Das Polynom- und Pogsonverfahren zur Ermittlung von Maximum- und Minimumzeiten bei Helligkeitsverläufen Veränderlicher Sterne einschließlich einer Fehlerabschätzung

Herbert Achterberg

Bei der Auswertung von Helligkeitsbeobachtungen Veränderlicher Sterne stellt die Ermittlung der Maximum- bzw. Minimumzeiten eine wichtige Teilaufgabe dar. Zur Beurteilung der Güte der erhaltenen Ergebnisse ist dabei eine Fehlerabschätzung der ermittelten Extremwertzeiten zweckmäßig und von offizieller Seite sehr erwünscht.

Es gibt eine ganze Reihe von Methoden, die Maximum- bzw. Minimumzeiten zu bestimmen, angefangen von einfachen Techniken, die auch per Hand ausgeführt werden können, bis zu aufwendigen Rechenverfahren, für deren Durchführung wegen der Kompliziertheit normalerweise ein Computer erforderlich ist. Manche dieser Methoden, wie z.B. das Verfahren von Kwee van Woerden, sind allerdings nur anwendbar, wenn der Helligkeitsverlauf axialsymmetrisch ist. Derartige Lichtkurven treten vorzugsweise bei Bedeckungsveränderlichen auf. Hier sollen zwei Methoden beschrieben werden, die sowohl bei symmetrischen als auch (unter gewissen Einschränkungen) bei asymmetrischen Helligkeitsverläufen angewendet werden können: Das Polynomverfahren und das schon recht alte Pogsonverfahren (erfunden von N. R. Pogson 1829 bis 1891). Es sei gleich hier darauf aufmerksam gemacht, dass die Auswertung bei asymmetrischen Lichtkurven meist schwieriger und die Unsicherheit bei der Ermittlung der Extremwertzeiten größer ist als bei symmetrischen Helligkeitsverläufen.

Die Eingangsdaten zur Ermittlung der Maximum- oder Minimumzeit eines Veränderlichen Sterns bestehen normalerweise aus einer Serie von gemessenen Helligkeitswerten mit den zugehörigen Messzeiten, also aus einer Reihe von durch Beobachtung ermittelten Mess*punkten*. Um die Polynom- und Pogsonmethode überhaupt anwenden zu können, muss aber eine mittlere Licht*kurve* vorhanden sein, mit der die jeweils vorliegenden Messpunkte hinreichend gut approximiert werden.

Zur Darstellung einer mittleren Lichtkurve aus vorgegebenen Messpunkten eignen sich besonders gut Ausgleichsfunktionen und hierfür bieten sich Polynome oder Splinefunktionen an. Grundprinzip der Berechnung solcher Funktionen ist, die Quadratsumme der Differenzen zwischen den Funktionswerten und den Messwerten zu minimieren, wodurch ein Ausgleich zwischen den einzelnen Messpunkten erzielt wird. Ausgleichspolynome haben den Vorteil, dass nur ein zusätzlicher Parameter, nämlich der Polynomgrad k, gewählt werden muss. Nachteilig ist, dass Polynome bei höheren Polynomgraden zu Oszillationen neigen, und zwar insbesondere an den Enden des durch die Messwerte gegebenen Bereiches. Der zur optimalen Approximation geeignetste Polynomgrad kann aber, wenigstens näherungsweise, durch Sichtkontrolle einer auf dem Bildschirm dargestellten Lichtkurvengrafik leicht und schnell ermittelt werden: Bei zu niedrigem Polynomgrad ist die Approximation schlecht, während bei zu hohem Polynomgrad an den Enden des Messbereiches oder an Stellen mit größeren Zeitlücken in den Messdaten Oszillationen des Ausgleichpolynoms auftreten. Im dazwischen liegenden Bereich von k liegt der optimale Polynomgrad. Dieser hängt auch von der Anzahl n der für die Approximation verwendeten Messpunkte ab und liegt unter normalen Bedingungen etwa zwischen $n/3$ und $n/10$. Wenn Splinefunktionen als Ausgleichsfunktion herangezogen werden, muss außer der Art der Splinefunktion auch noch für jeden Messpunkt ein Gewicht angegeben werden, mit dem die Stärke der Bindung der Splinefunktion an den jeweiligen Messpunkt festgelegt wird. Abgesehen von der zusätzlichen Arbeit zur individuellen Festlegung der Gewichte ist dadurch aber auch eine gewisse Willkür beim Verlauf der mittleren Lichtkurve und damit bei der ermittelten Extremwertzeit nicht zu vermeiden. Wegen dieser Nachteile der Splinefunktionen sind Polynome als Ausgleichsfunktion bei der Lichtkurvenapproximation zur Ermittlung von Maximum- bzw. Minimumzeiten zu bevorzugen.

Um eine brauchbare mittlere Lichtkurve für die Extremwertbestimmung berechnen zu können, sind genügend viele Messpunkte erforderlich, die selbstverständlich das Maximum bzw. Minimum, aber auch einen hinreichend langen Bereich der Lichtkurvenflanken einschließen müssen. Kurventeile, die einen großen Abstand vom jeweils zu bestimmenden Extremwert haben, wie z.B. bei einer Maximumbestimmung der Minimumbereich eines RR-Lyrae-Sterns, sind dagegen nicht erforderlich und eher störend, weil dann ein unnötig hoher Polynomgrad zur befriedigenden Darstellung so langer Helligkeitsverläufe erforderlich ist. In solchen Fällen ist es für die alleinige Maximum-/Minimumbestimmung zweckmäßig, nicht unbedingt benötigte Messpunkte bei der Ermittlung des Ausgleichspolynoms auszuschließen. Soweit möglich sollte man aber vermeiden, dass größere zeitliche Lücken innerhalb der Messpunkteserie auftreten.

Nach Ermittlung des Ausgleichspolynoms, das im Allgemeinen durch Polynomkoeffizienten definiert ist, liegt eine Lichtkurve in mathematischer Form vor, die den mittleren Verlauf der Messpunkte unter normalen Bedingungen gut approximiert. Bei der Polynommethode wird als gesuchte Extremwertzeit des jeweiligen Helligkeitsverlaufes der Zeitwert verwendet, bei dem das Maximum bzw. Minimum des Polynoms liegt. Da es sich um ein Ausgleichspolynom handelt, wird die Lage des Extremwertes nicht durch den Messpunkt mit dem größten bzw. kleinsten Helligkeitswert bestimmt, sondern durch alle verwendeten Messpunkte, wobei die Gewichtung der Punkte mit zunehmendem Abstand vom Extremwert abnimmt. Der Zahlenwert der Extremwertzeit (und auch der zugehörigen Helligkeit) lässt sich leicht ermitteln, da das Ausgleichspolynom als mathematische Funktion vorliegt. In der Praxis geschieht das aber nicht auf analytischem Wege, sondern mit Hilfe eines Iterationsverfahrens. Damit ist die gesuchte Extremwertzeit nach dem Polynomverfahren ermittelt und es muss jetzt nur noch eine Fehlerabschätzung des gefundenen Wertes durchgeführt werden.

Die Lage des gefundenen Extremwertes ist mit einem Fehler behaftet, der daher rührt, dass die einzelnen Messpunkte entsprechend der Länge der Fehlerbalken eine Unsicherheit besitzen und darüber hinaus um das Ausgleichspolynom streuen. Wie Bild 1 schematisch für eine Maximumbeobachtung zeigt, ist das Ausgleichspolynom von einem Toleranzband umgeben, dessen Breite von den beiden genannten Anteilen abhängt. Der erste durch die Fehlerbalken charakterisierte Anteil dieser Unsicherheit rührt vom Rauschen der Helligkeitssignale des Veränderlichen, des Referenzsterns und des Hintergrundfeldes her und lässt sich bei CCD-Aufnahmen aus den Pixelwerten ableiten. Dieser Fehleranteil muss in den Eingangsdaten für die Lichtkurvenauswertung enthalten sein und vom Programm zur Photometrie der CCD-Aufnahmen geliefert werden. Der zweite Anteil wird hauptsächlich durch atmosphärische Störungen und apparative Unzulänglichkeiten verursacht und lässt sich aus der Streuung der Messwerte um das Ausgleichspolynom ermitteln. Beide Anteile müssen (quadratisch) addiert werden, um den Gesamtfehler und damit die Breite des Toleranzbandes in Richtung Helligkeitsachse zu erhalten.

Die wahre Lichtkurve liegt irgendwo innerhalb dieses Toleranzbandes, allerdings mit zwei Einschränkungen: Erstens muss die Kurve eindeutig sein, d.h. zu jedem Zeitwert darf es nur einen einzigen Helligkeitswert geben, und zweitens dürfen, wenigstens innerhalb des Kuppenbereiches, keine doppelten- oder mehrfachen Maxima bzw. Minima auftreten, denn sonst ist die Eindeutigkeit bei der Extremwertbestimmung nicht gegeben. Wenn die Lichtkurve mehrere Extremwerte einer Art innerhalb des Kuppenbereiches besitzt, müssen die einzelnen Maxima bzw. Minima getrennt behandelt werden.

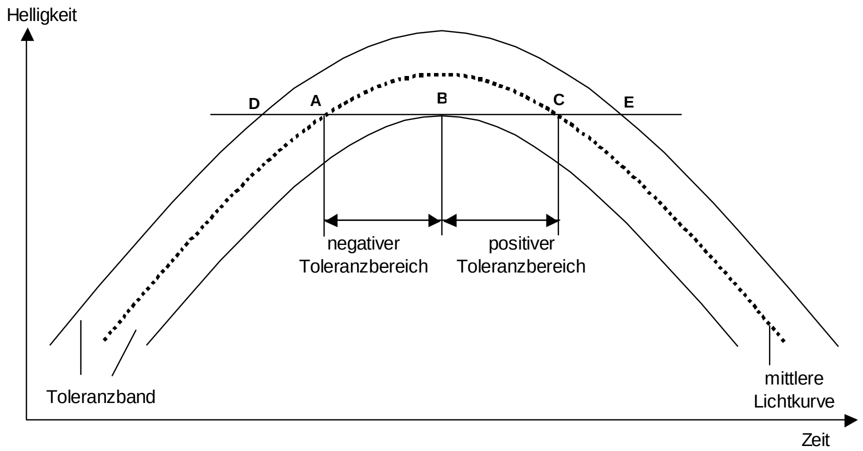

Bild 1. Zur Ermittlung des Toleranzbereiches bei der Polynommethode (schematisch)

Die Fehlerangaben liegen zunächst nur als Helligkeitswerte vor. Benötigt werden hier aber Angaben als Zeitfehler, da eine Fehlerabschätzung der Extremwertzeit gesucht wird. Es ist also notwendig, aus der Breite des Toleranzbandes eine Unsicherheit in Richtung Zeitachse abzuleiten. Das kann auf folgende Weise geschehen, wie am Beispiel der Maximumdarstellung von Bild 1 erläutert wird. Bei einer Minimumbeobachtung gelten entsprechende Überlegungen, nur das sich dort die Richtung der Helligkeitsvariationen gerade umkehrt. Zieht man durch den höchsten Punkt B der unteren Grenze des Toleranzbandes eine horizontale Gerade, so schneidet diese die mittlere Lichtkurve in den Punkten A und C und die obere Grenze des Toleranzbandes in den Punkten D und E.

Überall innerhalb des gesuchten Toleranzbereiches der Maximumzeit muss ein Extremwert der wahren Lichtkurve mit einiger Wahrscheinlichkeit auftreten können. Dass sich in den Punkten D und E ein solches Maximum befinden kann, ist jedoch unter den getroffenen Voraussetzungen (Lage der wahren Lichtkurve innerhalb des Toleranzbandes und kein Auftreten von Mehrfachmaxima) sehr unwahrscheinlich, weil dann die wahre Lichtkurve einen genau horizontalen Verlauf von D bis B bzw. B bis E haben müsste, was praktisch ausgeschlossen werden kann. Der gesuchte Toleranzbereich muss also eine kleinere Ausdehnung haben als der Abstand zwischen den Punkten D und E.

Eine etwas willkürliche Festlegung dieses Bereiches durch Grenzen bei den Zeitwerten der Punkte A und C ist dagegen realistisch, denn hier hat die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Maximums der wahren Lichtkurve einen endlichen Wert. Die Punkte A und C lassen sich als Schnittpunkte zwischen der horizontalen Geraden durch B und der mittleren Lichtkurve leicht berechnen, so dass der Toleranzbereich in der Praxis auch eindeutig und reproduzierbar angegeben werden kann und Vergleiche mit anderen Verfahren möglich sind. Ganz entsprechende Überlegungen lassen sich auch für einen Helligkeitsverlauf mit einem Minimum durchführen. Grundsätzlich sind auch andere Festlegungen des Toleranzbereiches denkbar. So könnte man als Grenzen z.B. die Mitten zwischen den Punkten D und B sowie B und E wählen.

Der linksseitige und der rechtsseitige Toleranzbereich kann, insbesondere bei asymmetrischen Lichtkurven, verschieden groß sein. Da die Asymmetrie im Kuppenbereich der Lichtkurve meist noch nicht sehr stark ausgeprägt ist, kann es zweckmäßig sein, nicht beide Teilbereiche, sondern deren arithmetischen Mittelwert als Plus-/Minusbereich anzugeben. Vorteilhaft ist dabei, dass man dann nur einen Wert für den Fehlerbereich erhält, der einen Vergleich erleichtert.

Als Nächstes soll auf die schon erwähnte Pogsonmethode näher eingegangen werden. Ein wesentlicher Unterschied dieser Methode zu dem schon beschriebenen Polynomverfahren besteht darin, dass Letzteres zur Bestimmung der Maximum- bzw. Minimumzeit vor allem die Messpunkte in der Umgebung des Extremwertes heranzieht, während die Pogsonmethode dafür die Messpunkte im Bereich der Lichtkurvenflanken benutzt.

Bei der Pogsonmethode werden nach Ermittlung der Ausgleichsfunktion von einem Helligkeitswert M_1 bis zu einem zweiten Helligkeitswert M_2 üblicherweise äquidistante Parallelen zur Zeitachse gezogen und deren Schnittpunkte mit der mittleren Lichtkurve ermittelt. Die Anzahl der Parallelen sollte nicht zu klein und > 4 sein. Der zum Maximum- bzw. Minimum nächstgelegene Helligkeitswert M_1 ist so zu wählen, dass der Abstand zum Extremwert der Lichtkurve einerseits nicht zu klein wird und die Neigung der Lichtkurve an den Schnittpunkten mit der Parallele M_1 schon deutlich von der Horizontalen abweicht, andererseits aber auch nicht zu groß ausfällt (Abstand etwa < 0,15 mag). Die Wahl von M_2 sollte so getroffen werden, dass der Abstand zwischen den beiden Parallelen bei den Helligkeiten M_1 und M_2 möglichst > 0,1 mag ist und im Bereich zwischen M_1 und M_2 die beiden Flanken der Lichtkurve einen möglichst glatten Verlauf haben.

Die zwischen den Lichtkurvenästen liegenden Teile der gezeichneten Parallelen, bei denen es sich mathematisch um Sehnen handelt, werden als Nächstes halbiert. Durch die Sehnenmittelpunkte muss nun eine glatte Kurve konstruiert werden, die im Folgenden als *Pogsonkurve* bezeichnet wird. Diese kann von Hand gezeichnet oder besser durch ein Ausgleichspolynom dargestellt werden. Der Grad dieses Polynoms darf nicht sehr hoch gewählt werden, da dieses Polynom von der Parallele M_1 bis zum Schnittpunkt mit der Lichtkurve extrapoliert werden muss. Im einfachsten Fall wäre auch eine Ausgleichsgerade als Pogsonkurve möglich, jedoch ist dann die Approximation häufig unzureichend und es lässt sich nicht erkennen, wie stark die optimale Pogsonkurve gekrümmt ist. Der günstigste Polynomgrad k liegt im vorliegenden Fall im Allgemeinen bei 2, da höhere Werte von k eher Schwierigkeiten als Verbesserungen mit sich bringen.

Nach Ermittlung der Polynomkoeffizienten für das Pogsonpolynom besteht der letzte Schritt der Pogsonmethode darin, den Schnittpunkt der Pogsonkurve mit der Ausgleichsfunktion der Lichtkurve zu berechnen. Die dabei sich ergebende Gleichung lässt sich nicht in geschlossener Form lösen, jedoch kann der Schnittpunkt mit einem Iterationsverfahren mit jeder gewünschten Genauigkeit gefunden werden. Der Zeitwert dieses Schnittpunktes stellt beim Pogsonverfahren die gesuchte Extremwertzeit dar.

Wie bereits erwähnt, wird bei der Pogsonmethode die Extremwertzeit eines beobachteten Helligkeitsverlaufs im Wesentlichen aus dem Verlauf der beiden Lichtkurvenflanken abgeleitet, die ja vom Maximum oder Minimum einen mehr oder weniger großen zeitlichen Abstand haben. Eine solche Ableitung ist nur möglich, wenn die Lichtkurve bestimmte Symmetrieeigenschaften besitzt. Erforderlich ist, dass die auszuwertende Lichtkurve hinreichend gut axial- (d.h. klapp-) oder schiefsymmetrisch ist. Diese Forderung ist hinreichend erfüllt, wenn die Pogsonkurve eine Gerade oder nur schwach gekrümmt ist. Bei Bedeckungsveränderlichen liegt meist eine Axialsymmetrie vor, so dass die Pogsonkurve nahezu eine senkrechte Gerade ist. Die asymmetrischen Lichtkurven vieler Pulsationsveränderlicher sind mehr oder weniger schiefsymmetrisch und die zugehörigen Pogsonkurven schrägliegend und schwach gekrümmt, wie es das Bild 2 für einen RR-Lyrae-Stern zeigt. Wenn die Pogsonkurve stark gekrümmt ist, sollte man jedoch die Pogsonmethode nicht oder nur mit allergrößter Vorsicht anwenden. In einem solchen Fall lässt sich die Fehlermarge herabsetzen, wenn man den Abstand zwischen der Grenzgeraden M_1 und dem Maximum bzw. Minimum klein hält.

Das Ergebnis der Auswertung einer Veränderlichenbeobachtung nach dem Polynom- und Pogsonverfahren ist in einem Beispiel in Bild 2 wiedergegeben. Im Diagramm eingetragen sind die Messpunkte mit den Fehlerbalken, das Ausgleichspolynom vom Grade 15, die beiden Parallelen zur Zeitachse mit den Grenzhelligkeiten M_1 und M_2, die als kleine Kreise dargestellten Mittelpunkte der zwischen den Lichtkurvenflanken liegenden Sehnenabschnitte der Parallelen sowie die zugehörige Pogsonkurve. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wurde auf eine Darstellung der zwischen M_1 und M_2 liegenden Sehnen verzichtet. Insgesamt wurden hier sieben Sehnen zur Ermittlung der Pogsonkurve verwendet. Oberhalb des Diagramms sind einige numerische Angaben zur Auswertung angegeben.

Anhand eines solchen Diagramms kann die Qualität der Auswertung schon recht gut beurteilt werden. Im vorliegenden Beispiel läuft das Ausgleichspolynom bei den meisten Messpunkten durch den Bereich des Fehlerbalkens. Echte Ausreißer (die man tunlichst vor der Auswertung eliminieren sollte, da sie die Statistik verfälschen) sind unter den Messpunkten nicht vorhanden. Im Helligkeitsbereich von M_1 bis M_2 ist die Lichtkurve glatt und nicht stark gekrümmt. Schließlich ist die Pogsonkurve nur schwach gekrümmt, so dass man ein zuverlässiges Ergebnis erwarten kann. Diese Aussage wird dadurch bekräftigt, dass (nach den numerischen Angaben oberhalb des Diagramms) die ermittelte Maximumzeit nach der Pogsonmethode nur um 1s von der Zeit des Polynommaximums abweicht. Im Allgemeinen muss man hier allerdings mit etwas größeren Differenzen rechnen.

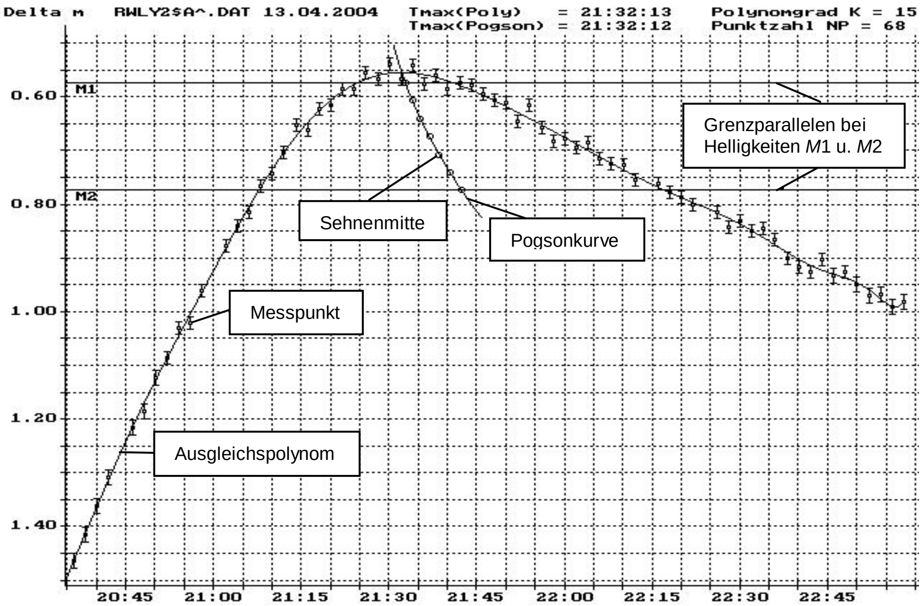

Bild 2. Beispiel für ein mit dem Auswerteprogramm MAXMIN erzeugtes Lichtkurvendiagramm u.a. zur Beurteilung der Qualität der ermittelten Maximumzeit nach der Polynom- und Pogsonmethode. Es handelt sich um das Ergebnis einer Beobachtung des RR-Lyrae-Sterns RW Lyn vom 13.3.04.

Es muss nun noch auf die Fehlerabschätzung bei der Pogsonmethode eingegangen werden, die sich von der Fehlerabschätzung bei der Polynommethode natürlich stark unterscheidet, da beide Verfahren auf verschiedenen Prinzipien beruhen. Jeder der beschriebenen Schritte zur Ermittlung der Extremwertzeit ist mit einem Teilfehler verknüpft, die sich zu einem Gesamtfehler addieren. Es handelt sich um folgende Schritte:

1. Ermittlung der Schnittpunkte der im Bereich von M_1 bis M_2 liegenden horizontalen Parallelen mit der mittleren Lichtkurve, d.h. dem Ausgleichspolynom, und Berechnung der Mittelpunkte der zwischen den beiden Ästen der Lichtkurve liegenden Sehnenabschnitte dieser Parallelen.

2. Ermittlung der Koeffizienten der Pogsonparabel.

3. Ermittlung des Schnittpunktes zwischen Pogsonparabel und Lichtkurvenpolynom.

Zu Punkt 1:
Die Lage der Schnittpunkte zwischen den Parallelen und dem Ausgleichspolynom ist mit einem Fehler behaftet, der daher rührt, dass die mittlere Lichtkurve, wie schon beim Polynomverfahren erläutert und in Bild 1 dargestellt wurde, von einem Toleranzband umgeben ist, in dessen Bereich die wahre Lichtkurve verläuft. Der Schnittpunkt einer Parallelen mit der wahren Lichtkurve liegt also auf dieser Parallelen irgendwo innerhalb des Toleranzbandes, woraus sich eine Zeittoleranz für den Schnittpunkt ergibt. Benötigt wird also die Breite des Toleranzbandes in Richtung der Zeitachse. Da die Breite des Toleranzbandes aus den Streuungen der Helligkeitsmessungen abgeleitet wird, ist diese Breite zunächst auch nur in Richtung der Helligkeitsachse bekannt. Zur Ermittlung des Zeitfehlers muss deshalb eine Umrechnung von der senkrechten Breite in die horizontale Breite des Toleranzbandes vorgenommen werden, was mit Hilfe der Neigung der mittleren Lichtkurve möglich ist. Da die mittlere Lichtkurve durch das ermittelte Ausgleichspolynom dargestellt wird, kann die benötigte Neigung und damit auch die Umrechnung an jeder beliebigen Stelle problemlos durchgeführt werden. Nun müssen nur noch aus den ermittelten Zeitfehlern an den Lichtkurvenflanken die Zeitfehler der Sehnenmitten berechnet werden. Bei asymmetrischen Lichtkurven ist die Neigung auf der linken und rechten Flanke verschieden groß. Deshalb wird in diesem Falle die linksseitige und die rechtsseitige Fehlermarge deutlich unterschiedlich ausfallen.

Zu Punkt 2:
Die ermittelten Sehnenmitten, aus denen die Koeffizienten der Pogsonparabel berechnet werden, liegen in der Praxis nie exakt auf einer Parabel, sondern streuen um die Pogsonkurve. Im Beispiel von Bild 2 sind diese Abweichungen nur klein, aber bei genauer Betrachtung deutlich zu erkennen. Diese Streuung der Sehnenmitten um die Pogsonparabel charakterisiert eine Unsicherheit und damit einen mittleren Fehler in der Lage der Pogsonparabel, der sich letzten Endes auch bei der ermittelten Extremwertzeit bemerkbar macht. Diese Streuung stellt den zweiten Fehleranteil im Gesamtfehler der nach Pogson ermittelten Extremwertzeit dar und lässt sich leicht berechnen, wenn die Sehnenmittelpunkte und die Koeffizienten der Pogsonparabel bekannt sind.

Zu Punkt 3:
Da das Ausgleichspolynom, wie bereits unter Punkt 1 erläutert wurde, von einem Toleranzband umgeben ist, ist auch der Schnittpunkt von Ausgleichspolynom und Pogsonparabel mit einer Unsicherheit behaftet. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, die von der Breite des Toleranzbandes im Kuppenbereich der Lichtkurve abhängt, kann dieser Schnittpunkt auch bei etwas größeren oder kleineren Helligkeitswerten liegen. Wenn die Pogsonparabel in der Nähe des Schnittpunktes nicht senkrecht (wie bei symmetrischen Lichtkurven), sondern schräg (wie bei asymmetrischen Lichtkurven) verläuft, bewirkt eine Verschiebung des Schnittpunktes in Richtung der Helligkeitskoordinate auch eine Zeitverschiebung. Ganz ähnlich, wie es bei Ermittlung des Flankenfehlers unter Punkt 1 beschrieben wurde, lässt sich hier aus der Breite des Toleranzbandes im Kuppenbereich und der Neigung der Pogsonparabel am Schnittpunkt der dritte Fehleranteil der ermittelten Pogson-Extremwertzeit berechnen.

Alle drei Fehleranteile müssen quadratisch addiert werden, um den Gesamtfehler zu erhalten. Den größten Fehleranteil liefern nahezu immer die Unsicherheiten an den Flanken (Punkt 1), während der Anteil durch die Streuung der Sehnenmitten um die Pogsonparabel (Punkt 2) meist sehr klein ist und oft auch vernachlässigt werden kann.

Bei einem Vergleich der Fehlerangaben der Extremwertzeit bei Anwendung der Polynom- und der Pogsonmethode zeigt sich, dass die Fehlerangabe bei Benutzung der Polynommethode nicht selten größer ausfällt als bei der Verwendung der Pogsonmethode. Das kann einerseits daran liegen, dass bei der Pogsonmethode zur Ermittlung der Extremwertzeiten die zeitlich meist gut definierten Lichtkurvenflanken herangezogen werden, während bei der Polynommethode der weniger gut definierte Bereich der Lichtkurve in der Umgebung der Kuppe verwendet wird. Der Unterschied in den beiden Fehlerangaben kann aber auch auf den verschiedenen Verfahren zur Fehlerberechnung beruhen, denn es muss davon ausgegangen werden, dass beide Fehlerangaben nicht völlig gleichwertig sind, da sie auf verschiedene Weise ermittelt werden.

Wie man sieht, sind die hier beschriebenen Methoden zur Ermittlung von Extremwertzeiten und deren Fehlerabschätzungen nicht ganz einfach und ziemlich rechenintensiv, so dass eine Berechnung von Hand kaum in Frage kommen dürfte. Wenn dagegen geeignete Auswerteprogramme zur Verfügung stehen, können mit Computerhilfe die Berechnungen schnell und anwenderfreundlich durchgeführt werden. MAXMIN ist z.B. ein solches Programm, bei dem nach Eingabe bzw. Übernahme der Eingangsdaten und Wahl einiger Parameter die Ergebnisse in Tabellenform oder als Grafik (siehe Bild 2) in Sekundenschnelle zur Verfügung stehen. Anhand der angezeigten Ergebnisse lässt sich die Güte der Auswertung bereits recht gut beurteilen und gegebenenfalls eine erneute Berechnung mit anderen Parametern durchführen.

Weiterhin ist es mit MAXMIN möglich, die nach der Polynom- und Pogsonmethode ermittelten Extremwertzeiten einschließlich der Fehlerabschätzungen für einen ganzen Bereich von Polynomgraden (z.B. von k = 6 bis k = 26) in einem Arbeitsgang zu berechnen und in einer Tabelle auszugeben. Dadurch wird die Wahl eines günstigen Polynomgrades sehr erleichtert und beschleunigt. Schließlich liefert das Programm MAXMIN nach Eingabe der Rektaszension und der Deklination sowie der Periode und Ausgangsepoche des periodischen Veränderlichen die heliozentrische Korrektur der ermittelten Extremwertzeit und den dazugehörigen (B-R)-Wert. Damit sind alle wichtigen Angaben für ein Lichtkurvenblatt vorhanden.

Ausdrücklich sei davor gewarnt, die Computerergebnisse völlig blind zu übernehmen, da bei den vielen eingebauten Automatiken oder auch durch Fehleingaben Fehler nie ganz auszuschließen sind. Es ist unbedingt notwendig das Ergebnis kritisch zu überprüfen! Das Mindeste was man tun sollte, ist einen Blick auf das Lichtkurvendiagramm mit den gewählten Parametern (k, M_1, M_2 u.s.w.) zu werfen und zu prüfen, ob keine Unzulänglichkeiten oder unerwünschte Störungen, wie stärkere Oszillationen des Ausgleichspolynoms oder eine stark gekrümmte Pogsonkurve, auftreten.

Herbert Achterberg, Liegnitzer Str. 12, D-22850 Norderstedt