

Die Parallaxe von 61 Cygni – anhand von Amateuraufnahmen selbst bestimmt! –

E. Heiser*, R. Groß**, U. Backhaus**

*Naturwissenschaftlicher Verein Osnabrück, **Universität Koblenz

1 Einleitung

Der Parallaxeneffekt ist jedem, z.B. vom Auto- oder Bahnfahren, bekannt: Die Gegenstände der Umgebung scheinen sich in der entgegengesetzten Richtung zu bewegen, und zwar umso schneller, je näher sie sind.

Seit der Ausarbeitung des heliozentrischen Weltsystems durch Copernicus Mitte des 16. Jahrhunderts war klar, daß sich die Bewegung der Erde um die Sonne am Fixsternhimmel widerspiegeln müßte, entweder als kollektive (scheinbare) Bewegung aller Sterne oder, bei unterschiedlicher Entfernung der Sterne, als gegenseitige Verschiebung. Die Nichtbeobachtbarkeit dieses Effektes war zunächst ein starkes Argument gegen Copernicus' Theorie.

Es dauerte fast 300 Jahre, bis Bessel die erste zweifelsfreie Beobachtung und Messung einer Fixsternparallaxe am 61. Stern im Sternbild Schwan (61 Cygni) gelang. Bis dahin hatte dieses Problem die Weiterentwicklung der Beobachtungs- und Instrumententechnik entscheidend vorangetrieben. Als Bessel 1838 als erster erfolgreich war, war die Entwicklung so weit fortgeschritten, daß mehrere Fixsternparallaxen nahezu gleichzeitig vermessen werden konnten ([6]).

2 Etwas Theorie

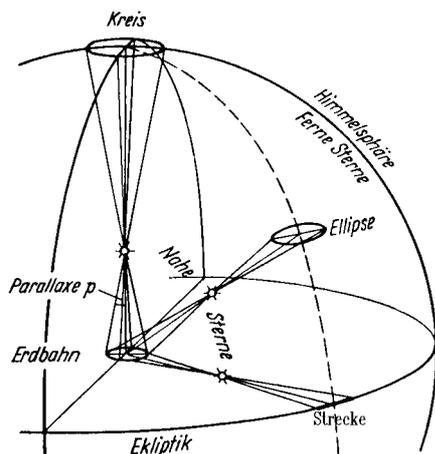


Abbildung 1: Parallaxische Bewegung naher Fixsterne (nach [4], S. 133)

Die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne führt zu einer parallaxischen Bewegung eines nahen Sternes relativ zu den sehr viel weiter entfernten Nachbarsternen¹. Diese Bewegung bildet, bei als kreisförmig angenommener Erdbahn, bei einem Stern nahe einem der Pole der Ekliptik einen Kreis, bei einem Stern in der Ekliptikebene ist sie geradlinig (s. Abb. 1). Bei allen sonstigen Positionen durchläuft der Stern eine mehr oder weniger exzentrische Ellipse.

Diese parallaxische Bewegung hat jedoch wegen der unvorstellbar großen Entfernung selbst bei den nächsten Sternen eine Amplitude von höchstens 1 Bogensekunde ($1'' = \frac{1^\circ}{3600} \hat{=} \frac{1}{200000}$). Das entspricht einer Murmel in 2 km Entfernung! Die Fixsternparallaxe blieb deshalb lange unbeobachtbar und ist auch heute noch schwierig zu messen.

¹Bei dieser Beobachtungsmethode müssen, anders als bei den ersten Versuchen, bei denen die Zenitdistanz der Sterne gemessen wurde, Lichtaberration und Nutation der Erdachse nicht berücksichtigt werden: Eng benachbarte Sterne unterliegen diesen Effekten in demselben Maße!

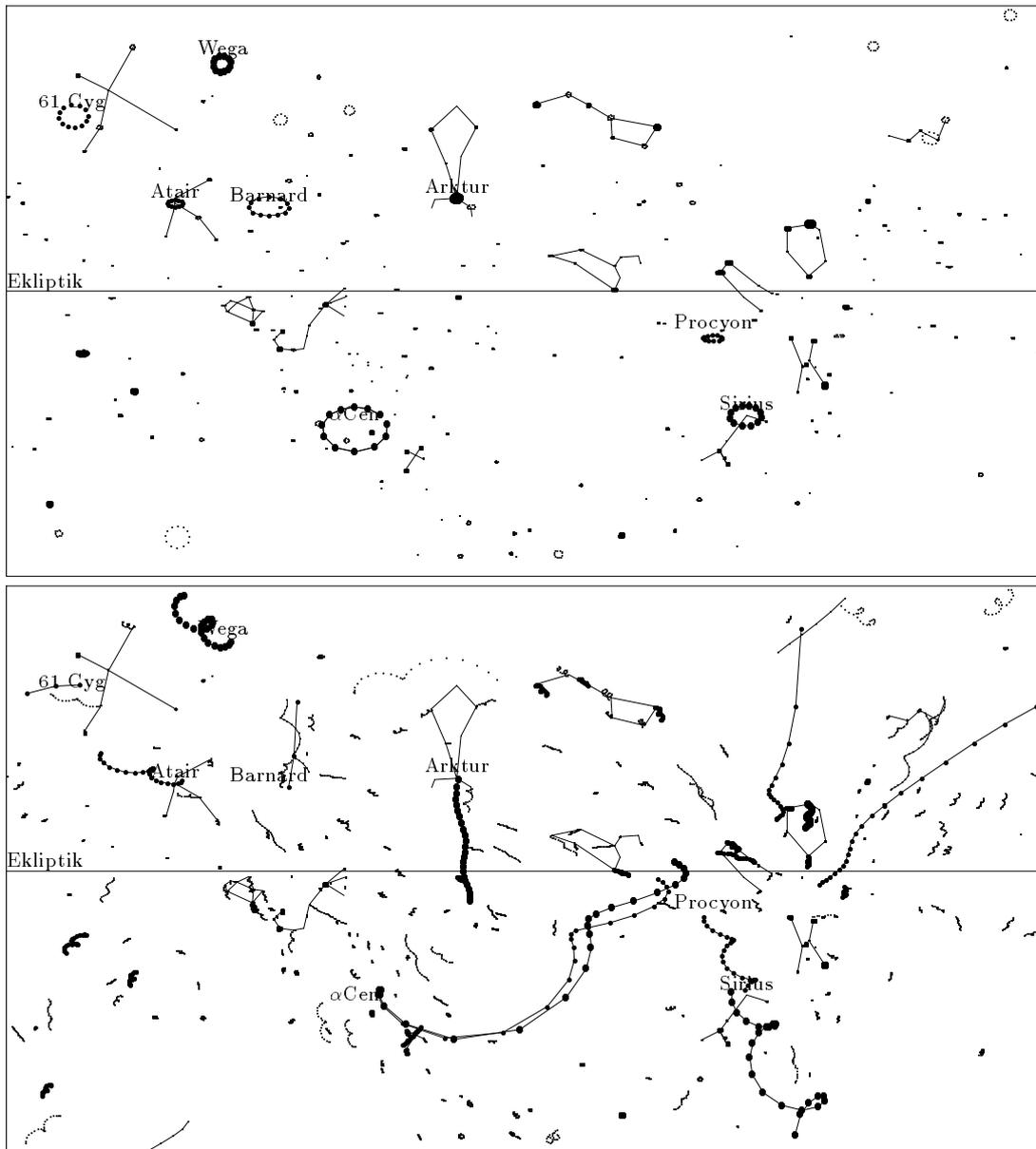


Abbildung 2: 12 „Fotos“ des gesamten Sternenhimmels, aufgenommen und übereinandergelegt jeweils im Abstand von einem Monat. Alle Fixsternentfernungen wurden um den Faktor $4 \cdot 10^4$ verkleinert.
oben: ohne Eigenbewegung, unten: mit Eigenbewegung

Zur Veranschaulichung wird deshalb in Abb. 2 die Entfernung aller Sterne um den Faktor 40000(!) verkleinert (dadurch verringert sich die Entfernung des sonnennächsten Sternes, Proxima Centauri, auf ca. 6.8 AE). Dann kann man im oberen Teil erkennen, daß alle Sterne im Laufe eines Jahres (als Ausdruck unterschiedlicher Entfernung) eine mehr oder weniger große Ellipse durchlaufen².

Der Zusammenhang zwischen der ekliptikalen Position (λ, β) eines Sternes, seiner parallaktischen Verschiebung ($\Delta\lambda, \Delta\beta$) und der ekliptikalen Länge λ_S der Sonne ist gegeben durch (siehe z.B. [7], S. 219)

²Man erkennt auch, daß die Ellipsenachsen parallel zur Ekliptik verlaufen und daß die Ellipsen umso „runder“ sind, je weiter sie von der Ekliptik entfernt sind.

$$\begin{aligned}
x &= -\cos \beta \Delta\lambda = -\Pi \sin(\lambda_S - \lambda) \\
y &= \Delta\beta = -\Pi \sin \beta \cos(\lambda_S - \lambda)
\end{aligned}$$

Dabei ist Π die sogenannte Parallaxe des Sternes, der Winkel also, unter dem vom Stern aus der Radius der Erdbahn erscheint.

Die Gleichungen bilden die parametrisierte Darstellung einer Ellipse. Der Stern durchläuft sie im Laufe eines Jahres einmal, während sich aufgrund des Erdumlaufes die ekliptikale Länge λ_S der Sonne einmal um 360° ändert (Frühlingsanfang: $\lambda_S = 0^\circ$, Sommeranfang: $\lambda_S = 90^\circ$, ...).

Abb. 1 und Abb. 2 oben sind jedoch verfälschend hinsichtlich des Umstandes, daß die Fixsterne eben *nicht* „fix“ sind. Diese (wegen der ungeheuren Abstände im Weltall geradlinige) sogenannte *Eigenbewegung* μ (gemessen in $\frac{''}{a}$) überlagert sich der parallaktischen Bewegung. Die Gestalt der zusammengesetzten scheinbaren Bahn am Himmel wird bestimmt vom Verhältnis μ/Π und der Richtung der Eigenbewegung relativ zu den Achsen der Ellipse (s. Abb. 2 unten).

3 Der 61. Stern im Sternbild Schwan

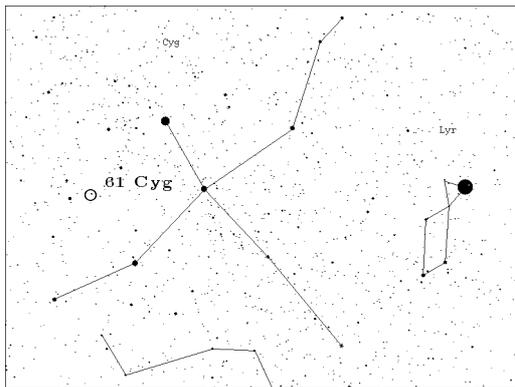


Abbildung 3: Das Sternbild „Schwan“ mit dem 61. Stern

Um eine Chance zu haben, Fixsternparallaxen zu messen, braucht man außer einer starken Vergrößerung³ eine hochauflösende lichtempfindliche Schicht⁴. Nachdem E. Heiser gezeigt hatte, daß die Parallaxe von Barnards Pfeilstern Amateurmitteln zugänglich ist ([5]), hatten wir den Mut, es auch an dem Stern zu versuchen, an dem Bessel 1838 eine Fixsternparallaxe erstmals zweifelsfrei nachgewiesen hatte ([1]).

Die Messung der Parallaxe ist jedoch bei 61 Cyg, einem Stern, der in jedem Feldstecher zu sehen ist (s. Abb. 3), aus drei Gründen deutlich schwieriger als bei Barnards Pfeilstern: Es handelt sich um einen Doppelstern, der mit $m = 6.0\text{mag}$ so hell ist, daß er leicht überbelichtet wird, wenn benachbarte Bezugssterne noch erkennbar sein sollen. Außerdem bilden Eigenbewegung und Hauptachse der parallaktischen Ellipse nur einen kleinen Winkel miteinander.

Insgesamt fotografierte E. Heiser den Stern in der Zeit vom 3.1.1995 bis 2.2.1997 an 23 Tagen. Die Bilder wurden von R. Groß im Rahmen ihrer Staatsexamensarbeit ([3]) mit dem Astrometrieprogramm **MiPS** ([2]) ausgewertet.

³Das Fernrohr auf dem Oldendorfer Berg hat eine Brennweite $f = 7460\text{mm}$.

⁴E. Heiser benutzte die CCD-Kamera ST-6 der Firma SBIG, deren Chip mit $375 * 242$ Pixeln $8.6\text{mm} * 6.5\text{mm}$ groß ist. Das entspricht einem Bildausschnitt von insgesamt $4' * 3'$ (Briefmarke in 17m Entfernung) bzw. $0.6'' * 0.7''$ pro Pixel (Briefmarke in 6 km Entfernung!).

4 Auswertung

Abb. 4 zeigt zwei typische Aufnahmen. Sie zeigen neben dem Doppelstern 61 Cyg weitere Fixsterne, von denen angenommen wird, daß sie so viel weiter entfernt sind, daß sie als festes Bezugssystem verwendet werden können, relativ zu dem die Positionen von 61 Cyg vermessen werden können⁵. Die Position des Doppelsternes (genauer: des Mittelpunktes zwischen den beiden Komponenten) wird dann bestimmt, indem der Winkelabstand zu den drei am nächsten benachbarten Sternen, deren Koordinaten man z.B. mit dem Astronomie-Programm **GUIDE** herausfinden kann, gemessen wird.

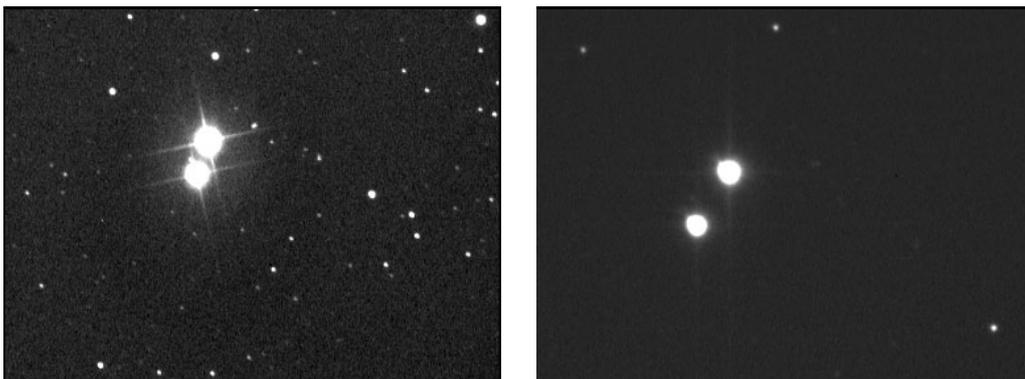


Abbildung 4: CCD-Aufnahmen von 61 Cyg bei
a) $f \approx 4000\text{mm}$, b) $f \approx 7000\text{mm}$

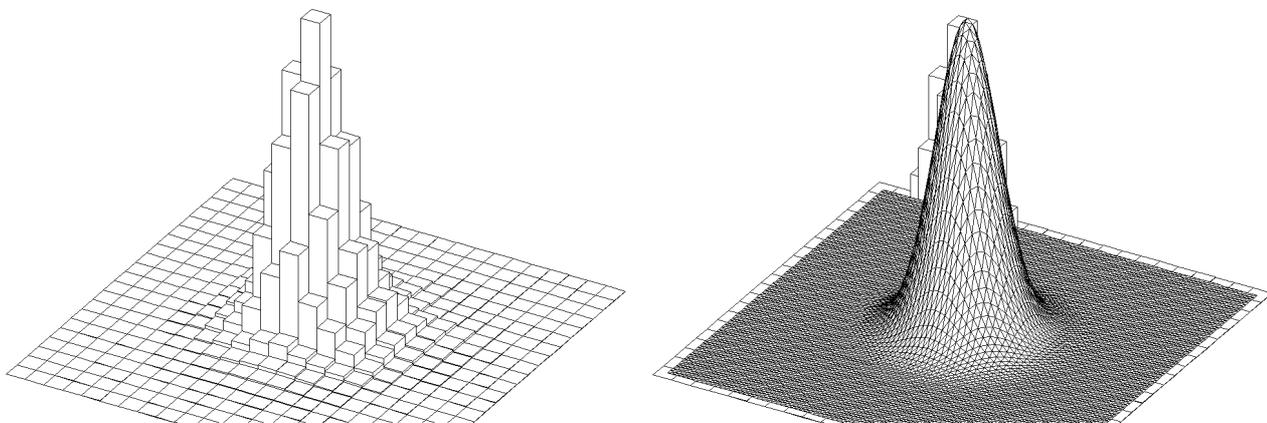


Abbildung 5: a) Verteilung der Helligkeit des Sternbildes auf benachbarte Pixel und b) Anpassung einer Gausskurve

Die ersten Auswertungsversuche führten zu keinem Ergebnis, da der zu erwartende Effekt auf dem CCD-Chip etwa von der Größenordnung eines Pixels ist, die Beugungsscheibchen von 61 Cygni aber Durchmesser von mindestens 7 Pixeln haben. Erst die Beschränkung auf die besten Bilder und eine sehr sorgfältige Astrometrie machten neben der Eigenbewegung auch die parallaktische Bewegung sichtbar: Dabei wird, nachdem eine konstante Hintergrundhelligkeit vom Bild subtrahiert worden

⁵Tatsächlich bestätigt sich diese Annahme im nachhinein: Die Positionen der drei in Abb. 4 rechts schwach sichtbaren Sterne ändert sich im Beobachtungszeitraum nicht. Tatsächlich sind die Parallaxen dieser Sterne entweder noch gar nicht bekannt oder um mehr als den Faktor 10 kleiner als die von 61 Cyg.

ist, eine Gauss-Verteilung an die Helligkeitsverteilung des Sternscheibchens angepaßt (s. Abb. 5). Als Position des Sternes wird dann der Schwerpunkt dieser Verteilung angenommen; er kann mit einer Genauigkeit von bis zu 0.01 Pixel bestimmt werden. Natürlich hängt das genaue Ergebnis dieser Prozedur vom gewählten Hintergrund und von der Anzahl der berücksichtigten Pixel – und damit auch von der Geschicklichkeit des Auswerters – ab. Abb. 5 zeigt deutlich, daß die Sternposition nicht mit dem Mittelpunkt eines Pixels übereinstimmt.

Abb. 6 zeigt die auf diese Weise gemessenen Sternpositionen und vergleicht sie mit der theoretisch erwarteten Bewegung. Eingezeichnet sind außerdem die ungefähre Größe eines Beugungsscheibchens und eines Pixels.

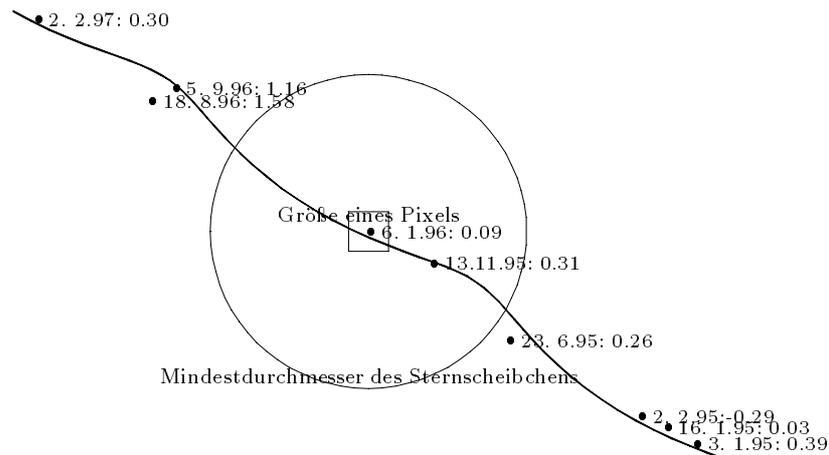


Abbildung 6: Vergleich der gemessenen Positionen von 61 Cyg mit der erwarteten Bewegung

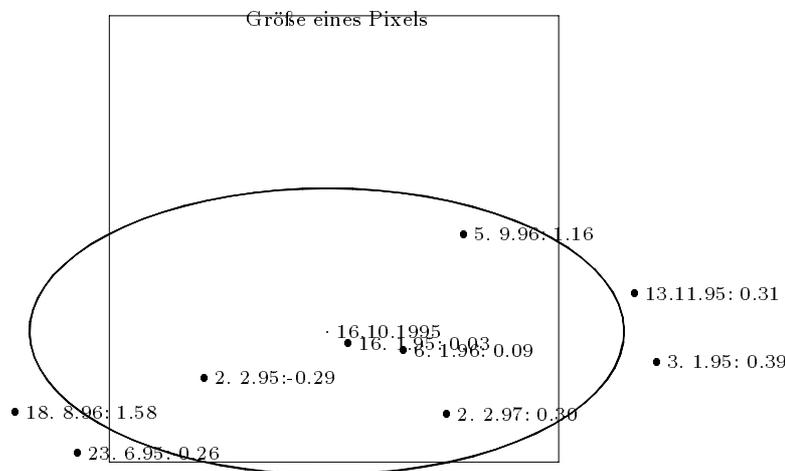


Abbildung 7: Variation von ekliptikaler Länge und Breite nach Abzug der Eigenbewegung

Die gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Messung machte uns Mut, eine Parallaxenbestimmung zu versuchen: Um die parallaktische Bewegung zu isolieren, bestimmten wir zunächst durch Anpassung einer Geraden mit der Methode der kleinsten Quadrate die Eigenbewegung des Sternes. Nach Abzug dieser Eigenbewegung und Umrechnung in ekliptikale Koordinaten erhielten wir bezüglich der mittleren Position am 16.10.1995 ($\alpha = 316.72131^\circ$, $\delta = 38.74201^\circ$, $\lambda = 336.94738^\circ$, $\beta = 51.89381^\circ$) die in Abb. 7 dargestellte Variation in ekliptikaler Länge und Breite.

Nun mag das Ergebnis auf den ersten Blick enttäuschen: Die gemessenen Positionen liegen nicht auf der (ebenfalls eingezeichneten) theoretisch erwarteten Ellipse. Vergleicht man jedoch die Größenordnung des Effektes mit der Ausdehnung eines Pixels (die ebenfalls eingezeichnet ist), dann wird deutlich, daß wir mit diesem ersten Ergebnis sehr zufrieden sein können: Sowohl die Variation in Länge, als auch die in Breite haben die richtige Größenordnung!

Aus diesen Meßergebnissen läßt sich auf unterschiedliche Weisen die Parallaxe Π von 61 Cyg abzuleiten: durch Anpassung einer theoretischen Kurve in Abb. 4: $\Pi = 0.35''$, durch Auswertung der Variation in ekliptikaler Breite: $\Pi = .22''$ und durch Auswertung der ekliptikalen Längenänderung: $\Pi = 0.31''$.

Dabei liefert das letzte Verfahren offensichtlich den zuverlässigsten Wert: Danach beträgt die Entfernung von 61 Cyg 3.3 pc oder 10.5 Lichtjahre.

5 Schluß

Der Nachweis der parallaktischen Bewegung von Fixsternen war bereits zur Zeit Bessels als Beweis der Erdbewegung um die Sonne uninteressant geworden. Niemand zweifelte mehr an der zentralen Stellung der Sonne. Trotzdem ist die Fixsternparallaxe bis heute das am leichtesten zu verstehende Argument für die Erdbewegung. Ihr Nachweis ist deshalb von großer didaktischer Bedeutung. Unser Meßergebnis für die Entfernung von 61 Cyg stimmt exakt mit Bessels erster Angabe überein. Wir haben jedoch die Hoffnung, anders als Bessel, dessen zweites Ergebnis schlechter war als das erste, mit weiteren Messungen dichter an den heute gültigen, von Hipparcos gemessenen, Wert ($\Pi = 0.285''$) heranzukommen.

Literatur

- [1] F. W. Bessel: *Bestimmung der Entfernung des 61. Sterns des Schwans*, Abhandlungen Band 2, Leipzig 1875-76, S. 217-236
- [2] C. Buil u.a.: *The Microcomputer Image Processing System, Version 2.0*, zu beziehen über Baader Planetarium, Zur Sternwarte, 82291 Mammendorf
- [3] R. Groß: *Die Fixsternparallaxe und ihre Messung mit CCD-Kameras*, Examensarbeit, Koblenz 1997
- [4] GUIDE 6.0, Astronomie-Programm, zu beziehen über astro-shop im Planetarium, Hindenburgstr. Ö1, 22303 Hamburg
- [5] E. Heiser, R. Schröder, *Eigenbewegung und Parallaxe von Barnards Pfeilstern*, Sterne und Weltraum 35/5, 388 (1996)
- [6] D. B. Herrmann, *Kosmische Weiten, Johann Ambrosius Barth: Leipzig 1977*
- [7] W. M. Smart, *Textbook on Spherical Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge 1986
- [8] A. Unsöld, B. Baschek, *Der neue Kosmos*, Springer, Berlin usw. 1991