	B 6.88
	V 6.66
	J 6.106*
	H 5.989*
	K 6.000*

Tabelle 5: Basisdaten BT Cancri (Perryman et al. 1997)

Auch hier stammen die mit „*“ bezeichneten Filterwerte vom Two Micron All Sky Survey, auch 2MASS genannt (Cutri et al. 2003). Neben BT Cnc sind die wichtigsten Identifier BD+20 2149 (Bonner Durchmusterung), HD 73575 (Henry Draper Catalogue), HIP 42485 (The Hipparcos and Tycho Catalogues) und SAO 98006 (SAO Star Catalog J2000).

Die Variabilität von BT Cnc wurde im Rahmen eines Surveys im Praesepe Cluster 1970 entdeckt (Breger 1970). In diesem Paper wird der Stern mit HD73575 bezeichnet und Werte für $V=6.66 \text{ mag}$ und $(b-y) = 0.153$ angegeben. 1973 publizierte Breger auch die Periode zu diesem Datensatz mit $P=0.11 \pm 0.01 \text{ d}$ (Breger 1973). 1979 wurde der Stern erstmals für eine längere Zeit und zwar für 12 Nächte am Observatorium in Milan beobachtet und eine Frequenzanalyse durchgeführt. Weitere 4 Nächte, welche bereits

1975 gewonnen wurden, wurden zum bestehenden Datensatz inkludiert (Guerrero 1975). Die dabei eruierten Frequenzen waren $f_1=7.14$ c/d mit 6 mmag, $f_2=7.17$ c/d mit 6 mmag und $f_3=9.77$ c/d mit 21 mmag (Guerrero, Mantegazza & Scardia 1979). Kurze Zeit später wurde ein anderes Frequenzset unter Verwendung der gleichen Daten von Guerrero, Mantegazza und Scardia, bestehend aus den folgenden drei Frequenzen publiziert (Breger 1980):

FREQUENCY (cycles per day)	SEMIAMPLITUDES (mag)			σ (epoch) (U, B, V)
	V	B	U	
9.77713.....	0.0172	0.0201	0.0227	0 ^d 000
7.8811.....	0.0051	0.0080	0.0050	0 ^d 002
5.9465.....	0.0042	0.0038	0.0047	0 ^d 009

Tabelle 6: Frequenzset BT Cnc 1980 (Breger 1980)

Anzumerken ist, dass die 3. Frequenz in dieser Publikation als unsicher gilt und nur die Frequenz von 9.77 c/d bestätigt werden konnte. Observationen über die Dauer von 50 Stunden in Seoul/Korea (Kim & Lee 1995) brachten zwei Frequenzen zu Tage:

Frequency	Present data(1994)					Previous data(1975-76)	
	Cycles/Day	μ Hz	S/N [†]	$A_j^{\dagger}$	$\phi_j^{\dagger}$	Cycles/day	S/N [†]
f_1	9.7783	113.174	16.0	0.0158	0.307	9.7771	12.0
f_2	7.0153	81.195	9.1	0.0088	2.616	7.8818	3.8

Tabelle 7: Frequenzset BT Cnc 1994 (Kim & Lee 1995)

Bereits 1997 wurden am Brorfelde Schmidt Telescope der Universität Kopenhagen 704 Datenpunkte über zwei Wochen gesammelt. Dies lieferte folgende Frequenzergebnisse (Freyhammer, Larsen & Petersen 1997):

Frequency [c/d]	Semiamp. [mmag]	Phase [rad]	Identification
9.783	18.0 ± 0.2	2.55 ± 0.01	ν_a
19.566	0.7 ± 0.2	3.00 ± 0.26	$2\nu_a$
7.005	9.9 ± 0.2	2.54 ± 0.02	ν_b
14.011	1.1 ± 0.2	5.48 ± 0.16	$2\nu_b$
16.788	1.4 ± 0.2	2.98 ± 0.13	$\nu_a + \nu_b$
2.778	1.2 ± 0.4	3.09 ± 0.53	$\nu_a - \nu_b$
8.052	2.5 ± 0.3	2.39 ± 0.13	
6.273	1.0 ± 0.2	5.79 ± 0.24	

Tabelle 8: Frequenzset BT Cnc 1997 (Freyhammer, Larsen & Petersen 1997)

Grundsätzlich sind diese Frequenzen zwar im Datensatz vorhanden, jedoch können nur die Frequenzen von 9.783 c/d und 7.005 c/d als sicher angesehen werden (Freyhammer, Larsen & Petersen 1997). Angaben bzgl. S/N sucht man jedoch in dieser Publikation vergeblich. Die letzte vorhandene Publikation bzgl. der Frequenzanalyse wurde 1998 veröffentlicht (Hernandez et al. 1998). Observationen während der STEPHI-Campaign 1997 brachten insgesamt 115 Stunden an Daten, jedoch nur zwei bis dato bekannte Frequenzen:

- $F_1=9.78$ c/d bei einer Amplitude 10.55 mmag und S/N=11.3
- $F_2=7.01$ c/d bei einer Amplitude 8.28 mmag und S/N=8.2

Weiters konnten nachfolgende Ergebnisse aus der Literatur gefunden werden (Lopez de Coca et al. 1990):

$$\begin{aligned}b - y &= 0.158 \\m_1 &= 0.180 \\c_1 &= 0.995 \\\beta &= 2.778 \\v \sin i &= 150 \text{ km s}^{-1} \\\log T_{eff} &= 3.885 \\\log g &= 3.414 \\M_V &= 0.74\end{aligned}$$

Abweichende Werte werden in der Literatur auch gehandelt zu (Breger 1980):

$$\begin{aligned}\log g &= 3.67 \text{ (durch Perioden berechnet)} \\\log g &= 3.64 \text{ (durch uvby}\beta \text{ - Photometrie)}\end{aligned}$$

und (Breger 1979)

$$\begin{aligned}b - y &= 0.153 \\M_V &= 0.51\end{aligned}$$

Im Weiteren konnten zu den vorigen Werten leicht abweichende Daten einer ausgedehnten Beobachtungsreihe aus den Jahren 1985, 1987 und 1997 gefunden werden (Pena et al. 1998):

$$\begin{aligned}b - y &= 0.144 \\m_1 &= 0.199 \\c_1 &= 0.988\end{aligned}$$

$$\beta = 2.763$$

$$M_V = 0.50$$

$$M_{bol} = 0.38$$

$$\log T = 3.89$$

$$\log g = 2.90$$

Anzumerken ist, dass der bolometrische Wert von 0.38 mit einer Differenz zur absoluten Magnitude von 0.12 (Lang 1991) zu niedrig zu sein scheint und mit den Rechnungen mittels neueren Modellen von Flower (Differenz von 0.03) und Bessel et al. (Differenz von 0.02) nicht konsistent ist. Jedoch gibt das ältere Modell von G. Habets bzw. J. Heintze eine größere Differenz von 0.18 wieder. Diese Varianz in den Werten der verschiedenen Modelle stellt eine erhebliche Fehlerquelle bei der Eruiierung der Pulsationskonstanten dar.

9.3. HD 73872

Dieser Stern ist bis dato nicht als variabel bekannt. Eine via ADS/Harvard durchgeführte Anfrage verlief negativ. Somit sind nur die durch SIMBAD eruierten Basisdaten bekannt:

Deklination	08 41 13.7734
Rektaszension	+19 55 19.177
Spektraltyp	A5V
Helligkeiten	B 8.55
	V 8.34
	J 7.875*
	H 7.825*
	K 7.774*

Tabelle 9: Basisdaten HD 73872 (Hog et al. 1998)

Auch hier stammen die mit „*“ bezeichneten Filterwerte vom Two Micron All Sky Survey auch 2MASS genannt (Cutri et al. 2003). Neben HD 73872 (Henry Draper Catalogue) sind die wichtigsten Identifier BD+20 2179 (Bonner Durchmusterung) und SAO 80353 (SAO Star Catalog J2000).

9.4. BS Cancri

Zuerst wieder die Basisdaten von BS Cancri bzw. KW 154 (Praesepe):

Deklination	08 39 09.0992
Rektaszension	+19 35 32.634
Spektraltyp	A9V
Helligkeiten	B 8.78
	V 8.59
	J 8.006*
	H 7.949*
	K 7.875*

Tabelle 10: Basisdaten BS Cancri (Hog et al. 1998)

Auch hier stammen die mit „*“ bezeichneten Filterwerte vom Two Micron All Sky Survey, auch 2MASS genannt (Cutri et al. 2003). Neben BS Cnc sind die wichtigsten Identifier BD+20 2144 (Bonner Durchmusterung), HD 73450 (Henry Draper Catalogue) und SAO 98002 (SAO Star Catalog J2000).

Die erste grundlegende Feststellung der Variabilität von BS Cnc erfolgte 1973 durch Breger zu einer Periode von 19.61 c/d und einer Amplitude von 20 mmag (Breger 1973). Erst 1998 erfolgten die nächsten Ergebnisse (Hernandez et al. 1998):

Frequenz [c/d]	Amplitude [mmag]	Phase
17.035	6.141	-0.041
15.525	2.676	+0.228
34.229	1.353	+2.659
41.630	1.116	-1.300

Tabelle 11: Frequenzergebnisse der STEPPI Kampagne (Hernandez et al. 1998)

Ohne Angabe der Amplituden erfolgte ebenfalls 1998 eine Untersuchung des Objektes im Rahmen eines Surveys. Dabei konnten folgende Frequenzwerte eruiert werden (Pena et al. 1998):

$$f_1=17.038 \text{ (signifikant)}$$

$$f_2=16.300 \text{ c/d (signifikant)}$$

$$f_3=2.025 \text{ c/d (nicht signifikant)}$$

Im Weiteren konnten folgende Werte in der Literatur gefunden werden (Breger 1973):

$$b - y = 0.149$$

$$M_V = 2.50 \text{ mag}$$

Etwas aktuellere Werte (Pena et al. 1998):

$$M_V = 2.19 \text{ mag}$$

$$M_{bol} = 2.09 \text{ mag}$$

$$\log T = 3.88$$

$$\log g = 4.00$$

$$b - y = 0.149$$

$$m_1 = 0.197$$

$$c_1 = 0.793$$

$$\beta = 2.770$$

Auch hier ist die bolometrische Korrektur von 0.10 mag (Lang 1991), gegenüber 0.034 (Flower 1996) und 0.30 (Bessell, Castelli & Plez 1998) hoch, mittels 0.09 mag (Habets & Heintze 1981) jedoch nahezu deckungsgleich zum älteren Modell.

10. Datenreduktion

Da die Datenreduktion durch Kollegen Markus Hareter aufgrund der „Data Reduction pipeline for MOST Guide Stars“ (Hareter et al. 2008) durchgeführt wurde, erfolgt hier lediglich ein Überblick über die hierbei für die Daten dieser Diplomarbeit angewendeten Methoden. Dieser Überblick folgt, falls nicht anders angegeben der genannten Publikation.

Diese Reduktionsmethode senkt die Amplituden der Artefakt- und Aliasfrequenzen um das Vielfache und stellt somit eine sehr gute Methode zur Verbesserung des Datensatzes dar.

Das vorliegende Datenformat für Guide-Stars (GS) besteht aus lediglich drei Werten, dem julianischem Datum, der Integrationszeit und der Intensität. Das julianische Datum wird hierbei auf den 01.01.2000 normiert, sprich es wird der Wert des JD 2,451,545 abgezogen. Die Einheiten der Integrationszeit sind Sekunden, die der Intensität ADU. Bei einer Mindestanzahl der GS für die notwendige Positionsgenauigkeit des Satelliten von vier, wird jeder GS mit einem Subraster von 20x20 Pixel (1'x1') versehen. Die erste und letzte Reihe des Subrasters wird zur Feststellung der Hintergrundhelligkeit gemittelt und zur Korrektur vom Wert des GS abgezogen. Mehrere korrigierte Einzelbelichtungen (3s) werden schließlich zu einem Gesamtwert (ca. 40s) aufsummiert (stacked exposure). Die elementaren Korrekturen werden On-Board durchgeführt und lediglich die drei finalen Werte werden in Form eines Timestrings Richtung Erde geschickt.

Nun kommt die Technik der Dekorrelation (Reegen et al. 2006) zur Anwendung, welche ursprünglich für den Fabry Imaging Mode entwickelt wurde. Diese Methode stellt eine lineare Korrelation zwischen den Intensitäten des Targets und des Hintergrundes her. Da im GS-Modus jedoch keine separaten Informationen des Hintergrundes vorhanden sind, wird als Ersatz die Intensität eines nichtvariablen GS verwendet. Schließlich werden Korrelationskoeffizienten zwischen der Intensitätskurve des variablen Sternes und aller konstanten Sterne berechnet und nach der Größe des Wertes geordnet.

Anschließend wird der Wert der linearen Regression der Lichtkurve des variablen Sternes in Relation zur Lichtkurve des nichtvariablen Sternes von den variablen Intensitäten abgezogen. Hier gibt die Größe der Korrelationskoeffizienten die Abfolge an, in welcher die nichtvariablen Lichtkurven verwendet werden. Dadurch gibt es so viele Vorgänge der Dekorrelation wie nichtvariable Vergleichssterne im Feld. Als Fehlerquelle bei dieser Methode ist der Einfluss auf die Amplituden der Fourieranalyse zu nennen, nicht nur auf die ungewünschten Aliases und Artefakte, sondern auch auf wahre

Frequenzen. Tests haben jedoch gezeigt, dass dies im GS-Modus vernachlässigbar gering ist. Da verschiedene Positionen am CCD unabhängig vom Streulicht beeinflusst werden, ist die Korrektur durch mehr als einen Referenzstern notwendig, um möglichst viele Fehlereffekte herausfiltern zu können. Im Weiteren kann bei Ungenauigkeit der einfachen linearen Regression eine schrittweise lineare Regression mit kleineren Teilschritten durchgeführt werden.

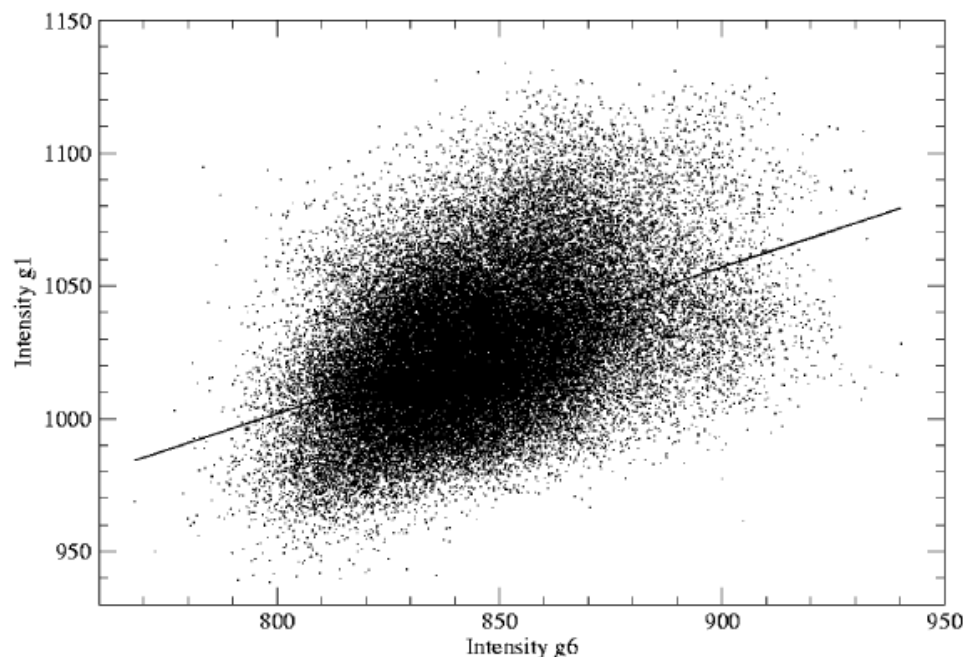


Abbildung 19: Illustration der Dekorrelation mittels GS1 und GS6 (Hareter et al. 2008)

Die Dekorrelationsmethode ist jedoch nicht unbeschränkt verwendbar. Da im GS-Modus entgegen den anderen Moden keine direkten Werte für den Hintergrund vorliegen, ist die Genauigkeit hier geringer. Die Korrelation vom Hintergrund zum Objekt ist deutlich besser, als die Korrelation zwischen Lichtkurven zweier Objekte. Im Weiteren kann diese Methode keine variablen Sterne identifizieren. Wird nun ein variabler Stern nicht identifiziert und dient dieser als Referenzstern, wird ein fälschliches Signal in alle Beobachtungsobjekte impliziert. Ist das Streulicht demnach sehr hoch oder werden Zielobjekte nur während den Orbit-Phasen des maximalen Streulichtes beobachtet, erhöht diese Methode die Streuung im Datensatz.

Zum Ende dieses Kapitels folgt eine Illustration des Erfolges der Methode am Beispiel von EP Cnc. Betrachten wir die Lage des Ausgangsdatsatzes (Abb. 20) ergibt sich ein Frequenzspektrum mit deutlich höheren Amplituden der signifikanten Orbits und Multiplen (ROT), Aliasing (BLAU) und Artefakte (GRÜN), als im reduzierten Spektrum (Abb. 21).

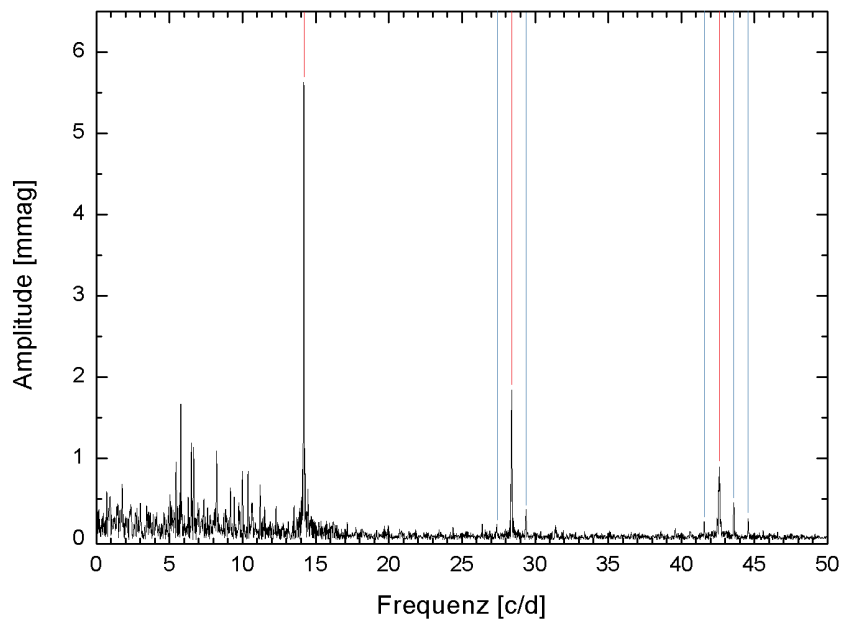


Abbildung 20: Frequenzspektrum der Rohdaten EP Cnc 2008

Der Vorteil ist, wie ersichtlich, die Herabsetzung der Amplituden der signifikanten Orbits bis zu einem maximalen Faktor von sechs und die weitestgehende Auslöschung der Aliasing rund um diese Orbits. Der Nachteil besteht durch die Einführung eines Artefaktes beim Frequenzwert 3.0 (Abb. 21 GRÜN) und auch einer Kombination aus Artefakt und Orbit von $14.19 - 3.00 = 11.19$ (Abb. 21 BLAU). Diese Einführung von Artefakten kann in manchen Fällen, wie zum Beispiel Pulsationen im Frequenzbereich zwischen 1 c/d und 5 c/d erfahrungsgemäß als eher kontraproduktiv angesehen werden, wobei der Nutzen bzgl. der Bereinigung von Streulicht aber unumgänglich ist.

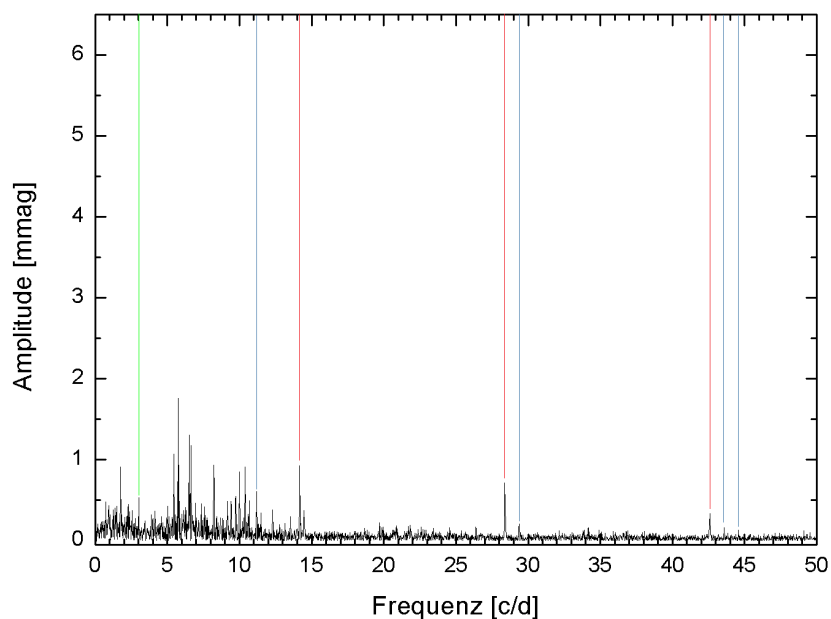


Abbildung 21: Frequenzspektrum der reduzierten Daten EP Cnc 2008

11. Eine Übersicht über den Datensatz

Es liegen aus der MOST-Kampagne 2008 Datensätze für EP Cnc, BT Cnc, BS Cnc und HD 73872, weiters Datensätze für EP Cnc und BS Cnc von der Kampagne 2009 vor.

	von JD - 2,451,545	bis JD - 2,451,545	Länge [Tage]	Punkte
Kampagne 2008	2945.11798	2976.96238	31.84440	34244
Kampagne 2009	3330.20223	3346.99940	16.79717	16843
Gesamt			48.64157	51087

Tabelle 12: Übersicht Beobachtungskampagnen

Anmerkung:

In weiterer Folge finden, soweit nicht anders angemerkt, zur besseren Illustration lediglich Frequenzspektren von 0-50 c/d Verwendung, da bei der Datenauswertung der Objekte keine höheren Frequenzen festgestellt werden konnten (alle Frequenzen <40c/d).

11.1. Datensatz 2008

Die Science-Frames der Daten aus 2008 wurden gemeinsam aufgenommen, haben somit die gleiche Anzahl an Datenpunkten und sind zum Großteil (80%) zu 49.6 Sekunden-Aufnahmen gestackt worden. Da jedoch Fehlerquellen in den Aufnahmen vorhanden sind (Süd-Atlantik-Anomalie, zu nahe an Erdatmosphäre, Cosmics etc.), ist auch ein kleinerer oder größerer Abstand zwischen den aufeinander folgenden Datenpunkten möglich. Das Maximum zwischen zwei Datenpunkten liegt hier bei 87590 Sekunden (ca. 1 Tag), der Gesamtdurchschnitt über den ganzen Zeitraum bei 80.35 Sekunden. Berechnet man die Nyquistfrequenz

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t} = \frac{N-1}{2\Delta T}$$

und setzt man die Daten aus 2008, 31.8444 d mit 34244 Datenpunkten ein, beträgt diese nach dem rechten Term $f_c = 538$ c/d. Dies ist jedoch nicht korrekt, da dies nur zutrifft, falls keine Datenlücken existieren und somit der Durchschnitt von 80.35 Sekunden herangezogen werden würde. Somit müssen zur Feststellung die überwiegenden Zeitabstände (49.6 Sekunden) zur Abschätzung in Betracht gezogen werden. Wird im Term $\Delta t = 49.6s = 0.001148$ d eingesetzt, beträgt $f_c = 871.02$. Im Vergleich hierzu liefert Period04 den leicht abweichenden Wert von 876.82, da dieses Programm eine sinnvolle

Modifikation zur Berechnung enthält. Hierbei wird ein Histogramm angefertigt, also quasi die jeweilige Anzahl der vorkommenden Zeitabstände gezählt und aus diesem der Erwartungswert berechnet. Gegenüber dem selbst berechneten Wert von $f_c=871.02$ c/d, berücksichtigt die Methode von Period04 noch dazu die Tatsache, dass, bezogen auf den Wert 49.6 Sekunden, kürzere Zeitabstände als längere Zeitabstände im Datensatz vorliegen.

Kommen wir nun zur Illustration der Verlustquellen bzgl. der Datenpunkte. Hier hilft ein Plot der Zeit gegen die Phase des Satelliten (Normierung auf die Umlaufzeit von 101.413 Minuten) am Beispiel von EP Cnc.

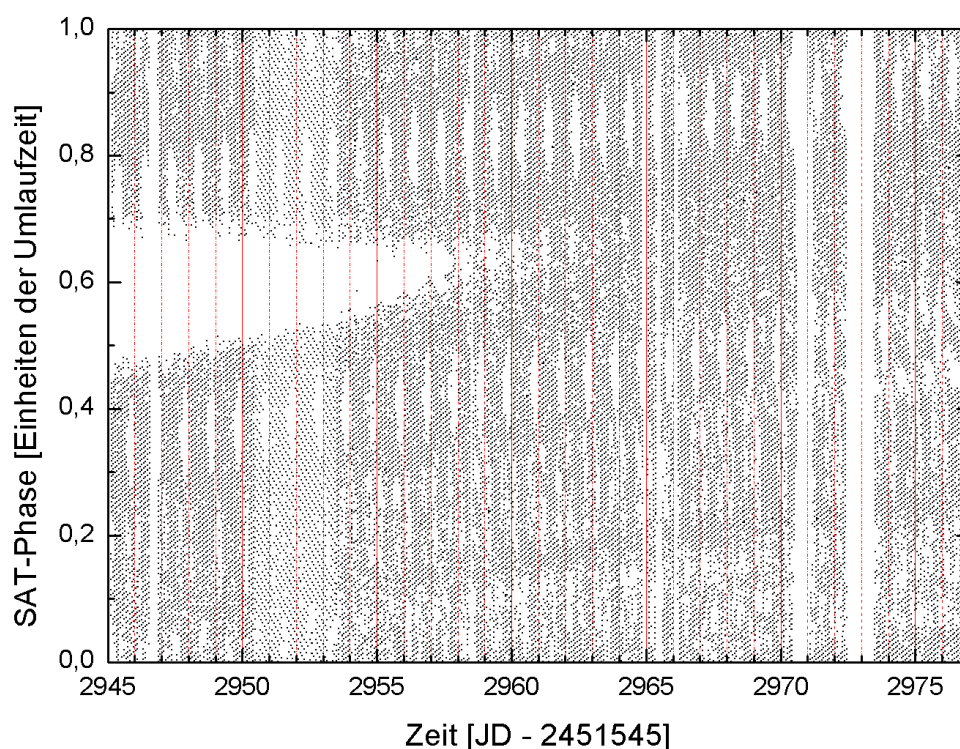


Abbildung 22: Illustration Zeit - Phase der Daten 2008

Aufgrund dieser Illustration lassen sich schon einige Approximationen bzgl. der Fehlerquellen erahnen. **Zur Erklärung wird nachfolgend für die Auffindung im Diagramm Koordinatenschreibweise verwendet werden.** Als Beispiel Koordinate [0.20; 2950] entspricht Phase 0.20 bei Zeitkoordinate 2950.

Als die wohl signifikanteste Stelle kann wohl der Bereich von [0.50-0.70; 2945] bis [0.6; 2958] genannt werden. Das Fehlen von Datenpunkten kann in diesem Bereich durch die SAA, die Süd-Atlantik-Anomalie, erklärt werden. Durch eine Anomalie im Magnetfeld der Erde kann der Van-Allen-Strahlungsgürtel (vgl. hierzu Kapitel 3, Orbit) in tiefere Höhenschichten eindringen und sorgt damit für ein Gebiet höherer Strahlungsaktivität.

Dies wirkt sich auf den CCD-Detektoren in der Weise aus, dass die Daten durch hochenergetische Partikeltreffer unbrauchbar werden und aussortiert werden müssen.

Auf der Position [0.00-1.00; 2947], [0.00-1.00; 2965.50], [0.00-1.00; 2971] und [0.00-1.00; 2973] sehen wir jeweils größere Lücken im Datensatz. Diese treten entweder bei Wartungsarbeiten des Satelliten oder bei temporärer Beobachtung anderer Objekte auf.

Zu beachten sind die deutlich sichtbaren, täglich wiederkehrenden, schräg nach rechts oben verlaufenden Lücken bei den Koordinaten [0.40; 2945.90] bis [0.40; 2975.90] und [0.80, 2946.30] bis [0.40; 2976.30]. Diese größeren Lücken können gemeinsam mit kleineren bei den Phasen 0.10, 0.20 und 0.90 Artefakte mit $1/2/3... \text{ c/d}$ implizieren. Betrachten wir die SAT-Phase und die wiederkehrenden Lücken auf der y-Achse, dann können wir Orbitfrequenzen um den Normierungsfaktor 101.413 Minuten (14.99 c/d) und deren Vielfaches, gemeinsam mit Aliasing verursacht durch Kombinationen mit den Artefakten erwarten. Anzumerken ist, dass dies lediglich erwartet werden KANN, MUSS aber nicht, aufgrund der fehlerbereinigenden Methode der Dekorrelation. Betrachtet man nun das durch Period04 berechnete Spektralfenster, sind die zu erwarteten Fehlerquellen in den Sternspektren deutlich sichtbar. Signifikante Orbitalfrequenzen mit $14.19/28.38/43.57 \pm 0.01 \text{ c/d}$ sind in ROT markiert, das signifikante Aliasing in BLAU:

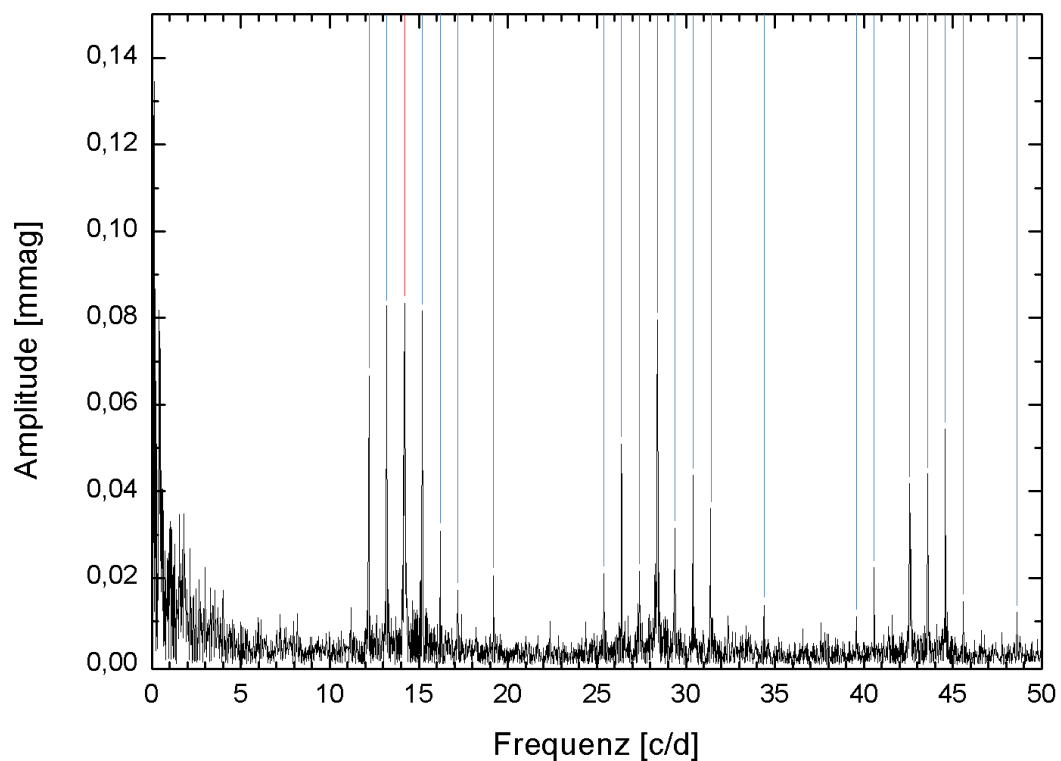


Abbildung 23: Spektralfenster der Daten 2008

11.2. Datensatz 2009

Aus dem Datensatz von 2009 liegen Timestrings für die Objekte EP Cnc und BS Cnc vor. Da auch die Science-Frames aus 2009 gleichzeitig aufgenommen wurden, verfügen beide somit über die gleiche Anzahl an Datenpunkten.

Betrachtet man den Timestring, kann der maximale Abstand zwischen zwei Datenpunkten zu 0.48 Tagen festgestellt werden. Eine Abschätzung der Nyquistfrequenz bei einem vorherrschenden Wert von 62.208 s zwischen den Datenpunkten, ergibt ein $f_c=694.44$ c/d. Jedoch liegen auch deutlich größere und kleinere Werte vor, sodass die Gewichtung nach Period04 sinnvoll erscheint. Period04 stellt die Nyquist-Frequenz zu einem Wert von $f_c=689.75$ c/d fest.

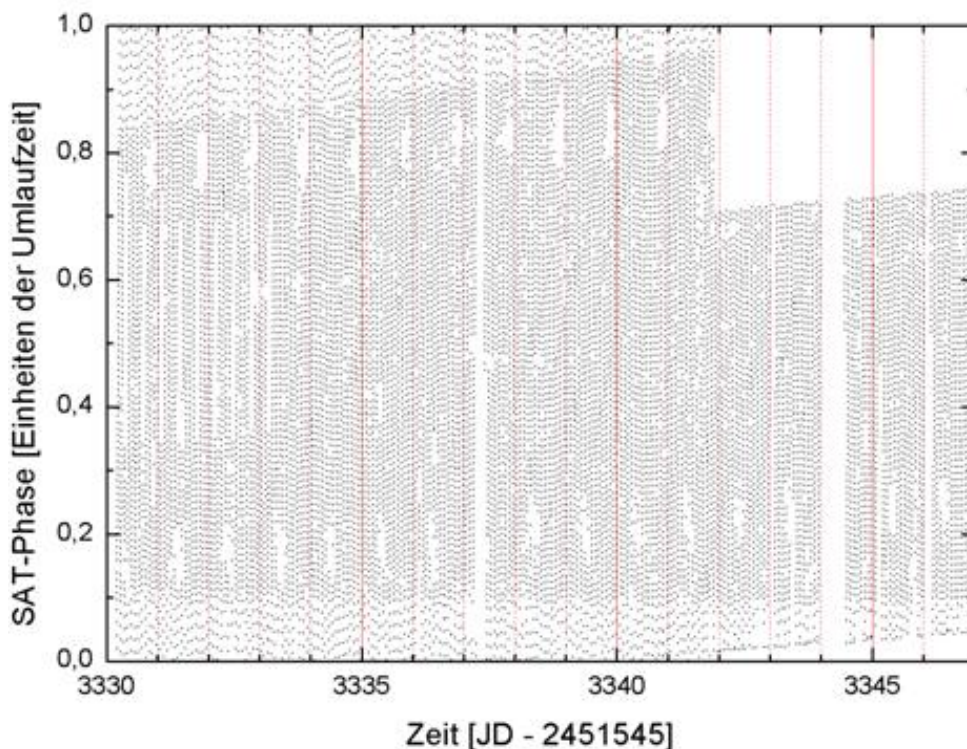


Abbildung 24: Illustration Zeit - Phase der Daten 2009

Deutlich erkennbar ist der größere Abstand zwischen den Datenpunkten im Vergleich zu 2008. Der größte Abstand befindet sich bei [0.00-1.00; 3344] mit einer Länge von 0.48 Tagen, gefolgt von [0.00-1.00; 3357.20] mit 0.17 Tagen. Markant ist auch das Gebiet in der Region [0.70-1.00; 3342] bis [0.70-1.00; 3347]. Hier fehlen Datenpunkte komplett, was auf temporäre Beobachtung eines anderen Objektes zurückgeführt werden kann. An den Rändern bei den Phasen 0.00 bis 0.10 und 0.90 bis 1.00 kann eine Ausdünnung der Datenpunkte beobachtet werden. Dies beruht auf der Tatsache, dass die Bilder zu 127 Sekunden statt zu ca. 62 Sekunden gestackt wurden. Der Grund ist schwierig zu

eruierten, beruht jedoch wahrscheinlich auf der Tatsache, dass S/N in Atmosphärennähe zu erhöhen.

Gut sichtbar im Datensatz 2008 sind auch wieder die regelmäßig vorkommenden Lücken bei [0.20; 3330.30] bis [0.20; 3346.30] und auch bei [0.80; 3330.90] bis [0.80; 3346.90], welche die genannten Artefakte, Orbitalfrequenzen, Aliasing und deren Kombinationen in das Frequenzspektrum implizieren.

Werfen wir nun einen Blick aufs das von Period04 berechnete spektrale Fenster. Anzumerken ist nochmals, dass nur die signifikanten Frequenzen markiert wurden.

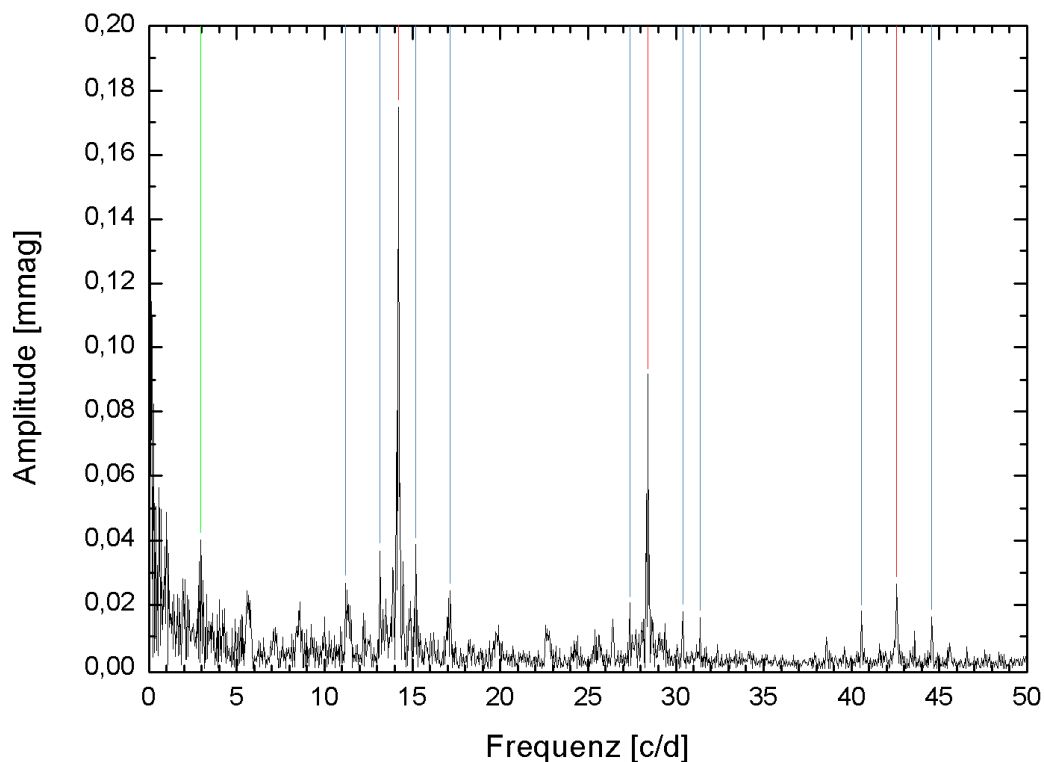


Abbildung 25: Spektralfenster der Daten 2009

Sichtbar sind wieder die Orbitalfrequenzen und Aliasing, sowie ein Artefakt bei der Frequenz 3.00 c/d. Um jedoch alle möglichen Fehlerquellen abdecken zu können, werden die Frequenzspektren von Vergleichssterne hinzugezogen.

12. Vergleichssterne

Zusätzlich zum Spektralfenster ist die Einbeziehung von nichtvariablen Vergleichssterne sinnvoll. Gibt das Spektralfenster Hinweise auf falsche Frequenzen, verursacht durch Lücken im Datensatz, liefern die Frequenzspektren von Vergleichssterne Hinweise auf Charakteristiken der Spektren und auf mögliche falsche Frequenzen, verursacht durch Streulicht und das Instrument. Der Vergleich ist sinnvoll, da die simultane Aufnahme mehrerer Sterne mittels Satellits einen bedeutenden Nachteil aufweist. Wird bei den meisten Reduktions- und Auswertungsmethoden angenommen, dass sich störende Effekte gleichzeitig auf alle Sterne auswirken, so ist die bei MOST-Daten nicht der Fall (Hareter et al. 2008). Hier wandert das Streulicht über das CCD und betrifft einen Stern zu einem anderen Zeitpunkt, als einen anderen. So ist es auch möglich, dass die Lichtkurven von Sternen auf der einen Seite des CCDs ein anderes Verhalten aufweisen können, als auf der anderen. Aus diesem Grund ist es mit MOST auch nicht bzw. schwer möglich, 3-Stern-Photometrie anzuwenden (Hareter et al. 2008). Ein oftmaliger Mangel an geeigneten Vergleichssterne verschärft dieses Problem noch zusätzlich.

12.1. Vergleichssterne 2008

Für die Daten aus 2008 wurden zwölf nichtvariable Vergleichssterne, mit ähnlichen Helligkeiten bzw. CCD-Counts, beigezogen und deren Frequenzspektren auf Charakteristiken und zu erwartende Fehlerquellen untersucht:

Guidestar	Name	Typ
G1	BD+20 2140	F7V
G3	GSC 01395-01937	unbekannt
G6	TYC 1395-1892-1	F3V
G7	GSC 01395-02372	unbekannt
G11	GSC 01395-01724	unbekannt
G14	GSC 01395-01999	F6V
G15	HD 73711	F0III
G17	42 Cnc	A9III
G26	TYC 1395-1897-1	F7V
G28	GSC 01395-01765	unbekannt
G33	BD+20 2180	F4V
G34	BD+20 2183	F6V

Tabelle 13: Liste der Vergleichssterne 2008

Für die unbekannten Typen konnte noch kein Eintrag in der Simbad-Datenbank gefunden werden, da es sich hier um neu aufgefundene Sterne handelt.

Kommen wir nun zu den Charakteristiken, welche jeweils mit einem Beispiel illustriert werden sollten.

Zuerst können die im Spektralfenster gefundenen falschen Frequenzen auch in den Vergleichssterne bestätigt werden, wobei G1 hier als Beispiel fungiert. Anzumerken ist, dass lediglich signifikante Peaks in den entsprechenden Farben markiert wurden.

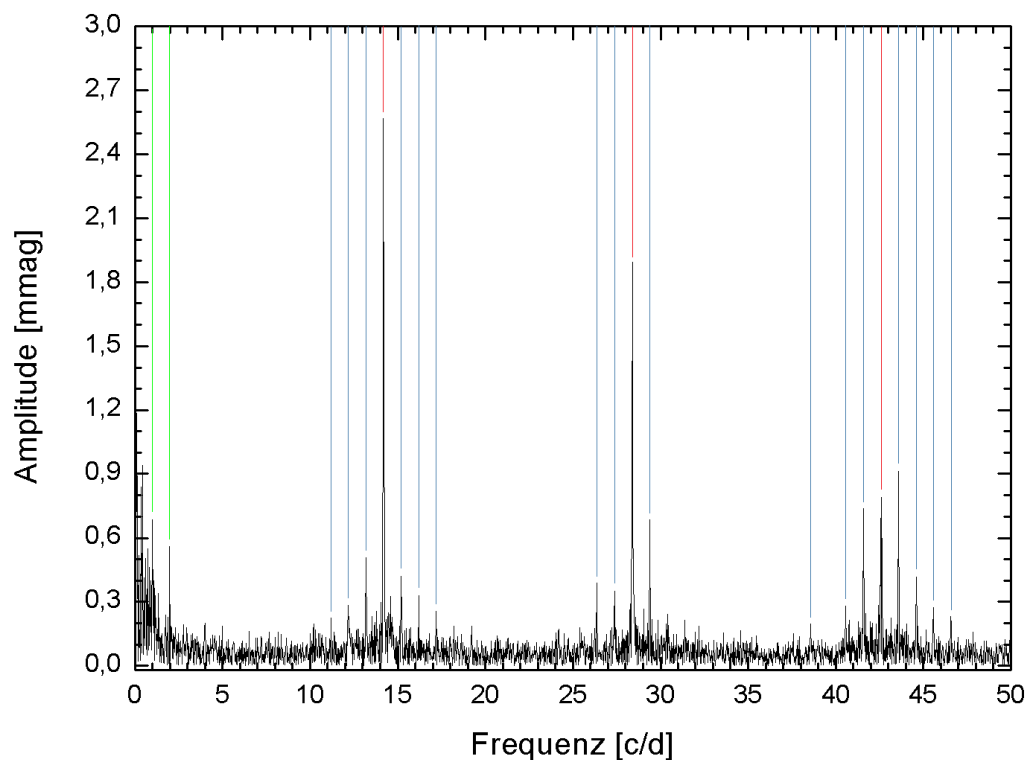


Abbildung 26: Bestätigung des spektralen Fensters durch G1

„ROT“ markiert sind jeweils die signifikanten Orbitalfrequenzen, „BLAU“ die Aliases und „GRÜN“ die Artefakte bei Frequenzen 1 und 2 c/d. Betrachtet man G3, so können weitere Annahmen abgeleitet werden.

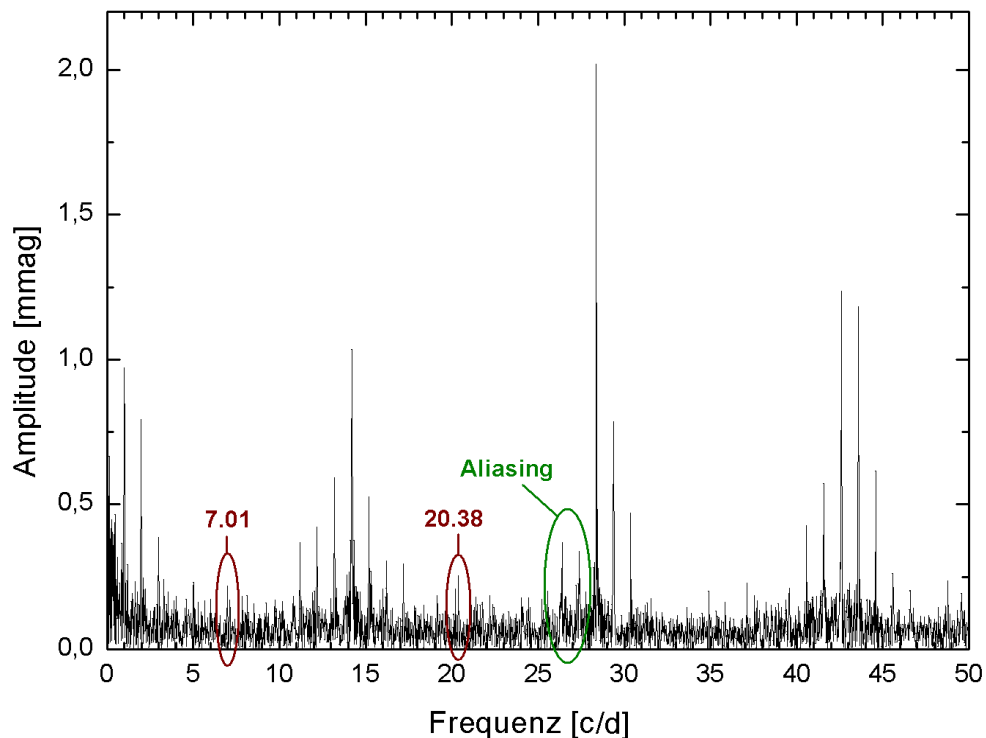


Abbildung 27: Spektrum G3 mit weiteren Charakteristiken

Neben den aus dem Spektralfenster und G1 bekannten falschen Frequenzen wird durch Abbildung 27 deutlich, dass signifikante Artefakte der 1-Tages-Aliases („ROT“ illustriert) über einen größeren Frequenzraum zu erwarten sind. So konnte hier eine signifikante Frequenz bei 7 c/d, sowie ein Alias der 2. Orbitalfrequenz 28.28 c/d bei 20.38 c/d gefunden werden. Im Weiteren kann asymmetrisches Aliasing („GRÜN“ illustriert) auftreten.

Wie im Spektralfenster der reduzierten Daten in Abbildung 23 ersichtlich, kann auch nicht angenommen werden, dass Orbitalfrequenzen höhere Amplituden besitzen, als deren Aliasings. Dies ist als Nachteil des Reduktionsprozesses aufzuzeigen. Da dies bei unreduzierten Daten nicht vorkommt, ist ein Vergleich mit diesen bzgl. der Amplituden in bestimmten und ausgewählten Fällen sicherlich sinnvoll. Zu berücksichtigen ist auch die Möglichkeit des Fehlens von erwarteten signifikanten Alias-Peaks zwischen wahrer Frequenz und weiter entferntem dazugehörigem Alias. So fehlen bei G3 signifikante Aliases der 2. Orbitalfrequenz zwischen 20.38 c/d und 26.38 c/d.

Es stellt sich die Frage, ob die Helligkeit des Sternes an die Amplitude der Orbitalfrequenzen gekoppelt ist, weswegen Abbildung 28 herangezogen wird. Anzumerken ist, dass die Datenpunkte mit Nummern beschriftet sind, welche der Nummerierung der Vergleichssterne entsprechen. Im Weiteren wurde die jeweils

höchste Amplitude der 1. bis 3. Orbitalfrequenz in Verbindung mit der mittleren Helligkeit des Sternes gebracht (instrumentelle Magnituden). Zwecks Vereinfachung entsprechen höhere Helligkeitswerte auch helleren Sternen.

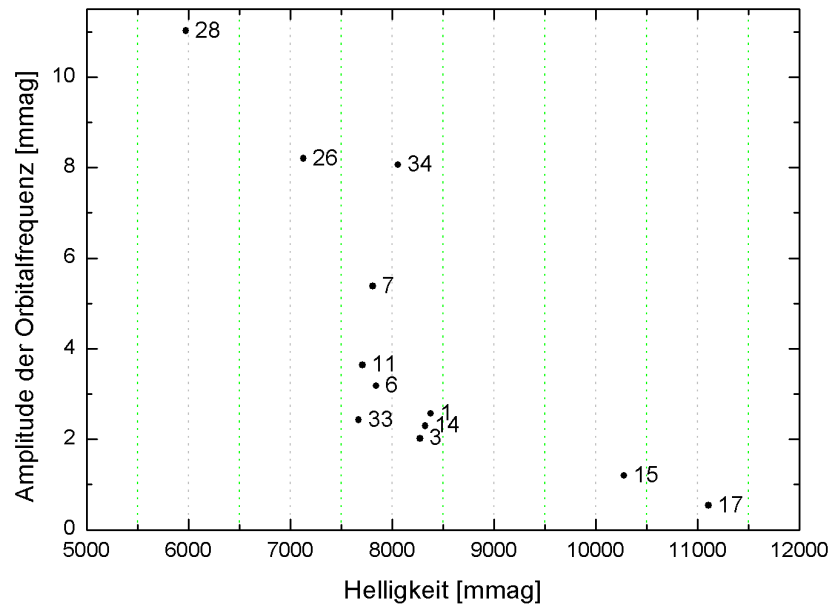


Abbildung 28: Helligkeit der Vergleichssterne zur Amplitude d. Orbitalfrequenz

Trotz großen Abweichungen im Gebiet von 7500 bis 8000 mmag ist ein Trend zu kleineren Amplituden der Orbitalfrequenzen mit größeren Stern-Helligkeiten erkennbar. Dass diese Charakteristik nicht vom Reduktionsprozess herrührt, sollte nachfolgende Abbildung verdeutlichen, welche mit den Rohdaten angefertigt wurde:

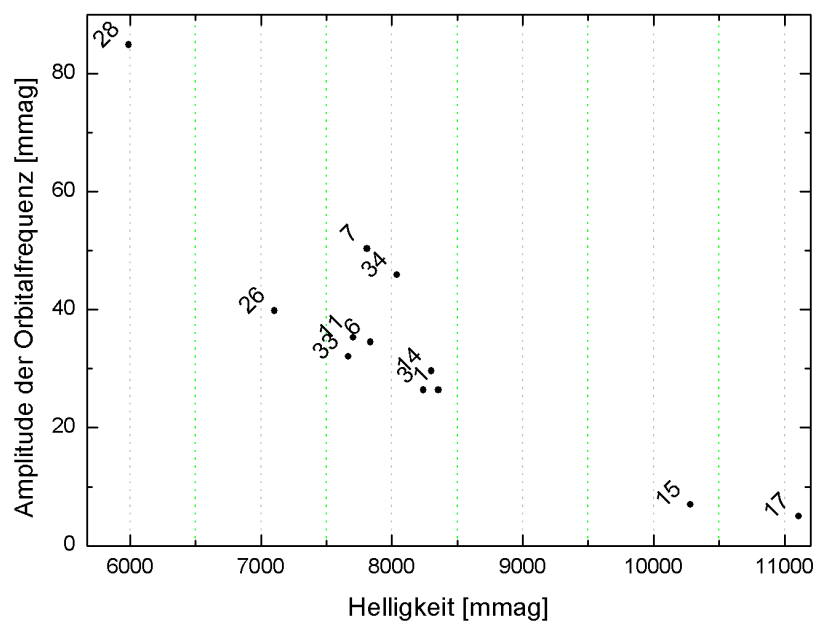


Abbildung 29: Rohdaten, Helligkeit der Vergleichssterne zur Amplitude d. Orbitalfrequenz

Auch hier ist der Abfall mit zunehmenden Helligkeiten erkennbar, wobei der Verlauf sogar etwas klarer herauskommt, als bei den bereits reduzierten bzw. dekorrelierten Daten. Dies besagt nach reiflicher Überlegung im Grunde nichts anderes, als dass die relative Amplitude von beispielsweise 200 ADU bei einem Mittelwert von 2000 ADU groß ist, während sie bei einem Mittelwert von 50000 relativ klein ist. Betrachtet man diese Annahme nun logarithmisch (Magnituden), ergibt sich der genannte Verlauf. Dies ist zwar nicht unmittelbar wichtig für Auswertung und Beachtung falscher Frequenzen, gibt jedoch einen geeigneten Anhaltspunkt für die zu erwartenden Amplituden der Orbitalfrequenzen für jegliche Datensätze.

Nach diesem kleinen Exkurs werden noch weitere Charakteristiken betrachtet:

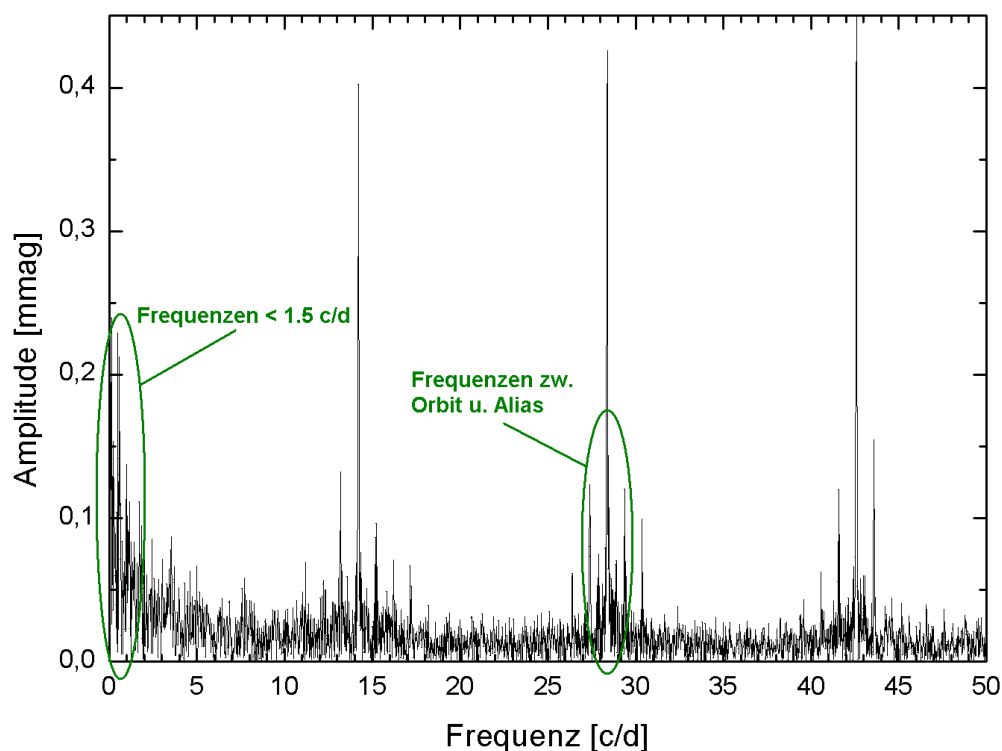


Abbildung 30: Spektrum G17 mit Charakteristiken

Sichtbar und diesmal „GRÜN“ markiert sind zum Einen der Umstand der Erhöhung des Rauschens bei Frequenzen kleiner als 1.5 und dadurch in diesem Bereich auch die Einführung vereinzelter falscher Peaks. Aus diesem Grunde ist es ratsam, signifikanten Frequenzen in diesem Bereich kritisch gegenüber zu stehen. Zum Anderen können auch falsche Frequenzen zwischen der Orbitalfrequenz und dem ersten Alias auftreten, welches die Ermittlung korrekter Frequenzen um die genannten noch zusätzlich erschwert.

12.2. Vergleichssterne 2009

Zu den Daten aus 2009 wurden 6 Vergleichssterne mit vergleichbaren Helligkeiten hinzugezogen.

Guidestar	Name	Typ
G14	GSC 01395-01826	unbekannt
G20	HD 73618	Am
G24	HD 73731	A5m
G29	GSC 01395-01857	unbekannt
G31	BD+20 2140	F7V
G34	TYC 1395-1892-1	F3V

Tabelle 14: Liste der Vergleichssterne 2009

Zwecks Charakteristiken gibt es gegenüber den Vergleichssterne von 2008 nichts Neues zu sagen. Auch hier kommen signifikante Artefakte bei den Frequenzen $1/2/3\dots$ c/d, sowie die Orbitalfrequenzen inklusive einem großräumigeren Aliasing und das signifikante Ansteigen des Rauschens bei Frequenzen kleiner als 1.5 c/d vor. Dies soll nachfolgende Abbildung verdeutlichen:

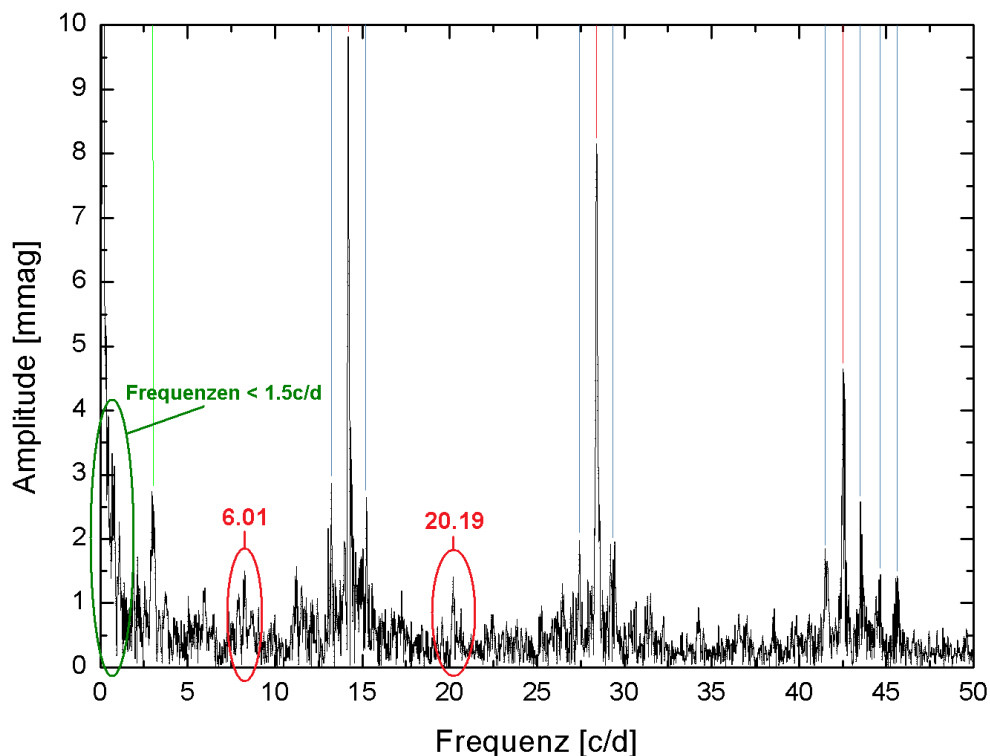


Abbildung 31: Charakteristiken Datensatz 2009 illustriert mit G29

Im Rahmen der Auswertung sind die Orbitalfrequenzen und deren oft großräumiges Aliasing, durch mathematische Herabsetzung des SNRs von wahren Frequenzen in benachbarten Bereichen, als störend anzusehen. Vor allem der Bereich zum 1. Aliasing mit der Möglichkeit von zusätzlichen Zwischenpeaks (vgl. Abbildung 30) erschwert das Auffinden korrekter Frequenzen in diesen Bereichen erheblich. Aus diesem Grund wurden im weiteren Verlauf der Auswertung, Ansätze zur Eliminierung dieser Fehlerquellen untersucht.

13. Ansätze zur Eliminierung der Orbitalfrequenzen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über versuchte Ansätze zur Eliminierung der Orbitalfrequenzen und deren Aliasing zwecks bereits besprochener Verbesserung der Auffindung von korrekten Frequenzen mit korrekten SNRs in dessen Einflussbereich.

13.1. Simplex Prewhitening

Die wohl offensichtliche und einfachste Methode ist der Versuch des Prewhitening der Problemfrequenzen. Dies gestaltet sich jedoch schwieriger als gedacht und wirft zusätzliche Probleme auf.

Zum Einen tritt das unerwartete Problem der „Out-of-Iterations“ bei Period04 auf. Kann die Software durch das Least-Square-Fitting keinen mathematischen Peak innerhalb einer definierten Anzahl von Iterationen finden, so ist der mit der FFT gefundene Frequenzwert wahrscheinlich nicht korrekt beziehungsweise kann nicht ausreichend angenähert werden. Das Prewhitening vieler Orbitalfrequenzen in den Spektren der Objekte ergibt diese Fehlermeldung (BS Cnc, BT Cnc, HD 73872). Auch ist es möglich, dass diese Meldung erst nach dem Prewhitening mehrerer solcher Frequenzen in Verbindung mit einer wahren Frequenz auftritt (ausnahmslos alle Objekte). Bezieht man noch dazu das Aliasing in den Vorgang ein, wird dieses Problem weiter verschlimmert. Ist allein das genannte Problem ausreichend für das Versagen dieser Methode, ist zum Anderen auch die Hartnäckigkeit der Orbitalfrequenzen und dessen Aliasing zu nennen. Hier ein Beispiel von HD 73872:

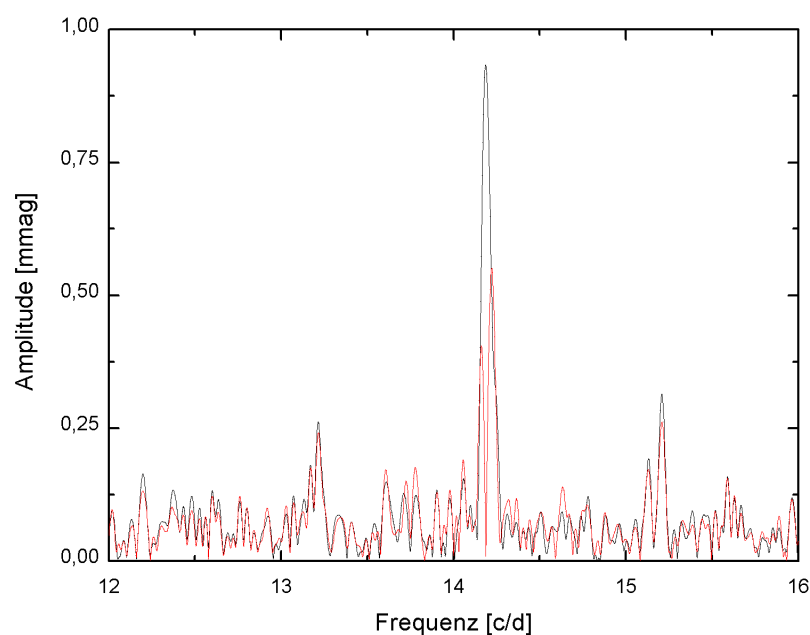


Abbildung 32: Ursprung SCHWARZ, Prewhitening von 1. Orbitalfrequenz ROT

Trotz Prewheritings der 1. Orbitalfrequenz entstehen daraus zwei neue signifikante Peaks (aus 14.19 c/d wird 14.16 c/d und 14.22 c/d). Im Weiteren erhöht sich das umliegende Rauschen zwischen 13.5 und 15 c/d geringfügig. Markant ist das „Stehenbleiben“ des Aliasings bei 13.19 c/d und 15.19 c/d. Betrachtet man nun schlussendlich das Problem der „Out-of-Iterations“ in Verbindung mit der Notwendigkeit des prewhitens von Minimum 6-8 Peaks pro Orbitalfrequenz, liegt es auf der Hand, dass diese Methode nicht zum Erfolg führen wird.

Anzumerken ist, dass bei einigen Objekten, wie zum Beispiel Vergleichssterne G1, deutlich mehr Prewhitening-Vorgänge für Orbitalfrequenzen und Aliasing nötig wären. So konnten, ungeachtet der kontinuierlichen „Out-of-Iterations“, 16 signifikante Frequenzen rund um die 1. Orbitalfrequenz extrahiert werden.

13.2. Abziehen der Lichtkurve von einem Vergleichssterne

Konventionelle Methoden, beruhend auf den Eigenschaften der Erdbeobachtung, ziehen nichtvariable Vergleichssterne bei, deren Lichtkurven schließlich von den eigentlichen Beobachtungsobjekten abgezogen werden. Dies dient dazu, um atmosphärische Effekte oder Eigenschaften des Detektors (Drifts etc.) von vornherein ausschließen zu können, da im Grunde lediglich die Differenzen der Lichtkurven und somit die Helligkeitsvariationen benötigt werden. Grundvoraussetzung dabei ist natürlich eine möglichst ähnliche Helligkeit, Spektralklasse und geringe Entfernung des Vergleichssterne zum Zielobjekt.

Die 3-Sterne-Methode (Breger 1993b) stellt hierbei eine erhebliche Verbesserung dar, da neben dem eigentlichen Beobachtungsobjekt, also Variablen, zwei nichtvariable Vergleichssterne beobachtet werden. Dies hat den Vorteil, dass, falls sich ein nichtvariabler Stern doch als variabel herausstellen sollte, ein zweiter Stern vorhanden ist, welcher die Beobachtung absichert. Im Weiteren müssen zwecks Differenzenbildung, Interpolationen der Lichtkurven durchgeführt werden, falls die Sterne nicht unmittelbar simultan beobachtet werden. Dies ist deutlich genauer unter Verwendung zweier Vergleichssterne. Bildet man darüberhinaus die Differenz zweier Vergleichssterne, kann die Qualität der Daten eruiert werden.

Der Reduktionsprozess bei MOST unterscheidet sich durch die Methode der Dekorrelation jedoch grundsätzlich von jener der 3-Sterne-Methode. Es werden zwar Vergleichssterne zur Feststellung etwaiger Charakteristiken beobachtet, jedoch keine

Differenzen gebildet. Wieso dem so ist, soll ein Versuch der Differenzenbildung unter Sternen mit ähnlicher Helligkeit, klären.

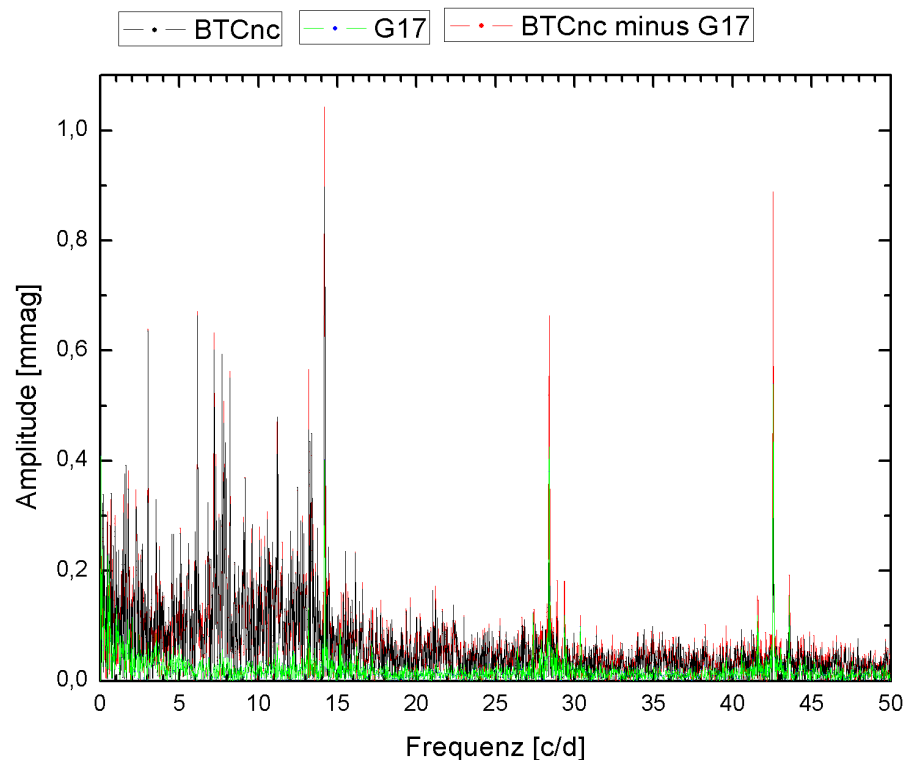


Abbildung 33: Vergleich Sterne und Differenzenbildung

BT Cnc (zur besseren Illustration alle signifikanten Frequenzen bereits prewhitened) wird hierbei mit G17 sowie der Differenzenbildung dieser beiden Objekte (ebenfalls alle signifikanten Frequenzen prewhitened) verglichen. Die Orbitalfrequenzen inklusive deren Aliasing verschwinden nicht wie erwartet, deren Amplituden werden sogar noch erhöht. Aus diesem Grund muss auch diese Methode zwecks Eliminierung unerwünschter Frequenzen verworfen werden. Um Einwände zur Verwendung von reduzierten oder bereits ausgewerteten Daten hintanzuhalten, muss angemerkt werden, dass dies auch bei nichtreduzierten Datensätzen auftritt und Abbildung 33 lediglich als beste Illustration ausgewählt wurde.

Um Fehler durch eine Umrechnung in Magnituden auszuschließen, erfolgte auch eine Überprüfung mittels der in ADU vorliegenden Rohdaten. Hierbei konnte die gleiche Charakteristik mit gleichen Größenordnungen beobachtet werden.

Die Differenzenbildung erfolgte zum Einen mittels simplen Abzugs der mmag-Werte des Vergleichssterne von BT Cnc, zum Anderen mittels jeweiligen Abzuges des Nullpunktes vor der Differenzenbildung. Es ist anzumerken, dass beide Methoden die gleichen

Ergebnisse erbrachten, da sich die durchschnittlichen Helligkeitswerte nur um 0.2 Magnituden unterschieden.

13.3. Berücksichtigung von Amplituden und Phasenvariationen

Ein weiterer Ansatz bezieht sich auf das Vorkommen von Amplituden und Phasenvariationen, welches mit Period04 berücksichtigt werden kann (Tab „Fit“ und „Calculate Amplitude/Phase Variations“). Dies könnte die schwierige Umsetzbarkeit des Prewhitening von Orbitalfrequenzen inklusive dessen Aliasing erklären. Problem ist hierbei jedoch wieder die Grundvoraussetzung der vorangehenden Möglichkeit des Extrahierens der dafür benötigten Frequenz und der Vermeidung von „Out-of-Iterations“. Dementsprechend scheitert diese Methode schon an den Anfängen, der Feststellung der Frequenz, welche einer Amplituden- und Phasenvariation unterliegt.

Ist eine anfängliche Extrahierung einer Orbitalfrequenz dennoch möglich, so entstehen auch mit dieser Methode wieder die gewohnten Sidepeaks. Darüberhinaus zeigt sich auch das Aliasing als resistent.

Alternativ wurde mittels der Einstellung PTS (Periodic Time-Shift), welche ursprünglich für Variationen der Lichtzeit entwickelt wurde, versucht, ein besseres Ergebnis zu erzielen. Auch dies scheiterte und führte zu keiner Verbesserung des Frequenzspektrums.

13.4. Resümee und Empfehlung für MOST-Datensätze

Keine der vorangegangenen Methoden zur Elimination der Orbital- und Aliasfrequenzen zeigten nachhaltigen Erfolg. Das dominierende Problem der „Out-of-Iterations“ konnte weder umgangen werden, noch führten die weiteren Ansätze zur signifikanten Verbesserung der Frequenzspektren.

Um darüber hinaus weitere Fehler jeglicher Art (Produktion neuer Sidepeaks, Erhöhung des umliegenden Rauschens, keine mathematisch korrekte Lösung durch Iterationen, eventuelle Produktion neuer bekannter/unbekannter Artefakte) zu vermeiden, wird demnach empfohlen keine der Orbital-, Aliasing- oder Artefakt-Frequenzen zu prewhiten. Diese sind im Frequenzspektrum des Objektes zu belassen und durch die Hinzuziehung des Spektralfensters, als auch der Vergleichssterne zu identifizieren. Schlicht gesagt, würde der Versuch der Eliminierung alter Fehler, neue schwierigere abzuschätzende und zusätzliche Fehler produzieren.

Es stellt sich die Frage, welche Gründe für das Scheitern der vorangegangenen Methoden verantwortlich sind. Diese sind gegenüber Erdbeobachtungen komplexer als gedacht. Wie bereits weiter oben angesprochen, kann zum Beispiel die effiziente 3-Stern-Methode nur unter der Voraussetzung angewendet werden, dass sich störende Effekte auf alle Sterne gleich auswirken. Unter allen störenden Effekten wäre als Wichtigstes das Streulicht und die Absorption zu nennen, welches durch die Atmosphäre (Streuung an Partikeln, Energieniveaus der Partikel) beeinflusst wird. Aus diesem Grund werden Vergleichssterne verwendet, welche nah am Beobachtungsobjekt stehen und darüberhinaus eine möglichst ähnliche Spektralklasse aufweisen. Dies darum, da Streuung (und somit das Licht vom Stern) eine wellenlängenabhängige Charakteristik aufweist, welche überdies auch von der Partikelgröße des Streukörpers in der Atmosphäre abhängt. Die ebenfalls wellenlängenabhängige Absorption kann überdies je nach chemischem Element nur in gewissen Molekülbanden auftreten. Eine Nichtbeachtung dieser Effekte durch zu weite Entfernungen der Beobachtungsobjekte am Himmel oder unähnlichen spektralen Verteilungen würde eine Vergleichbarkeit der Lichtkurven durch eine inhomogene Atmosphäre im mmag-Bereich stark beeinträchtigen.

MOST hat durch seine Flughöhe den Vorteil, atmosphärische Fehlerquellen vernachlässigen zu können und somit eine deutlich höhere Präzision bei kürzeren Belichtungszeiten und kleineren Teleskopöffnungen zu erreichen. Dennoch ist Streulicht verschiedenster Ursprünge präsent. Die sphärische Albedo der Erdatmosphäre von 0.367 (Williams 2009) impliziert ein durchschnittliches Rückstrahlvermögen von 36.7% des einfallenden Sonnenlichtes, welches mit MOST in Form von Streulicht interagiert. Die Flugbahn von MOST führt zwar über den Terminator (Tag-/Nachtgrenze) und zu gleichen Zeiten über die gleichen Gebiete der Erdoberfläche, bedeutet aber nicht, dass Streulichtverhältnisse immer absolut gleich sind. Die Atmosphäre unterliegt ständigen Variationen der Albedo durch verschiedene Wolkentypen und Molekülkonzentrationen in diversen Schichten. So verfügen als Beispiel Cirrus-Wolken über eine Albedo von 20-40% und Cumulonimbus-Wolken über eine Albedo von ca. 90% (Gourdeau 2007). Im Weiteren beeinflusst das Vorkommen verschiedenster Moleküle in Form von Staub oder Aerosolpartikeln die Durchlässigkeit der Atmosphäre. Auch die Oberfläche der Erde trägt zu einer Variation der Albedo in großem Maße bei. So steigt die Albedo bei Schneefall von ca. 5-25% (Gras bzw. Wald) auf 80-85% (frischer Schnee) und sinkt auf 50-60% (alter Schnee) oder auf 30-40% (Eis). Ein Unterschied ist auch bei trockenem Boden von 25-35% und feuchtem Boden von 5-15%, sowie bei Wüstensand von 25-50% vorhanden (Gourdeau 2007).

Da die Albedo der Atmosphäre, als auch die der Oberfläche ständig starken Schwankungen unterliegt, ist die Streulichtcharakteristik nicht für jeden Umlauf des Satelliten um die Erde ident. Im Weiteren ist auch die Geschwindigkeit des Satelliten durch seine elliptische Bahn nicht immer gleich, sodass selbst bei gleichen Streulichteffekten kleinste nichtlineare zeitliche Schwankungen über einen längeren Zeitraum auftreten können. Diese Effekte werden durch Lageänderungen des Satelliten überlagert. Diese Lageänderungen treten durch laufende Positionsänderungen von Erde-Beobachtungsobjekt auf und implizieren verschiedene Winkel zur streuenden Atmosphäre und somit variierende Streulichteffekte.

Betrachtet man nun zusätzlich zu den genannten Effekten auf einen Punkt des CCDs die gesamte ausgedehnte Fläche des CCDs, kommt noch ein Problem hinzu. Das Streulicht zieht quasi je nach Phase über den Detektor, wobei sich störende Effekte dadurch nicht gleichzeitig auf alle Beobachtungsobjekte auswirken. Je nach Lage des Satelliten ist es sogar möglich, dass eine Seite des CCDs unempfindlicher gegen Streulicht ist und Datensätze dadurch eine höhere Qualität aufweisen als auf der anderen Seite.

Diese Umstände bedeuten ein sehr komplexes Streulichtverhalten, deren Eliminierung mittels Vergleichssterne quasi unmöglich ist. Die Reduktion durch die Dekorrelation (Vergleich mit vielen Objekten) ist hierbei die einzige Möglichkeit, den Datensatz, neben der Feststellung der eigentlichen Intensitätsschwankungen, zumindest in gewissem Maße zu verbessern. Weitere Methoden zur Verbesserung des Ausgangsdatsatzes, wie in den letzten Unterkapiteln angeführt, sind aufgrund eines komplexen nichtlinearen Streulichtverhaltens jedoch unmöglich. Die Nichtlinearität in Form von kleinen Schwankungen der durch Streulicht verursachten Peaks (siehe Ergebnisse Kapitel 14, abgeschätzter Bereich der Schwankungen von Artefakte, Aliasing, Orbitalfrequenzen von erfahrungsgemäß ± 0.02 bis ± 0.03 c/d) im Fourier-Frequenzspektrum impliziert dadurch die von Period04 verursachten „Out-Of-Iterations“ beim Prewhitening-Vorgang. Es muss angemerkt werden, dass die Schwankungen in der Größenordnung der Auflösung des Datensatzes liegen und eventuell auch mit diesen korrelieren.

14. Darstellung der Ergebnisse

Nach Beurteilung der Fehlerquellen werden nun die Ergebnisse der Datensätze 2008, 2009 und Kombinationen für jedes Beobachtungsobjekt dargestellt.

14.1. EP Cnc

14.1.1. EP Cnc, Datensatz 2008

Bei einer Betrachtung des Frequenzspektrums konnten folgende Orbitalfrequenzen (Rot), Aliases (Blau) und Artefakte (Grün) identifiziert werden:

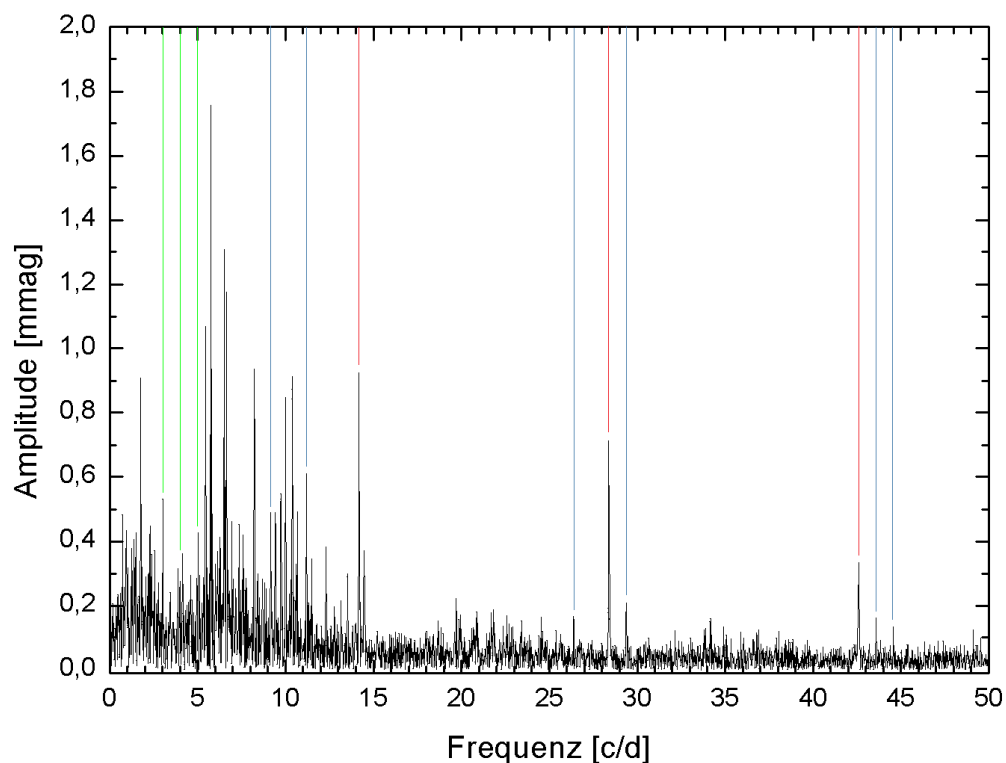


Abbildung 34: Frequenzspektrum EP Cnc 2008

Diese sind von links nach rechts betrachtet in c/d 3.02 (Artefakt, nicht signifikant), 4.02 (Artefakt, nicht signifikant), 5.02 (Artefakt, nicht signifikant), 9.17 (Alias, nicht signifikant), 11.20 (Alias, signifikant), 14.19 (1. Orbitalfrequenz, signifikant), 26.40 (Alias, nicht signifikant), 28.38 (2. Orbitalfrequenz, signifikant), 29.38 (Alias, signifikant), 42.58 (3. Orbitalfrequenz, signifikant), 43.58 (Alias, nicht signifikant), 44.58 (Alias, nicht signifikant).

Im Rahmen der Auswertung konnten 17 Frequenzen eruiert werden, wobei es sich bei dreien um Kombinationsfrequenzen handelt. Hierbei konnten die Residuen von 3.59 auf

2.63 gesenkt werden. Dies erscheint gering, jedoch aufgrund der im Spektrum belassenen Orbitalfrequenzen, Aliasing und Artefakte gerechtfertigt.

Im Folgenden ist die Ergebnistabelle angegeben. Neben der Frequenznummer ist die Frequenz, Amplitude, Phase, Signal-to-Noise und eine eventuelle Kombination angegeben. Falls zwei Werte in den Spalten vorhanden sind (Frequenz, Amplitude, Phase), handelt es sich bei den linken um die Ergebniswerte, bei den rechten um die statistische Unsicherheit. Entsprechend diesem Sigma wurde die Anzahl der Kommastellen bzw. signifikanten Stellen, angepasst.

Nr.	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N	Komb.
F1	5.774	0.004	1.68	0.20	0.00	0.05	14.7	
F2	6.519	0.004	1.26	0.17	0.39	0.06	13.0	
F3	6.659	0.005	0.99	0.17	0.26	0.08	10.0	
F4	5.460	0.006	0.98	0.19	0.21	0.09	8.7	
F5	8.227	0.005	0.93	0.14	0.04	0.07	11.5	
F6	10.381	0.005	0.92	0.15	0.04	0.07	10.7	
F7	1.772	0.010	0.91	0.29	0.87	0.15	5.3	
F8	9.999	0.006	0.82	0.14	0.60	0.08	9.7	F5+F7
F9	9.438	0.009	0.53	0.15	0.10	0.13	6.1	
F10	9.734	0.009	0.52	0.16	0.72	0.14	5.7	
F11	5.727	0.012	0.49	0.19	0.14	0.18	4.4	
F12	6.969	0.011	0.49	0.17	0.94	0.17	4.8	
F13	10.676	0.010	0.47	0.15	0.85	0.15	5.3	
F14	12.294	0.010	0.37	0.12	0.10	0.15	5.2	F1+F2
F15	7.355	0.012	0.37	0.14	0.00	0.18	4.5	
F16	7.598	0.013	0.35	0.14	0.37	0.19	4.3	
F17	11.506	0.014	0.30	0.14	0.69	0.21	3.8	F7+F10

Tabelle 15: Ergebnisse EP Cnc 2008

Auffallend sind die Frequenzen F1 und F7 mit 5.774 und 1.772 c/d. Aufgrund des Umstandes, dass F1 bereits in früheren Publikationen bestätigt wurde und F7 in eine Kombinationsfrequenz involviert ist, lässt auf einen Zufall der Gleichheit der Kommastellen schließen. Die Differenz der Frequenzen von ca. 4 c/d ist weder in den Rohdaten, noch in den reduzierten Daten präsent. Die Frequenz 8.227 c/d (F5) liegt in der Nähe eines möglichen Aliasings der 1. Orbitalfrequenz. Da diese aber sowohl in eine Kombinationsfrequenz mit korrekten Frequenzen verwickelt ist, als auch im Datensatz 2009 mit gleicher Amplitude (innerhalb Fehlergrenzen) bestätigt werden konnte, überdies Werte des Aliasings normalerweise etwas niedriger anzusiedeln sind (bis 8.220 c/d), wird diese als wahr interpretiert.

Ein weiteres Argument für die Richtigkeit dieser Frequenz liegt in der höheren Amplitude (0.93 mmag), als die Orbitalfrequenz (0.92 mmag). Entgegen diesem Fall hätte ein Aliasing charakteristischerweise eine niedrigere Amplitude, als die dazugehörige Orbitalfrequenz. Die letzte Annahme ist jedoch mit Vorsicht zu genießen, da, wie bereits besprochen, im Zuge des Reduktionsprozesses die Gefahr besteht, dass die Orbitalfrequenzen um einen größeren Faktor reduziert werden könnten, als deren Aliasings. Dies konnte mittels des Spektralfensters der reduzierten Daten 2008 in Abbildung 23 gezeigt werden. Ein weiteres Beispiel hierfür wäre der Stern BS Cnc (siehe Kapitel 14.4). Auch ein Abgleich mit den Rohdaten von EP Cnc 2008 bestätigt die Unzulässigkeit dieses Beweises, da hier die Orbitalfrequenz deutlich höher ist, als die infrage gestellte Frequenz 8.227 c/d.

F1 und F11 mit einer Differenz von 0.047 c/d können durch eine Frequenzauflösung von $1/T=0.031$ c/d unterschieden werden. T ist dabei die Länge des Datensatzes in Tagen.

Da, wie schon im Datensatz 2008, ausschließlich signifikante Frequenzen im Bereich kleiner als die 1. Orbitalfrequenz gefunden wurden, erfolgen die folgenden Abbildungen (Abbildungen 35 und 36) zur besseren Darstellung nur im Frequenzbereich zwischen 0 und 15 c/d.

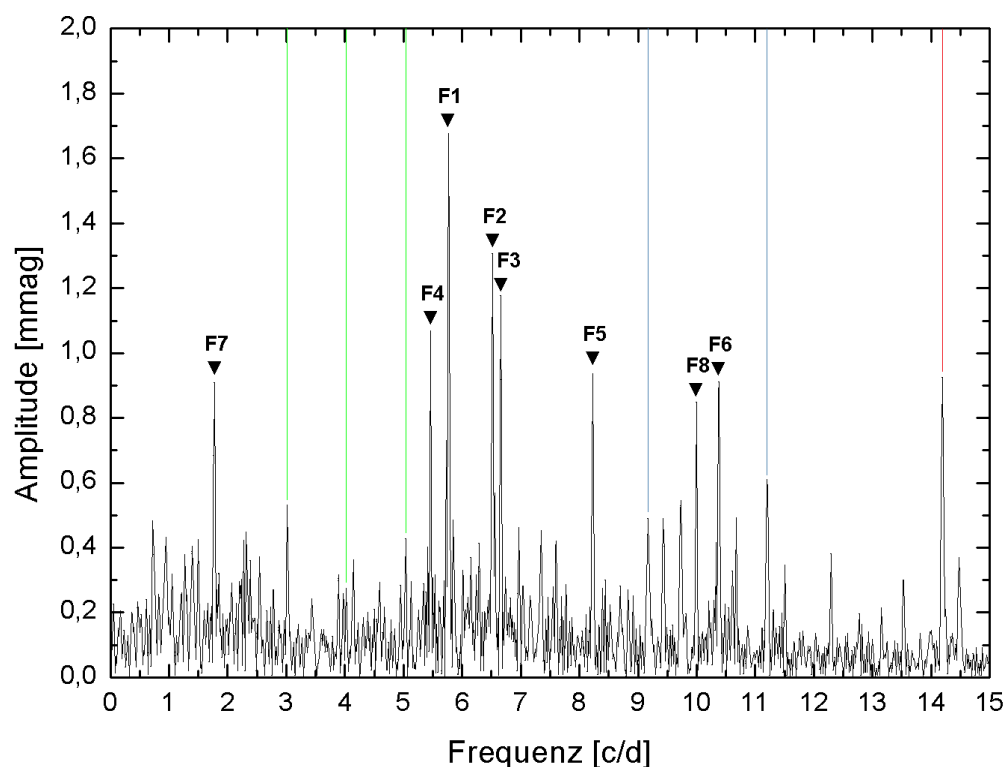


Abbildung 35: EP Cnc 2008, Frequenzen 1 bis 8

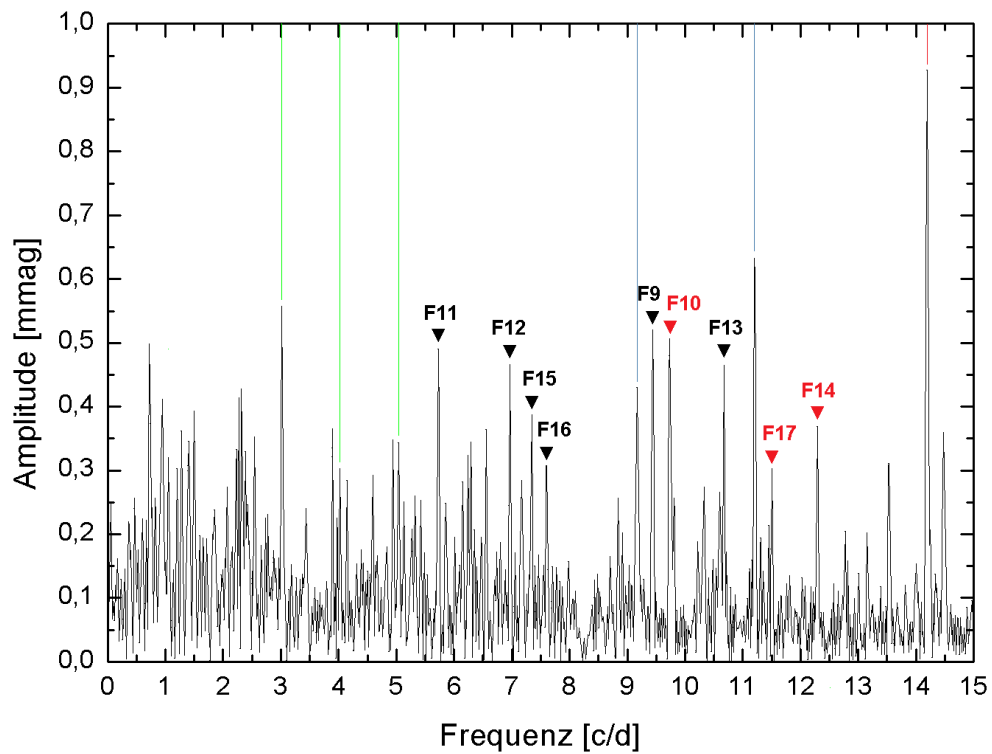


Abbildung 36: EP Cnc 2008, Frequenzen 9 bis 17

Die folgende Abbildung gibt das Spektrum von EP Cnc mit allen 17 signifikanten Frequenzen prewhitened:

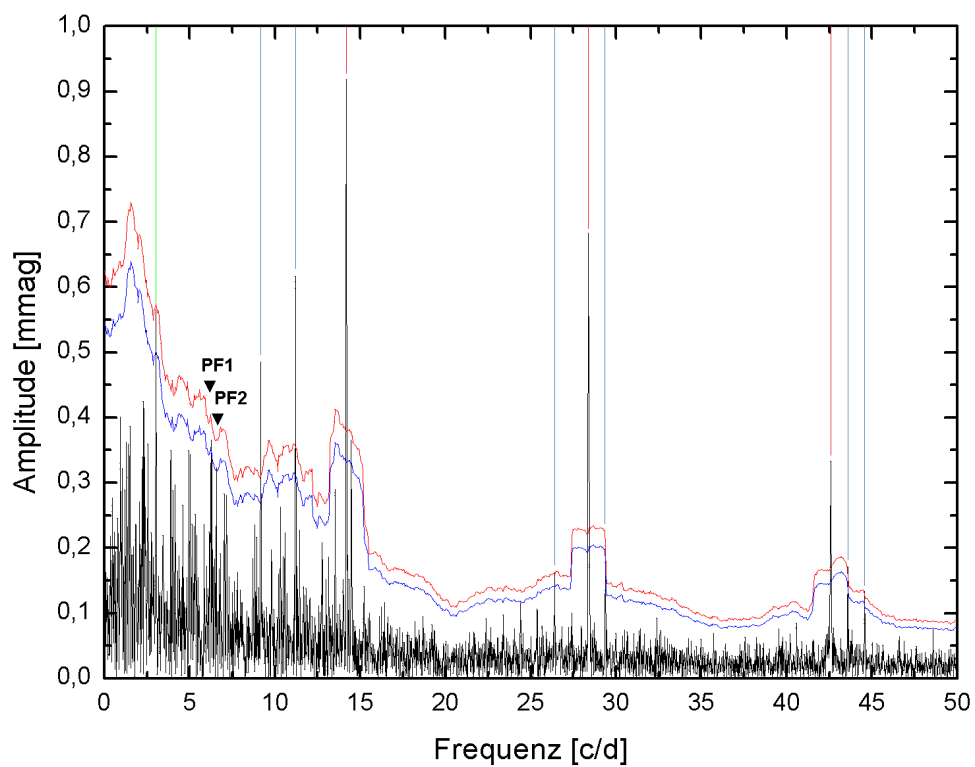


Abbildung 37: EP Cnc 2008-Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened

Die rote Linie zeigt dabei den Grenzwert für herkömmliche Frequenzen von $S/N < 4$, die blaue Linie das Limit für Kombinationsfrequenzen von $S/N < 3.5$. Dieser Noise-Verlauf ist mit Period04 berechnet worden, nachdem alle Frequenzen mit einem $S/N > 3.5$ prewhitened wurden. Anschließend folgte ein Plot ins resultierende Frequenzspektrum nach Abzug der Ergebnisfrequenzen und Kombinationsfrequenzen. Dementsprechend sind PFs im Spektrum zwischen roter und blauer Linie sichtbar. Zwecks Übersicht wurden ebenfalls die Orbitalfrequenzen, Aliasing und Artefakte mit einem $S/N > 3.5$ in den jeweiligen Farben markiert.

Eine deutliche Erhöhung des Rauschens in Richtung kleinerer Frequenzen und der Umstand, dass die Frequenzen F5, F7 und F8 von den Amplituden sehr ähnlich sind, legt nahe, dass die Kombinationsfrequenz unter Berücksichtigung des Amplitudenfehlers, wahrscheinlich nicht F8 (9.999 c/d), sondern F7 (1.772 c/d) lauten dürfte.

Im Weiteren konnten einige potentielle Frequenzen (im Weiteren kurz PF für „Possible Frequency“) im Bereich von $3.5 < S/N < 4.0$ festgestellt werden, welche keinerlei Kombinationen unterliegen.

Nr.	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N
PF1	6.291	0.014	0.36	0.16	0.174	0.21	3.8
PF2	6.557	0.014	0.33	0.16	0.728	0.22	3.6

Tabelle 16: Mögliche Frequenzen für EP Cnc 2008

14.1.2. EP Cnc, Datensatz 2009

Aus dem Datensatz konnten folgende Frequenzen unter Berücksichtigung der in Abbildung 38 markierten Aliasing und Artefakte (4.00 c/d – nicht signifikant, 5.20 c/d – nicht signifikant, 7.20 c/d – nicht signifikant, 11.20 c/d – nicht signifikant) extrahiert werden:

Nr.	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N	Komb.
F1	5.766	0.005	1.69	0.26	0.34	0.07	11.3	
F2	1.764	0.010	1.30	0.40	0.74	0.14	5.6	
F3	6.510	0.007	1.18	0.25	0.24	0.01	8.0	
F4	5.459	0.008	1.07	0.27	0.34	0.12	6.9	
F5	9.994	0.009	1.00	0.29	0.08	0.14	5.9	
F6	8.231	0.009	0.95	0.26	0.70	0.13	6.3	F5-F2

F7	10.375	0.011	0.87	0.31	0.92	0.17	4.8
F8	6.653	0.011	0.72	0.26	0.96	0.17	4.8
F9	11.493	0.012	0.56	0.22	0.33	0.18	4.4
PF1	9.426	0.015	0.57	0.26	0.26	0.22	3.7
PF2	10.658	0.015	0.51	0.25	0.77	0.23	3.5

Tabelle 17: Ergebnis EP Cnc 2009

Hierbei stellt PF wieder mögliche Frequenzen dar, welche über ein $3.5 < S/N < 4.0$ verfügen, jedoch in keiner Kombinationsfrequenz involviert sind. Die Residuen konnten von 3.52 auf 2.71 gesenkt werden. Anzumerken ist, dass alle Frequenzen, einschließlich der PFs, ebenfalls im Datensatz 2008 enthalten sind.

Eine Differenzenbildung der Daten 2009 von den Daten 2008 ergibt folgende Tabelle für Frequenz und Amplitude (Bezeichnung/Nummerierung der Frequenzen folgt den Daten aus 2008):

Nr.	ΔFrequenz [c/d]	Fehler [c/d]	ΔAmp. [mmag]	Fehler [mmag]
F1	0.008	0.009	-0.01	0.46
F2	0.009	0.013	0.08	0.42
F3	0.006	0.016	0.27	0.43
F4	0.001	0.014	-0.09	0.46
F5	-0.004	0.014	-0.02	0.40
F6	0.006	0.016	0.05	0.46
F7	0.008	0.020	-0.39	0.69
F8	0.005	0.015	-0.18	0.43
F17	0.013	0.026	-0.26	0.36
F9	0.012	0.024	-0.04	0.41
F13	0.018	0.025	-0.04	0.40

Tabelle 18: Vergleich zu EP Cnc-Daten aus 2008

Die Frequenzen sind nach dem Datensatz 2008 nummeriert. Unterschiede in Frequenz und Magnitude sind gemeinsam mit den addierten erlaubten maximalen Fehlerwerten beider Datensätze gegeben. Die Frequenzen F9 und F13 sind im Datensatz 2008 zwar vorhanden, treten 2009 aber lediglich als PFs auf. Alle Unterschiede in Frequenz und Amplitude bewegen sich innerhalb der erlaubten Fehlertoleranzen. Somit kann keine Variation in Amplitude oder Frequenz nachgewiesen werden.

Im Folgenden werden die gefundenen Frequenzen grafisch illustriert.

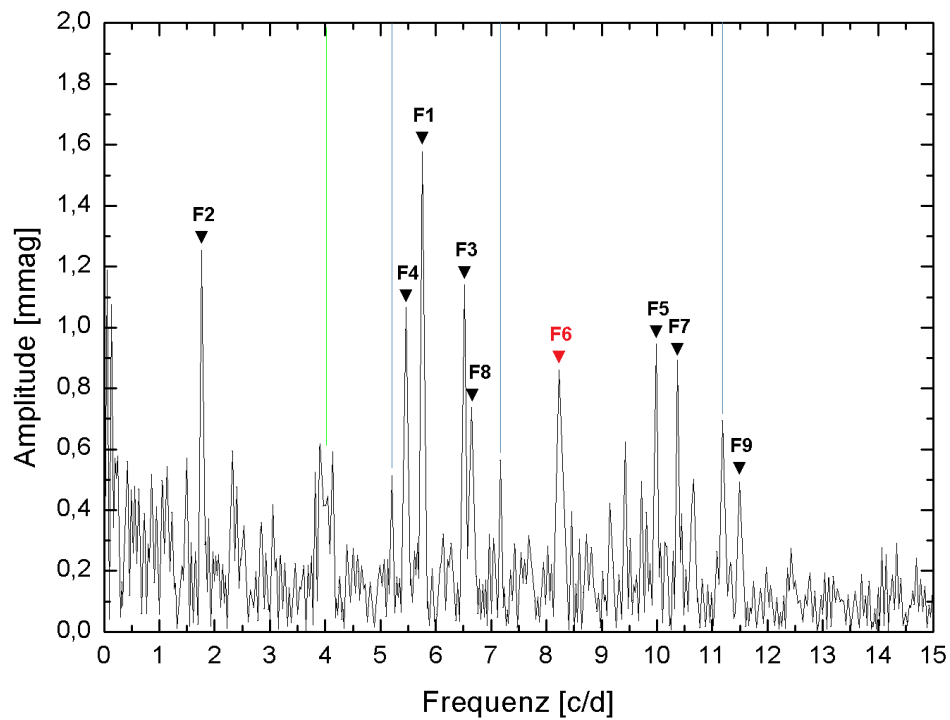


Abbildung 38: EP Cnc 2009, Frequenzspektrum

Auch hier wurden zwecks Übersichtlichkeit nur der Frequenzbereich zwischen 0-15 c/d geplottet, da keine wahren Frequenzen in anderen Bereichen aufgefunden werden konnten.

Als Abschluss erfolgt eine Illustration der Grenzen des S/N um das vollständige Prewhitening aller signifikanten und wahren Frequenzen darzustellen:

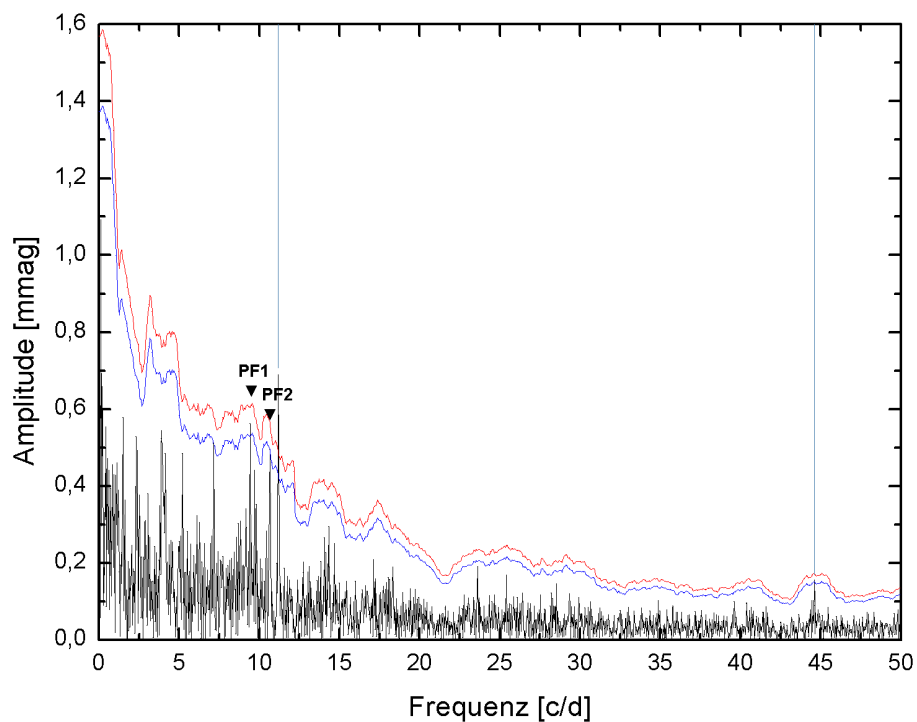


Abbildung 39: EP Cnc 2009-Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened

14.1.3. EP Cnc-Kombination der Datensätze 2008/2009

Da dies lediglich eine Kombination bereits bekannter Datensätze darstellt und keine signifikanten wahren Frequenzen über 15 c/d aufgefunden werden konnten, finden in diesem Kapitel zwecks Übersichtlichkeit nur Abbildungen mit 0-15 c/d Anwendung.

Zu den Frequenzen vom Datensatz 2008 konnten vier neue signifikante Frequenzen aufgefunden werden (rot markiert), wobei F17 und F20 bereits als PFs gelistet wurden. F12 und F14 dürften eigenständige Frequenzen sein, da keine neuen Kombinationen aufgefunden werden konnten. Im Weiteren wurde eine neue PF eruiert. Die Residuen konnten dabei von 3.57 auf 2.59 gesenkt werden.

Nr.	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N	Komb.
F1	5.774	0.002	1.63	0.15	0.34	0.04	18.6	
F2	6.520	0.002	1.23	0.13	0.18	0.05	16.1	
F3	5.461	0.003	1.03	0.15	0.58	0.07	11.9	
F4	1.771	0.005	1.00	0.23	0.43	0.10	7.6	
F5	8.227	0.003	0.93	0.12	0.46	0.06	13.5	
F6	6.660	0.003	0.91	0.13	0.24	0.07	11.8	
F7	10.381	0.003	0.89	0.13	0.86	0.07	11.7	
F8	9.999	0.003	0.85	0.12	0.56	0.07	11.8	F4+F5
F9	9.438	0.005	0.55	0.13	0.90	0.11	7.3	
F10	5.728	0.006	0.49	0.15	0.32	0.14	5.6	
F11	9.733	0.006	0.48	0.13	0.88	0.13	6.2	
F12	2.317	0.009	0.47	0.20	0.54	0.20	4.0	
F13	10.676	0.006	0.47	0.13	0.80	0.13	6.1	
F14	3.899	0.008	0.42	0.15	0.66	0.17	4.6	
F15	6.968	0.007	0.39	0.14	0.82	0.16	5.0	
F16	11.504	0.007	0.38	0.12	0.40	0.15	5.4	F4+F11
F17	6.291	0.008	0.35	0.14	0.94	0.18	4.4	
F18	7.597	0.008	0.31	0.12	0.26	0.17	4.6	
F19	7.354	0.008	0.31	0.12	0.63	0.19	4.3	
F20	6.559	0.008	0.29	0.12	0.25	0.19	4.2	
F21	12.294	0.010	0.22	0.10	0.24	0.22	3.7	F1+F2
PF1	12.773	0.009	0.21	0.09	0.33	0.21	3.8	

Tabelle 19: EP Cnc-Frequenzlösung der kombinierten Daten 2008 und 2009

Anzumerken ist, dass wie erwartet, die Frequenzwerte innerhalb der erlaubten Fehlergrenzen mit den beiden separaten Datensätzen übereinstimmen.

Nachfolgend eine kurze Illustration des Prewhitening-Vorganges, wobei Kombinationsfrequenzen rot beschriftet wurden. Identifizierte falsche Frequenzen sind

2.999 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 4.001 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 5.003 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 7.191 c/d (Aliasing, nicht signifikant), 9.192 c/d (Aliasing, nicht signifikant), 11.191 c/d (Aliasing, signifikant), 14.193 c/d (1. Orbitalfrequenz, signifikant).

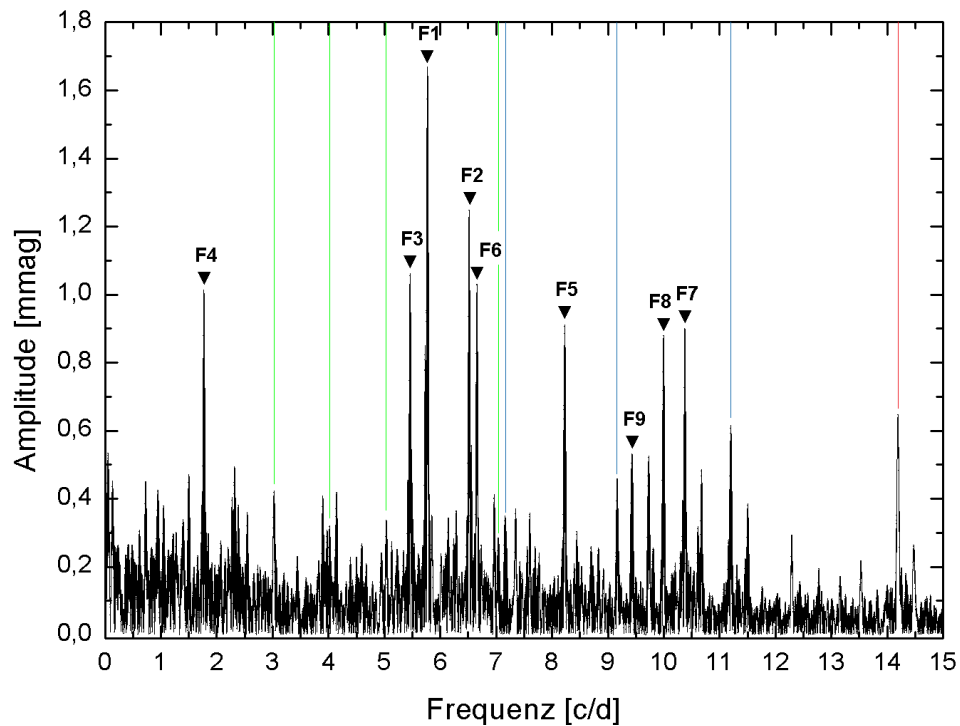


Abbildung 40: EP Cnc-Spektrum und Frequenzen F1 bis F9

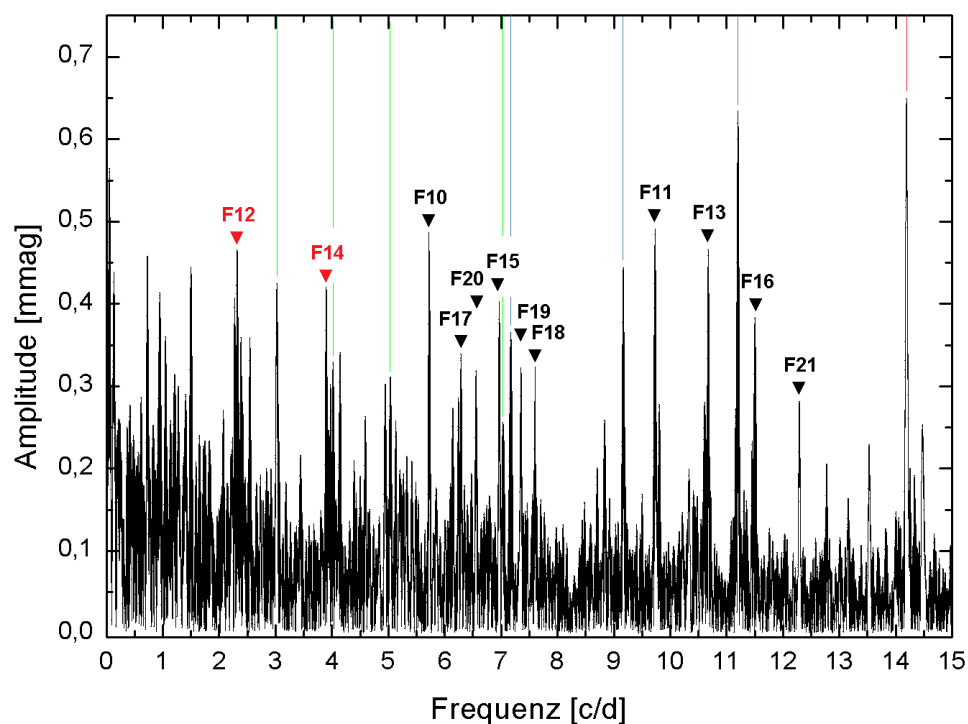


Abbildung 41: EP Cnc, Frequenzen F10 bis F21

Nachfolgend nun die Illustration zwecks vollständigen Prewhitenings infrage kommender Frequenzen inklusive der PF. Artefakte, Aliasing und Orbitalfrequenzen mit einem $S/N > 3.5$ wurden dabei in den entsprechenden Farben markiert.

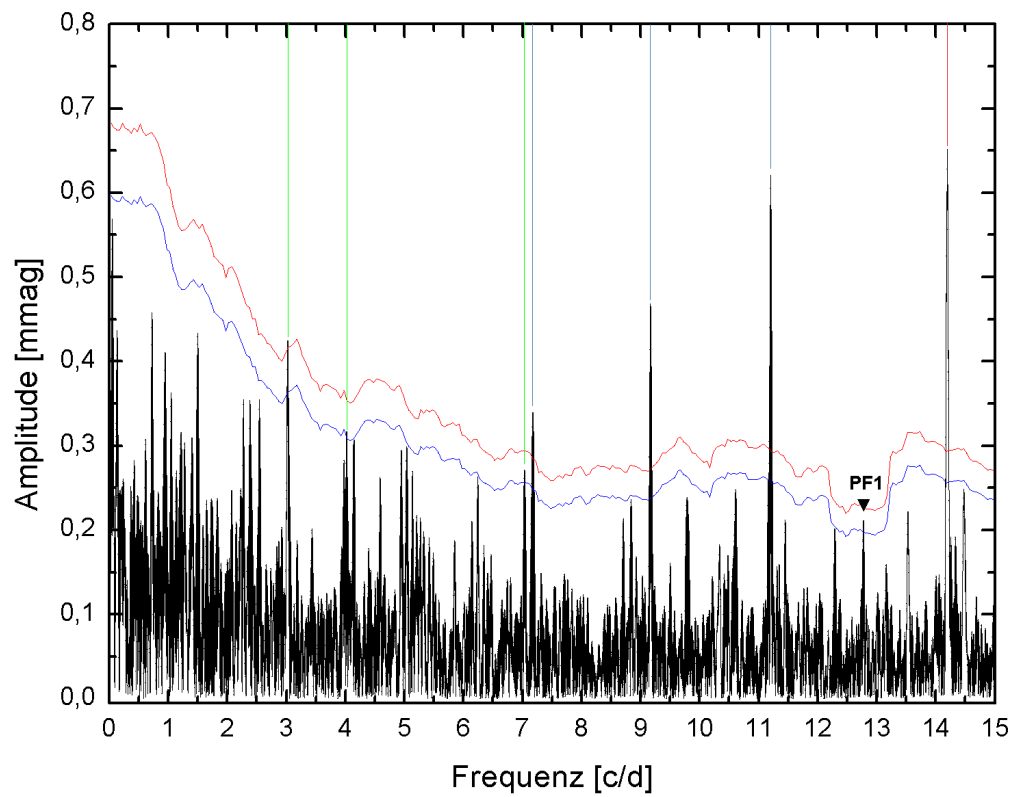


Abbildung 42: EP Cnc 2008/2009, Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened

14.2. BT Cnc

BT Cnc zeigt zu Beginn ein sehr interessantes Frequenzspektrum, wobei hier zwecks Übersicht nur von 0-50 c/d geplottet wurde.

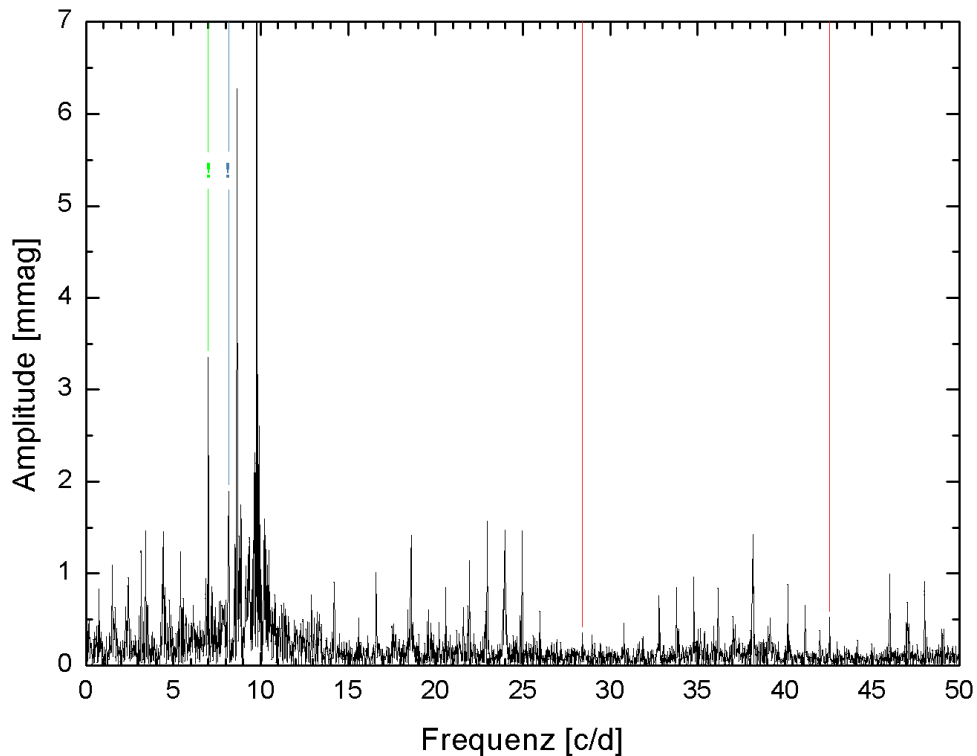


Abbildung 43: Frequenzspektrum BT Cnc [eigene Illustration]

Um auch Peaks mit niedrigerer Amplituden darstellen zu können, wurde die Grafik und somit der höchste Peak (17.674 mmag) bei 7 mmag abgeschnitten.

Zu beachten sind die mit Rufzeichen markierten Frequenzen 7.015 c/d (blau, signifikant) und 8.166 c/d grün, signifikant). 7.015 c/d stellt normalerweise ein Artefakt dar. Aufgrund der unüblichen Höhe der Amplitude und des Umstandes, dass diese Frequenz bereits als bekannte wahre Frequenz in diversen Publikationen (Freyhammer, Larsen, & Petersen 1997 und Kim & Lee 1995) aufscheint, wird diese in die Frequenzliste übernommen. Schwieriger gestaltet sich die Argumentation für 8.166 c/d. Da die Amplituden des Aliasings charakteristischerweise niedriger sind, als die Amplituden der Orbitalfrequenzen (1. Orbitalfrequenz 0.90 mmag), spricht für deren Richtigkeit. Jedoch nicht in den vorliegenden reduzierten Daten. In den unreduzierten Daten ist der Peak der 1. Orbitalfrequenz höher. Obgleich die Frequenz 8.166 c/d definitiv mit Vorsicht zu genießen ist, sprechen einige Gründe dennoch für deren Richtigkeit. Zum einen sind im Spektrum keinerlei andere Aliasings erkennbar (weder in den Rohdaten, noch in den reduzierten Daten). Der Peak der 1. Orbitalfrequenz fehlt in den reduzierten Daten sogar vollständig, die restlichen haben sehr niedrige Amplituden. Somit ist es

unwahrscheinlich, dass genau die Frequenz 8.166 c/d mit einer derartigen signifikanten Höhe der Amplitude nachwievor als falsche Frequenz präsent ist. Zum Anderen ist der Abstand zu der dazugehörigen 1. Orbitalfrequenz größer, als die Auflösung des Datensatzes und auch größer, als die aus Erfahrung gewonnenen Schwankungsbreiten der Aliasings von bis zu ± 0.03 c/d. Beim Prewhitening wird überdies ein Peak bei 8.199 c/d sichtbar, welcher definitiv ein Aliasing darstellt und durch die Auflösung des Datensatzes von 8.166 c/d getrennt werden kann. Im Weiteren sind lediglich noch die Orbitalfrequenzen (signifikant) im Spektrum zu berücksichtigen, welche aber hier kein Aliasing aufweisen. Kommen wir nun zur Frequenzlösung für BT Cnc mit 22 Frequenzen, davon 6 Kombinationen. Im Weiteren wird eine PF angeführt. Die Residuen konnten von 14.1 auf 3.08 gesenkt werden:

Nr.	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N	Komb.
F1	9.777	0.001	17.67	0.21	0.53	0.01	140.9	
F2	8.657	0.002	5.92	0.27	0.67	0.02	37.2	
F3	7.015	0.003	3.47	0.31	0.53	0.04	19.0	
F4	8.166	0.006	1.66	0.31	0.89	0.09	9.3	
F5	8.880	0.005	1.49	0.23	0.44	0.07	10.9	
F6	3.150	0.005	1.21	0.21	0.66	0.08	10.0	
F7	1.520	0.007	1.08	0.24	0.10	0.10	7.6	
F8	10.495	0.007	1.05	0.23	0.62	0.10	7.7	
F9	9.825	0.007	1.03	0.22	0.52	0.10	8.2	
F10	2.390	0.008	0.94	0.23	0.91	0.12	6.9	
F11	0.761	0.010	0.86	0.28	0.42	0.15	5.3	F6-F10
F12	12.911	0.010	0.84	0.26	0.59	0.14	5.6	
F13	8.523	0.011	0.77	0.27	0.00	0.17	4.8	
F14	6.943	0.013	0.75	0.30	0.11	0.19	4.3	
F15	4.760	0.009	0.66	0.18	0.27	0.13	6.1	
F16	5.721	0.010	0.64	0.21	0.96	0.15	5.3	
F17	9.893	0.011	0.61	0.22	0.08	0.17	4.8	
F18	1.659	0.014	0.53	0.23	0.72	0.20	3.9	F9-F4
F19	18.434	0.006	0.48	0.09	0.09	0.08	9.4	F1+F2
F20	16.792	0.009	0.38	0.11	0.94	0.14	5.8	F1+F3
F21	18.482	0.009	0.31	0.09	0.05	0.13	6.2	F2+F9
F22	19.554	0.008	0.29	0.08	0.04	0.12	6.5	2F1
PF1	7.708	0.015	0.61	0.28	0.91	0.22	3.7	

Tabelle 20: Ergebnis BT Cnc

Entgegen der Erwartung bei Betrachtung des Frequenzspektrums Abbildung 43 sind nur Frequenzen unter 20 c/d in der Lösung beinhaltet. Grund dafür ist, dass zahlreiche signifikante Peaks im Bereich größer 20 c/d durch Prewhitening der ersten drei Haupt-Peaks verschwinden. Dies soll durch folgende Grafik anschaulich illustriert werden:

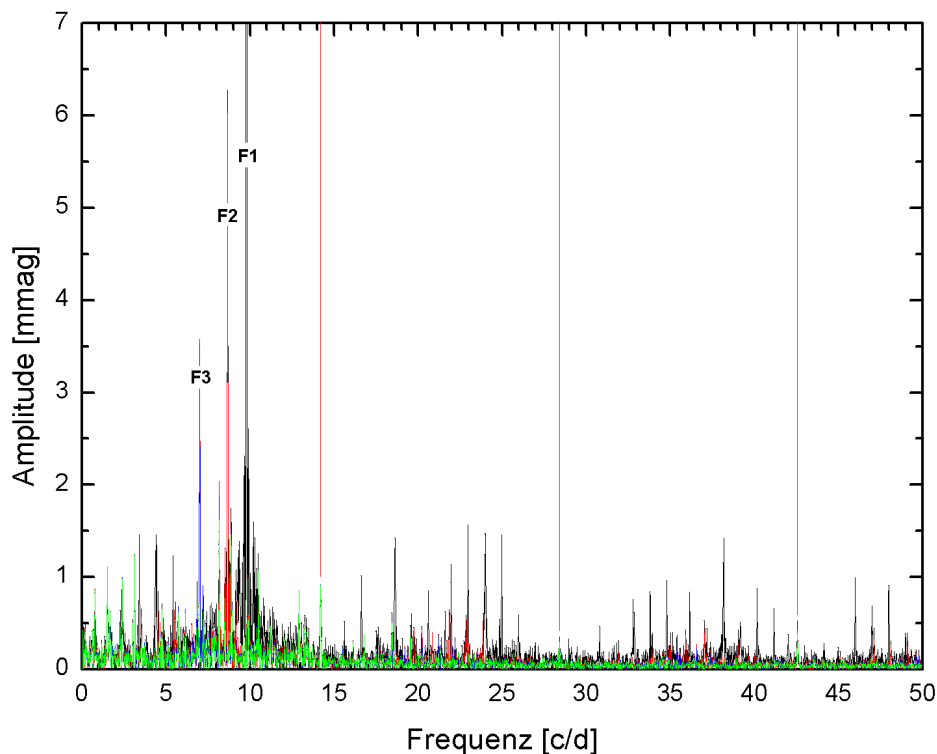


Abbildung 44: Prewhitening der ersten drei Frequenzen

Nummeriert sind die ersten drei Frequenzen (F1, F2 und F3) welche prewhitened wurden. Aus dem Originalspektrum (Schwarz) entstehen nach Berücksichtigung der Frequenzen jeweils die Spektren mit den Farben Rot, Blau und schließlich Grün. Sind die meisten Peaks größer als 20 c/d schon mit F1 eliminiert, so ist nach Berücksichtigung von F1/F2/F3 kein Peak (außer Orbitalfrequenzen) mehr sichtbar. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Vorgang des Prewhitening nur im Frequenzraum von 0-20 c/d mit Start bei F4 illustriert.

Durch die Herabsetzung des Noise durch Prewhitening von F1, F2 und F3 werden in weiterer Folge Aliasing und Artefakte besser sichtbar. So können im Weiteren 3.013 c/d (Artefakt, signifikant), 6.152 c/d (Aliasing von 8.168, signifikant), 7.206 (Aliasing, nicht signifikant), 8.199 (Aliasing, nicht signifikant, wird erst sichtbar bei Abbildung 46 nach prew. F4 = 8.167 c/d), 11.185 (Aliasing, nicht signifikant), 13.211 (Aliasing, nicht signifikant), 14.199 (1. Orbitalfrequenz, signifikant) identifiziert werden.

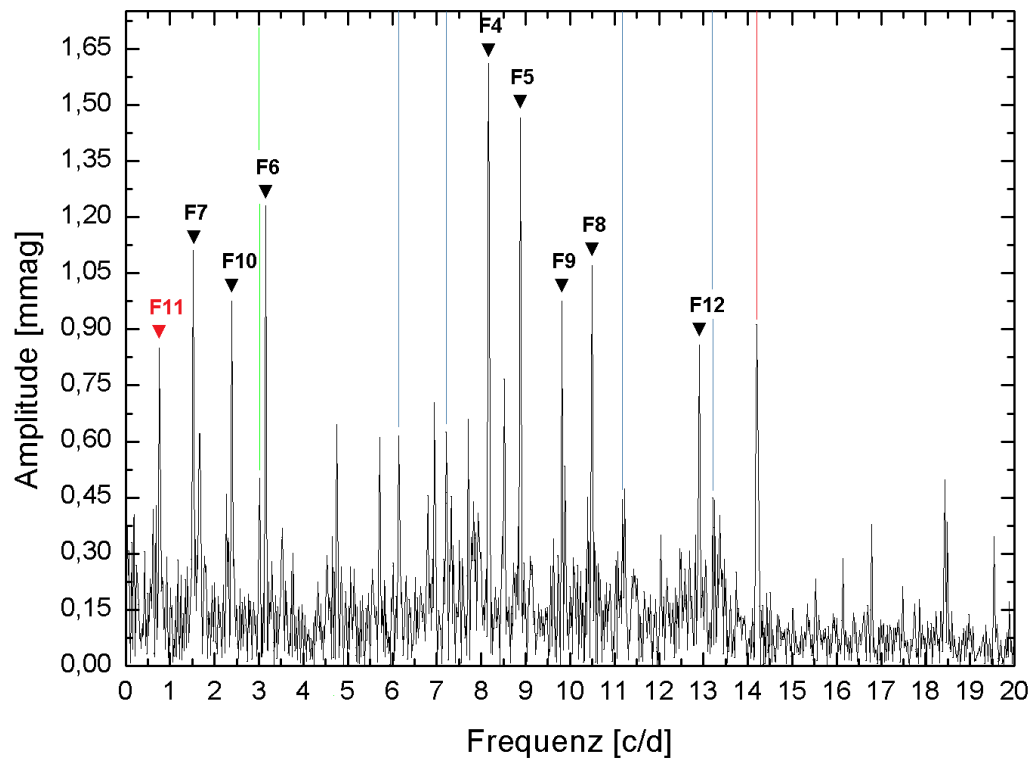


Abbildung 45: BT Cnc, Frequenzen F4 bis F12

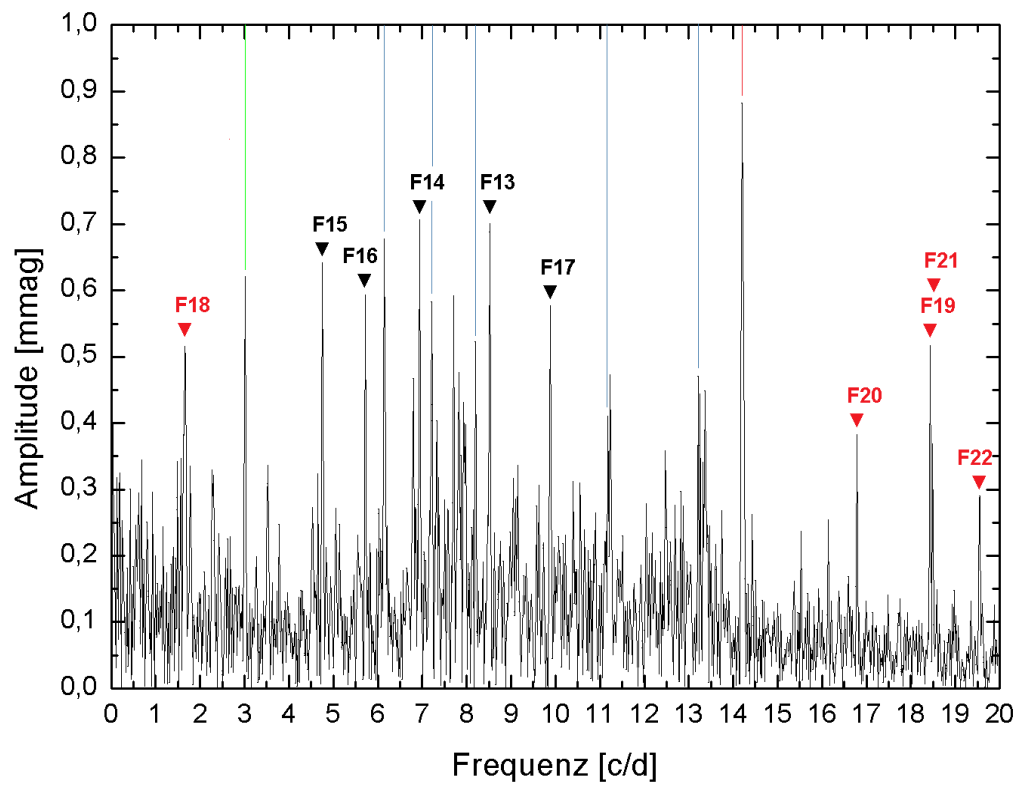


Abbildung 46: BT Cnc, Frequenzen F13 bis F22

Um die Vollständigkeit aller signifikanten Frequenzen zu unterstreichen, erfolgt wieder ein Plot des Frequenzspektrums in Verbindung mit dem Noise-Level. Zur Übersichtlichkeit wurden Artefakte, Aliasing und Orbitalfrequenzen mit einem $S/N > 3.5$ markiert.

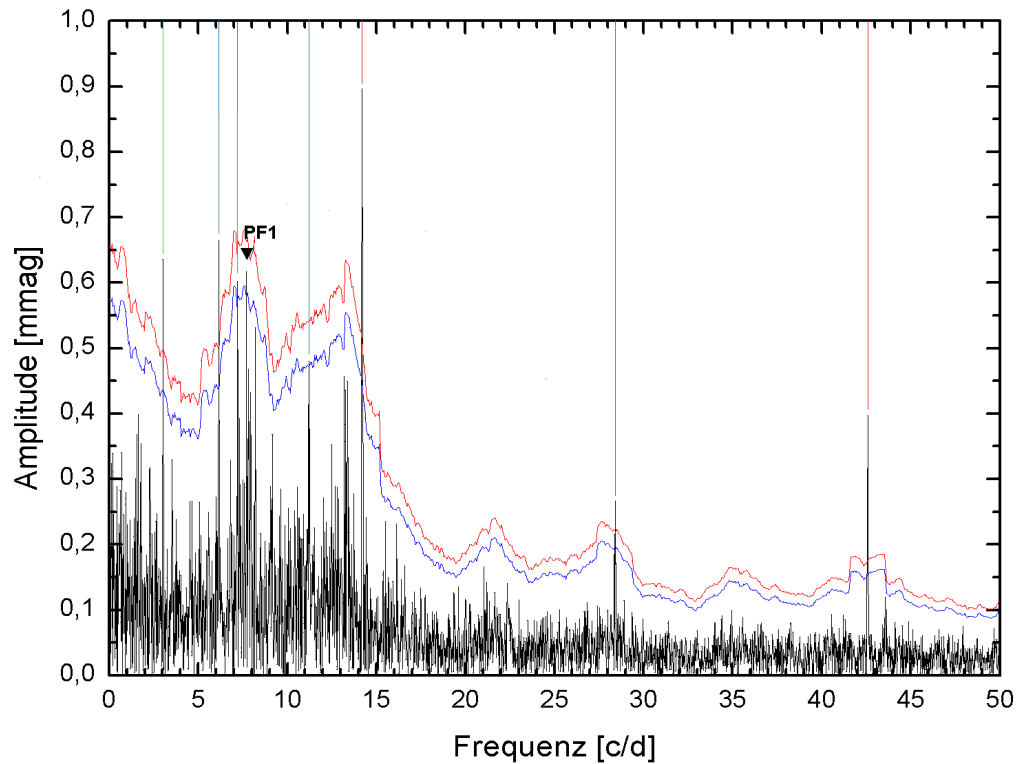


Abbildung 47: BT Cnc-Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened

14.3. HD 73872

Das Frequenzspektrum von HD 73872 in Abbildung 48 beinhaltet eine beachtliche Anzahl von Artefakten, Aliasings und Orbitalfrequenzen. Diese sind 1.025 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 2.000 c/d (Artefakt, signifikant), 2.989 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 5.012 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 7.026 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 13.214 c/d (Aliasing, nicht signifikant), 14.186 c/d (1. Orbitalfrequenz, signifikant), 15.207 c/d (Aliasing, nicht signifikant), 18.218 c/d (Aliasing, nicht signifikant), 19.203 c/d (Aliasing, nicht signifikant), 26.414 c/d (Aliasing von F1, signifikant), 27.399 c/d (Aliasing, signifikant), 28.384 c/d (2. Orbitalfrequenz, signifikant), 29.397 c/d (Aliasing, signifikant), 34.541 c/d (Aliasing von F4, signifikant), 37.559 c/d (Aliasing von F4, nicht signifikant), 38.599 c/d (Aliasing, signifikant), 39.400 c/d (Aliasing F1 oder 2. Orbitalfrequenz, signifikant), 42.581 c/d (3. Orbitalfrequenz, signifikant), 43.576 c/d (Aliasing, signifikant), 44.569 c/d (Aliasing, nicht signifikant), 45.603 c/d (Aliasing, signifikant), 46.606 c/d (Aliasing, signifikant).

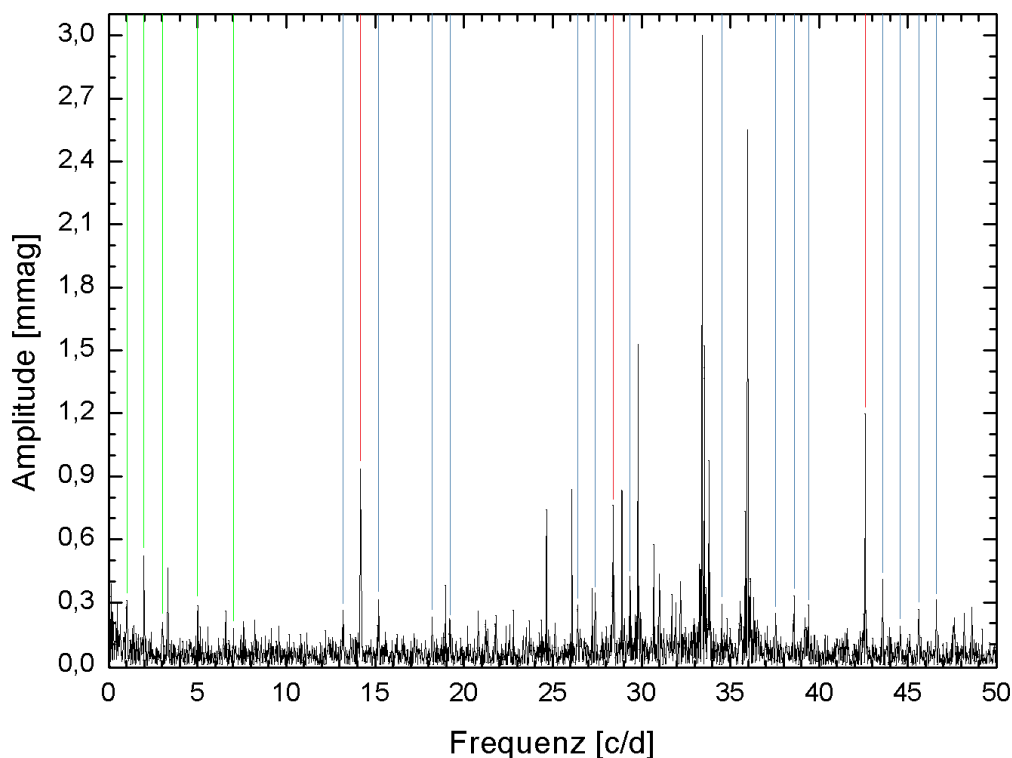


Abbildung 48: Frequenzspektrum HD 73872

Im Folgenden eine Auflistung der aus dem Datensatz eruierten Frequenzen, wobei die Residuen von 4.98 auf 3.54 gesenkt werden konnten.

Nr.	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N
F1	33.416	0.001	3.00	0.07	0.51	0.01	75.0
F2	35.981	0.001	2.50	0.08	0.46	0.01	53.8
F3	29.807	0.002	1.52	0.10	0.18	0.03	26.7
F4	33.542	0.002	1.50	0.07	0.54	0.02	35.1
F5	33.786	0.007	0.87	0.18	0.71	0.10	8.1
F6	28.902	0.006	0.86	0.15	0.03	0.08	9.5
F7	26.086	0.004	0.81	0.09	0.21	0.05	14.6
F8	24.656	0.003	0.75	0.06	0.37	0.04	20.3
F9	30.685	0.005	0.53	0.08	0.01	0.07	11.5
F10	3.332	0.005	0.48	0.08	0.59	0.08	10.1
F11	35.824	0.005	0.46	0.08	0.45	0.08	10.0
F12	32.215	0.005	0.46	0.07	0.29	0.07	11.7
F13	31.016	0.005	0.44	0.07	0.59	0.07	10.7
F14	18.965	0.005	0.39	0.06	0.29	0.08	10.5
F15	27.243	0.010	0.36	0.12	0.50	0.15	5.2
F16	36.335	0.010	0.26	0.08	0.47	0.15	5.5
F17	31.714	0.010	0.22	0.07	0.85	0.15	5.3
F18	23.680	0.007	0.21	0.05	0.45	0.11	7.4
F19	31.948	0.011	0.20	0.07	0.35	0.16	5.1
F20	8.222	0.010	0.20	0.06	0.84	0.14	5.6
F21	22.587	0.008	0.19	0.04	0.62	0.11	7.1
F22	25.135	0.012	0.19	0.07	0.43	0.18	4.5
F23	23.531	0.010	0.14	0.05	0.87	0.15	4.5
PF1	36.506	0.015	0.16	0.08	0.89	0.23	3.5
PF2	23.934	0.014	0.14	0.07	0.05	0.20	3.9

Tabelle 21: Ergebnis HD 73872

Hierbei konnten 23 Frequenzen festgestellt werden, wobei keinerlei Kombinationen zu finden sind. Zusätzlich wurden noch zwei PFs gefunden. Interessant hierbei sind die Frequenzen F10 und F20, da diese eine Sonderstellung aufgrund deren niedrigen Frequenzbereichs gegenüber allen anderen Frequenzen einnehmen. F20 mit 8.222 c/d tritt auch bei EP Cnc (8.227 c/d) auf, wobei dort viele Argumente für die Richtigkeit dieser Frequenz sprechen (Amplitude → jedoch unsicher, in einer Kombination, Abstand Frequenzwert zu möglichen Aliasing). Bei HD 73872 spricht eigentlich nur der Abstand des Frequenzwertes zu einem möglichen Aliasing für die Richtigkeit. Durch den Wert der 1. Orbitalfrequenz von 14.189 c/d ergibt sich der Unterschied zu F20, falls Aliasing, 0.038 c/d. Dies wäre uncharakteristisch hoch und sogar höher, als die Auflösung des Datensatzes von 0.031 c/d. F20 wurde aus diesem Grunde zwar in die Frequenzliste

aufgenommen, ist jedoch mit Vorbehalt zu betrachten, da unter Berücksichtigung des Fehlers ein gewisser Spielraum vorhanden ist, der einen Ausreißer des Aliasings in diesen Bereich bewirken könnte. Es muss angemerkt werden, dass dieser Frequenzwert in keinem der Vergleichssterne aufgefunden werden konnte.

Auch F1 (33.416 c/d) und F4 (33.542 c/d) liegen in der Nähe von möglichen Aliasings. F1 verfügt hierbei über eine seltene Eigenschaft, welches die Korrektheit bestätigt. Die Amplitude dieser Frequenz ist sogar in den Rohdaten höher, als die 2. Orbitalfrequenz. Dies ist zwar bei F4 nicht der Fall, jedoch sprechen hier Frequenzunterschiede zu einem möglichen Aliasing, größer als die Auflösung des Datensatzes, für die Korrektheit. Im Weiteren verfügen beide Frequenzen über eigene Aliasings.

Nun zur Illustration des Prewhitening-Vorganges. Da bis auf F10 und F20 ausschließlich Frequenzen zwischen ungefähr 16 c/d und 40 c/d gefunden wurden, erfolgt lediglich eine Illustration, zwecks besserer Übersicht, in diesem Frequenzbereich.

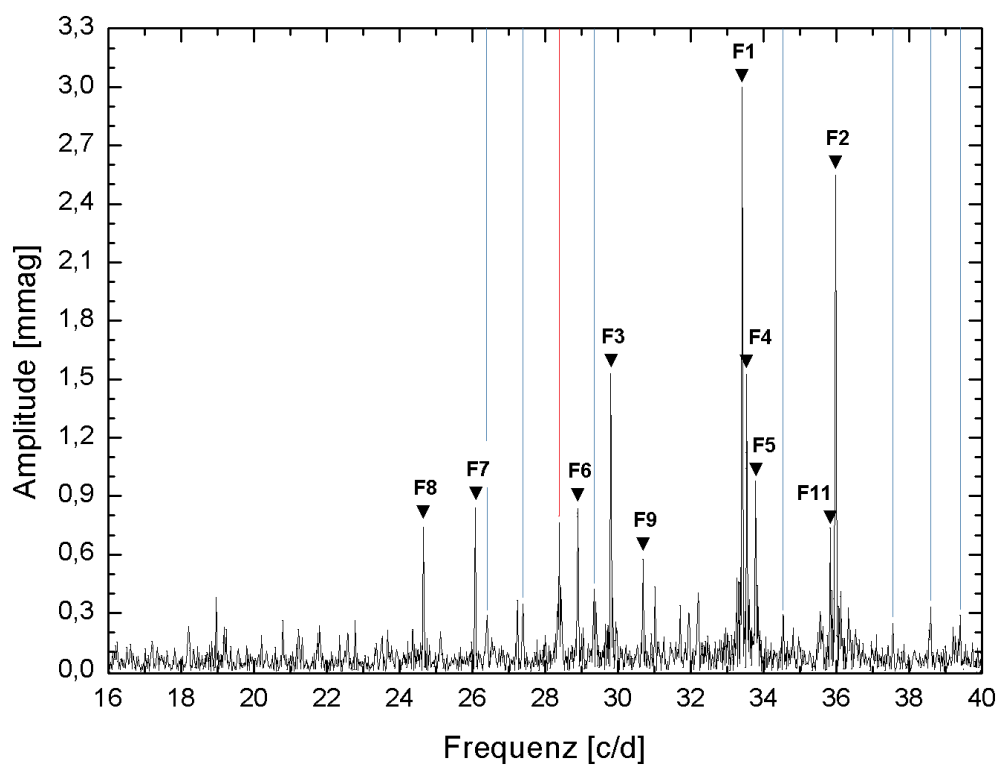


Abbildung 49: HD 73872, Frequenzen F1 bis F11

Im folgenden Diagramm ist das Aliasing von F4 mit dem Wert 37.559 c/d, durch Prewhitening von F4, verschwunden. Dies spricht für die Richtigkeit von F4.

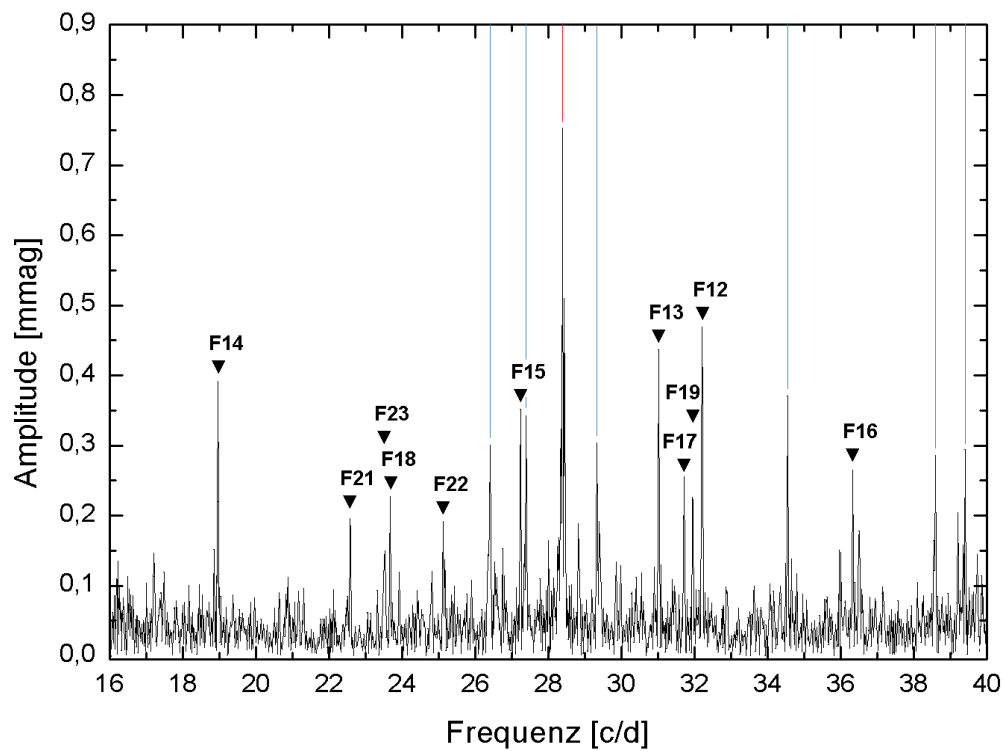


Abbildung 50: HD 73872, Frequenzen F1 bis F22

Nun eine Illustration für die Frequenzen F10 und F20. In Schwarz wird das Originalspektrum dargestellt, in Rot das Spektrum nach Abzug aller Frequenzen der Frequenzlösung unter Vorbehalt von F10 und F20.

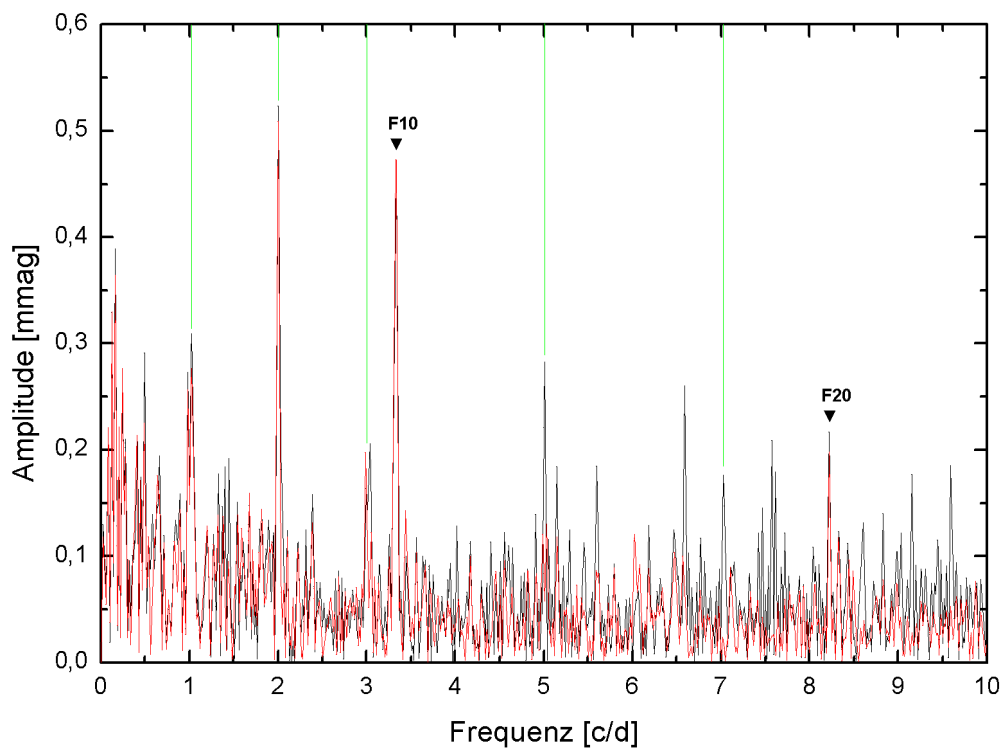


Abbildung 51: Illustration von HD 73872 F10 und F20

Markiert sind neben den Frequenzen F10 und F20, die bereits genannten Artefakte. Anzumerken ist, dass die Artefakte bei 5.012 c/d beim Prewhitening von F4 und bei 7.026 c/d beim Prewhitening von F2 verschwinden (beide nicht signifikant).

Als Abschluss noch die Illustration bezüglich der S/N-Verhältnisse des Spektrums nach dem Prewhitening aller Frequenzen der Ergebnisliste. Zwecks Übersicht sind wieder nur Artefakte, Aliasing und Orbitalfrequenzen mit einem $S/N > 3.5$ markiert.

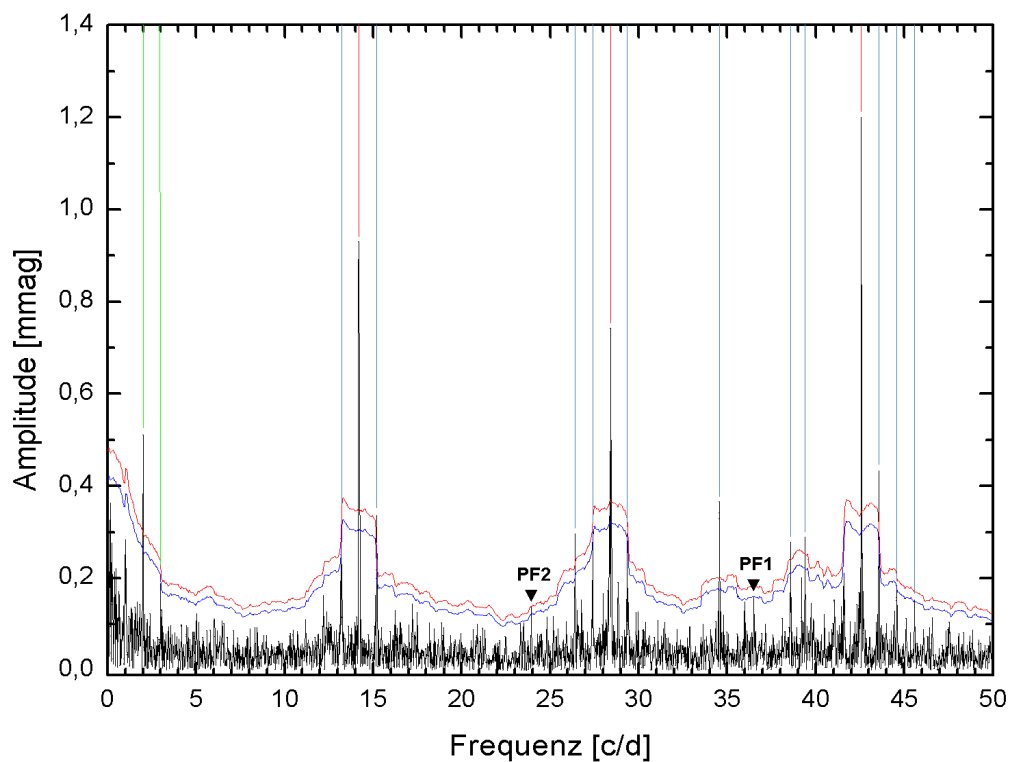


Abbildung 52: HD 73872-Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened

14.4. BS Cnc

Auch für BS Cnc lagen, wie für EP Cnc, Datensätze aus 2008 und 2009 vor. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln besprochen.

14.4.1. BS Cnc, Datensatz 2008

Auch hier folgt zuerst eine Illustration des Spektrums mit zu beachtenden Artefakten, Aliasings und Orbitalfrequenzen. Diese sind 6.006 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 14.191 c/d (1. Orbitalfrequenz, signifikant), 28.381 c/d (2. Orbitalfrequenz, signifikant), 29.389 c/d (Aliasing, signifikant), 41.570 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 42.562 c/d (3. Orbitalfrequenz, nicht signifikant), 43.575 c/d (Artefakt, signifikant).

Nun das Spektrum von BS Cnc 2008, wobei zwecks besserer Übersicht F1 bei 17.036 c/d mit einer Amplitude von 6.17 mmag abgeschnitten wurde:

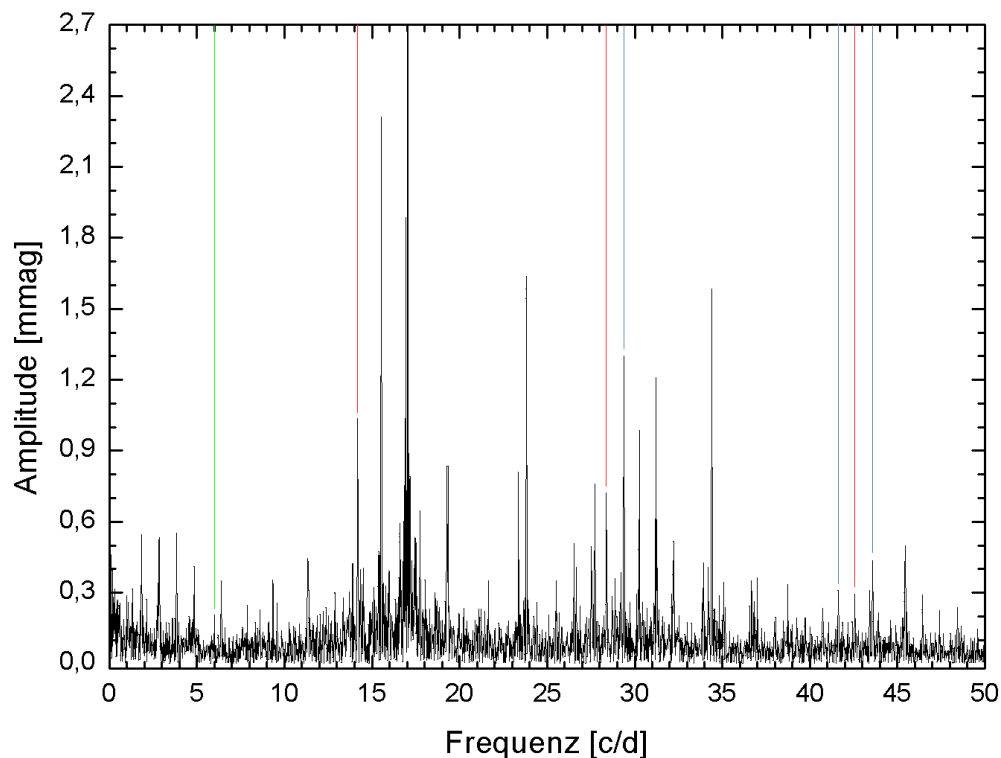


Abbildung 53: BS Cnc-Spektrum 2008

Dabei ist diesmal ein interessanter Umstand zu beachten, der bis jetzt bei den vorangegangenen untersuchten Sternen noch nicht beobachtet werden konnte, jedoch durch das Spektralfenster bereits erwartet wurde. Die Orbitalfrequenzen sind von der Amplitude kleiner, als deren Aliasing. Da dies im Spektrum der nichtreduzierten Daten nicht der Fall war, impliziert der Reduktionsprozess, wie bereits angesprochen, neben dem bereits bekannten asymmetrischen Aliasing auch die Schwierigkeit der Abschätzbarkeit der Amplituden möglichen Aliasings (siehe z.B. 8.22 c/d bei EP Cnc und

HD 73872). Somit stellt das Spektrum jedes Sternes trotz gleichem Reduktionsprozess eine individuelle Problemstellung dar.

Eine beachtliche Anzahl von Frequenzen konnte extrahiert werden, wobei die Residuen von 6.18 auf 2.94 gesenkt wurden:

	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N	Komb.
F1	17.036	0.001	6.17	0.07	0.32	0.01	161.2	
F2	15.527	0.001	2.35	0.09	0.26	0.02	44.5	
F3	23.812	0.001	1.70	0.06	0.19	0.02	46.6	
F4	34.410	0.001	1.64	0.07	0.58	0.02	38.7	
F5	16.934	0.002	1.20	0.07	0.13	0.03	30.9	
F6	30.267	0.005	0.96	0.14	0.34	0.07	11.6	
F7	19.282	0.002	0.90	0.06	0.11	0.03	25.7	
F8	19.339	0.002	0.89	0.06	0.13	0.03	25.6	
F9	23.364	0.002	0.85	0.06	0.81	0.03	24.7	
F10	31.214	0.004	0.81	0.09	0.16	0.05	15.3	
F11	17.746	0.002	0.81	0.06	0.12	0.04	22.2	
F12	27.736	0.006	0.71	0.14	0.68	0.09	8.6	
F13	34.192	0.005	0.46	0.07	0.11	0.07	10.7	
F14	26.669	0.007	0.41	0.08	0.04	0.10	8.2	
F15	27.524	0.010	0.41	0.13	0.85	0.15	5.3	
F16	32.185	0.008	0.38	0.10	0.94	0.12	6.8	
F17	33.927	0.006	0.37	0.08	0.99	0.10	8.3	
F18	36.675	0.005	0.35	0.06	0.24	0.08	9.8	
F19	35.071	0.007	0.34	0.07	0.58	0.10	7.9	
F20	6.390	0.006	0.34	0.06	0.19	0.08	9.6	
F21	21.657	0.006	0.32	0.06	0.42	0.09	9.1	
F22	7.869	0.006	0.29	0.06	0.98	0.09	8.4	
F23	24.428	0.008	0.28	0.07	0.28	0.12	6.7	
F24	37.011	0.007	0.28	0.06	0.08	0.10	7.8	
F25	21.115	0.007	0.27	0.06	0.92	0.10	7.8	
F26	21.444	0.007	0.27	0.06	0.66	0.10	7.6	
F27	26.895	0.010	0.26	0.08	0.41	0.15	5.5	
F28	36.841	0.007	0.26	0.06	0.21	0.11	7.3	
F29	26.540	0.011	0.24	0.08	0.63	0.16	5.1	F4-F22
F30	35.156	0.010	0.23	0.07	0.80	0.15	5.5	
F31	11.884	0.011	0.23	0.08	0.03	0.16	5.1	
F32	39.254	0.010	0.22	0.07	0.73	0.15	5.3	
F33	19.949	0.009	0.22	0.06	0.67	0.13	6.1	
F34	30.436	0.013	0.22	0.09	0.38	0.19	4.1	

F35	25.705	0.013	0.20	0.08	0.16	0.19	4.1	
F36	20.895	0.009	0.19	0.06	0.18	0.14	5.7	
F37	22.799	0.010	0.19	0.06	0.31	0.15	5.4	
F38	34.851	0.013	0.19	0.07	0.34	0.19	4.3	
F39	38.915	0.012	0.19	0.07	0.08	0.18	4.5	
F40	33.864	0.013	0.18	0.08	0.89	0.19	4.1	
F41	18.889	0.011	0.17	0.06	0.80	0.17	4.8	
F42	36.796	0.011	0.17	0.06	0.99	0.17	4.7	
F43	18.552	0.011	0.16	0.06	0.56	0.17	4.8	F34-F31
F44	20.015	0.013	0.15	0.06	0.80	0.19	4.2	
F45	22.465	0.013	0.15	0.06	0.91	0.19	4.3	
PF1	31.851	0.015	0.20	0.09	0.76	0.22	3.7	
PF2	25.106	0.015	0.20	0.10	0.76	0.228	3.5	
PF3	32.299	0.015	0.19	0.09	0.39	0.23	3.5	
PF4	39.779	0.014	0.17	0.07	0.49	0.205	3.9	
PF5	26.089	0.015	0.16	0.08	0.64	0.23	3.5	
PF6	39.290	0.015	0.14	0.07	0.19	0.22	3.7	
PF7	22.278	0.014	0.13	0.06	0.93	0.20	3.9	
PF8	35.414	0.015	0.13	0.06	0.67	0.216	3.7	
PF9	20.437	0.014	0.12	0.05	0.54	0.205	3.9	

Tabelle 22: Ergebnis BS Cnc 2008

Trotz 45 Frequenzen und 9 PFs konnten nur zwei Kombinationen gefunden werden. Einige Frequenzen bedürfen auch einer näheren Betrachtung. F4 liegt in der Nähe eines möglichen Aliasings der 2. Orbitalfrequenz. Ist dessen Amplitude im reduzierten Spektrum höher als die Orbitalfrequenz, ist dem im nichtreduzierten Spektrum nicht so. Somit kann dies nicht als Beweis für die Richtigkeit angeführt werden. Dennoch sprechen zwei Gründe für dessen Richtigkeit. Zum Einen konnte im unreduzierten Spektrum 2008 festgestellt werden, dass das Aliasing bei 29.38 c/d von der Amplitude her niedriger ist, als F4. Zum Anderen konnte die gleiche Frequenz auch in den Daten 2009 eruiert werden. Auch im nichtreduzierten Spektrum der Daten 2009 ist der Peak zwar niedriger, als die Orbitalfrequenz, aber höher, als das Aliasing bei 29.38 c/d. Außerdem wäre es äußerst unwahrscheinlich, dass in beiden Datensätzen zwischen dem Aliasing 29.38 c/d und F4 keinerlei andere Aliasings präsent sind und sich ein solches dann beide Male erst als F4 manifestiert. Im Weiteren ist F4 noch in eine Kombinationsfrequenz involviert und würde einen erfahrungsgemäß leicht zu hohen Frequenzwert für ein Aliasing aufweisen.

Auch für F9 finden Argumentationen wie bei F4 Anwendung. F9 ist auch wieder im Datensatz 2009 präsent. In keinem der reduzierten, als auch unreduzierten Spektren 2008 oder 2009 ist ein anderes Aliasing zwischen der Orbitalfrequenz und F9 auffindbar. Dies macht es sehr unwahrscheinlich, dass gerade F4 ein Aliasing sein sollte.

Die Frequenzen F7 und F8 (Abstand 0.057 c/d), sowie F33 und F44 (Abstand 0.066 c/d), F40 und F17 (Abstand 0.064 c/d), F42 und F28 (Abstand 0.045 c/d), F32 und PF6 (Abstand 0.036 c/d) können durch die Auflösung des Datensatzes von 0.031 c/d getrennt werden. Eine Frequenz von 34.223 c/d (0.28 mmag) wurde aufgrund deren knappen Unauflösbarkeit mit F13 von 34.192 c/d (0.46 mmag) nicht in die Frequenzliste übernommen. Im Weiteren sollte angemerkt werden, dass diese Frequenz eine ständige „Out-of-Iterations“ bewirkt, somit der Wert mit Vorsicht zu genießen ist. Dieser Frequenzwert ist in keinem der anderen untersuchten Sterne präsent. Es liegt somit der Verdacht nahe, dass diese Frequenz ident mit F13 ist.

Im Weiteren könnte F44 ein Aliasing von F1 darstellen. Da jedoch keinerlei andere mögliche Aliasings von F1 aufgefunden werden konnten und ein Peak bei 3 c/d (auch in Rohdaten) fehlt, wird F44 mit Vorbehalt in die Frequenzliste übernommen.

Eine mögliche Kombination von $F_{24}-F_1=F_{44}$ führte, aufgrund deren zu großen Differenz, auch nach mehrmaligen Versuchen zu einem „Out-of-Iterations“.

Kommen wir nun zum Vorgang des Prewhitenings. Um eine bessere Übersicht zu gewährleisten, wurden Artefakte, Aliasings und Orbitalfrequenzen wegen deren hohen Amplitude in den Diagrammen gelegentlich abgeschnitten. Diese wurden daraufhin mit farblich entsprechenden Strichen markiert.

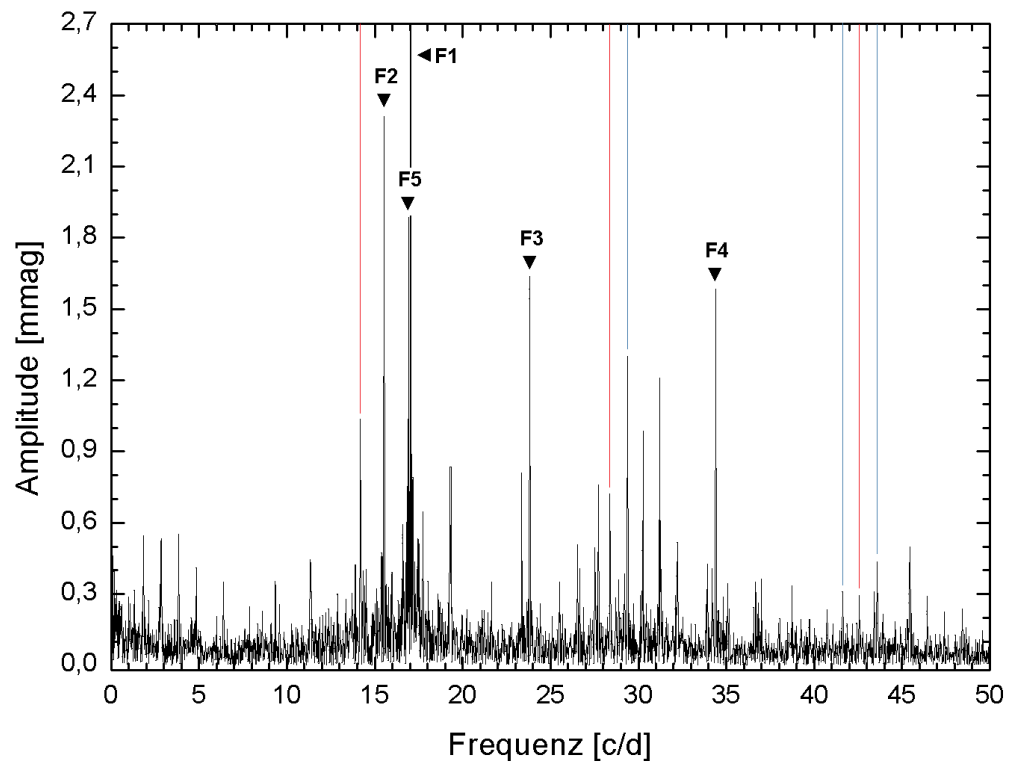


Abbildung 54: BS Cnc 2008, F1 bis F5

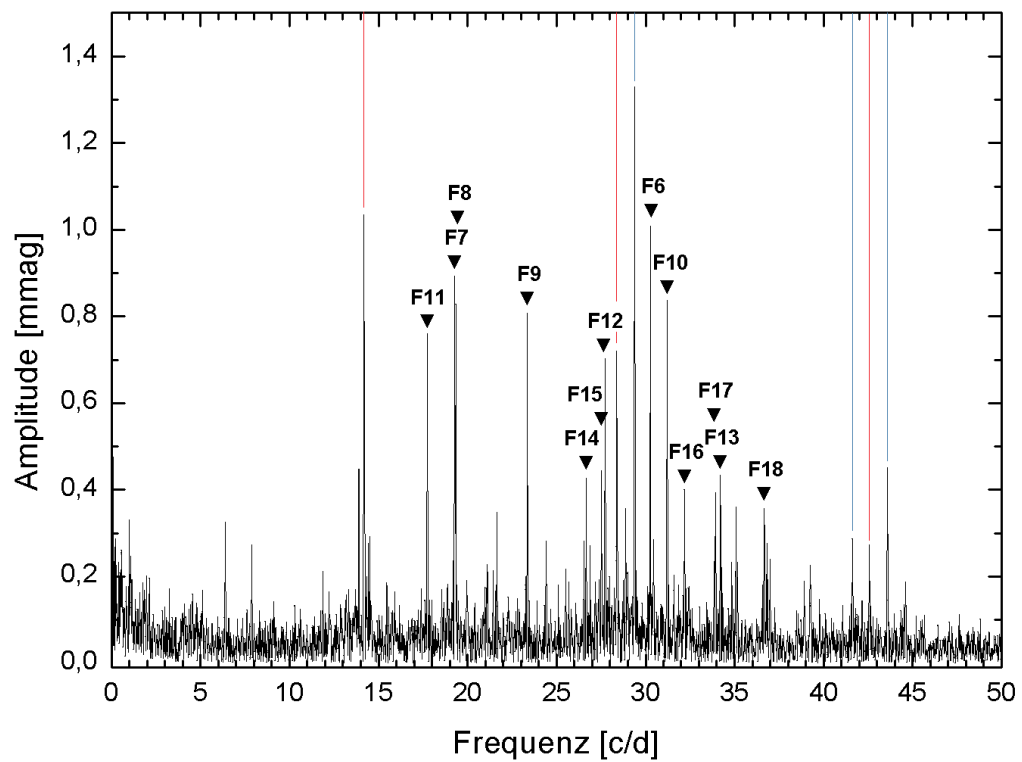


Abbildung 55: BS Cnc 2008, F6 bis F18

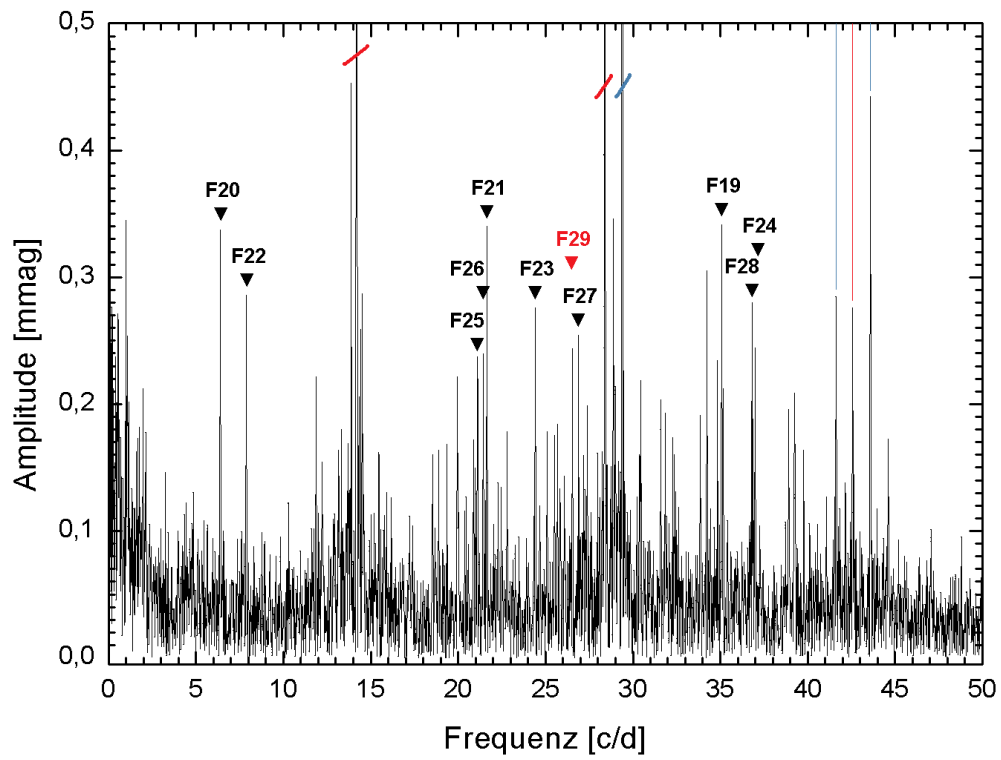


Abbildung 56: BS Cnc 2008, F19 bis F29

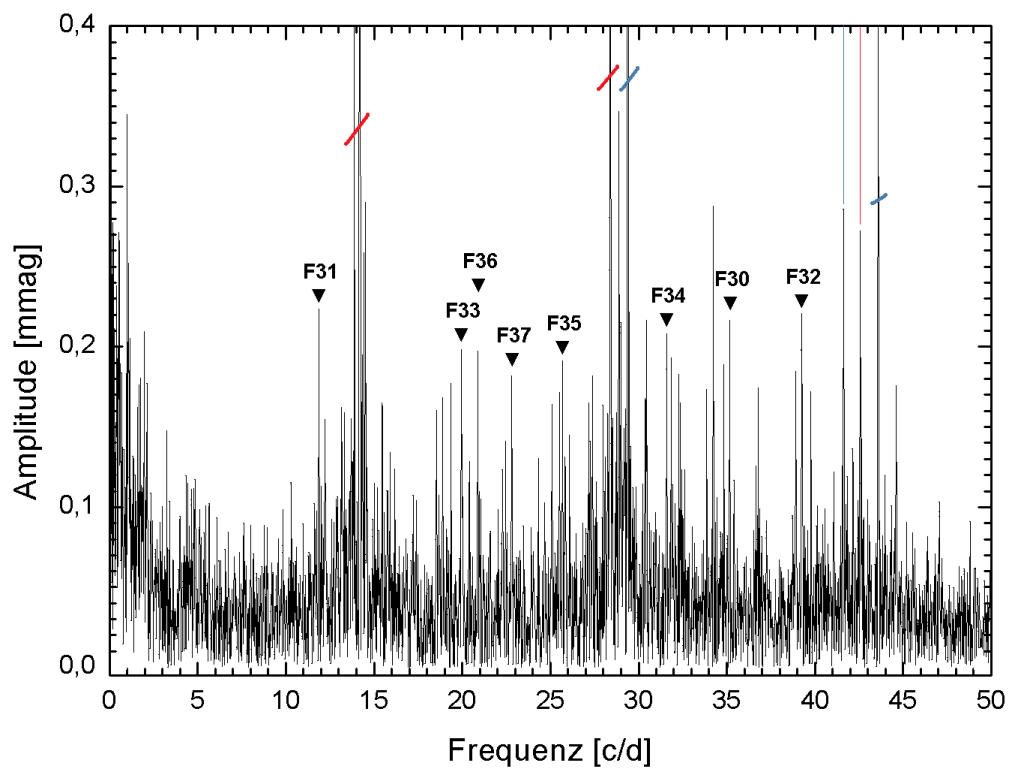


Abbildung 57: BS Cnc 2008, F30 bis F37

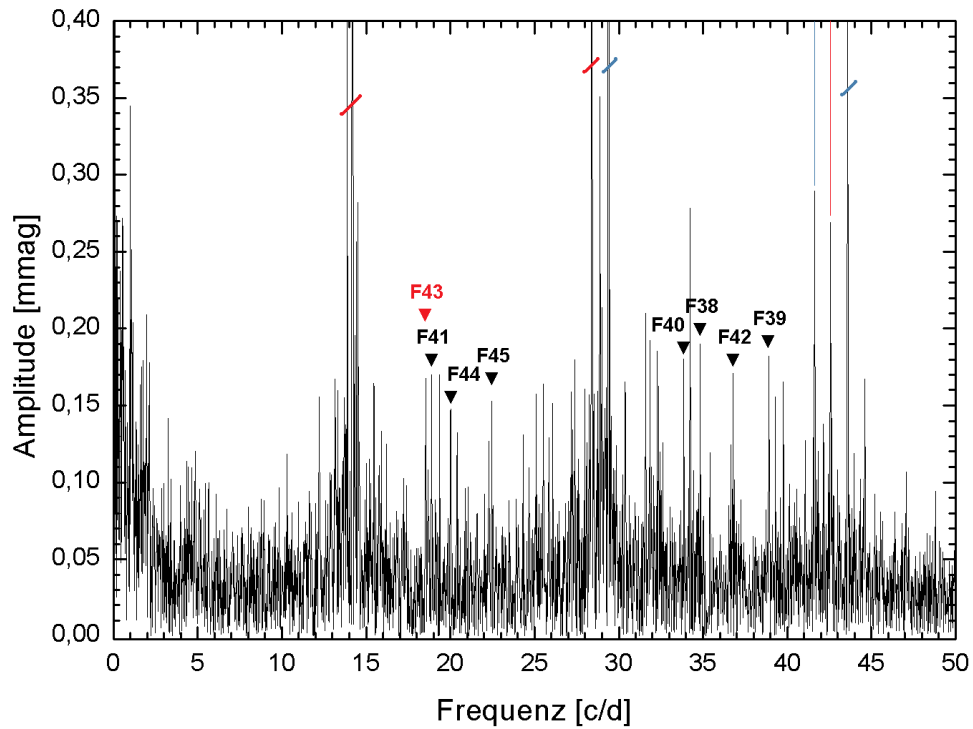


Abbildung 58: BS Cnc 2008, F38 bis F45

Zum Abschluss erfolgt wieder die Illustration des vollständigen Prewhitenings aller signifikanten Frequenzen inklusive der Markierung der PFs.

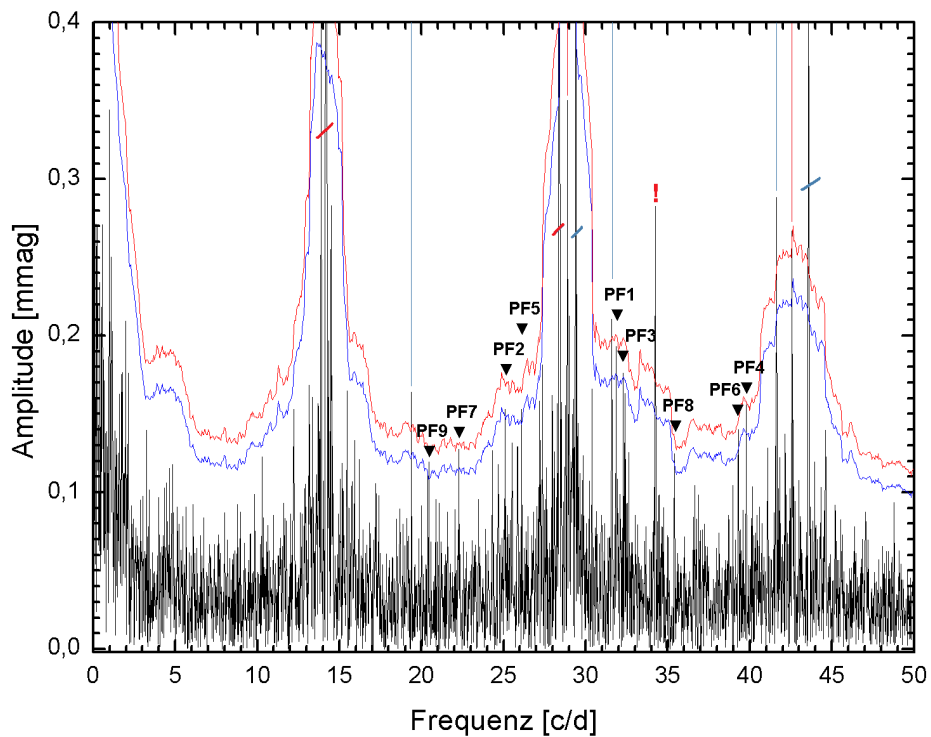


Abbildung 59: BS Cnc 2008, Spektrum nach prewhitening aller signifikanten Frequenzen

Die bereits angesprochene, nicht auflösbare Frequenz wurde dabei mit einem Rufzeichen markiert.

14.4.2. BS Cnc, Datensatz 2009

Unter Beachtung der in Abbildung 60 angeführten Artefakte (1.024 c/d, nicht signifikant; 9.069 c/d, signifikant) und Orbitalfrequenz (Peak geteilt in 14.129 c/d und 14.289 c/d, signifikant) konnten folgende Frequenzen eruiert werden:

	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N
F1	17.035	0.001	5.55	0.16	0.28	0.01	60.5
F2	31.603	0.003	2.03	0.18	0.36	0.04	19.1
F3	34.409	0.005	1.11	0.17	0.90	0.07	11
F4	23.805	0.005	1.10	0.17	0.69	0.07	11.4
F5	16.936	0.005	1.08	0.16	0.17	0.07	11.9
F6	17.746	0.005	0.95	0.16	0.96	0.08	10.2
F7	15.531	0.007	0.85	0.20	0.63	0.11	7.4
F8	19.277	0.007	0.78	0.18	0.24	0.11	7.5
F9	19.344	0.008	0.73	0.18	0.48	0.11	7
F10	12.295	0.011	0.71	0.25	0.03	0.16	4.9
F11	23.367	0.009	0.68	0.19	0.56	0.13	6.2
F12	31.212	0.012	0.46	0.17	0.98	0.17	4.6
F13	34.223	0.012	0.44	0.17	0.58	0.18	4.4
F14	30.419	0.013	0.43	0.17	0.87	0.19	4.3
F15	18.759	0.011	0.42	0.15	0.88	0.17	4.8
PF1	26.695	0.014	0.48	0.22	0.37	0.21	3.8
PF2	6.370	0.015	0.38	0.18	0.55	0.22	3.6
PF3	18.411	0.014	0.30	0.13	0.81	0.20	3.9

Tabelle 23: Ergebnis BS Cnc 2009

Nun der Vorgang des Prewhitening, bei dem die Residuen von 6.36 auf 4.41 gesenkt wurden:

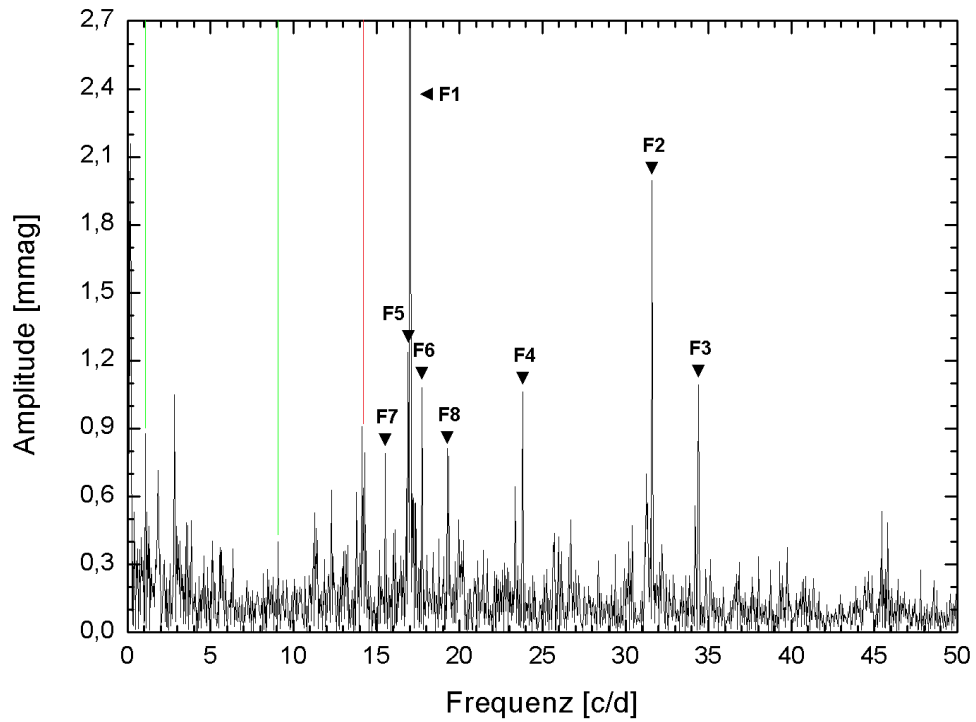


Abbildung 60: BS Cnc 2009, F1 bis F8

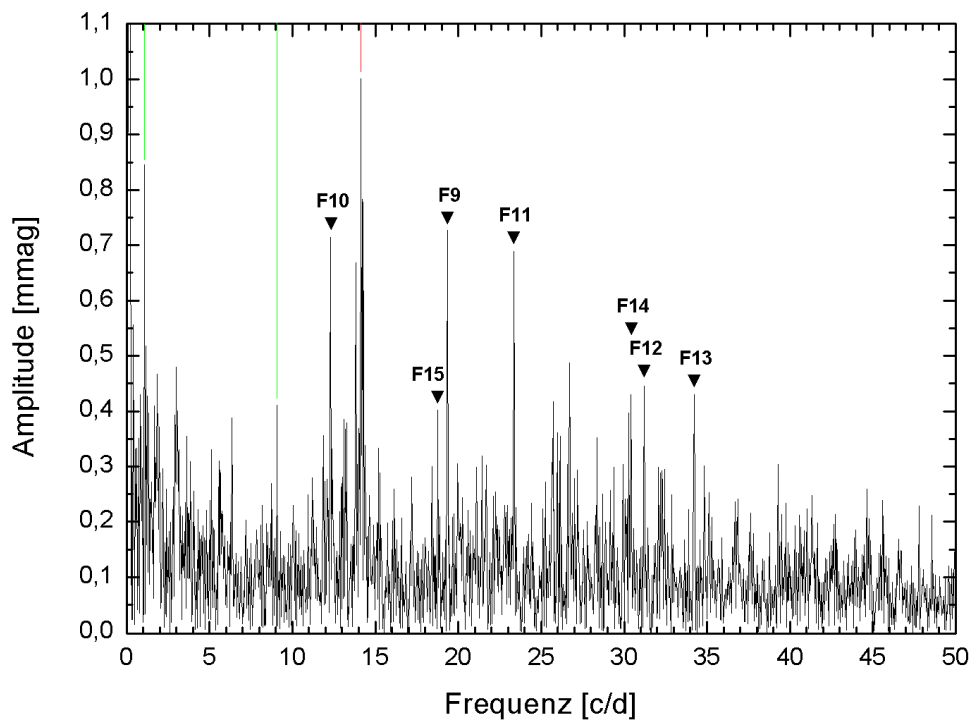


Abbildung 61: BS Cnc 2009, F9 bis F15

Zum Abschluss der Beweis des vollständigen Prewhitenings aller signifikanten Frequenzen und Markierung der PFs:

F3	23.812	0.001	23.805	0.005	0.006	0.006	1.70	0.06	1.10	0.17	0.60	0.23
F4	34.410	0.001	34.409	0.005	0.001	0.006	1.64	0.07	1.11	0.17	0.52	0.25
F5	16.934	0.002	16.936	0.005	0.001	0.006	1.20	0.07	1.08	0.16	0.12	0.22
F6	30.267	0.005					0.96	0.14				
F7	19.282	0.002	19.277	0.007	0.005	0.009	0.90	0.06	0.78	0.18	0.12	0.24
F8	19.339	0.002	19.344	0.008	0.005	0.010	0.89	0.06	0.73	0.18	0.15	0.24
F9	23.364	0.002	23.367	0.009	0.003	0.011	0.85	0.06	0.68	0.19	0.17	0.25
F10	31.214	0.004	31.212	0.012	0.003	0.015	0.81	0.09	0.46	0.17	0.35	0.26
F11	17.746	0.002	17.746	0.005	0.000	0.008	0.81	0.06	0.95	0.16	0.14	0.22
			12.295	0.011					0.71	0.25		
F12	27.736	0.006					0.71	0.14				
F13	34.192	0.005	34.228	0.012	0.036	0.017	0.46	0.07	0.44	0.17	0.02	0.24
F14	26.669	0.007	26.695	0.014	0.027	0.021	0.41	0.08	0.48	0.22	0.08	0.30
F15	27.524	0.010					0.41	0.13				
F16	32.185	0.008					0.38	0.10				
F17	33.927	0.006					0.37	0.08				
F18	36.675	0.005					0.35	0.06				
F19	35.071	0.007					0.34	0.07				
F20	6.390	0.006	6.370	0.015	0.019	0.021	0.34	0.06	0.38	0.18	0.05	0.24
F21	21.657	0.006					0.32	0.06				
			18.411	0.014					0.30	0.13		
F22	7.869	0.006					0.29	0.06				
F23	24.428	0.008					0.28	0.07				
F24	37.011	0.007					0.28	0.06				
F25	21.115	0.007					0.27	0.06				
F26	21.444	0.007					0.27	0.06				
F27	26.895	0.010					0.26	0.08				
F28	36.841	0.007					0.26	0.06				
F29	26.540	0.011					0.24	0.08				
F30	35.156	0.010					0.23	0.07				
F31	11.884	0.011					0.23	0.08				
F32	39.254	0.010					0.22	0.07				
F33	19.949	0.009					0.22	0.06				
F34	30.436	0.013	30.419	0.013	0.017	0.026	0.22	0.09	0.43	0.17	0.21	0.26
F35	25.705	0.013					0.20	0.08				
F36	20.895	0.009					0.19	0.06				
F37	22.799	0.010					0.19	0.06				
F38	34.851	0.013					0.19	0.07				
F39	38.915	0.012					0.19	0.07				
F40	33.864	0.013					0.18	0.08				
F41	18.889	0.011	18.759	0.011	0.130	0.022	0.17	0.06	0.42	0.15	0.25	0.21
F42	36.796	0.011					0.17	0.06				
F43	18.552	0.011					0.16	0.06				
F44	20.015	0.013					0.15	0.06				
F45	22.465	0.013					0.15	0.06				
PF1	31.851	0.015					0.20	0.09				

PF2	25.106	0.015	0.20	0.10
PF3	32.299	0.015	0.19	0.09
PF4	39.779	0.014	0.17	0.07
PF5	26.089	0.015	0.16	0.08
PF6	39.290	0.015	0.14	0.07
PF7	22.278	0.014	0.13	0.06
PF8	35.414	0.015	0.13	0.06
PF9	20.437	0.014	0.12	0.05

Tabelle 24: Vergleich BS Cnc-Daten 2008 und 2009

Aus dieser Tabelle ergeben sich einige interessante Umstände.

Die Amplituden von F1, F2, F3, F4 variieren deutlich. Auch F10 und F41 zeigen Variationen über den erlaubten Fehlergrenzen. F13 und F14 zeigen Variationen in den Frequenzwerten, wobei diese bei F14 kleiner ist, als die Auflösung eines einzelnen Datensatzes. Bei F13 handelt es sich vermutlich um zwei separate Frequenzen, da im Datensatz 2008 die 34.223 c/d, aufgrund deren knappen Unauflösbarkeit, aussortiert werden musste. Bei F41 stellt sich überdies auch die Frage, ob es sich, aufgrund des Unterschiedes der Frequenzwerte, um ein und dieselbe Frequenz handelt.

Im Datensatz 2009 konnten, trotz weniger Ergebnisfrequenzen, drei komplett neue Frequenzen ermittelt werden (inklusive 1xPF). Diese sollten aufgrund deren Amplituden auch im Datensatz 2008 vorhanden sein. Diese konnten im Satz 2008 aber nicht einmal als PFs identifiziert werden. Deren Frequenzwerte sprechen jedoch für dessen Richtigkeit, wobei anzumerken ist, dass die 12.295 c/d bereits bei EP Cnc 2008 involviert ist (F14 mit 12.294 c/d, 0.37 mmag und Phase 0.10, Kombinationsfrequenz F1+F2). Aufgrund des Umstandes, dass diese eine Kombinationsfrequenz ist und die Amplituden verschieden hoch sind, dürfte es sich hierbei jedoch um einen Zufall handeln.

Im Weiteren stellt sich die Frage, wieso Frequenzen, insbesondere F6 oder F12 im Datensatz 2009 fehlen, obwohl deren Amplituden eine Auffindung normalerweise ermöglichen sollten. Eine Erklärung dafür, kann eine ausgeprägte Amplitudenvariation sein.

Kombiniert man die beiden Datensätze, erhält man 48 Ergebnisfrequenzen und zwei PFs. Die Residuen konnten dabei von 6.24 auf 3.60 reduziert werden.

Nr.	Frequenz [c/d]		Amplitude [mmag]		Phase		S/N
F1	17.036	0.002	5.98	0.09	0.48	0.01	115.2
F2	15.527	0.004	1.86	0.12	0.83	0.03	27.5
F3	23.812	0.004	1.50	0.08	0.58	0.02	32.0
F4	34.409	0.004	1.46	0.07	0.38	0.02	33.8
F5	16.935	0.004	1.16	0.09	0.11	0.04	22.1
F6	19.341	0.005	0.86	0.07	0.97	0.04	20.3
F7	19.283	0.005	0.86	0.07	0.35	0.04	20.3
F8	17.746	0.005	0.83	0.09	0.17	0.05	16.5
F9	31.601	0.006	0.82	0.12	0.04	0.07	11.4
F10	23.364	0.005	0.79	0.08	0.41	0.05	16.2
F11	30.267	0.007	0.74	0.13	0.08	0.08	9.5
F12	31.213	0.007	0.71	0.13	0.27	0.08	9.7
F13	27.736	0.008	0.51	0.14	0.92	0.12	6.4
F14	26.669	0.008	0.40	0.11	0.64	0.13	6.3
F15	32.187	0.009	0.39	0.12	0.30	0.15	5.4
F16	34.191	0.007	0.37	0.07	0.44	0.10	8.4
F17	27.522	0.010	0.35	0.14	0.64	0.19	4.2
F18	6.391	0.007	0.34	0.07	0.77	0.10	8.2
F19	21.656	0.007	0.32	0.07	0.78	0.10	7.9
F20	35.072	0.007	0.32	0.07	0.92	0.10	7.8
F21	36.676	0.007	0.31	0.06	0.39	0.09	8.5
F22	12.287	0.010	0.29	0.11	1.00	0.18	4.5
F23	30.435	0.010	0.28	0.10	0.67	0.17	4.6
F24	21.115	0.008	0.28	0.07	0.64	0.11	7.3
F25	24.427	0.008	0.28	0.08	0.79	0.14	5.9
F26	33.927	0.008	0.27	0.08	0.30	0.13	6.1
F27	21.444	0.008	0.27	0.07	0.56	0.11	7.0
F28	36.842	0.008	0.27	0.06	0.00	0.11	7.2
F29	34.228	0.008	0.26	0.07	0.36	0.13	6.1
F30	25.705	0.010	0.26	0.10	0.88	0.18	4.5
F31	11.885	0.010	0.26	0.10	0.35	0.17	4.6
F32	7.869	0.008	0.25	0.07	0.16	0.12	6.5
F33	37.011	0.008	0.24	0.06	0.28	0.12	6.6
F34	35.156	0.009	0.23	0.07	0.13	0.14	5.6
F35	34.851	0.009	0.23	0.07	0.50	0.15	5.4
F36	19.948	0.009	0.21	0.07	0.56	0.15	5.4
F37	33.861	0.010	0.21	0.08	0.93	0.17	4.6
F38	22.800	0.010	0.20	0.08	0.77	0.18	4.4
F39	36.798	0.009	0.19	0.06	0.88	0.16	5.1
F40	39.253	0.009	0.19	0.06	0.53	0.16	5.1
F41	39.778	0.010	0.18	0.07	0.82	0.17	4.6
F42	20.896	0.009	0.18	0.06	0.69	0.16	4.8
F43	18.761	0.010	0.18	0.07	0.94	0.18	4.5
F44	39.297	0.009	0.18	0.06	0.15	0.17	4.8

F45	18.890	0.010	0.18	0.07	0.80	0.18	4.4
F46	18.412	0.010	0.17	0.07	0.24	0.19	4.1
F47	20.015	0.010	0.16	0.07	0.32	0.20	4.0
F48	38.914	0.010	0.14	0.06	0.48	0.19	4.1
PF1	26.896	0.011	0.22	0.10	0.55	0.22	3.7
PF2	22.276	0.011	0.12	0.06	0.67	0.22	3.6

Tabelle 25: Ergebnis BS Cnc, Daten 2008 und 2009

Alle Frequenzen konnten, unter Beachtung der erlaubten Fehlergrenzen, im Datensatz 2008 oder 2009 bestätigt werden, wobei F16 (34.192 c/d) und F29 (34.228 c/d) nun als separate Frequenzen getrennt werden können. Ansonsten konnten keine neuen Frequenzen aufgefunden werden.

Die Frequenz 26.695 c/d, aus dem Datensatz 2008, konnte im kombinierten Datensatz nicht bestätigt werden. Diese Frequenz dürfte mit den 26.669 c/d, aus dem Datensatz 2009, ident sein.

Die 18.889 c/d, aus dem Datensatz 2008, und die 18.759 c/d, aus dem Datensatz 2009, konnten beide im kombinierten Datensatz bestätigt werden. Somit dürfte es sich um separate Frequenzen handeln. Dies würde auch den großen Unterschied in den Amplituden erklären.

In weiterer Folge erfolgt eine Übersicht der Frequenzen im Vergleich zu den Ergebnissen der Datensätze 2008 und 2009. Dabei ist ersichtlich, dass die Werte, mathematisch gesehen und unter Berücksichtigung möglicher Fehlergrenzen, jeweils Zwischenwerte aus den Ergebnissen der beiden separaten, unterschiedlich langen, Datensätzen darstellen. Die Nummerierung erfolgt wieder nach dem Ergebnis von 2008, wobei die PFs aus 2009 und dem kombinierten Datensatz mit roter Schrift markiert sind.

Nr.	Frequenz [c/d]			Amplitude [mmag]		
	2008	2009	Beide	2008	2009	Beide
F1	17.036	17.035	17.036	6.17	5.55	5.98
F2	15.527	15.531	15.527	2.35	0.85	1.86
		31.603	31.601		2.03	0.82
F3	23.812	23.805	23.812	1.70	1.10	1.50
F4	34.410	34.409	34.409	1.64	1.11	1.46
F5	16.934	16.936	16.935	1.20	1.08	1.16
F6	30.267		30.267	0.96		0.74
F7	19.282	19.277	19.283	0.90	0.78	0.86
F8	19.339	19.344	19.341	0.89	0.73	0.86
F9	23.364	23.367	23.364	0.85	0.68	0.79
F10	31.214	31.212	31.213	0.81	0.46	0.71

F11	17.746	17.746	17.746	0.81	0.95	0.83
		12.295	12.287		0.71	0.29
F12	27.736		27.736	0.71		0.51
F13	34.192		34.191	0.46		0.37
F14	26.669	26.695	26.669	0.41	0.48	0.40
F15	27.524		27.522	0.41		0.35
F16	32.185		32.187	0.38		0.39
F17	33.927		33.927	0.37		0.27
F18	36.675		36.676	0.35		0.31
F19	35.071		35.072	0.34		0.32
F20	6.390	6.370	6.391	0.34	0.38	0.34
F21	21.657		21.656	0.32		0.32
		18.411	18.412		0.3	0.17
F22	7.869		7.869	0.29		0.25
F23	24.428		24.427	0.28		0.28
F24	37.011		37.011	0.28		0.24
F25	21.115		21.115	0.27		0.28
F26	21.444		21.444	0.27		0.27
F27	26.895		26.896	0.26		0.22
F28	36.841		36.842	0.26		0.27
F29	26.54			0.24		
F30	35.156		35.156	0.23		0.23
F31	11.884		11.885	0.23		0.26
F32	39.254		39.253	0.22		0.19
F33	19.949		19.948	0.22		0.21
F34	30.436	30.419	30.435	0.22	0.43	0.28
F35	25.705		25.705	0.20		0.26
F36	20.895		20.896	0.19		0.18
F37	22.799		22.800	0.19		0.20
F38	34.851		34.851	0.19		0.23
F39	38.915		38.914	0.19		0.14
F40	33.864		33.861	0.18		0.21
F41	18.889		18.890	0.17		0.18
		18.759	18.761		0.42	0.18
F42	36.796		36.798	0.17		0.19
F43	18.552			0.16		
F44	20.015		20.015	0.15		0.16
F45	22.465			0.15		
PF1	31.851			0.20		
PF2	25.106			0.20		
PF3	32.299			0.19		
PF4	39.779		39.778	0.17		0.18
PF5	26.089			0.16		
PF6	39.29		39.297	0.14		0.18
PF7	22.278		22.276	0.13		0.12
PF8	35.414			0.13		

PF9	20.437		0.12	
	34.223	34.228	0.44	0.26

Tabelle 26: BS Cnc, Gegenüberstellung mit Daten 2008 und 2009

Nun der Vorgang des Prewhitening, wobei 1.093 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 9.072 c/d (Artefakt, nicht signifikant), 14.195 c/d (1. Orbitalfrequenz, signifikant), 28.381 c/d (2. Orbitalfrequenz, signifikant), 29.396 c/d (Aliasing, signifikant), 42.564 c/d (3. Orbitalfrequenz, nicht signifikant), 43.572 c/d (Aliasing, nicht signifikant) beachtet werden sollten.

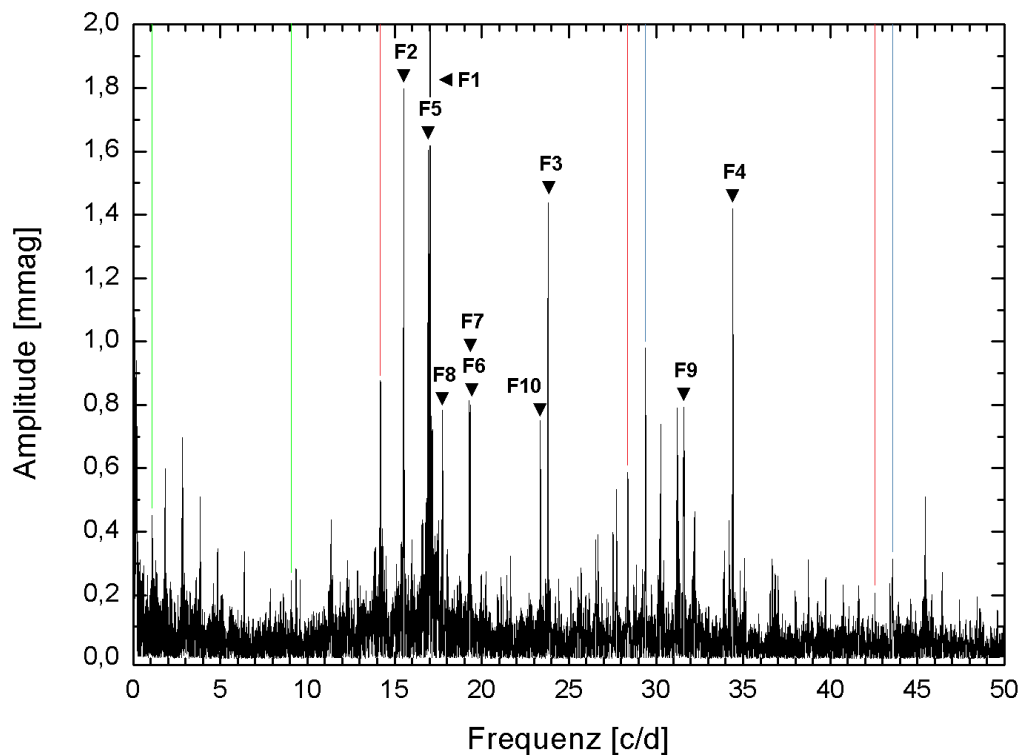


Abbildung 63: BS Cnc 2008/2009, Spektrum und F1 bis F10

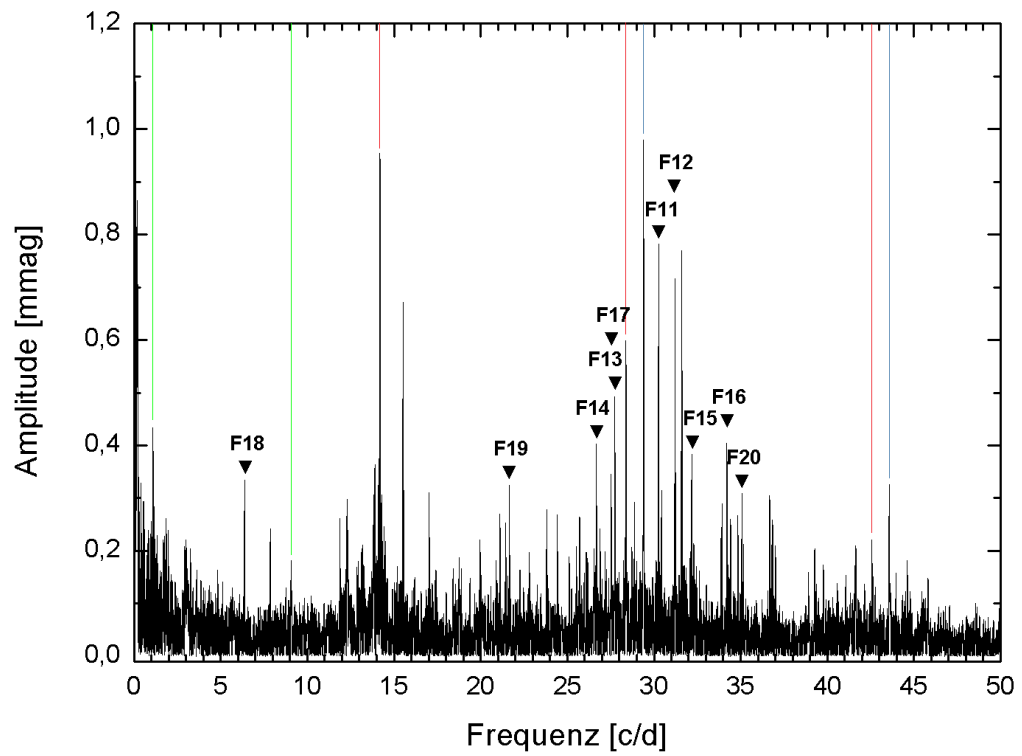


Abbildung 64: BS Cnc 2008/2009, F11 bis F20

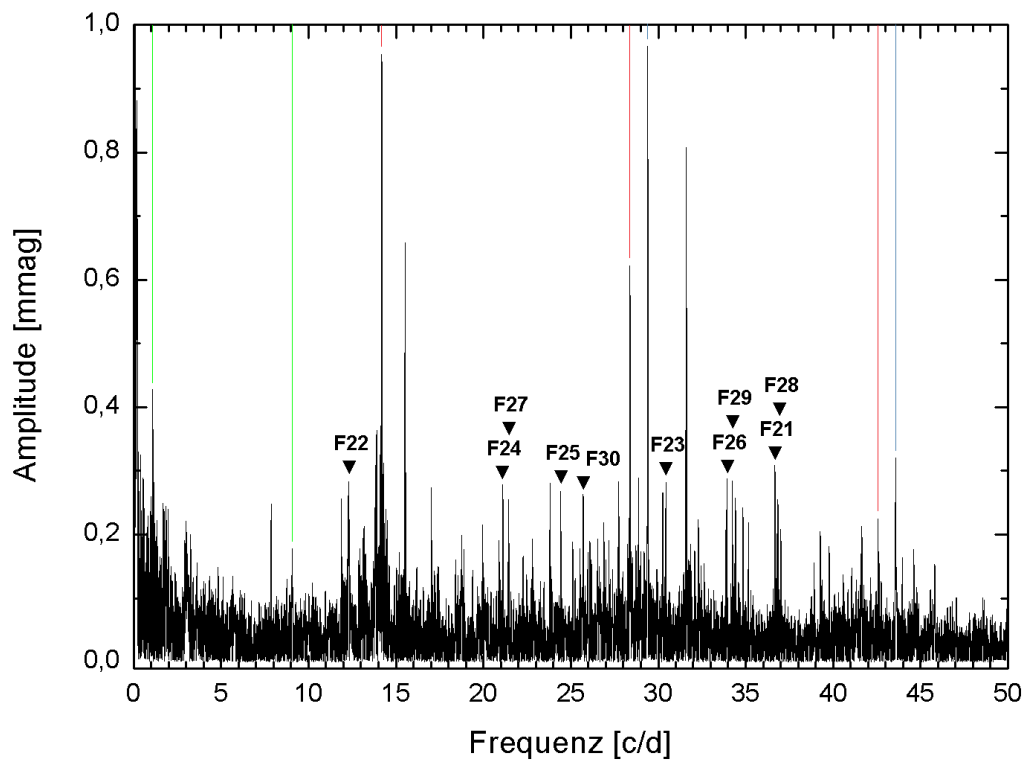


Abbildung 65: BS Cnc 2008/2009, F21 bis F30

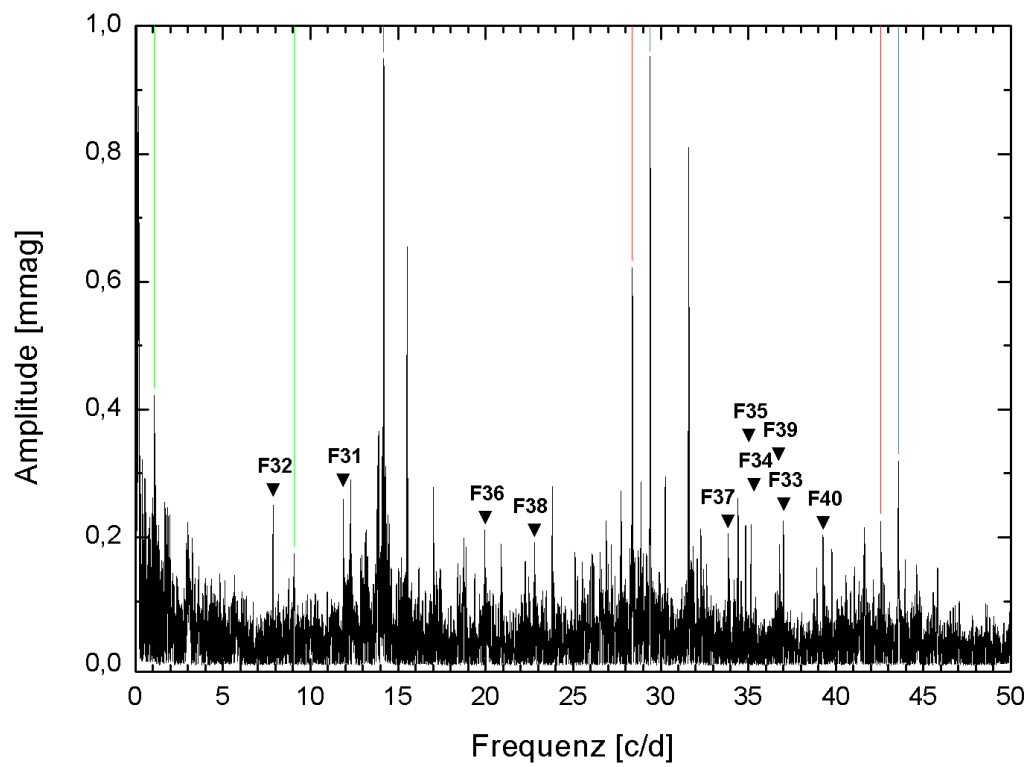


Abbildung 66: BS Cnc 2008/2009, F31 bis F40

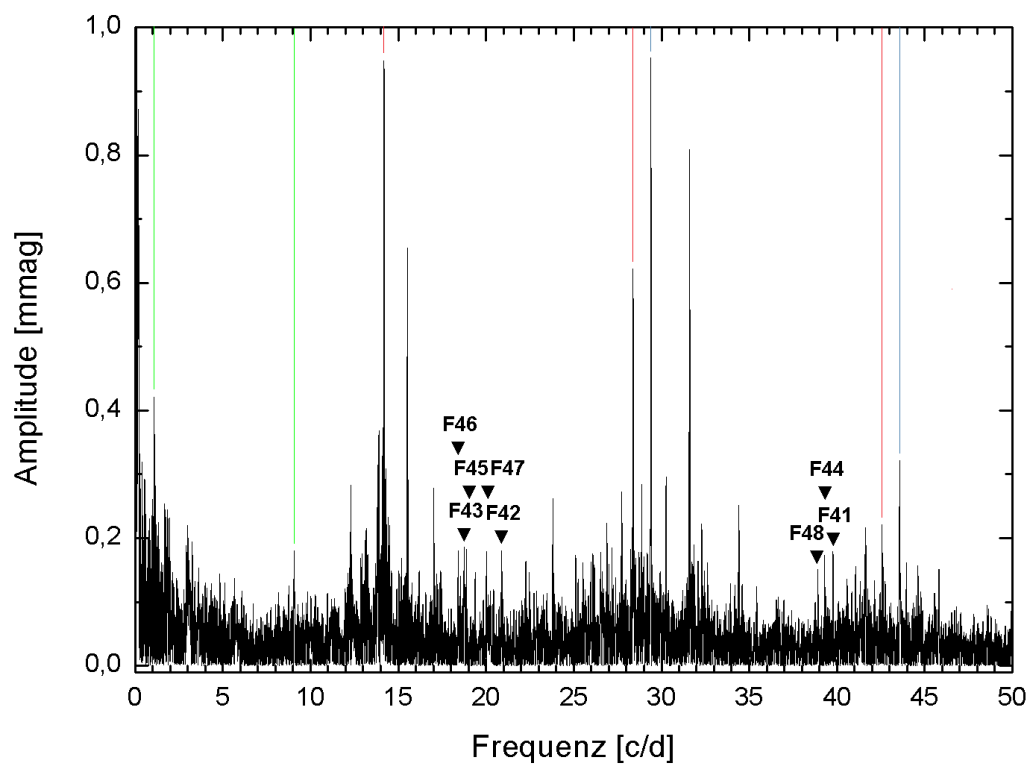


Abbildung 67: BS Cnc 2008/2009, F41 bis F48

Zur Illustration des vollständigen Prewhitening, inklusive der Markierung der jeweiligen S/N-Grenzwerte, dient nachfolgende Grafik.

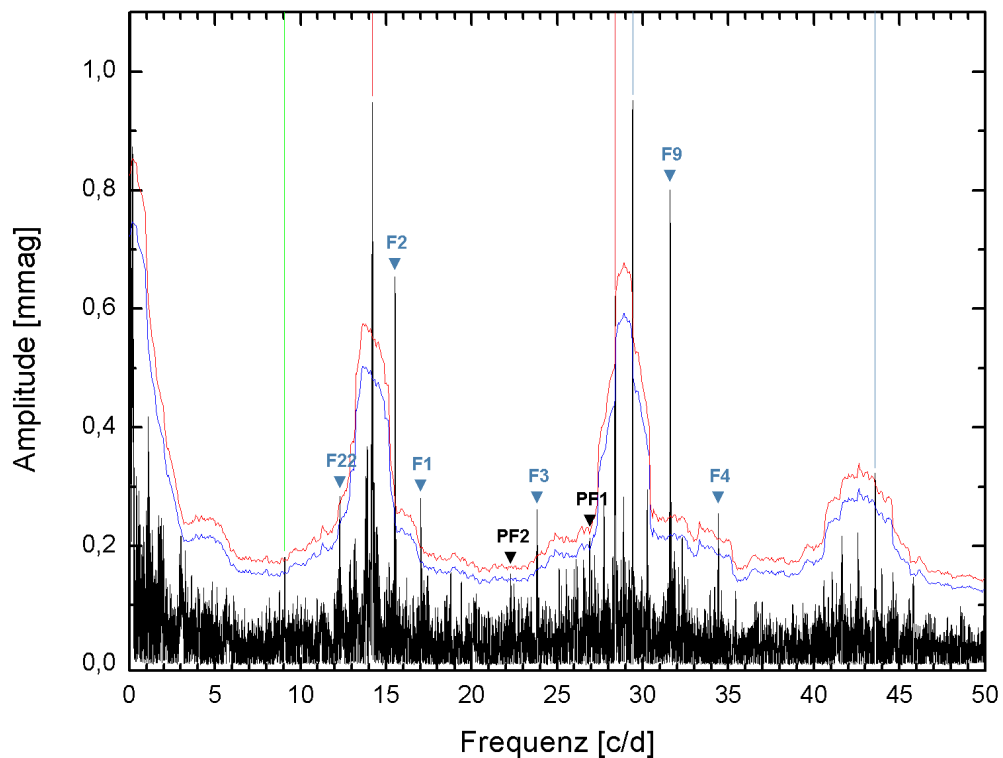


Abbildung 68: BS Cnc 2008/2009, Spektrum nach prewhitening aller signifikanten Frequenzen

Die beiden PFs wurden markiert. Deutlich sichtbar sind Frequenzwerte (blaue Nummerierung), welche bereits prewhitened wurden, aber dennoch im Spektrum mit niedrigeren Amplituden und signifikant, auftreten. Diese sind im kombinierten Datensatz mit F1, F2, F3, F4, F9 und F22 nummeriert. F1 bis F4 wurden bei einem Vergleich zwischen den Datensätzen 2008 und 2009 als variabel eingestuft. Im Weiteren handelt es sich bei F9 und F22 um Werte, welche 2009 neu aufgefunden wurden. Auch diese sind wahrscheinlich variabel, sodass diese im Datensatz 2008 nicht signifikant auftreten.

Mittels Period04 wurde versucht, diese Frequenzen über die Funktion der Berücksichtigung der Amplitudenvariation auszumerzen, welches aber aufgrund der Größe der Variationen nicht gelang. Dementsprechend kann die Amplitudenvariation für diese Frequenzwerte eindeutig bestätigt werden.

15. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden finalen Kapitel werden die Ergebnisse mit früheren Studien verglichen und bilden, zusammen mit den Ergebnissen, die Grundlage für weitere theoretische Modelle der Sternpulsation. Im Weiteren wird die jeweilige Pulsationskonstante für die dominante Frequenz errechnet.

15.1. Vergleich EP Cnc

Die von (Breger et al. 1994) postulierten Frequenzen konnten in beiden Datensätzen 2008 und 2009 bestätigt werden.

Bekannt		2008		2009		Komb.	
c/d	mmag	c/d	mmag	c/d	mmag	c/d	mmag
5.466	3.80	5.460	0.98	5.459	1.07	5.461	1.03
6.511	2.30	6.519	1.26	6.510	1.18	6.520	1.23
5.786	1.80	5.774	1.68	5.766	1.69	5.774	1.63

Tabelle 27: Vergleich EP Cnc mit bekannten Frequenzen

Sind die Frequenzwerte innerhalb der Fehlergrenzen konsistent, stimmen die Amplituden bis auf die 3. Frequenz nicht überein. Da diese jedoch im Datensatz 2008 und 2009 ebenfalls innerhalb der Fehlergrenzen ident sind, werden die neuen Amplitudenwerte als korrekt gewertet.

Die von Breger et al. (1994) angeführte PF 6.30 c/d konnte im Datensatz 2008 als PF bzw. 2009 nicht identifiziert werden. Im kombinierten Datensatz ist jedoch die 6.291 c/d mit 0.35 mmag signifikant. Die weiters angeführte PF 2.18 c/d könnte der im kombinierten Datensatz festgestellten 2.317 c/d mit 0.47 mmag entsprechen. Ein ebenfalls angeführter möglicher Peak bei 5.51 c/d konnte nicht verifiziert werden.

Insgesamt konnten im Datensatz 2008 insgesamt 14 neue Frequenzen und eine neue PF festgestellt werden, im Datensatz 2009 insgesamt 17 Frequenzen (16, falls die 2.317 c/d der 2.18 c/d entsprechen würden) plus einer PF.

Zur Berechnung der Pulsationskonstanten für die dominante Frequenz wird die Gleichung mit den bekannten angeführten Werten vereinfacht und ergibt sich zu

$$\log(Q_i) = -0.658 + \log(P_i)$$

wobei P_i die dominante Frequenz in d/c darstellt. Somit ergibt sich für Q_i für den Datensatz 2008/2009 und kombiniert ein $Q=0.0403$.

15.2. Vergleich BT Cnc

Von den von Guerrero, Mantegazza & Scardia (1979) beschriebenen drei Frequenzen konnten nur die 9.77 c/d mit 21 mmag bestätigt werden.

Auch Breger (1980) beschreibt drei Frequenzen, wobei auch hier nur die 9.771c/d mit 17.2 mmag bestätigt werden konnte. Die ebenfalls angeführte, aber laut Breger unsichere Frequenz 5.946 c/d mit 4.2 mmag kommt im vorliegenden Datensatz 2008 zwar nicht vor, jedoch könnte diese ein Aliasing der vorliegenden Frequenz 6.943 c/d darstellen. Da diese lediglich eine Amplitude von 0.75 mmag aufweist, ist dies aber ziemlich unwahrscheinlich. Auffallend ist, dass auch die dritte von Breger festgestellte Frequenz mit 7.881 c/d und 5.1 mmag im Datensatz 2008 als 8.880 c/d und 1.49 mmag einen Abstand von genau 1 c/d aufweist.

Freyhammer, Larsen & Peterson (1997) führen eine ganze Liste von Frequenzen an, wobei nach ihren Aussagen nur die 9.783 c/d mit 18 mmag und 7.005 c/d mit 9.9 mmag als korrekt gewertet werden. Diese konnten, wie bereits angemerkt, durch den Datensatz 2008 bestätigt werden. Auch die unsicheren Frequenzen, wie die 19.566 c/d mit 0.7 mmag und 16.788 mit 1.4 mmag konnten nunmehr als korrekt identifiziert werden. Die vier weiteren Frequenzen sind im Datensatz 2008 jedoch nicht auffindbar.

Nun eine Übersicht der bekannten Frequenzen, welche auch im Datensatz 2008 von BT Cnc aufgefunden werden konnten. Dabei sind in der linken Spalte die Publikationen durchnummeriert.

- 1... (Guerrero, Mantegazza & Scardia 1979)
- 2... (Breger 1980)
- 3... (Kim & Lee, 1995)
- 4... (Freyhammer, Larsen & Petersen 1997)
- 5... (Hernandez et al. 1998)

Publ.	F1		F3		2F1		F1+F3	
	c/d	mmag	c/d	mmag	c/d	mmag	c/d	mmag
1	9.770	21.000	-	-	-	-	-	-
2	9.771	17.20	-	-	-	-	-	-
3	9.778	15.80	7.015	8.80	-	-	-	-
4	9.783	18.00	7.005	9.90	19.566	0.70	16.788	1.40
5	9.780	10.550	7.010	8.280	-	-	-	-
Daten	9.777	17.670	7.015	3.470	19.554	0.29	16.792	0.380

Tabelle 28: Vergleich BT Cnc mit bekannten Frequenzen

Die Frequenzwerte befinden sich hierbei wieder innerhalb der erlaubten Fehlergrenzen. Große Variationen gibt es jedoch bei den Amplitudenwerten. Besonders die 7.015 c/d

zeigen bei den vorliegenden Daten 2008 gegenüber allen anderen Datensätzen eine deutlich niedrigere Amplitude. Um Einflüsse des Reduktionsprozesses ausschließen zu können, da die Frequenz ein Artefakt der 1-Tag-Aliases sein könnte, wurde diese Frequenz in den Rohdaten überprüft. Auch dort weist die Amplitude denselben Wert auf, als in den reduzierten Daten. Somit dürften F1 und F3 als Variable einzuschätzen sein.

Da die 19.554 c/d und 16.792 c/d aufgrund deren S/N in der Publikation 4 als unsicher gewertet wurde, kann auch über deren deutlich höheren Amplitude gegenüber den Daten 2008 keine Aussage gemacht werden.

Da die Grundwerte von Pena et al. (1990) umstritten sind, erfolgt eine Berechnung der Pulsationskonstante unter Verwendung aktueller Grundwerte von Lopez de Coca et al. (1990) und bolometrischer Korrektur von Bessell, Castelli & Plez (1998) zu 0.02 bzw. Flower (1996) zu 0.03. Daraus ergibt sich für die dominante Frequenz

$$\log(Q_i) = -0.789 + \log(P_i) \text{ und } Q_i = 0.0167$$

15.3. Vergleich HD 73872

Da für HD 73872 noch keinerlei Daten vorliegen, sind alle 23 aufgefundenen Frequenzen plus 2 PFs als neu einzustufen. Eine Berechnung der Pulsationskonstante ist aufgrund fehlender Grundwerte, welche für die Formel benötigt werden, nicht möglich.

15.4. Vergleich BS Cnc

Bei BS Cnc konnten 2008 gegenüber den bekannten Daten 42 neue Frequenzen und 9 PFs aufgefunden werden. Der Datensatz 2009 brachte 12 neue Frequenzen und drei PFs zu Tage, wobei angemerkt werden sollte, dass 2009 drei komplett neue Frequenzen gegenüber 2008 aufgefunden wurden.

Der kombinierte Datensatz beinhaltet 45 neue Frequenzen und zwei PFs. Dabei wurden alle Frequenzen, inklusive der PFs, vom Datensatz 2009 bestätigt. Gegenüber 2008 konnten nun zwei Frequenzen aufgelöst werden und zwei PFs bestätigt werden. Jedoch liegen drei Frequenzen aus 2008 nicht mehr signifikant vor.

Von Hernandez et al. (1998) konnten die ersten drei Frequenzen bestätigt werden, die 4. Frequenz bei 41.630 c/d ist in keinem der Datensätze auffindbar.

Von Pena et al. (1998) konnte nur die 1. Frequenz eruiert werden, die 16.300 c/d und 2.025 c/d sucht man vergebens.

In folgender Tabelle werden die bekannten Frequenzen mit dem aktuellem Datensatz gegenüber gestellt. Dabei sind in der linken Spalte die Publikationen durchnummeriert.

1... (Hernandez et al. 1998)

2... (Pena et al. 1998)

Publ.	F1		F2			
	c/d	mmag	c/d	mmag	c/d	mmag
1	17.035	6.141	15.525	2.676	34.229	1.35
2	17.038	-	-	-	-	-
2008	17.036	6.17	15.527	2.35	-	-
2009	17.035	5.55	15.531	0.85	34.223	0.44
Beide	17.036	5.98	15.527	1.86	34.228	0.26

Tabelle 29: Vergleich BS Cnc mit bekannten Frequenzen

Die Pulsationskonstante für die dominante Frequenz ergibt sich zu

$$\log(Q_i) = -0.365 + \log(P_i) \text{ und } Q_i = 0.0253$$

Literaturverzeichnis:

Abt, H. A. & Willmarth, D. W. (1999). Binaries in the Praesepe and Coma Star Clusters and Their Implications for Binary Evolution. *The Astrophysical Journal*, Volume 521, Issue 2, S. 682-690

Adams, J. D., Stauffer, J. R. & Skrutskie, M. F. (2002). Structure of the Praesepe Star Cluster. *The Astronomical Journal*, Volume 124, Issue 3, S. 1570-1584

Aerts, C. (2007-2008). *Lecture notes by Conny Aerts, Universities of Leuven and Nijmegen*. Leuven

Arfken, G. (1985). *Discrete Orthogonality--Discrete Fourier Transform*. §14.6 in *Mathematical Methods for Physicists*, 3rd ed. Orlando, FL: Academic Press, pp. 787-792

Bartsch, H. J. (2004). *Taschenbuch mathematischer Formeln*. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

Bergmann, L. et al. (2001). *Erde und Planeten*, 2. Auflage, S. 605-608. Gruyter

Berserkerus (26. Oktober 2008). *Wikipedia*. Abgerufen am 24. Juli 2009 von <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Amfm3-en-de.gif>

Bessell, M. S., Castelli, F. & Plez, B. (1998). Model atmospheres broad-band colors, bolometric corrections and temperature calibrations for O - M stars. *Astronomy and Astrophysics*, v.333, p.231-250

Bevington, P. R. (1969). *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. New York: McGraw-Hill

Bonnell, I. A. & Davis, M. B. (1998). Mass segregation in young stellar clusters. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, vol. 295, p. 691

Breger, M et al. (März 1998). The delta Scuti star FG Vir. III. The 1995 multisite campaign and the detection of 24 pulsation frequencies. *Astronomy and Astrophysics*, v.331, p.271-279

Breger, M. (1993b). Accuracy in variable star work: The three-star single-channel technique. *Stellar Photometry - Current Techniques and Future Developments*, IAU Colloquium 136, p.106

Breger, M. (1979). Delta Scuti and related stars. *Astronomical Society of the Pacific, Publications*, vol. 91, Feb.-Mar. 1979, p. 5-26

Breger, M. (1970). Metallic-Line a Stars and Pulsation. *Astrophysical Journal*, vol. 162, p.597

Breger, M. (1993a). Nonradial Pulsation of the Delta-Scuti Star Bu-Cancris in the Praesepe Cluster. *ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS* V.271, NO. 2/APR, P. 482

Breger, M. (1990). Period-determination program PERDET available. *Delta Scuti Star Newsletter*, p.21

Breger, M. (1980). Radial and nonradial periods in Delta Scuti stars. I - Multiple periods of 38 CANCRI. *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 237, May 1, 1980, p. 850-854

Breger, M. (1980). Radial and nonradial periods in Delta Scuti stars. I - Multiple periods of 38 CANCRI. *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 237, May 1, 1980, p. 850-854

Breger, M. (1969a). Short-Period Variability of B, A and F Stars. V. The Coma Cluster and NGC 752. *Astrophysical Letters*, Vol. 3, p.67

Breger, M. (1973). Short-period variability of B, A and F stars. VI. New Delta Scuti stars in selected regions. *Astron. Astrophys.*, Vol. 22, p. 247 - 249

Breger, M. (1969b). Short-period variability of B, A, and F stars. II. Photometry of new Delta Scuti stars. *Astron. J.*, Vol. 74, p. 166 - 176 = *Contrib. Kitt Peak National Obs.*, No. 414

Breger, M. (1969c). Short-Period Variability of b, a, and F Stars. III. a Survey of Delta Scuti Variable Stars. *Astrophysical Journal Supplement*, vol. 19, p.79

Breger, M. (1969d). Short-Period Variability of b, a, and F Stars. IV. Variability in the Lower Hertzsprung Gap. *Astrophysical Journal Supplement*, vol. 19, p.99

Breger, M. et al. (1994). EP Cancri: A nonradially pulsating delta Scuti star in the Praesepe cluster. *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, vol. 281, no. 1, p. 90-94

Breger, M. et al. (1990). Multiple frequencies of the Delta Scuti variable 4 Canum Venaticorum. *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, vol. 231, no. 1, May 1990, p. 56-60. Research supported by the Chinese Academy of Sciences and NSF

Bulla, W. (2003). *TU Graz*. Abgerufen am 26. Februar 2010 von <http://itp.tugraz.at/LV/bulla/MMThPh/MMThPhII.pdf>

Cutri, R. M. et al. (2003). 2MASS All Sky Catalog of point sources. *CDS/ADC Collection of Electronic Catalogues*, 2246, 0

Danziger, I. J. & Dickens, R. J. (1967). Spectrophotometry of New Short-Period Variable Stars. *Astrophysical Journal*, vol. 149, p.55

DATAKOM Buchverlag GmbH. (2008). *Wissens-Portal ITwissen.info*. Abgerufen am 24. Juli 2009 von <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Zweiphasenumtastung-BPSK-binary-phase-shift-keying.html>

Demmer, C. (29. August 2005). *Wikipedia*. Abgerufen am 31. Juli 2009 von <http://de.wikipedia.org/wiki/Invar>

Demtröder, W. (2005). *Experimentalphysik 1*, 4. Auflage, S. 294-296. Springer-Verlag

Dobbie, P. D. et al. (2006). New Praesepe white dwarfs and the initial mass-final mass relation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 369, Issue 1, pp. 383-389 .

Dziembowski, W. A. (1980). Delta Scuti variables - The link between giant- and dwarf-type pulsators. In: *Nonradial and nonlinear stellar pulsation; Proceedings of the Workshop, Tucson, Ariz., March 12-16, 1979. (A81-21401 07-90) Berlin, Springer-Verlag, 1980, p. 22-33. NSF-supported research*

Dziembowski, W. A. (1995). The Opacity Driven Pulsators. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Volume 76. GONG '94*

Eggen, O. J. (1970). Ultrashort-Period Variables and the Masses of Blue Stragglers in the Old Disk Population. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 82, No. 485, p.274

Fitch, W. S. (1967). Evidence of Tidal Effects in Some Pulsating Stars. I. CC Andromedae and Sigma Scorpii. *Astrophysical Journal*, vol. 148, p.481

Fitch, W. S. & Wisniewski, W. Z. (1979). Tidal effects in pulsating stars. III - L = 1 /p 5/ modes in the ellipsoidal variable 14 Aurigae A. *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 231, Aug. 1, 1979, p. 808-825

FIZ CHEMIE Berlin. (1998). *Chemgapedia, Chemgaroo Produktfamilie*. Von http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/1/pc/pc_09/pc_09_01/pc_09_01_01.vlu/Page/vsc/de/ch/1/pc/pc_09/pc_09_01/pe_09_01_02.vscml.html, abgerufen am 23.. Juli 2009

Flower, P. J. (1996). Transformations from Theoretical Hertzsprung-Russell Diagrams to Color-Magnitude Diagrams: Effective Temperatures, B-V Colors, and Bolometric Corrections. *Astrophysical Journal* v.469, p.355

Frandsen, S. et al. (2001). Delta Scuti stars in Praesepe I. The STACC 1998 campaign - the photometry. *Astronomy and Astrophysics*, v.376, p.175-187

Frast, D. (2004). *MOST-Seminar*. Abgerufen am 24. 09 2009 von ASAP: http://www.univie.ac.at/asap/most/most/MOSTSeminar_DF_20040419.pdf

Freyhammer, L. M., Larsen, S. S. & Petersen, J. O. (1997). Oscillations of BT CANCRI in the Praesepe cluster. *Astronomy and Astrophysics*, v.325, p.559-562 .

Frommert, H. & Kronberg, C. (25. August 2007). *Students for the Exploration and Development of Space*. Abgerufen am 2.. März 2010 von <http://www.seds.org/messier/m/m044.html>

Garrido, R. (2000). Photometric Modal Discrimination in δ Scuti and γ Doradus Stars. *Delta Scuti and Related Stars, Reference Handbook and Proceedings of the 6th Vienna Workshop in Astrophysics, held in Vienna, Austria, 4-7 August, 1999. ASP Conference Series, Vol. 210. Edited by Michel Breger and Michael Montgomery. (San Francisco: ASP)*

German Center for Infrared and Optical Interferometry. (2001). *MPIA Max-Planck-Institut für Astronomie*. Abgerufen am 26. Februar 2010 von http://www.mpia.de/FRINGE/tutorials/01/IA_02.pdf

Görne, T. (2008). *Tontechnik*, S. 155-157. Carl Hanser Verlag München

Gourdeau, J. (2007). *Max-Planck-Gesellschaft für Chemie*. Abgerufen am 20. 7 2010 von http://www.atmosphere.mpg.de/enid/3__Sonne_und_Wolken/_Albedo_3ao.html

Grocott, S., Zee, R. & Matthews, J. (2003). Exploring the Mysteries of the Cosmos on the MOST Microsatellite Mission. *Presented at the 17th AIAA/USU Conference on Small Satellites, August 2003*

Guerrero, G. (1975). Variability of the Delta Scuti Star 38 Cancri. *Information Bulletin on Variable Stars*, 1034, 1

Guerrero, G., Mantegazza, L. & Scardia, M. (1979). Study of the variability of the Delta Scuti stars. I - Photometric observations of the star 38 CANCRI. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 38, Nov. 1979, p. 181-186. *Research supported by the Consiglio Nazionale delle Ricerche*

Habets, G. M. & Heintze, J. R. (1981). Empirical bolometric corrections for the main-sequence. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 46, Nov. 1981, p. 193-237

Hambly, N. C. et al. (1995). Very low mass stars in the galactic cluster Praesepe. *Astron. Astrophys. Suppl.* 109, 29-69

Hareter, M. et al. (2008). Data Reduction pipeline for MOST Guide Stars and Application to two Observing Runs. *Communications in Asteroseismology*, Vol.156, p. 48-72

Harris, F. J. (1978). *On the use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform*. Proceedings of the IEEE, Vol. 66, pp 51-83

Hernandez, M. M. et al. (1998). New multi-site observations of the delta Scuti stars BS and BT Cancri. Results of the STEPHI VII campaign on the Praesepe cluster. *Astronomy and Astrophysics*, v.337, p.198-206

Hog, E. et al. (1998). The TYCHO Reference Catalogue. *Astronomy and Astrophysics*, v.335, p.L65-L68

Joergensen, H. E., Johansen, K. T. & Olsen, E. H. (1971). Variability of A and F main sequence stars. *Astron. Astrophys.*, Vol. 12, p. 223 - 231

Kallinger, T., Reegen, P. & Weiss, W. W. (2008). A heuristic derivation of the uncertainty for frequency determination in time series data. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 481, Issue 2, 2008, pp.571-574

Kennelly, E. (1998). The Oscillations of Tau Pegasi. *Astrophysical Journal* v.495, p.440

Khalisi, E., Amaro-Seoane, P. & Spurzem, R. (2007). A comprehensive NBODY study of mass segregation in star clusters: energy equipartition and escape. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 374, Issue 2, pp. 703-720

Kharchenko, N. V. et al. (2005). Astrophysical parameters of Galactic open clusters. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 438, Issue 3, August II 2005, pp.1163-1173

Kim, S.-L. & Lee, S.-W. (1995). CCD Photometry of a Delta Scuti Star in an Open Cluster II. BT CNC in the Praesepe. *Journal of the Korean Astronomical Society*, vol. 28, no. 2, p. 197-208

Kraus, A. L. & Hillenbrand, L. A. (2007). The Stellar Populations of Praesepe and Coma Berenices. *The Astronomical Journal*, Volume 134, Issue 6, pp. 2340-2352

Kurucz, R. L. (1991). New Lines, New Models, New Colors. *Precision Photometry: Astrophysics of the Galaxy, Proceedings of the conference held 3-4 October, 1990 at Union College, Schenectady, NY. Edited by A.G.D. Philip, A.R. Upgren and K.A. Janes. Schenectady, NY: Davis Press, 1991., p.27*

Lang, K. R. (1991). Astrophysical Data: Planets Stars. *Springer Verlag, Berlin*

Lenz, P. (2009). *Dissertation: Pulsation models of selected Delta Scuti stars*. Wien: Universität Wien, Institut für Astronomie

Lenz, P. & Breger, M. (2005). Period04 User Guide. *Communications in Asteroseismology*, vol. 146, p.53-136

Lenz, P. & Breger, M. (2004). Period04: A software package to extract multiple frequencies from real data. *The A-Star Puzzle, held in Poprad, Slovakia, July 8-13, 2004. Edited by J. Zverko, J. Ziznovsky, S.J. Adelman, and W.W. Weiss, IAU Symposium, No. 224. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004., p.786-790*

Long, S. J. (1997). *Regression Models for Categorical and Limited Dependent Variables* (p. 25-33). Thousand Oaks, California: Sage Publications

Lopez de Coca, P. et al. (1990). Empirical P-L-C relation for Delta Scuti stars - A catalogue. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series (ISSN 0365-0138)*, vol. 83, no. 1, April 1990, p. 51-69. *Research supported by the Direccion General de Investigacion Cientifica y Tecnica*

Martin, B. E. & Hube, D. P. (1989). The Variability of HD 73819. *Information Bulletin on Variable Stars*, 3324, 1

Mathworld, W. (1999). *Wolfram Mathworld, Least Square Fitting*. Abgerufen am 24. 2 2010 von <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html>

Matthews, J. (2001). Canada's Space Seismology Project: The MOST recent news. *Appeared in the March 2001 edition of Cassiopeia, the newsletter of CASCA (the Canadian Astronomy Society / Societe Canadienne D'Astronomie)*

- Mermilliod, J.-C. et al. (1997). The Distance of the Pleiades and Nearby Clusters. *Proceedings of the ESA Symposium 'Hipparcos - Venice '97', 13-16 May, Venice, Italy, ESA SP-402 (July 1997), p. 643-650*
- Millis, R. L. (1967). Photoelectric Observations of Two New Short-Period Variables. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 79, No. 468, p.262*
- Pena, J. H. et al. (1998). Photoelectric photometry and period analysis of selected Delta Scuti stars in Praesepe. *Astronomy and Astrophysics Supplement, v.129, p.9-22*
- Perryman, M. A. et al. (1997). The Hipparcos Catalogue. *Astron. Astrophys., 323, L49-L52*
- Pinfield, D. J. et al. (2003). Brown dwarfs and low-mass stars in the Pleiades and Praesepe: membership and binarity. *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, Volume 342, Issue 4, pp. 1241-1259*
- PixCellent. (20. 11 2000). *Pixcellent*. Abgerufen am 2009. 09 28 von <http://www.pixcellent.com/EEV%2047-20%20CCD.html>
- präzisions glas & optik PGO GmbH. (2009). *PGO Online*. Abgerufen am 31. Juli 2009 von <http://www.pgo-online.com/de/katalog/BK7.html>
- Reegen, P. (2007). Frequency- and phase-resolved significance in Fourier space. *A&A 467, 1353–1371 (2007)*
- Reegen, P. et al. (2006). Reduction of time-resolved space-based CCD photometry developed for MOST Fabry Imaging data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 367, Issue 4, pp. 1417-1431*
- Reineker, P., Schulz, M. & Schulz, B. M. (2007). *Theoretische Physik III: Quantenmechanik 1, Band 3, Seite 243-260*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH
- Rife, D. C. & Vincent, G. A. (1970). *Use of the Discrete Fourier Transform in the Measurement of Frequencies and Levels of Tones*. Bell Sys. Tech. J., pp. 197ff
- Rodriguez, E. & Breger, M. (2001). Delta Scuti and related stars: Analysis of the R00 Catalogue. *Astronomy and Astrophysics, v.366, p.178-196*
- Rowe, J., Matthews, J. & Kuschnig, R. (2006). Direct imaging photometry with the MOST. *Memorie della Societa Astronomica Italiana, v.77, p.282*
- Spahn, F. (2009). *Universität Potsdam, Institut für Physik und Astronomie, Nichtlineare Dynamik*. Abgerufen am 26. Februar 2010 von <http://www.agnld.uni-potsdam.de/~frank/delta.pdf>
- Sperl, M. (1998). Manual for Period98: V1.0.4; A period search-program for Windows and Unix. *Communications in Asteroseismology, vol. 111, p. 1-100*

Templeton, M. R. (1997). A New Pulsation Spectrum and Asteroseismology of δ Scuti. *The Astronomical Journal*, v. 114, p. 1592

Uesugi, A. & Fukuda, I. (1982). Catalogue of stellar rotational velocities (revised). *Kyoto: University of Kyoto, Departement of Astronomy, 1982, Rev.ed.*

Vanicek, P. (1971). Further Development and Properties of the Spectral Analysis by Least-Squares. *Astrophysics and Space Science, Volume 12, Issue 1, pp.10-33*

VanLeeuwen, F. (2009). Parallaxes and proper motions for 20 open clusters as based on the new Hipparcos catalogue. *Astronomy and Astrophysics, Volume 497, Issue 1, 2009, pp.209-242*

Walker, G. (1987 (a)). *Astronomical Observations*. Cambridge University Press

Walker, G. et al. (2003). The MOST Asteroseismology Mission: Ultraprecise Photometry from Space. *Astronomical Society of the Pacific* , Vol.115, pp 1023-1035

Weisstein, E. W. (2004). *Fourier Transform " From MathWorld--A Wolfram Web Resource"*. Abgerufen am 27. Februar 2010 von <http://mathworld.wolfram.com/FourierTransform.html>

Williams, D. R. - NASA-. (2009). *NASA Planetary Science*. Abgerufen am 20. 7 2010 von <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>

Wissensmagazin (20. 11 2009). *Scinexx Wissensmagazin, Springer Verlag*. Abgerufen am 11. 12 2009 von http://www.scinexx.de/redaktion/wissen_aktuell/bild6/fenstertrieb.jpg

Young, A. T. (1967). Photometric error analysis. VI. Confirmation of Reiger's theory of scintillation. *Astronomical Journal* , Vol. 72, p. 747

Zee, R. & Stibrany, P. (2000). Canada's First Microsatellite - An Enabling Low-Cost Technology for Future Space Science and Technology Missions. *Presented at the 11th CASI (Canadian Aeronautics and Space Institute) Conference on Astronautics, November 2001*

Zee, R., Grocott, S. & Matthews, J. (2002). The MOST Microsatellite Mission: All Systems go for Launch. *Presented at the 12th CASI (Canadian Aeronautics and Space Institute) Conference on Astronautics, November 2002*

Zima, W. (2005). *Dissertation*

Zima, W. (1999). *Diplomarbeit*. Universität Wien, Institut für Astronomie

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Satellite und Ground Segment (Zee & Stibrany 2000)	14
Tabelle 2: Eckdaten Praesepe Cluster M44 (Kharchenko et al. 2005).....	52
Tabelle 3: Basisdaten EP Cancri (Perryman et al. 1997)	54
Tabelle 4: Pulsationsfrequenzen EP Cnc (Breger et al. 1994)	55
Tabelle 5: Basisdaten BT Cancri (Perryman et al. 1997)	56
Tabelle 6: Frequenzset BT Cnc 1980 (Breger 1980)	57
Tabelle 7: Frequenzset BT Cnc 1994 (Kim & Lee 1995)	57
Tabelle 8: Frequenzset BT Cnc 1997 (Freyhammer, Larsen & Petersen 1997).....	57
Tabelle 9: Basisdaten HD 73872 (Hog et al. 1998)	59
Tabelle 10: Basisdaten BS Cancri (Hog et al. 1998)	60
Tabelle 11: Frequenzergebnisse der STEPHI Kampagne (Hernandez et al. 1998).....	60
Tabelle 12: Übersicht Beobachtungskampagnen	65
Tabelle 13: Liste der Vergleichssterne 2008	70
Tabelle 14: Liste der Vergleichssterne 2009	75
Tabelle 15: Ergebnisse EP Cnc 2008.....	84
Tabelle 16: Mögliche Frequenzen für EP Cnc 2008.....	87
Tabelle 17: Ergebnis EP Cnc 2009	88
Tabelle 18: Vergleich zu EP Cnc-Daten aus 2008	88
Tabelle 19: EP Cnc-Frequenzlösung der kombinierten Daten 2008 und 2009	90
Tabelle 20: Ergebnis BT Cnc	94
Tabelle 21: Ergebnis HD 73872	99
Tabelle 22: Ergebnis BS Cnc 2008	105
Tabelle 23: Ergebnis BS Cnc 2009	110
Tabelle 24: Vergleich BS Cnc-Daten 2008 und 2009	114
Tabelle 25: Ergebnis BS Cnc, Daten 2008 und 2009	116
Tabelle 26: BS Cnc, Gegenüberstellung mit Daten 2008 und 2009	118
Tabelle 27: Vergleich EP Cnc mit bekannten Frequenzen.....	122
Tabelle 28: Vergleich BT Cnc mit bekannten Frequenzen.....	123
Tabelle 29: Vergleich BS Cnc mit bekannten Frequenzen.....	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Atmosphärisches Fenster (Wissensmagazin 2009)	8
Abbildung 2: Geometrie MOST-Orbit (Walker et al. 2003)	13
Abbildung 3: Basis/Stack (unten), Teleskop-Tubus (oben) (Zee, Grocott & Matthews 2002)	15
Abbildung 4: BPSK mit zwei festen Phasenlagen (DATACOM Buchverlag GmbH 2008)	18
Abbildung 5: Prinzip AM und FM (Berserkerus 2008)	19
Abbildung 6: Teleskop-Layout (Walker et al. 2003)	21
Abbildung 7: Detektorlayout (Walker et al. 2003)	22
Abbildung 8: Demonstration Positions-Invarianz bei FI (Frast 2004)	24
Abbildung 9: Demonstration FI-System (Frast 2004)	24
Abbildung 10: CCD-Regionen und Bildgebung (Frast 2004)	26
Abbildung 11: Transmission (Walker et al. 2003)	27
Abbildung 12: Beispiel Ausleseregionen (Walker et al. 2003)	28
Abbildung 13: Lage der Delta Scuti Sterne im HRD	33
Abbildung 14: Radiale Oszillation der Ordnung $n=2$ (Zima 1999)	36
Abbildung 15: Illustration der nichtradiellen Werte l und m (Zima 1999)	36
Abbildung 16: Illustration "Import Timestring"	45
Abbildung 17: Illustration des Tabs Fourier	46
Abbildung 18: Illustration Tab Fit	47
Abbildung 19: Illustration der Dekorrelation mittels GS1 und GS6 (Hareter et al. 2008)	63
Abbildung 20: Frequenzspektrum der Rohdaten EP Cnc 2008	64
Abbildung 21: Frequenzspektrum der reduzierten Daten EP Cnc 2008	64
Abbildung 22: Illustration Zeit - Phase der Daten 2008	66
Abbildung 23: Spektralfenster der Daten 2008	67
Abbildung 24: Illustration Zeit - Phase der Daten 2009	68
Abbildung 25: Spektralfenster der Daten 2009	69
Abbildung 26: Bestätigung des spektralen Fensters durch G1	71
Abbildung 27: Spektrum G3 mit weiteren Charakteristiken	72
Abbildung 28: Helligkeit der Vergleichssterne zur Amplitude d. Orbitalfrequenz	73
Abbildung 29: Rohdaten, Helligkeit der Vergleichssterne zur Amplitude d. Orbitalfrequenz	73
Abbildung 30: Spektrum G17 mit Charakteristiken	74
Abbildung 31: Charakteristiken Datensatz 2009 illustriert mit G29	75
Abbildung 32: Ursprung SCHWARZ, Prewhitening von 1. Orbitalfrequenz ROT	77
Abbildung 33: Vergleich Sterne und Differenzenbildung	79
Abbildung 34: Frequenzspektrum EP Cnc 2008	83
Abbildung 35: EP Cnc 2008, Frequenzen 1 bis 8	85
Abbildung 36: EP Cnc 2008, Frequenzen 9 bis 17	86
Abbildung 37: EP Cnc 2008-Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened	86
Abbildung 38: EP Cnc 2009, Frequenzspektrum	89
Abbildung 39: EP Cnc 2009-Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened	89
Abbildung 40: EP Cnc-Spektrum und Frequenzen F1 bis F9	91
Abbildung 41: EP Cnc, Frequenzen F10 bis F21	91
Abbildung 42: EP Cnc 2008/2009, Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened	92
Abbildung 43: Frequenzspektrum BT Cnc [eigene Illustration]	93
Abbildung 44: Prewhitening der ersten drei Frequenzen	95
Abbildung 45: BT Cnc, Frequenzen F4 bis F12	96
Abbildung 46: BT Cnc, Frequenzen F13 bis F22	96
Abbildung 47: BT Cnc-Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened	97
Abbildung 48: Frequenzspektrum HD 73872	98

Abbildung 49: HD 73872, Frequenzen F1 bis F11	100
Abbildung 50: HD 73872, Frequenzen F1 bis F22	101
Abbildung 51: Illustration von HD 73872 F10 und F20	101
Abbildung 52: HD 73872-Spektrum mit allen signifikanten Frequenzen prewhitened	102
Abbildung 53: BS Cnc-Spektrum 2008.....	103
Abbildung 54: BS Cnc 2008, F1 bis F5	107
Abbildung 55: BS Cnc 2008, F6 bis F18	107
Abbildung 56: BS Cnc 2008, F19 bis F29.....	108
Abbildung 57: BS Cnc 2008, F30 bis F37	108
Abbildung 58: BS Cnc 2008, F38 bis F45.....	109
Abbildung 59: BS Cnc 2008, Spektrum nach prewhitening aller signifikanten Frequenzen.....	109
Abbildung 60: BS Cnc 2009, F1 bis F8	111
Abbildung 61: BS Cnc 2009, F9 bis F15	111
Abbildung 62: BS Cnc 2009, Spektrum nach prewhitening aller signifikanten Frequenzen.....	112
Abbildung 63: BS Cnc 2008/2009, Spektrum und F1 bis F10	118
Abbildung 64: BS Cnc 2008/2009, F11 bis F20	119
Abbildung 65: BS Cnc 2008/2009, F21 bis F30	119
Abbildung 66: BS Cnc 2008/2009, F31 bis F40	120
Abbildung 67: BS Cnc 2008/2009, F41 bis F48	120
Abbildung 68: BS Cnc 2008/2009, Spektrum nach prewhitening aller signifikanten Frequenzen	121

ANHANG

Abstract

Die Datengewinnung durch Satelliten wird in der Astronomie immer wichtiger. Vor allem in der Astroseismologie stellt diese Methode eine ausgezeichnete Möglichkeit dar, Helligkeitsvariationen von pulsierenden Sternen im Sub-Millimag-Bereich zu erfassen. Dabei besteht der Vorteil gegenüber erdgebundenen Teleskopen darin, direkte atmosphärische Effekte vernachlässigen zu können und Beobachtungen über einen durchgehenden, wochenlangen Zeitraum zu ermöglichen.

Die in dieser Magisterarbeit vorliegenden Lichtkurven von vier Delta-Scuti-Sternen des Praesepe-Clusters, EP Cnc, BT Cnc, BS Cnc und HD 73872, wurden mit dem Satelliten MOST in den Jahren 2008 und 2009 gewonnen und einer Frequenzanalyse unterzogen.

Im theoretischen Teil wird auf die zugrunde liegende Technik von MOST eingegangen und Fehlerursachen, welche die Datensätze beeinflussen können, erhoben. Neben der Besprechung von Delta-Scuti-Pulsatoren und der verwendeten Fourier-Analyse mittels Period04 wird dieses Kapitel mit den bereits bekannten Daten des Praesepe-Clusters und der untersuchten Sterne abgerundet.

Im praktischen Teil werden zuerst Fehlerquellen durch Beispiele in den Datensätzen der untersuchten Objekte und der Vergleichssterne illustriert und nach Entwicklung geeigneter Verfahren, Vorschläge für das Auswertungsprozedere gegeben. Nach der Datenauswertung erfolgt ein Vergleich mit den bereits bekannten Ergebnissen früherer Jahre. Das Ergebnis ist ein deutlicher Zugewinn an Frequenzen für jedes einzelne der vier untersuchten Objekte.

Die in dieser Magisterarbeit erfolgte Feststellung der Frequenzen der Pulsation ermöglicht in weiterer Folge die Modellierung der radialen und nichtradiellen Pulsationsmoden, wobei physikalische Parameter, wie Massen, Temperaturen, Leuchtkräfte und Sternzusammensetzungen als Beispiele gelten sollten.

Kurzlebenslauf

Markus Endl, Bakk.

Geburtsdatum 14. September 1980

Ausbildung:

2010 – laufend

Technische Universität Graz, Advanced Material Science
Master Programm (Dipl. Ing.)

2008 – 2010

Universität Wien, Institut für Astronomie
Master Programm (Mag. rer. nat.)

2005 – 2008

Universität Wien, Institut für Astronomie
Bachelor Programm (Bakk. rer. nat.)

Berufliche Tätigkeiten:

März 2010 – Juni 2010

EADS Eurocopter Military, München, Deutschland
Intern für R&D, Optronik, interne und externe Helikopter-Beleuchtung

Oktober 2009 – Jänner 2010

Research Assistant, Universität Wien, Institut für Astronomie
Projekt: Stellar Seismology, Datenauswertung von Satelliten-basierten Daten

Oktober 2009 – Februar 2010

Universitätspersonal, Tutor
Tutoring v. Studenten im 5. Semester

März 2009 – Juli 2009

Universitätspersonal, Tutor
Tutoring v. Studenten im 6. Semester

November 2008 – Dezember 2008

Research Assistant, Universität Wien, Institut für Astronomie
Analysierung von Satellitendaten, technische Verwendung

Oktober 2008 - Februar 2009

Universitätspersonal, Tutor
Tutoring v. Studenten im 1. Semester

März 2008 – Oktober 2008

Lernquadrat Krems, Nachhilfe Mathematik

Februar 2007 – Juli 2007

Schülerhilfe Krems, Nachhilfe Mathematik

Dezember 2000 – März 2006

Polizist, Direktion Wien