

# SpecRaVE

Spectroscopic Radial Velocity Evaluation

Version 2.0

von Helmut Jahns, Roland Bücke 2009

# Handbuch

<b>0</b>	<b>ÜBERBLICK .....</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>KURZE EINFÜHRUNG IN DIE RADIALGESCHWINDIGKEITSMESSUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ERSTE SCHRITTE MIT SPECRAVE: EINE EINFACHE RADIALGESCHWINDIGKEITSBESTIMMUNG.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>DIE AUSWERTUNG VON MEHREREN SPEKTREN AUS EINER BEOBACHTUNGSREIHE .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>KORREKTURMÖGLICHKEITEN WÄHREND DER AUSWERTUNG VON SPEKTREN</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>VERBESSERUNG DER WIEDERHOLGENAUIGKEIT DER MESSUNGEN MIT DER FUNKTION „OPTIMIZE FIT“ .....</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>DIE AUSWERTUNG VON EMISSIONSLINIEN.....</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>DIE AUSWERTUNG VON SPEKTREN MIT DOPPELLINIEN.....</b>	<b>11</b>
<b>8</b>	<b>LINIENFIT AN UNNORMIERTEN SPEKTREN .....</b>	<b>11</b>
<b>9</b>	<b>WELLENLÄNGENKALIBRIERUNG VON SPEKTREN .....</b>	<b>11</b>
9.1	EINFACHE KALIBRIERUNG MIT LINIEN DES STERNSPEKTRUMS (NICHT FÜR RADIALGESCHWINDIGKEITSMESSUNGEN GEEIGNET) .....	12
9.2	KALIBRIERUNG MIT ATMOSPHERISCHEN LINIEN .....	12
9.3	KALIBRIERUNG VON SPEKTREN MIT EINEM REFERENZSPEKTRUM EINER KÜNSTLICHEN LICHTQUELLE	12
<b>10</b>	<b>BERECHNUNG DER RADIALGESCHWINDIGKEITSKURVE UND DER BAHNPARAMETER VON SPEKTROSKOPISCHEN DOPPELSTERNEN.....</b>	<b>13</b>

## 0 Überblick

Das Programm SpecRaVE ist speziell zur Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten und der Auswertung von Messreihen zur Ermittlung der Bahnparameter von spektroskopischen Doppelsternen konzipiert. Die Version 2.0 umfasst folgende Funktionen:

- Zur Auswertung können Spektren im Text/ASCII-Format eingelesen werden.
- Nichtkalibrierte Spektren können mit der für Radialgeschwindigkeitsmessungen erforderlichen Genauigkeit sowohl an atmosphärischen Linien als auch mit Emissionslinienspektren von Kalibrierlampen in der Wellenlänge kalibriert werden.
- Die Bestimmung der Linienwellenlängen erfolgt durch Anfitten der Gaußfunktion. Es können sowohl Absorptionslinien als auch Emissionslinien ausgewertet werden. Die Funktion *optimize Fit* ermöglicht hierbei eine präzisierte Positionsbestimmung an asymmetrischen Absorptionslinien (Blends).
- Die angefitteten Spektrallinien werden mittels frei editierbarer Dateien, die die Ruhewellenlängen enthalten, identifiziert.
- Berechnung der Radialgeschwindigkeiten mit automatischer heliozentrischer Korrektur.
- Auswertung umfangreicher Beobachtungsreihen und Speicherung der ermittelten Ergebnisse in unterschiedlichen Formaten.
- Berechnung der Bahnparameter spektroskopischer Doppelsterne aus Radialgeschwindigkeits-Zeitserien, die im Textformat vorliegen. Der Optimierungsalgorithmus sucht in vorgegebenen Wertebereichen auswählbarer Bahnparameter nach der besten Anpassung an die Messwerte. Die Güte der Anpassung wird in Form der mittleren quadratischen Abweichung (RMS) der berechneten Radialgeschwindigkeitskurve von den Messwerten angegeben. Die Radialgeschwindigkeitskurve wird grafisch dargestellt und die zugehörigen Bahnparameter werden tabellarisch ausgegeben.

Bei Doppelsternen mit zwei Komponenten muss die Auswertung für jede Komponente getrennt erfolgen.

## 1 Kurze Einführung in die Radialgeschwindigkeitsmessung

Die Messung von Radialgeschwindigkeiten beruht auf dem physikalischen Gesetz der Dopplerverschiebung der Wellenlängen in einem Spektrum:

$$\Delta\lambda \approx \frac{v_R \cdot \lambda}{c} \quad (1)$$

$v_R$  ist die Radialgeschwindigkeit ;  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichtes

Aus Formel (1) geht hervor, dass dieser Effekt sehr klein ist (z.B. verursacht eine Radialgeschwindigkeit von 1 km/s eine Wellenlängenverschiebung der H $\alpha$ -Linie von nur 0,022 Å). Die Wellenlängenkalibrierung der Spektren zur Radialgeschwindigkeitsbestimmung muss diesen hohen Anforderungen entsprechen. Eine einzige Ausnahme hiervon bildet nur die Messung der Radialgeschwindigkeitsdifferenz bei der Linienaufspaltung, wie sie bei spektroskopischen Doppelsternen mit Komponenten

nahezu gleicher scheinbarer Helligkeit auftritt, da Kalibrierfehler die Linien gleichermaßen verschieben.

Für die Messung von Dopplerverschiebungen sind in der Regel Spaltspektrographen erforderlich, da nur bei diesen das Spektrum ortsfest auf dem Sensor der Kamera abgebildet wird und somit die Kalibrierung mit Spektrallampen möglich ist. In speziellen Fällen können aber auch mit spaltlosen Anordnungen beachtliche Ergebnisse erzielt werden. Neben der oben genannten Beobachtung von Linienaufspaltungen sind mit hoch aufgelösten Spektren ( $R \approx 12000$  und höher) in Wellenlängenbereichen mit genügend tellurischen Linien zur Wellenlängenkalibrierung, Genauigkeiten von wenigen km/s durchaus möglich. Die Anforderungen an die Teleskopnachführung sind allerdings entsprechend hoch.

Die präzise Kalibrierung von Spektren mit Spektrallampen erfordert eine große mechanische Stabilität des Spaltspektrographen. Den Fehler, den eine Verschiebung des Spektrums während der Aufnahmezeit verursacht, kann man recht einfach aus der Dispersion des Spaltspektrographen und der Dopplerverschiebung abschätzen. Aber auch die mechanisch steifste Metallkonstruktion kann geringe Linienverschiebungen durch Temperaturschwankungen nicht unterbinden. Die höchste Präzision wird somit mit ortsfest in klimatisierten Räumen aufgestellten Spektrographen erzielt. Möglich wird dies mit einer Coude-Montierung, bei der das Licht durch die Achsen der parallaktischen Montierung gespiegelt wird. Eine für Amateure praktikable Möglichkeit bietet der Einsatz von Lichtleitern. Mit diesen wird der Spektrograph mechanisch vom Teleskop entkoppelt, so dass auch schwere, fest aufgestellte und zudem temperaturstabilisierte Geräte zum Einsatz gebracht werden können.

Ohne ins Detail zu gehen, sei an dieser Stelle erwähnt, dass neben der richtigen gerätetechnischen Ausstattung auch eine ausgefeilte Beobachtungstechnik eine Voraussetzung für hohe Messgenauigkeiten ist. Eine zielgerichtete Festlegung der Beobachtungsabläufe setzt eine detaillierte Kenntnis der Eigenschaften des Spektrographen voraus. Unter anderem sollten dabei folgende Fragen beantwortet werden:

Wie lange benötigt der Spektrograph nach dem Aufstellen am Beobachtungsort für die Temperaturanpassung?

Nach welcher Zeit hat der gekühlte Sensor der CCD-Kamera eine konstante Temperatur eingenommen?

Über welchen Beobachtungszeitraum hinweg bleibt das abgebildete Spektrum ausreichend stabil?

Aus der Beantwortung dieser Fragen kann man ableiten, wann mit den Aufnahmen begonnen werden kann und wie lang die Belichtungszeiten maximal betragen dürfen. Es kann durchaus günstiger sein, durch kürzere Integrationszeiten auf ein hohes SNR zu verzichten, um häufiger Kalibrierspektren aufzunehmen. Das schlechtere SNR kann durch eine entsprechend größere Anzahl an Wiederholungsaufnahmen kompensiert werden.

Da die gemessenen Positionen der Linien der Kalibrierspektren ebenso Messfehler aufweisen, wird zur Kalibrierung eine Ausgleichskurve nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Hierfür sind Polynome geeignet. Die Frage, welchen Grad das angefitte Polynom haben muss, lässt sich nur experimentell entscheiden. Eine einfache lineare Funktion setzt einen linearen Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Position voraus. Diese Bedingung dürfte aber nur in wenigen Fällen hinreichend genau erfüllt sein.

Die Version 2.0 ermöglicht die Kalibrierung mit einem Polynom frei wählbarer Ordnung von 1 (linear) bis 4.

## **2 Erste Schritte mit SpecRaVE: eine einfache Radialgeschwindigkeitsbestimmung**

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise für eine erste einfache Radialgeschwindigkeitsbestimmung anhand eines einzelnen Spektrums beschrieben. Dabei werden die grundlegenden Bedienungselemente des Programms vorgestellt.

Voraussetzung für die Auswertbarkeit eines Spektrums ist dessen Normierung und eine genaue Wellenlängenkalibrierung. Die Daten müssen in zwei Spalten, für die Wellenlängen in Å und für die Intensitätswerte, im Textformat angeordnet sein (Details zum Datenformat sind in der Referenz erläutert). Des Weiteren wird eine Liniendefinitionsdatei benötigt, die die Laborwellenlängen zur Berechnung der Dopplerverschiebungen bereitstellt. Für einfache Radialgeschwindigkeitsbestimmungen kann eine der mitgelieferten Liniendefinitionsdateien benutzt werden. Für weiterführende Untersuchungen wird evtl. eine an das Objekt angepasste, selbst editierte Datei nötig sein. Informationen zum Datenformat sind in der Referenz zu diesem Programm zu finden. Für ein erstes Kennenlernen von SpecRaVE werden zudem einige Beispielspektren bereitgestellt.

Wird das Programm das erste Mal benutzt, müssen die Koordinaten des Beobachtungsortes eingegeben werden. Hierfür wird mit dem Menüpunkt *Settings/Observer coordinates ...* ein Eingabefenster geöffnet. Die Eintragung der Koordinaten muss nur einmal erfolgen, da die Werte in die ini-Datei übernommen werden und erhalten bleiben.

Das Spektrum wird mit *Project/Open spectrum* in das Programm geladen.


Der Dateiname steht dann als Eintrag im Fenster „loaded spectra“ und das Spektrum erscheint automatisch skaliert im Grafikfenster. Die Größe des dargestellten Spektrenausschnitts kann mit den Zoomtasten in der Symbolleiste verändert und mit dem horizontalen Laufbalken des Grafikfensters kann durch das gesamte Spektrum gescrollt werden. Für die Skalierung der Intensitätsachse stehen zwei Modi zur Verfügung:

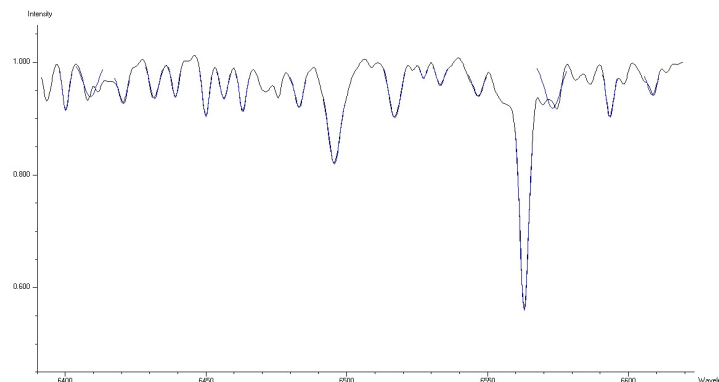
- Feste Skalierung: die Skalierung der y-Achse wird auch beim Scrollen vergrößerter Spektrenausschnitte beibehalten.
- Dynamische Skalierung: die Skalierung der y-Achse passt sich der Linientiefe des gescrollten Spektrenausschnittes automatisch an. In diesem Modus können sehr feine Details sichtbar gemacht werden.

Die Auswahl des Skalierungsmodus erfolgt durch das Feld „keep Y axis scaling fixed“ in der Symbolleiste.


In *Settings/Time of observation...* und *Settings/Object coordinates...* werden die entsprechenden Angaben zum Beobachtungszeitpunkt und den Objektkoordinaten vorgenommen. Der Beobachtungszeitpunkt kann wahlweise als Kalenderdatum oder Julianisches Datum eingetragen werden.

Nachdem das Spektrum nach auswertbaren Linien inspiziert wurde, wird mit *Gaussian fit/open file of lines* eine Liniendefinitionsdatei geladen, die die gewünschten Linieneinträge enthält. Dieser Schritt entfällt, wenn nach der Installation des Programms beim ersten Programmstart eine der mitgelieferten Dateien eingelesen wurde. Liniendefini-

tionsdateien haben zur besseren Unterscheidung von Spektrendateien standardmäßig den Suffix \*.asc, was aber nicht zwingend vorgeschrieben ist. Im nächsten Verarbeitungsschritt erfolgt der automatische Linienfit zur Bestimmung der Linienwellenlängen mit einer Gaußfunktion. Hierzu wird *Gaussian fit/find spectral lines* oder  in der Symbolleiste angeklickt. Angefittete Linien werden mit einer blauen Gaußkurve markiert. Diesen Vorgang kann man mit veränderten Stellungen der Schieberegler „Width“ und „Sensitivity“ so lange wiederholen, bis die günstigsten Parameter durch Probieren herausgefunden wurden. Mit „Width“ lässt sich die Breite des gefitteten Wellenlängenbereichs variieren, so dass diese Funktion vor allem dazu geeignet ist, dicht beieinander liegende Linien getrennt zu erkennen oder die Gaußanpassung an breiten oder auch asymmetrischen Linien zu verbessern. Ein weiteres Optimierungsverfahren wird im Abschnitt 5 ausführlich behandelt. Die Funktion „Sensitivity“ beeinflusst die Anzahl der erkannten Linien durch Variation der Mindestlinientiefe beim fit-Vorgang. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein mögliches Ergebnis der beschriebenen Verfahrensweise.



Der nächste Schritt besteht in der Identifikation der Linien, von denen die Radialgeschwindigkeit errechnet werden soll. Dies erfolgt durch einen Klick mit der linken Maustaste auf die ausgewählte Linie. Die betreffende Gaußkurve erscheint dann grün. Benutzt man zur Auswahl alternativ die rechte Maustaste, öffnet sich zusätzlich ein Kontextmenü. In der obersten Zeile dieses Menüs steht der Befehl „Identify with <Linie, Wellenlänge>“. Stimmt die angegebene Laborwellenlänge mit der in der Statuszeile angezeigten Wellenlänge in der Größenordnung eines Ångströms überein, war die Identifikation korrekt und man kann diese Linie durch Anklicken von „Identify with <Linie, Wellenlänge>“ mit der linken Maustaste übernehmen. Wird die korrekte Linie nicht angezeigt, kann alternativ mit dem Menüpunkt „Identify with ...“ die Liniendefinitionsdatei in einem Fenster geöffnet und die korrekte Linie durch Vergleich mit der Wellenlänge in der Statuszeile manuell ausgewählt werden. Diese Schritte werden wiederholt, bis alle gewünschten Linien zugeordnet wurden.

Die Berechnung der Radialgeschwindigkeiten erfolgt mit *Gaussian fit/Add to measurements* oder  in der Symbolleiste. Die Radialgeschwindigkeitsmesswerte werden daraufhin im Fenster „Table of radial velocities“ aufgelistet. In einem letzten Schritt können offensichtliche Fehlmessungen aus der Tabelle entfernt werden, indem man den betreffenden Eintrag mit der Maus markiert und anschließend mit der rechten Maustaste ein Kontextmenü öffnet. Mit „clear single cell“ lässt sich dann der betreffende Messwert entfernen.

Zur Dokumentation der Spektrenauswertung stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Als erstes sei auf die Funktion *Project/Save chart as .bmp ...* zum Speichern des abgebildeten Ausschnitts bzw. des gesamten Spektrum als Bitmap-Datei verwiesen. Mit *Project/Save project ...* werden die Messergebnisse incl. der Objektkoordinaten im Binärformat gespeichert und können so für eine spätere Fortführung der Auswertung mit weiteren Spektren erneut in das Programm geladen werden. Der Menüpunkt *Project/save measurements ...* ermöglicht das Speichern der Messergebnisse in einer Textdatei und mit *Project/save RV results ...* wird der arithmetische Mittelwert der Einzelmesswerte sowie deren Standardabweichung in einer Textdatei abgelegt. Diese Speicheroption erhält aber erst bei der Auswertung ganzer Messreihen als Grundlage für Periodenbestimmungen seine eigentliche Bedeutung.

### **3 Die Auswertung von mehreren Spektren aus einer Beobachtungsreihe**

Mit SpecRaVE können komplette Beobachtungsreihen soweit ausgewertet werden, dass am Ende mit *Project/Save RV results ...* eine Ergebnistabelle im Textformat vorliegt. Diese Ergebnistabelle beinhaltet in drei Spalten angeordnet für jede Beobachtung das Julianische Datum, die auf die Sonne bezogene Radialgeschwindigkeit und die Standardabweichung der einzelnen Messwerte. Wiederholungsmessungen lassen sich automatisch zu einem einzigen Messwert zusammenfassen, wie weiter unten noch beschrieben wird. Die Anzahl der Spektren, die gleichzeitig in das Programm zur Auswertung geladen werden können, hängt in Abhängigkeit von deren Dateigrößen vom Arbeitsspeicher des Rechners ab.

Die folgenden Erläuterungen bauen auf das Kapitel 2 auf, so dass dieses bekannt sein muss, um die weiteren Schritte problemlos nachvollziehen zu können. Es sind mehrere unterschiedliche Vorgehensweisen möglich:

- Die Spektren werden einzeln eingelesen und sofort ausgewertet. Das heißt, die Ergebnistabelle „Table of radial velocities“ wird schrittweise erweitert. Dabei muss keine zeitliche Reihenfolge eingehalten werden, da die Einträge automatisch nach dem julianischen Datum sortiert werden.
- Die Spektren einer Beobachtungsreihe werden komplett eingelesen und ausgewertet, indem man der Reihe nach die Spektren im Fenster „loaded spectra“ aktiviert und wie unter 1 beschrieben bearbeitet.
- Zu einem früheren Zeitpunkt wurden schon Spektren ausgewertet und die Ergebnisse mit der Funktion *Project/Save project ...* abgespeichert. Diese Datei wird mit *Project/Open project ...* erneut eingelesen. Die vorhandenen Daten werden daraufhin im Fenster „Table of radial velocities“ angezeigt. Neue Messungen können wie beschrieben angehängt werden. Die bei dieser Messreihe benutzte Liniendefinitionsdatei wird automatisch geladen, falls diese mit der aktuellen Datei nicht übereinstimmt.

Beim Anfitzen der Linien sollten zur Erhöhung der Wiederholgenauigkeit immer die einmal festgelegten Einstellungen der Fitparameter „Width“ und „Sensitivity“ beibehalten werden. Aus diesem Grunde wird empfohlen, diese Einstellungen für das Auswerten weiterer Messungen zu einem späteren Zeitpunkt zu notieren. Das Programm stellt immer nur die zuletzt benutzten Einstellungen bei einem erneuten Start des Programms wieder her.

Ebenso sollten bei umfangreichen Messreihen die Ergebnisse in geeigneten Abständen zwischendurch mit *Project/Save project* gesichert werden, um größere Datenverluste bei evtl. Fehlbedienungen zu vermeiden. Befinden sich im Fenster „loaded spectra“ sehr viele Einträge können Spektren beliebig wieder entfernt werden, ohne dass die Einträge im Fenster „table of radial velocities“ verloren gehen. Hierzu wird das zu entfernende Spektrum markiert mit *remove spectrum* im Kontextmenü entfernt. Sind die Berechnungen an allen Spektren ausgeführt worden, sollten auf jeden Fall die Radialgeschwindigkeiten in der Ergebnistabelle „Table of radial velocities“ auf offensichtliche Fehlmessungen überprüft werden. Diese machen sich in der Regel durch sehr stark abweichende Werte bemerkbar. Eine Korrektur erfolgt, indem im Fenster „loaded spectra“ das betreffende Spektrum markiert und die betreffende Linie neu markiert und berechnet wird. Der alte Wert wird dabei einfach überschrieben. In einem weiteren Schritt können Linien ausgesondert werden, die sich als schlecht auswertbar herausstellen, also eine signifikant höhere Streuung der Werte aufweisen und damit die Qualität der Messreihe verschlechtern würden. In Zweifelsfällen sollte man die Entscheidung hierüber mit entsprechenden statistischen Testverfahren untermauern, z.B. mit einem Ausreißertest. Das Löschen einzelner Messwerte erfolgt, indem man mit der linken Maustaste den betreffenden Messwert markiert, mit der rechten Maustaste das Kontextmenü öffnet und „clear single cell“ anwählt. Ebenso verfährt man beim Entfernen der Werte eines ganzen Spektrums, also einer Zeile der Tabelle, mit dem Befehl „clear single row“ und dem Entfernen einer ganzen Tabellenspalte mit „clear single column“. Die gesamte Tabelle kann mit „clear table of RV“ entfernt werden. Diese Editierfunktionen stehen ebenso im Menü *Edit* zur Verfügung. Nach dem Bereinigen der Radialgeschwindigkeitstabelle werden die Ergebnisse in der gewünschten Form abgespeichert (siehe hierzu auch letzten Abschnitt des Kapitels 1). Für eine spätere Weiterverarbeitung der RV-Tabelle mit SpecRaVE muss auf jeden Fall eine Datei mit *Project/Save project* abgespeichert werden.


Sind in der Messreihe Wiederholungsmessungen enthalten, also mehrere Spektren ausgewertet worden, die zu einem Messwert der Zeitserie gehören, so können diese in der mit *save RV results* gespeicherten Tabelle durch Mittelwertbildung zusammengefasst werden. Hierzu dient die Funktion „Time threshold“ im Menüpunkt *Settings/Misc settings*. Im Feld „Time threshold“ ist hierzu ein Wert in Tagen einzutragen, der größer als die Mindestzeitspanne zwischen den einzelnen Wiederholungsmessungen und kleiner als die Zeitspanne zwischen den Messpunkten ist. Sollen zum Beispiel alle Messungen eines Beobachtungsabends zusammengefasst, aber Spektren von verschiedenen Tagen getrennt aufgeführt werden, so sind Werte zwischen ca. 0.1 und 0.7 gut geeignet. Eine andere Anwendung der Funktion „Time threshold“ besteht darin, für eine möglichst genaue Radialgeschwindigkeitsbestimmung eines Referenzsterns den Mittelwert aus allen über einen großen Zeitraum aufgenommenen Spektren zu bilden. Hierfür ist ein entsprechend großer Wert einzugeben.



## **4 Korrekturmöglichkeiten während der Auswertung von Spektren**



In diesem Kapitel werden einige Korrekturmöglichkeiten aufgelistet, die zur Beseitigung von Fehlern bei der Auswertung von Spektren zur Verfügung stehen:



- *Edit/clear table of RV* oder im Kontextmenü „clear table of RV“: Löscht alle Einträge aus der Tabelle „Table of radial velocities“. Mit der Auswertung der Spektren kann neu begonnen werden.
- „clear single cell“ im Kontextmenü des Fensters „Table of radial velocities“: Nachdem ein Messwert markiert wurde, kann dieser mit diesem Befehl entfernt werden.
- „Remove single row“ im Kontextmenü des Fensters „Table of radial velocities“: Nachdem ein Messwert in der betreffenden Zeile markiert wurde, entfernt dieser Befehl die ganze Zeile, also alle Messwerte des betreffenden Spektrums.
- „Remove single column“ im Kontextmenü des Fensters „Table of radial velocities“: Nachdem ein Messwert in der betreffenden Spalte markiert wurde, entfernt dieser Befehl alle Messwerte der betreffenden Spektrallinie.

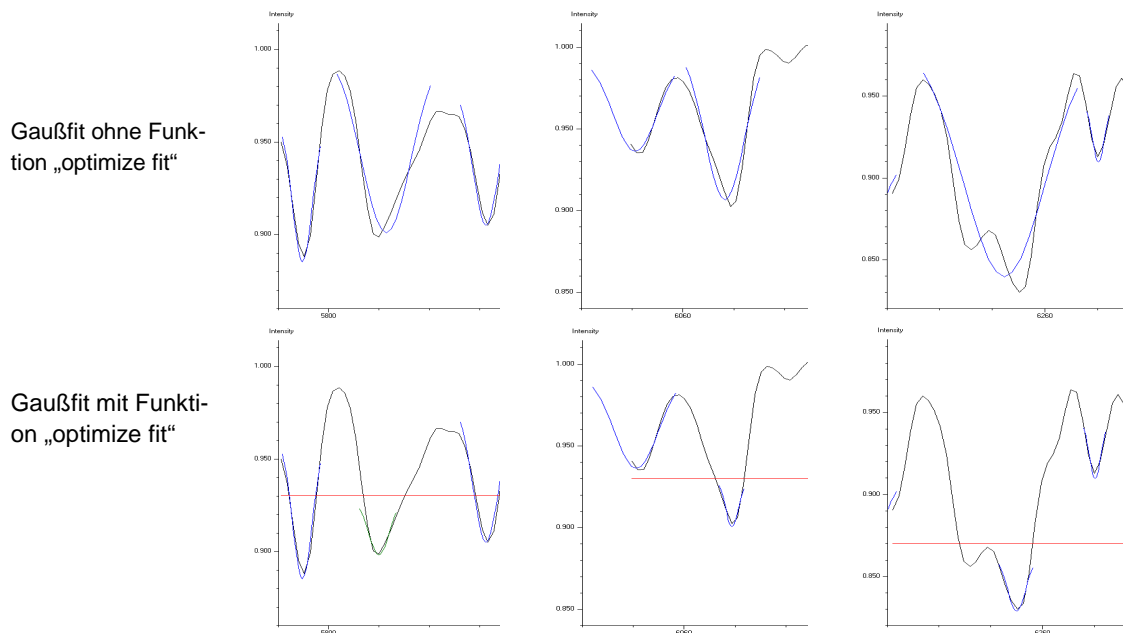
Werte, die mit diesen vier Funktionen gelöscht wurden, können mit *Calculation/Add measurement* bzw.  wieder hergestellt werden.

Wurde ein Spektrum mit *Gaussian fit/find spectral lines* oder  erneut angefittet, so müssen alle Linien neu bestimmt werden, da alle alten Einträge mit *Calculation/Add measurement* bzw.  aus der Tabelle entfernt werden.

- Überschreiben von Messwerten: Wurde eine Spektrallinie falsch angefittet, was an sehr großen RV-Werten erkennbar ist, kann diese Linie neu bestimmt werden, nachdem das betreffende Spektrum im Feld „loaded spectra“ markiert wurde und erneut im Grafikfenster sichtbar ist. Da die blauen Linienmarkierungen erhalten bleiben, reicht es, die korrekte Linie mit der rechten Maustaste erneut anzuwählen, wobei sich die Markierung grün färbt. Mit *Calculation/Add measurement* oder  in der Symbolleiste wird der falsche Wert anschließend überschrieben.
- Fehlerhafte Angaben der Beobachtungszeit können jederzeit überschrieben werden. Hierzu die Datei in „loaded spectra“ markieren. Kontextmenü öffnen und im Menüpunkt „Time of observation“ Korrektur vornehmen. Korrektur wird mit „add to measurement“ übernommen.
- Fehlerhafte Angaben bei den Objektkoordinaten können überschrieben werden. Hierzu die betreffende Datei im Fenster „loaded spectra“ markieren und das Fenster für die Eingabe der Objektkoordinaten unter *Settings/Object coordinates ...* öffnen. Korrekturen vornehmen und mit *Calculation/Add measurement* oder  neu berechnen.

## 5 Verbesserung der Wiederholgenauigkeit der Messungen mit der Funktion „optimize fit“

Bei stark gestörten Linien (Blends), die ein asymmetrisches Linienprofil aufweisen, ist die Position des Gaußfits stark von den Fitparametern abhängig. Mit der Funktion „optimize fit“ kann die Basislinie für den Gaußfit auf der Intensitätsachse so verschoben werden, dass nur die tiefste Einsenkung der Linie erfasst wird (siehe nachfolgende Abbildungen).



Im Feld „fitting parameters“ wird die Funktion „Opt. fit“ aktiviert. Es erscheint im Grafikfenster eine waagerechte rote Linie, die die Basis für den Gaußfit repräsentiert. Diese Linie kann mit dem Schieberegler auf den gewünschten Intensitätslevel verschoben werden. Es ist zu beachten, dass eine optimierte Anpassung nur funktioniert, wenn der Linienbereich unterhalb der roten Linie mindestens vier Messpunkte enthält. Mit der Maus wird nun die gewünschte Linie markiert, so dass diese in grüner Farbe erscheint. Mit der rechten Maustaste wird das Kontextmenü geöffnet und die Funktion „Optimize fit“ angewählt. Alternativ kann man auch die Funktion „Optimize fit“ im Menü unter *Gaussian fit* benutzen. Die Neuanpassung der Linie wird im Grafikfenster sichtbar. Dieser Vorgang kann bis zum Erreichen des gewünschten Ergebnisses beliebig oft wiederholt werden. Bei der Auswertung ganzer Messreihen empfiehlt es sich, den benutzten Wert zu notieren, um zu gewährleisten, dass weitere Auswertungen mit den gleichen Einstellungen erfolgen.

Für ein exaktes Anfitzen, kann ein Wert direkt als Zahl auch mit Nachkommastellen in das Zahlenfeld unterhalb des Schiebereglers eingegeben werden. Nach Entfernen und erneutem Setzen des Häkchens mit einem Doppelklick in *Opt. fit* springt die rote Basislinie auf das neue, genau vorgegebene Niveau.

## 6 Die Auswertung von Emissionslinien

Damit vom Programm auch Emissionslinien erkannt werden, muss dies kenntlich gemacht werden. Hierzu steht im Menü unter *Gaussian fit*, im Kontextmenü und auch in der Symbolleiste die Funktion „Indicate as emission spectrum“ zur Verfügung. Es ist wichtig, dass vor dem Anwählen dieser Funktion mit der linken Maustaste, das betreffende Spektrum im Fenster „loaded spectra“ markiert wurde. Die weitere Vorgehensweise entspricht der Auswertung von Absorptionsspektren.

## 7 Die Auswertung von Spektren mit Doppellinien

Aufgespaltene Linien wie sie in Spektren von Doppelsternen mit zwei sichtbaren Komponenten vorkommen, können nur ausgewertet werden, wenn die Peaks so weit auseinander liegen, dass für beide jeweils ein Gaußfit erfolgt. Für die Auswertung ist eine Liniendefinitionsdatei mit doppelten Einträgen der Linien notwendig. Beispielhaft wird diesem Programm die Datei Doppellinie.asc mitgeliefert. Der Eintrag für den blauseitigen Linienpeak wurde jeweils mit einem angehängten B gekennzeichnet und entsprechend der Eintrag für den rotseitigen Peak mit R. Die weitere Vorgehensweise der Auswertung entspricht der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen, wobei die Linienauswahl mit *identify with...* erfolgen muss, damit zwischen den Einträgen für den blauen bzw. roten Peak unterschieden werden kann. Im Ergebnisfenster werden dann für jede Linie beide Geschwindigkeiten angezeigt.

## 8 Linienfit an unnormierten Spektren


Bei hohen Genauigkeitsanforderungen sollte die Auswertung an normierten Spektren vorgenommen werden, da bei geneigtem Spektrenverlauf das Linienprofil insbesondere bei breiten Linien merklich verformt wird. Ist die Neigung des Spektrums nicht allzu stark bzw. die Linien sehr schmal, können ggf. auch unnormierte Spektren direkt ausgewertet werden. Da die gegenwärtige Version das Anfitten von Absorptionslinien nur in einem Intensitätsbereich zwischen 0 und 1 erlaubt, muss das unnormierte Spektrum so neu skaliert werden, dass alle Intensitätswerte im Spektrum kleiner 1 sind. Dies ist leicht möglich, indem man z.B. in Excel alle Intensitätswerte durch den maximalen Wert dividiert.

## 9 Wellenlängenkalibrierung von Spektren

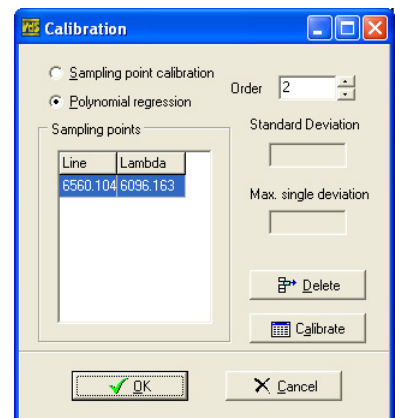
Die beim ersten Programmstart angegebene Kalibrierliniendatei steht standardmäßig nach jedem Programmstart automatisch solange zur Verfügung, bis diese durch eine andere mit *Calibration/Open calibration lines file* ersetzt wurde. Diese Datei enthält die Wellenlängen der Kalibrierlinien (für Neon- und atmosphärische Wasserlinien werden die Dateien Neon.asc und Tellur.asc zur Verfügung gestellt). Es kann aber entsprechend der Kalibriermethode auch jede andere Liniendefinitionsdatei verwendet werden.

## 9.1 Einfache Kalibrierung mit Linien des Sternspektrums (nicht für Radialgeschwindigkeitsmessungen geeignet)

Für Anwendungen außerhalb der Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten genügt oftmals eine einfache Kalibrierung an zwei oder mehr Linien des Sternspektrums selbst, ohne dass dabei die Dopplerverschiebung berücksichtigt wird. In diesem Fall kann im Menüpunkt *Calibration/Open calibration lines file* auch die gleiche Datei wie zur Auswertung des Spektrums in *Gaussian fit/Open lines file* aufgerufen werden.

Nachdem ein normiertes (bei unnormierten Spektren bitte Abschnitt 9 beachten) Spektrum in das Grafikfenster geladen wurde, wird dieses im Kontextmenü oder in der Symbolleiste als Referenzspektrum markiert (setzen eines Häkchens bei *indicate as reference*). Linienfit mit *Gaussian fit/find spectral lines* oder  durchführen. Die Linien, an denen das Spektrum kalibriert werden soll mit der Maustaste markieren, so dass die Gaußkurve grün wird und im Kontextmenü (rechte Maustaste) die Funktion *Identify inertial line...* wählen. Es öffnet sich ein Fenster, in dem in einer Tabelle die zugehörige Linie ausgewählt werden kann. Diesen Vorgang entsprechend der gewünschten Linienzahl zur Kalibrierung wiederholen.

Anschließend im Kontextmenü das Häkchen bei *Indicate as reference* wieder entfernen und nach erneutem Öffnen des Kontextmenüs die Funktion *Calibrate...* anklicken. Es öffnet sich das Fenster „Calibration“. Die ausgewählten Kalibrierlinien werden als Tabelle angezeigt. Einzelne Linien können ggf. markiert und mit *Delete* entfernt werden. Mit *Calibrate* wird das Spektrum mit einem Polynom wählbarer Ordnung 1 bis 4 kalibriert. Zur Kontrolle der Genauigkeit der Kalibration wird die Standardabweichung der Linien zum Polynom sowie die größte Abweichung einer Linie angezeigt. War der Kalibriervorgang erfolgreich, wird er mit *OK* abgeschlossen. Mit *Cancel* kann der Kalibriervorgang jederzeit abgebrochen und erneut durchgeführt werden. Das kalibrierte Spektrum wird abschließend mit *Calibration/Save calibrated spectrum* abgespeichert.



## 9.2 Kalibrierung mit atmosphärischen Linien


Der Ablauf der Kalibrierung entspricht der unter 10.1 beschriebenen Vorgehensweise mit dem einzigen Unterschied, dass nur terrestrische (unverschobene) Linien zur Kalibrierung benutzt werden. Im Menüpunkt *Calibration/Open calibration lines file* muss eine Referenzdatei, die die Wellenlängen der terrestrischen Linien enthält, geladen werden. Die Referenzdatei „Tellur.asc“ [Hanuschik 2006 (unpublished)] enthält Wasserlinien im Bereich der H $\alpha$ -Linie.

## 9.3 Kalibrierung von Spektren mit einem Referenzspektrum einer künstlichen Lichtquelle

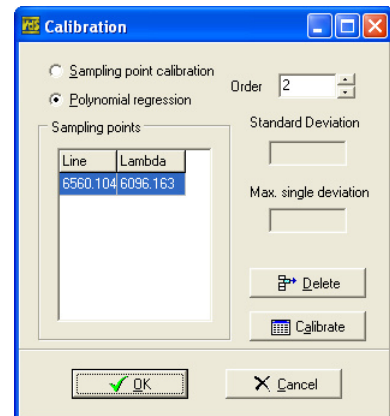
Benötigt werden neben dem zu kalibrierenden Spektrum zusätzlich ein Spektrum der Kalibrierlampe und eine Referenzdatei, die die Wellenlängen der Linien der Kalibrierlampe enthält. Das Kalibrierspektrum wird wie jedes andere Spektrum auch mit *Pro-*

*ject/Open spectrum* in das Programm geladen; die Referenzdatei entsprechend mit *Calibration/Open calibration lines file*.

Im Fenster „loaded spectra“ wird das Spektrum der Kalibrierlampe markiert, so dass dies im Grafikfenster angezeigt wird. Im Kontextmenü wird beim Menüpunkt *indicate as reference* durch Anklicken ein Häkchen gesetzt; ebenso mit dem Menüpunkt *indicate as emission spectrum* verfahren, damit die Emissionslinien erkannt werden. Li-

nienfit mit *Gaussian fit/find spectral lines* oder  durchführen. Die Linien, mit denen das Spektrum kalibriert werden soll mit der rechten Maustaste markieren, so dass die Gaußkurve grün wird und im Kontextmenü die Funktion *Identify inertial line...* wählen. Es öffnet sich ein Fenster, in dem in einer Tabelle die zugehörige Linie ausgewählt werden kann. Diesen Vorgang entsprechend der gewünschten Linienzahl zur Kalibrierung wiederholen.

Nach Abschluss dieses Vorgangs im Fenster „loaded spectra“ das zu kalibrierende Spektrum markieren, das daraufhin im Grafikfenster angezeigt wird. Dieses mit der rechten Maustaste anklicken, so dass das Kontextmenü erscheint. Es öffnet sich das Fenster „Calibration“. Die ausgewählten Kalibrierlinien werden als Tabelle angezeigt. Einzelne Linien können markiert und mit *Delete* entfernt werden. Mit *Calibrate* wird das Spektrum mit einem Polynom wählbarer Ordnung 1 bis 4 kalibriert. Zur Kontrolle der Genauigkeit der Kalibration wird die Standardabweichung der Linien zum Polynom sowie die größte Abweichung einer Linie angezeigt. War der Kalibriervorgang erfolgreich, wird er mit *OK* abgeschlossen. Mit *Cancel* kann der Kalibriervorgang jederzeit abgebrochen und erneut durchgeführt werden. Das kalibrierte Spektrum wird abschließend mit *Calibration/Save calibrated spectrum* abgespeichert.



## 10 Berechnung der Radialgeschwindigkeitskurve und der Bahnparameter von spektroskopischen Doppelsternen

Ab der Version 2.0 von SpecRaVE kann aus Radialgeschwindigkeitszeitserien von spektroskopischen Doppelsternen mit einem Optimierungsalgorithmus die Radialgeschwindigkeitskurve errechnet und grafisch dargestellt werden, die der besten Anpassung an die Messwerte entspricht. Die zugehörigen Bahnelemente werden tabellarisch ausgegeben.

Die auszuwertende Messwertetabelle muss als Textfile in zwei Spalten angeordnet das JD und die RV enthalten. Als Trennzeichen sind Tab und Semikolon zugelassen. Eine solche Messwertetabelle wird nach einer Auswertung von Spektren mit SpecRaVE mit der Funktion *Project/Save RV results* angelegt. Ebenso können aber Messwerte aus anderen Datenquellen ausgewertet werden, wenn diese das erforderliche Dateiformat haben.

Die Analyse der Messreihe beginnt mit dem Einlesen der Messwerte mit *Project/Open measurements*. Danach werden die Messwerte im Grafikfenster angezeigt. Mit dem Menüpunkt *Analysis/Calculate elements* wird das Fenster „Determine orbital elements“ geöffnet. In der Tabelle können nun für die einzelnen Bahnparameter Bereiche vorgegeben werden, in denen der Optimierungsalgorithmus nach der besten Anpassung an die Messwerte suchen soll. Mit der Spalte „Number of Steps“ wird die Zahl der Zyklen, die während der Berechnung durchlaufen werden, vorgegeben. Je höher der Wert, desto exakter die Anpassung. Allerdings verlängert sich mit der Anzahl der anzupassenden Parameter und der festgelegten Stepnumber die Rechenzeit erheblich, so dass man nicht mit unnötig großen Zahlen beginnen sollte. In der Regel genügen Werte zwischen 2 und 4. Danach kann, wenn erforderlich, durch eine gezielte Vergrößerung einzelner Werte eine Präzisierung der Optimierung vorgenommen werden. Bei näherungsweise bekannten Parametern, sollten die Optimierungsbereiche nicht unnötig groß gewählt werden. Dies betrifft insbesondere die Periode P.

Orbital element	Lower limit	Upper limit	Number of steps	Use
P	50,00	100,00	4	<input checked="" type="checkbox"/>
T0	10,00	120,00	4	<input checked="" type="checkbox"/>
e	0,00	0,90	3	<input checked="" type="checkbox"/>
$\omega$	0,00	360,00	3	<input checked="" type="checkbox"/>
$a1 \sin i$	1,00E+03	1,00E+10	3	<input checked="" type="checkbox"/>
$\gamma$	1,00	1,70	3	<input checked="" type="checkbox"/>

Sind einzelne Bahnparameter genau bekannt oder soll mit bestimmten exakten Werten (zum Beispiel bei Vergleichen mit Literaturwerten) optimiert werden, können diese Werte in der Spalte Lower limit eingetragen und das entsprechende Häkchen in der Spalte Use entfernt werden. Die so festgelegten Parameter werden bei der Optimierung nicht variiert. Mit der Taste „OK“ wird die Optimierung gestartet. Nach Abschluss der Berechnung verschwindet das Fenster „Determine orbital elements“, die errechnete Bahnkurve wird grafisch angezeigt und die Bahnparameter werden tabellarisch ausgegeben. Falls das Ergebnis unbefriedigend sein sollte, kann die Optimierung mit veränderten Vorgaben beliebig oft wiederholt werden. Mit der Auswahl von „Phase plot“ in der Symbolleiste kann zur Darstellung als Phasendiagramm umgeschaltet werden.

Das Optimierungsergebnis kann durch die grafische Anzeige der berechneten Bahnkurve beurteilt werden. Ein exaktes Maß für die Güte der Anpassung ist der Wert RMS (Root Mean Square), der die mittlere quadratische Abweichung der Anpassung von den Messwerten angibt und demzufolge möglichst klein sein sollte.

Im Tabellenblatt „RV values & Residuals“ werden die RV-Messwerte und die Abweichungen von den einzelnen Messwerten angezeigt.

Die Ergebnisse der Bahnparameterbestimmung können abschließend mit den Menüpunkten *Analysis/Export elements* und *Analysis/Export residuals* gespeichert werden. Die Grafische Darstellung der Bahnkurve kann unter *Projects* mit *Save chart as .bmp* im Bitmap-Format gespeichert werden.

Für erste Testversuche der Bahnparameterbestimmung wird die Datei binary.txt zur Verfügung gestellt. Die exakten Werte für diese Beispieldatei sind:  $P=200$  Tage,  $e=0.1$ ,  $\omega=45^\circ$ ,  $a1 \sin i=10^7$ ,  $\gamma=0$  km/s,  $K1=3.654$  km/s.