

Die Polbewegung aus den Beobachtungen von F. W. Bessel 1842–1844

Peter Brosche und Helmut Lenhardt

Zusammenfassung

F. W. Bessel hat sehr früh Breitenschwankungen der Erde für möglich gehalten. Ein Meridiankreis der Gebrüder Repsold, der 1841 nach Königsberg geliefert wurde, sollte u. a. diese Frage entscheiden. Bessel beobachtete bis zu seinem Tode 1846 insbesondere den Polarstern und zwar im direkten und im reflektierten Licht, um Biegungeffekte zu eliminieren. Seine Mitarbeiter konnten die Beobachtungen herausgeben, aber nicht hinsichtlich der Frage der Breitenschwankungen auswerten. Wir versuchen dies nachzuholen, wobei wir eine Reihe von solchen Einflüssen diskutieren, die die gesuchte freie Polbewegung der Erde (»Chandler wobble«) verfälschen könnten. Wir finden eine Amplitude von $0.''15$ und eine Phase, die beide mit den Ergebnissen von längeren Reihen aus Pulkovo übereinstimmen.

Summary

F. W. Bessel considered early the possibility of latitude variations. He wanted to address observations with the new Repsold meridian circle (delivered to Königsberg in 1841) especially to this problem. His death in 1846 and losses amongst his collaborators hampered the complete treatment of the data. We concentrate on those of Polaris, always observed in direct and reflected light, thus eliminating flexure. After discussing a number of possible disturbing effects, we arrive at an amplitude of the Chandler wobble of $0.''15$ and a phase in agreement with longer series of observations at Pulkovo.

Schlüsselworte: F. W. Bessel, Breitenschwankungen, Polbewegung

1 Einleitung

Wäre die Erde eine ideale Kugel – auch in ihrem inneren Aufbau – so könnte ihre Rotationsachse ihre Lage im Raum und in ihr selbst stets beibehalten. Diese bequeme Situation wäre allerdings gerade dann durch die kleinste Störung ins Wanken zu bringen. Es ist der Äquatorwulst der Erde, der uns vor solchen Unannehmlichkeiten bewahrt (Munk and MacDonald 1975, S. 56 f.).

Schon im Altertum merkte Hipparch, dass die Erdachse im Raum eine langsame Bewegung vollführt, die später als Teil eines Kegelmantels mit 23° Öffnung erkannt wurde, der in einem »Platonischen Jahr« (ca. 26.000 Jahre) durchlaufen wird. Dies ist die sogenannte Präzession der Erdachse, zu der später erkannte kleinere periodische Änderungen hinzutreten, die unter dem Namen Nutation erfasst werden – jedenfalls von den Astronomen, die damit

durch äußere Drehmomente veranlasste Achsenbewegungen der Erde bezeichnen. Physiker verstehen darunter oft die kräftefreie (genauer: drehmomenten-freie) Kreiselbewegung. Die gibt es im Falle der abgeplatteten Erde mit ihren unterschiedlichen Hauptträgheitsmomenten auch, und beides verändert nun ebenso die Lage der Rotationsachse im Erdkörper, man spricht von einer Polbewegung. Da diese Achse die wichtigste natürliche Bezugsrichtung für die Definition von Winkelkoordinaten auf der Erde ist, war das für alle Wissenschaftler, die solche Koordinaten mit höchster Genauigkeit bestimmen wollten, von größter Wichtigkeit. Weil es sich dabei um kleine Größenordnungen handelt, war die Erforschung der Polbewegung zunächst eine theoretische Entwicklung. Man konnte seit der exakten Formulierung der Theorie des starren Kreisels durch Leonhard Euler um die Mitte des 18. Jahrhunderts die Periode einer eventuellen freien Kreiselbewegung der Erde berechnen. Sie ergab sich aus den damals bekannten Abplattungswerten zu einem Wert um 300 Tage, also deutlich kürzer als ein Jahr. Ob die Erde aber diese »Freiheit« überhaupt nützte, d. h. die Amplitude messbar von Null verschieden war, das wusste man nicht, bzw. man wusste, dass sie höchstens an der Grenze der Messgenauigkeit liegen konnte, sonst wäre sie ja schon als Breitenschwankung entdeckt worden.

Die gesicherte Möglichkeit der Variation einerseits und die sehr langsame Steigerung der Winkelmessgenauigkeit andererseits führten zu einer sehr allmählichen Entdeckungsgeschichte. Erst durch die Messungen von Küstner 1884/85 in Berlin (Brosche 2000) sowie durch die von ihnen veranlassten Gegen-Beobachtungen in Hawaii wurde die Existenz der Polbewegung mit großer Sicherheit etabliert.

Generell wurde ihre Entdeckung dadurch verzögert, dass man zu lange an der Euler'schen Periode von ca. 305 Tagen für eine starre Erde festhielt und damit nach etwas in der Natur so nicht Vorhandenem suchte. Erst der amerikanische Privat-Astronom S. C. Chandler (1846–1913) besaß die geistige Unabhängigkeit, die Daten zu nehmen, wie sie waren, und nach einer beliebigen Periode zu suchen. Er fand einen Periodenbereich von 390 bis 440 Tagen. Bald darauf konnte Simon Newcomb diese Verlängerung durch die Elastizität der Erde verständlich machen.

Küstners Erfolg hatte außer in seiner sorgfältigen Arbeitsweise sicher seine wesentliche Wurzel in der strikt relativen Natur seiner Messungen, die u. a. von den Absolutwerten der Deklinationen seiner Sterne völlig unabhängig waren. Die relative Winkelmessgenauigkeit war ja immer mindestens eine Zehnerpotenz besser als diejenige



Abb. 1:
Friedrich Wilhelm Bessel,
Ausschnitt aus dem
Portrait in Bessel (1856)

für große Winkel. So konnte schon F.W. Herschel mikrometrisch die Bahnbewegung von visuellen Doppelsternen entdecken und so erzielte der vielleicht bedeutendste Astrometer des 19. Jahrhunderts, F.W. Bessel, zwei ganz grundlegende Erfolge:

1. die gesicherte Messung einer Fixsternparallaxe (also der hypothesenfreien Bestimmung einer Sternentfernung);
2. die Entdeckung von periodischen Schwankungen der Sirius-Position relativ zu Nachbarsternen, die er richtig als Wirkung eines Begleiters deutete, der 1862 von Alvan Clark erstmals gesehen wurde.

Einen Abriss der historischen Entwicklung haben Przybyłok (1914) und Wanach (1919) gegeben; bei ihnen spürt man noch die gefühlsmäßige Nähe der Teilnehmenden. Ausführlicher und vor allem mit einer umfangreichen Bibliographie ausgestattet ist die Monographie von Ševarlić (1957). Neuerdings haben Verdun und Beutler (2000) die Frühgeschichte zwischen Bessel und Küstner eingehend dargestellt, sodass wir uns hier auf einige Akzentuierungen und eine genauere Behandlung der letzten Beobachtungen Bessels beschränken können. Darüber hinaus hat Verdun (2002) die Polbewegung im Rahmen der wichtigsten Stationen in der Evolution der klassischen Astrometrie behandelt.

Bessel dachte über Polschwankungen nach und er machte mehrere Anläufe, sie zu messen, zuerst 1820 an ihrer Auswirkung auf das Azimut (Bessel 1821), später durch die auf die gemessene Breite der Station. Verdun und Beutler (2000, S. 67) sagen mit Recht, dass man sich darüber verständigen muss, was unter Polbewegung verstanden werden soll. Offenbar verstehen sie die freie Kreiselbewegung darunter. Bessel hat »nur« die durch eine Massenverschiebung auf der Erde erzeugte diskutiert (Bessel 1818), wobei die Apostrophierung erfolgt, weil die Kreiselbewegung unter Einfluss von Drehmomenten mathematisch die freie enthält. Übrigens hat er aus der für 1" Polverschiebung nötigen Masse von 9.47×10^{16} Pfunden nur geschlossen, dass alle menschlichen Transporte (z.B. aus den beiden »Indien«) in dieser Hinsicht so gut

wie nichts bedeuten. Er hat dann versucht, die einschlägigen Probleme mit seinem Meridiankreis von Reichenbach zu traktieren. Als damit noch Fragen offen blieben, die er aus konstruktiven Gründen mit diesem Instrument nicht klären zu können glaubte, gelang es ihm, in Zusammenarbeit mit den berühmten Hamburger Instrumentenbauern, den Gebrüdern A. und G. Repsold, von diesen einen Meridiankreis nach seinen Wünschen bauen zu lassen, bei dem alles damals Mögliche getan war, um Fehler thermischen oder elastischen Ursprungs entweder gar nicht erst entstehen zu lassen – oder sie messbar zu machen.

Bemühungen um alte Beobachtungen sind heute noch deshalb sinnvoll, weil in dem datenmäßig gut belegten Zeitraum ab 1900 nur ein Intervall eine kleine Chandler-Amplitude ($\sim 0.''1$) aufweist, nämlich dasjenige um 1930 (Vondrák 1999, Fig. 10 upper part, p. 185). Angesichts der Tatsache, dass der Anregungsmechanismus der freien Kreiselbewegung der Erde immer noch diskutiert wird, ist jede Vermehrung der Datenbasis sehr willkommen.

Die derzeitige Wertung der Beobachtungen des 19. Jahrhunderts über die Polbewegung wird in den neueren zusammenfassenden Darstellungen sichtbar: Vondrák (1999) beginnt mit Ende 1899.7. Der Annual Report 2007 des International Earth Rotation Service (IERS 2009) enthält im Berichtsteil 3.5 Analysen ab 1900 und gibt für ältere Zeiten gerade noch das Zitat Fedorov et al. (1972), das sich im Titel auf die Zeit ab 1890 bezieht, im Inhalt allerdings auch mittlere Koordinaten ab 1846.0 enthält (Tafel 6 ab S. 61). Wie man aus diesen Daten direkt ersieht und wie auf ihnen basierende Untersuchungen (zuletzt Malkin und Miller 2010) gezeigt haben, sind die Amplituden des Chandler wobble offenbar mindestens auch in den Jahren 1846 bis 1848 klein gewesen (d.h. um $0.''1$). Eine solche kleine Amplitude ist natürlich bei einer Beobachtungsgenauigkeit um $0.''1$ gar nicht festzustellen, wenn man verlangt, dass der mittlere Fehler $< 1/3$ Amplitude sein soll. Wir halten es »forschungspsychologisch« für wahrscheinlich, dass ein Teil der schlechten Meinung über die alten Breitenschwankungsmessungen davon herrührt, also nicht nur mit deren Qualitäten zu tun hat. Dabei wird übersehen, dass es eine wichtige Information darstellt, auch nur eine obere Schranke für die Amplitude des Chandler wobble zu erhalten – und damit eine untere Schranke für dessen Variabilität.

Obwohl Seitz (2005) gezeigt hat, dass zufällige Anregungen, wie sie Atmosphäre und Ozean auf die feste Erde ausüben, der Größenordnung nach ausreichen, die Chandlerbewegung zu verursachen, ist die kausale Erklärung noch nicht vollständig und die Erweiterung der empirischen Basis ein Desideratum. Damit könnte dann hoffentlich auch in die noch ungeklärte Phasenbeziehung von Anregung und Chandlerbewegung Licht gebracht werden.

Die hier behandelten Beobachtungen von Bessel verdienen besondere Beachtung, weil ihre Auswertung bei der bekannten Sorgfalt ihres Urhebers aussichtsreich erscheint, weil sie ausführlich dokumentiert worden sind

und weil sie bisher – von einer unzureichend beschriebenen Ausnahme abgesehen – noch nicht in dieser Hinsicht ausgewertet worden sind.

2 Bessels Messungen, Meinungen und Absichten

Der Repsold'sche Meridiankreis traf im Herbst 1841 bei Bessel in Königsberg ein. Nach seinen bekannten Grundsätzen begann er mit der Untersuchung des Instruments, mit der er es ein zweites Mal erschuf: »Jedes Instrument wird auf diese Art zweimal gemacht; einmal in der Werkstatt des Künstlers von Messing und Stahl; zum zweitenmale aber von dem Astronomen auf seinem Papiere, durch die Register der nöthigen Verbesserungen, welche er durch seine Untersuchung erlangt« (Bessel 1848). Allerdings war er schon von Krankheit gezeichnet und hatte Mühe, die körperlichen Anstrengungen und die Nachtwachen zu überstehen (Bessel 1856, Teil von A. L. Busch, S. VI–IX). Dennoch dachte er offenbar schon an Themen, die über die ersten rein technischen und instrumentellen Probleme hinausgingen. Dies zeigt sich im Briefwechsel mit Alexander von Humboldt (Felber 1994), insbesondere in dem langen Brief Bessels vom 15. Juni 1843. Er spricht darin über die Gründe, weshalb er anstelle des bisherigen Reichenbach'schen Kreises den neuen Kreis von Repsold haben wollte und wie er ihn bisher untersuchte. Besonderen Nachdruck legt er auf die Feststellung, dass trotz der Ablesegenauigkeit von ca. 0."1 die ersten, ohne zusätzliche Untersuchungen gewonnenen Resultate nicht besser waren als mit dem älteren Instrument. Erst durch eine ganze Reihe von Prüfungen und Vergleichen kam die bessere Qualität des neuen Instruments zum Tragen. Zentral war dabei die dauernde Beobachtung des Nadirs durch Reflexion des Fadenkreuzbildes an einem Quecksilberhorizont. Die angewandte Viertelstunde für diese zusätzliche Beobachtung dürfe man nicht scheuen, »indem man eine der stärksten Fehlerursachen dadurch ganz aus dem Resultate schafft« (S. 153). Und er hofft »Wie schnell wird man aus Beobachtungen von der Sicherheit der gegenwärtigen folgern können, ob die Polhöhen wirklich unverändert sind!« (S. 155). Etwa ein Jahr später, am 1. Juni 1844, entschließt sich Bessel am Ende eines Briefs zu der Bemerkung:

»Noch eins, obgleich es noch unreif ist! – Ich habe Verdacht gegen die Unveränderlichkeit der Polhöhen. Meine sehr schön untereinander stimmenden Beob[achtungen] mit dem neuen Kreise verkleinern die Polhöhe fortwährend; vom Frühjahr 1842 bis jetzt zwar nur um 0."3, aber selbst diese Kleinigkeit scheint mir nicht Beobachtungsfehler sein zu können, denn nach meiner jetzigen Beobachtungsart wird Alles eliminiert, was constanten Einfluss auf die Mittel der einzelnen Sätze haben könnte. Ich denke dabei an innere Veränderungen des Erdkörpers, welche Einflüsse auf die Richtung der Schwere erlangen. –«

Und Humboldt, der nicht auf der Jagd nach Sensationen war, sondern stets auf der Suche nach neuen prinzipiellen Fakten und Erkenntnissen, schreibt am 7. November 1845 an Bessel: »Wenn Sie einen freien Augenblick haben, so beschwöre ich Sie, einige Worte über die Veränderung der Breite von Königsberg zu sagen. Was Sie mir davon anvertraut, sitzt mir tief wie ein Stachel in der Brust. Also Beobachtungen aus einer Zeit, wo Sie schon Ihre scharfsinnigen Methoden angewandt hatten, alles zu entfernen, was von der Wärme und Beugung des Kreises abhängen kann. In den Sternen liegt der Grund auch nicht in veränderter Declination, da von oberen und unteren Durchgängen der Polaris die Rede ist. Also Veränderungen der Richtung der Schwerkraft, fortschreitende Veränderungen der Dichtigkeit in einzelnen Theilen der Erdrinde. Ich weiß nichts, was tiefer eingreift, mehr meine Neugierde spannt. Ich weiß nur einen einzigen Passus, in dem Sie werther Freund, den Punct entfernt öffentlich berührt haben, und diesen Passus habe ich im Kosmos S. 312 und 472 benutzt!« (Felber 1994).

In der Tat ist sowohl die Passage im Kosmos (Humboldt 1845) als auch die »öffentliche Berührung des Punctes« durch Bessel (Bessel 1840) eine sehr entfernte, die lokale Änderungen betrifft, ohne dabei globale Ursachen und globale Wirkungen (Kreisel-Reaktionen) eindeutig anzusprechen – was an der betreffenden Stelle nicht gefordert war. Wie aus Bessel (1818) hervorgeht, hat er an solche globalen Kreiselbewegungen der Erde durchaus gedacht, es bleibt unklar, ob Humboldt das so verstanden hat. Abgesehen von diesem theoretischen Hintergrund können wir aber für den empirischen Vordergrund festhalten, dass Humboldt sich nicht allein auf die Autorität Bessels verlässt, sondern sehr wohl bemerkt, dass die nun vorliegende Evidenz nicht mehr von vielen vorher denkbaren Fehlereinflüssen zunichte gemacht werden kann. Und weiter, dass er einen wesentlichen Unterschied macht zwischen einer vertraulichen Mitteilung und einer solchen an die Öffentlichkeit, eben einer Veröffentlichung. Bessel hat sich dazu noch nicht entschließen können, und es kann ihm also – selbst nur als Möglichkeit – nicht der Vorwurf gemacht werden, er habe sich auf diesem Wege ungerechtfertigt eine Priorität erschleichen wollen. Um so weniger, als Bessel sich bei Gelegenheit der Methode der kleinsten Quadrate gerade gegenüber Humboldt am 19. April 1844 ganz entschieden für eine Prioritäts-Zuschreibung ausschließlich nach der Erst-Publikation ausgesprochen hat (Felber 1994, S. 174). Dass ihm ein Prioritäts-Vorgriff fernlag, beweist auch das Fehlen des Themas in seinem einzigen weiteren erhaltenen langen Brief an Humboldt vom 12. Februar 1846 und ebenso in der posthumen Veröffentlichung seiner Daten durch seine Mitarbeiter. Bessel selbst kam nicht mehr zu einer vollständigen Bearbeitung und Publikation. Er erlag am 17. März 1846 seiner Krankheit. Noch vor seinem Tod hatte er den Wunsch ausgesprochen, dass seine Beobachtungen von seinem Mitarbeiter August Ludwig Busch und, zur unabhängigen Kontrolle, vom Observator der



Abb. 2:
Eduard Luther,
Ausschnitt aus dem
Portrait bei dem
Nekrolog von Franz
(1888)

Altonaer Sternwarte Adolph Cornelius Petersen reduziert werden sollten. Sie begannen 1847 mit der Arbeit, die revolutionären Ereignisse um 1848 und der Tod Schumachers in Altona im Jahr 1850 (wodurch Petersen die Herausgabe der Astronomischen Nachrichten übernehmen musste) hinderten den Fortgang. Als endlich beide ihre Unterlagen zum Druck vorbereiten wollten, starb Petersen im Februar 1854, und Busch versuchte, das Vermächtnis allein zu erfüllen. Am 30. September 1855 starb aber auch er. Die Herren M.L.G. Wichmann (der selbst schon 1859 starb!) und Eduard Luther (1816–1887) führten die Arbeiten zu Ende. 1856 konnte in Königsberg also endlich erscheinen:

Der 1. Teil der 27. Abteilung der Astronomischen Beobachtungen auf der Königlichen Universitäts-Sternwarte zu Königsberg, enthaltend Beobachtungen an dem Repsold'schen Meridiankreise in den Jahren 1842, 1843 und 1844. Mit Bessels Portrait und einer Abbildung des Repsold'schen Meridiankreises.

Wie es gute Tradition der beobachtenden Sternwarten des 19. Jahrhunderts war, steht kein Verfasser auf dem Titel, jedoch enthält die erste Seite der Einleitung in Fettdruck die Zeile »Bessels letzte Beobachtungen«, sicherlich der von den Mitarbeitern intendierte sinngemäße Titel. Daher zitieren wir sie hier als Bessel (1856). Die einzelnen Abschnitte innen sind gezeichnet: Eine Einleitung von A.L. Busch im August 1855 (S. V–X), dann Bemerkungen über das Instrument und über die Beobachtungen mit demselben von M. Wichmann (S. XI–XXIII) und schließlich die Ableitung der Resultate der Deklinationsbeobachtungen von E. Luther (S. XXIV–LX). Darauf folgen auf arabisch nummerierten Seiten die Beobachtungen mit dem Repsold'schen Meridiankreise für die einzelnen Sterne (S. 1–127). Übrigens enthält der (früher erschienene) zweite Teil der 27. Abteilung der Königsberger Beobachtungen solche mit dem Reichenbach'schen Kreis. Wir haben die Publikation deswegen so ausführlich beschrieben, weil sie unseres Wissens (noch) nicht im Internet und auch in Sternwartenbibliotheken nicht leicht zugänglich ist. Sie ist natürlich auch nicht in Bessels Werken enthal-

ten. In der Publikation selbst ist übrigens von Breitenveränderungen keine Rede.

Chandler untersuchte viele ältere Beobachtungsreihen, darunter die von Bessel 1820–1827 (Chandler 1902) – nicht jedoch die letzten von 1841–1843. Aus diesen hat unseres Wissens nur Erich H.G. Przybyllok (1880–1954) versucht, die Polbewegung zu ermitteln (Przybyllok 1931). Wir werden auf den Unterschied von unserer zu seiner Herangehensweise weiter unten zu sprechen kommen.

3 Zur Bearbeitung

Die gemessenen Zenitdistanzen müssen zunächst von bestimmten Einflüssen befreit werden, bevor sie hinsichtlich von Breitenschwankungen analysiert werden können. Zuerst geht es dabei um die Refraktion, der wir auch deshalb einen eigenen Abschnitt widmen, weil wir bei ihr (und nur bei ihr) die Bessel'schen Reduktionen benutzen. Da Bessels Zeitgenossen natürlich die weiteren Reduktionen auf der Basis der damaligen Konstanten angestellt haben, und da diese Resultate manchmal auch später benutzt wurden, beleuchten wir im nächsten Abschnitt deren kritische Punkte. Im letzten Abschnitt folgt dann die Beschreibung unseres Vorgehens.

3.1 Die Wirkung der Refraktion

Bessel und seine Mitarbeiter mussten die gemessenen Zenitdistanzen des Polarsterns zunächst wegen des irdischen Effekts der Refraktion verbessern. Der hängt in erster Linie von der Zenitdistanz selbst ab und beträgt bei derjenigen des Polarsterns in Königsberg ($z \approx 37^\circ$) ungefähr $41''$.

Während die hauptsächlichliche Abhängigkeit des Refraktionswinkels von der Zenitdistanz z $R_0(z) = R(z, p_0, T_0)$ sich für mittlere Werte p_0, T_0 von Druck p und absoluter Temperatur T durch die mehr oder weniger große Komplexität der zugrunde gelegten Atmosphärenmodelle unterscheidet, wird die Abhängigkeit von p und T schon von Bessel und heute noch proportional zu p/T dargestellt:

$$R(z, p, T) = R_0(z, p_0, T_0)(p/T). \quad (1a)$$

Entwickeln wir $R(z, p, T)$ um die Zenitdistanz z_N des nördlichen Himmelspols und die Mittelwerte p_0, T_0 in eine Taylor-Reihe, ergibt sich

$$R(z, p, T) \approx R_0(z_N) + \frac{dR_0}{dz} \Delta z + R_0(z_N) \frac{\Delta p}{p_0} - R_0(z_N) \frac{\Delta T}{T_0}. \quad (1b)$$

Für Bessels Mittelwerte $p_0 = 751.5$ mmHg und $T_0 = 282.5$ K (bzw. $+9.3$ Celsius) folgt

$$R(z, p, T) \approx 40.''9 + (1.''51 / \text{Grad}) \Delta z + (0.''0540 / \text{mmHg}) \Delta p - (0.''1448 / ^\circ\text{K}) \Delta T. \quad (1c)$$

Die Größen Δz , Δp , ΔT sind zunächst die fehlerfreien Differenzen zu den Mittelwerten.

Betrachten wir nun die Terme in Gl. (1b) hinsichtlich ihres Potenzials, systematische Fehler in unserer Auswertung zu erzeugen.

Ein Fehler in $R_0(z_N)$ oder in $\frac{dR_0}{dz}$ würde nur einen konstanten Fehler in den Zenitdistanzen erzeugen und darum die Breite um einen konstanten Betrag verfälschen. Das ist für die Suche nach Variationen unschädlich. Der Druck hat keinen ausgeprägten Tages- oder Jahresgang, hingegen sehr wohl die Temperatur. In Kombination mit einem Fehler $F(R_0)$ in $R_0(z_N)$ wird der letzte Term in Gl. (1b) zu einem Fehler in der Zenitdistanz von $-F(R_0) \Delta T / T_0$ führen. Dieser Fehler kann sich in folgender Weise systematisch auswirken: Die Beobachtungen häufen sich im Frühjahr und Herbst. Im Frühjahr finden die oberen Kulminationen des Polarsterns ganz grob um 13^h und die unteren um 1^h statt, also zur Zeit der täglichen Temperaturextrema – jedenfalls für beobachtungsg geeignete Tage mit »offenem« Himmel. Im Herbst ist es umgekehrt. Solange in die Mittelwerte gleichviele obere und untere Kulminationen eingehen, gleichen sich die täglichen Temperaturschwankungen einigermaßen aus, d.h. in einem Mittelwert aus OC und UC ist nur noch eine Art Temperatur-Tagesmittel (Mittel der Extrema) enthalten. Die Voraussetzung ist in etwa erfüllt: es gibt insgesamt 124 UC- und 128 OC-Beobachtungen (hierin sind die Messungen ohne und mit Reflexion – siehe weiter unten – noch separat gezählt). Die 66 Frühjahrswerte gliedern sich in 33 OC und 33 UC, die 60 Herbstwerte in 31 OC und 29 UC.

Im Vergleich von Frühjahrs- und Herbstmittelwerten würde dann nur noch der Unterschied ΔT zwischen den Jahreszeiten wirksam werden. Nach Panzram (1982) liegen die mittleren Minimaltemperaturen in Königsberg im September 2° höher als im Mai, während die Maxima gleich sind. Mit einem recht großen Fehler der Bessel'schen Refraktion $\Delta R_0 = 1''$ wird die kombinierte Wirkung auf die Zenitdistanzen unter $0.''01$ betragen, also harmlos sein. Das gleiche erhoffen wir uns auch für einen bisher nicht erwähnten Einfluss auf die Refraktion, nämlich den der Luftfeuchtigkeit. Nicht nur Bessel, sondern auch Spätere haben ihn bis ins 20. Jahrhundert außer Acht gelassen. Unterschiede von 20% in der relativen Luftfeuchtigkeit führen bei Temperaturen von ca. 10° bis 20° in der Zenitdistanz des Polarsterns zu Differenzen von einigen $0.''01$. Das ist zwar nicht ganz belanglos, aber bei dem nur 7 km von der See entfernten Königsberg dürften systematische Unterschiede der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen Frühjahr und Herbst (darauf kommt es hier an)

doch wesentlich kleiner sein. Solange sich die Refraktion an das Gesetz (1) hält und die Temperaturverhältnisse in den Grenzen unserer Abschätzungen liegen, können wir also erwarten, dass die Refraktion die Bessel'schen Resultate nicht nennenswert verfälscht.

3.2 Probleme älterer Reduktionen

Nach der Anbringung der Refraktion geht es um die außerirdischen Einflüsse auf die Deklination: Präzession, Nutation und Aberration, also die langfristige und kurzfristige Kreiselbewegung der Erdachse unter dem Einfluss von Mond und Sonne und die speziell-relativistische Änderung durch die Bahnbewegung der Erde um die Sonne (der Arcus der Amplitude von rund $20''$ ist eben das Verhältnis der Bahngeschwindigkeit 30 km/s zur Lichtgeschwindigkeit 300.000 km/s, d.h. 10^{-4}).

Für unsere Bearbeitung sind sie bereits bestmöglich berücksichtigt, insofern wir die Deklinationen des Polarsterns mit modernen Werten der Konstanten bestimmt haben. Ältere Bearbeitungen, z.B. von Bessel, Chandler oder Peters beruhen jedoch auf älteren Werten; es ist daher zu prüfen, wie dies die gefundenen Breitenschwankungen beeinflussen kann. Als Beispiel wählen wir die von Bessel und Peters benutzten Werte.

Tab. 1 gibt die drei Effekte und die sie beschreibenden Konstanten, wie sie Bessel und Mitarbeiter verwendet haben (Bessel 1856, LVII) und moderne Werte (Expl. Suppl. Astr. Almanac 1992).

Tab. 1: Alte und neue Reduktionskonstanten

Effekt	Periode [Jahre]	Von Bessel benutzt (Quelle)	Moderne Werte
Präzession (a)	26000	$50.''2340/\text{Jahr}$ Bessel (1830)	$50.''2561/\text{Jahr}$
Nutation (b)	18.6	$9.''2231$ Peters (1842)	$9.''2025$
Aberration	1	$20.''4451$ Struve (1843)	$20.''4955$

Bemerkungen: (a) Epoche 1843.0, (b) Hauptterm in der Schiefe der Ekliptik

Kurzperiodische Glieder in der Nutation sind wegen ihrer Kleinheit ohne Bedeutung. Die Unterschiede im Hauptterm und in der Präzession können Beiträge zu einer Drift in der Größenordnung $\leq 0.''01/\text{Jahr}$ liefern, können also bei Verfolgung unseres Hauptzwecks (der Bestimmung der Polbewegung in der Zeitskala um ein Jahr) ebenfalls außer Acht gelassen werden. Das gilt nicht für die Aberration wegen Bahnbewegung der Erde (die tägliche Aberration wegen Rotation der Erde hat im Meridian keine Deklinationskomponente). Nach Schaub (1950, S. 109) können wir die Wirkung des Unterschieds

der modernen und alten Aberrationskonstante auf die Deklinationen des Polarsterns so approximieren:

$$\delta(\text{modern}) = \delta(\text{Bessel}) - \Delta\delta, \quad (2)$$

wobei τ die Phase im Jahr ist ($0 \leq \tau < 2\pi$) und

$$\Delta\delta = +0.''05 \cos \tau + 0.''01 \sin \tau. \quad (3)$$

Dazu tritt die Berücksichtigung der sogenannten elliptischen Aberration, die in den älteren Daten und Auswertungen noch enthalten ist.

In die Breiten φ gehen die Deklinationen δ mit verschiedenen Vorzeichen ein, je nachdem, ob eine untere (UC) oder obere Kulmination (OC) beobachtet wurde. Demnach wären die von Bessel angegebenen φ , die wir hier φ'' nennen, wegen Aberration so zu verbessern:

$$\varphi' = \varphi''(\text{Bessel, OC}) + \Delta\delta,$$

$$\varphi' = \varphi''(\text{Bessel, UC}) - \Delta\delta. \quad (4)$$

Wir haben diese Betrachtungen und die Gleichungen (2) bis (4) nur deswegen angestellt bzw. explizit gegeben, um zu demonstrieren, Effekte welcher Natur noch enthalten sind, wenn man Werte verwendet, die früher reduziert worden sind.

3.3 Unser Vorgehen

Für Ort und Eigenbewegung von Polaris benutzen wir die Werte des Fundamentalkatalogs FK5. Polaris ist ein mehrfacher Doppelstern. In unserem Zusammenhang ist eventuell das engste Paar AP von Belang (Wielen et al. 2000), das eine Umlaufzeit von 29.59 Jahren und eine große Halbachse des Photo-Zentrums von 0.''029 hat. Die Hipparcoswerte beziehen sich auf eine mittlere Epoche 1991.31. Fünf volle Umläufe zurück entsprechen einer Epoche 1843.36. Das ist nur wenige Monate früher als unsere mittlere Epoche. Demnach lassen sich unsere Resultate mit den Hipparcoswerten vergleichen, ohne Korrekturen für die Bahnbewegung vornehmen zu müssen. Die von Wielen et al. (2000) angegebenen mittleren Fehler in der Eigenbewegung von Polaris (für beide vorgeschlagene Bahnen) addieren sich in Deklination bei 150 Jahren Rückrechnung zu knapp 0.''1. Bessels eigene Messungen dürften absolut mindestens ebenso unsicher sein. Es ist daher gerechtfertigt, auch eine Korrektur der Deklination in die Analyse einzuführen.

Hinsichtlich der Polbewegung sind wir heute in einer viel besseren Situation als es Bessel 1843 war. Ihre Existenz ist gesichert, ihre Hauptanteile sind bekannt: die nahezu kreisförmige freie Kreiselbewegung (Chandler wobble) von bekannter Periode (um 430 Tage) mit variabler Amplitude (bis 0.''3) und Phase und eine jährliche, durch Anregungen bedingte leicht elliptische Variation

mit recht konstanten Parametern. Wir halten die Werte aus den letzten 100 Jahren eher für repräsentativ als die genaueren aus den letzten Jahrzehnten und entnehmen daher aus dem unteren Teil der Figur 10 von Vondrák (1999) folgende Schätzungen für die jährliche Variation: große Achse 0.''10, kleine Achse 0.''09, Orientierung 30°, Phase 240°. Daraus leiten wir gemäß seinen Gleichungen (4) den jährlichen Effekt in der Breite von Königsberg ab (das 20.°5 östlich von Greenwich liegt):

$$\Delta\varphi = -0.''02 \cos \tau - 0.''09 \sin \tau. \quad (5)$$

Hierin ist τ ein Maß für die Zeit innerhalb eines Jahres ($0 \leq \tau \leq 2\pi$) gerechnet vom Jahresanfang an – während wir t für die Zeit in Jahren ab einer mittleren Epoche von Bessels Beobachtungen verwenden. Wenn wir aus der Übersicht bei Munk and MacDonald (1975, S. 93) die Variante von Walker and Young (1957) zugrunde legen – weil ihre Daten am weitesten in die Vergangenheit reichen – erhalten wir $-0.''035$ und $-0.''083$ als Koeffizienten für Königsberg. Die Unterschiede sind für uns unerheblich.

Wir eliminieren die jährlichen Variationen also a priori aus den Daten und untersuchen die letzteren nur hinsichtlich des größeren, stärker variablen und geophysikalisch interessanteren, weil noch nicht völlig verstandenen Chandler wobble. Unsere Ausgangsdaten sind dann die φ gemäß:

$$\varphi = \varphi'' - \Delta\varphi. \quad (6)$$

Wir halten somit folgenden Ansatz für angemessen: Eine Konstante und eine zeitproportionale Drift sowie eine Amplitude und Phase für die kreisförmig angenommene Chandlerbewegung. Die Periode der Chandlerbewegung soll nach Vondrák (1999) mit 432.25 Tagen vorgegeben werden, denn es ist nicht zu erwarten, dass sie aus Daten einer so kurzen Zeitspanne hinreichend genau ermittelt werden könnte.

Demnach sind die fünf Parameter im folgenden Ansatz zu bestimmen

$$\varphi = a + b t \pm \Delta\delta + c \cos \Omega t + d \sin \Omega t \quad (7)$$

mit $\Omega = 2\pi/432.25$ Tage; Vorzeichen von $\Delta\delta$ nach (4).

Da Bessel Polaris am häufigsten beobachtet hat, und vor allem, da die betreffenden Ergebnisse zur Kalibrierung aller weiteren gedient haben (auch noch bei Przybyllok 1931), hielten wir es für geraten, uns auf die Polaris-Beobachtungen zu beschränken.

Die Verwendung anderer Sterne brächte neue Unbekannte hinein. Sie sind auch nicht in der Vollständigkeit beobachtet worden wie Polaris. Die Messwerte des letzteren gliedern sich in dreifacher Weise:

1. mit dem umlegbaren Kreis in Ost- oder Westrichtung (Abkürzung KO bzw. KW),

2. Polaris in unterer oder oberer Kulmination (UC bzw. OC),
3. Beobachtung des direkten oder reflektierten Sternbildes. Während man den Nadir durch einen fest unter dem Meridiankreis angebrachten Quecksilberhorizont bestimmte (wie bei einem Zenitteleskop), wurde das reflektierte Bild von einem mobilen Quecksilberhorizont erzeugt, dessen Lage entsprechend der Zenitdistanz des Sterns verändert werden konnte (Bessel 1856, S. XIV oben).

Bessel hat großen Wert auf die Nutzung der reflektierten Bilder gelegt; durch die Kombination mit dem direkten Bild (d. h. der gemessenen Zenitdistanzen) sollte insbesondere die Biegung eliminiert werden (Bessel an Humboldt, Bessel 1841, 1843a, b, 1856).

Insgesamt handelt es sich um 252 Polaris-Beobachtungen im Zeitraum 1842–1844, innerhalb von knapp 1000 Tagen oder 2,7 Jahren bzw. 2,4 Chandlerperioden (Bessel 1856, S. LVII ff.).

Wir geben allen Beobachtungen gleiches Gewicht und erhalten für alle oben angegebenen Gruppen weitgehend dieselben Restfehler, nämlich ca. 1."6. Wenn wir dann gemäß Bessels Erwartung, durch Mittelung von direktem und reflektiertem Bild die schlimmsten systematischen Fehler auszulöschen, eben diese Mittelung durchführen und jetzt die 126 Mittel als neue Einzelbeobachtungen benutzen, erhalten wir nach Anpassung an unseren Ansatz (7) nur Restfehler von ca. 0."48, also um einen Faktor 3.3 kleinere (die Unterschiede von KO, KW, UC, OC sind unerheblich). Dies ist ein Faktor 2.35 über den Faktor $\sqrt{2}$ hinaus, der bei Zusammenfassung von zwei Messwerten zu erwarten wäre, die nur mit zufälligen Fehlern behaftet sind! 2.35 ist bei ca. 100 Freiheitsgraden hochsignifikant, mit anderen Worten, der Faktor tritt nicht zufällig auf, sondern kommt durch die Elimination von starken systematischen Fehlern zustande.

Allerdings streuen die Reste in den zwei Jahreszeiten, in denen vor allem beobachtet wurde, nämlich im Frühjahr und im Herbst, unterschiedlich stark, und zwar ist $\sigma_F \approx 0."6$ und $\sigma_H \approx 0."3$. Einen Anhaltspunkt für die Ursache gibt Bessel, wenn er über die starken Nordwinde klagt, die im Frühjahr in Königsberg blasen und den Quecksilberhorizont stören (Bessel 1843, Sp. 22). Wir sehen dennoch von einer entsprechenden Gewichtung ab, weil wir die Gefahr möglicher systematischer Fehler für größer halten als den möglichen Gewinn.

Wir subtrahieren zunächst die oben angegebene jährliche Variation der Königsberger Breite von den Daten. Danach führen die 126 Einzelbeobachtungen zu folgender Lösung für unsere Parameter (Tab. 2).

In Abb. 3 wurden die Beobachtungen saisonweise zusammengefasst. Die Ordinate zeigt die Streuung des Mittels, während in der Abszisse die Streuung der einzelnen Daten eingetragen wurde, um den Zeitbereich zu charakterisieren, aus dem die Daten stammen.

Der Vergleich mit anderen historischen Daten wird durch die Angaben in Tab. 3 erleichtert.

Tab. 2: Die Parameter der besten Anpassung (die Zeit wurde gerechnet ab $t_0 = \text{JD } 2394433 = 21. \text{ August } 1843$)

Mittelwert der Breite	$a = 54^{\circ}42'50."69 \pm 0."03$
Jährliche Drift	$b = -0."16 \pm 0."03/\text{Jahr}$
Deklinations-Korrektur	$\Delta\delta = +0."59 \pm 0."03$
Chandler wobble	Amplitude $0."15 \pm 0."04$ Phase bzgl. t_0 $265^{\circ} \pm 16^{\circ}$
Reststreuung	$\sigma = \pm 0."30$

Tab. 3: Datum des Breitenmaximums an verschiedenen Orten

Die Phase des Chandler wobble entspricht einem Maximum der Breite		
am Ort	J. D.	zur Zeit Gregorianisch
Königsberg ($\lambda = 20.5^{\circ}$ ö.L.)	$239\,4319 \pm 19$	29. April 1843
und bei Kreisform des wobble in		
St. Petersburg-Pulkovo ($\lambda = 30.5^{\circ}$ ö.L.)	2394 307	17. April 1843
Paris ($\lambda = 2.4^{\circ}$ ö.L.)	341	21. Mai
Greenwich ($\lambda = 0^{\circ}$)	344	24. Mai
Washington ($\lambda = 76.3^{\circ}$ w. L.)	435	23. August

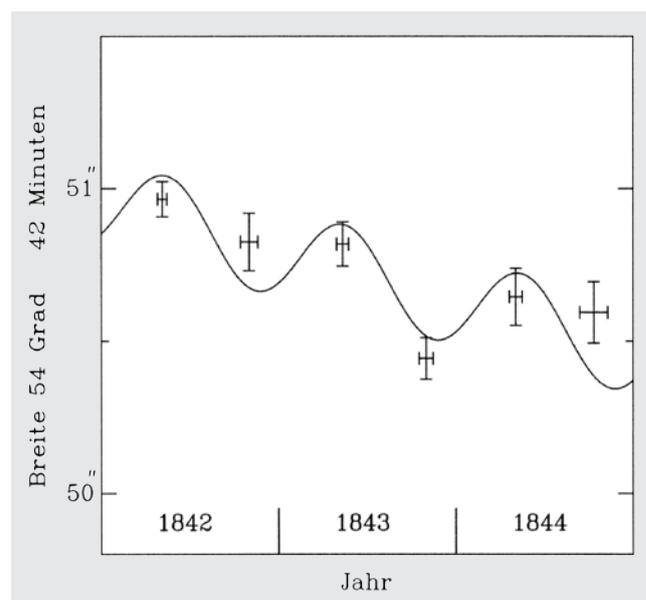


Abb. 3: Gemittelte Beobachtungen und ihre Darstellung

4 Vergleiche und Schlussfolgerungen

Bei vorgegebener jährlicher Variation lässt sich also aus den Bessel'schen Daten eine klare Information für die damalige Größe und Lage des Chandler wobble gewinnen. Wie sicher sie ist, folgt weniger aus den formalen Fehlern der Ausgleichung als aus zusätzlichen Betrachtungen und Vergleichen mit den Resultaten anderer Autoren.

Wenn wir die Resultate zunächst in wissenschaftshistorischer Hinsicht bewerten, so lässt sich das Bessel von Przybyllok verliehene Attribut des Entdeckers der Polbewegung nicht halten, jedenfalls nicht unterstützen: Die Änderung von $0.''3$, die Bessel so verdächtig war, dürfte die von uns gefundene Drift mindestens auch enthalten und kann somit nicht sicher als Polbewegung angesprochen werden.

Die Erklärung der Drift bleibt ein Desideratum, ihr Fehlen muss die gefundene kurzperiodische Variation aber nicht entwerten. Auch später hat man als »Kimura-Term« immer wieder langfristige Trends in der Polbewegung gefunden, die nicht wirklich endgültig gedeutet worden sind (Okuda 1969). Sie sind freilich wesentlich kleiner. Die Residuen, die bei der Analyse der Daten des Carlsberg Meridian Circle auf La Palma gegenüber einer einfachen Refraktion auftraten (Carlsberg Meridian Catalogue 1989, siehe Fig. 1 und Text S. VII der Einleitung) liegen in der Größenordnung $0.''1$ und enthalten sogar langfristige Trends derselben Größe.

So signifikant das gefundene $\Delta\delta$ auch ist, so wird es sich kaum näher interpretieren und benutzen lassen, um z. B. die Eigenbewegung zu verbessern. Es kann sich dabei um systematische Differenzen zwischen dem FK5-System und dem bei Bessel implizit zugrunde liegenden System handeln (wenn davon überhaupt gesprochen werden kann). Ein $\Delta\delta = 0.''25$ kann in 150 Jahren durch einen Eigenbewegungszusatz von -1.6 mas/Jahr erzeugt werden und dieser Unterschied entspricht für Polaris schon dem Transfer vom FK5- ins Hipparcos-System.

Bevor wir andere Daten heranziehen, wird man wissen wollen, wie der Vergleich mit Przybyllok (1931) ausfällt, der ja die gleichen Daten benutzt zu haben scheint. Das ist jedoch genau genommen nicht der Fall: er hat einerseits mehr Daten verwendet, nämlich neben dem Polarstern auch andere Sterne, um die Datums-Lücken zu füllen, andererseits weniger Daten vom Polarstern, nämlich nicht die reflektierten Bilder, die er ohne nähere Begründung für ungenauer hält. Wie wir gezeigt haben, sind sie von gleicher Güte wie die direkten Bilder, vor allem aber, die Kombination beider tilgt wesentliche systematische Fehler. Da wir auch wegen der knapp gehaltenen Beschreibung von Przybylloks Bearbeitung nicht sicher sind, diese genau zu verstehen, ist es nicht überraschend, weder eine deutliche Bestätigung für unser Ergebnis noch einen Widerspruch dazu bei ihm zu finden.

An unabhängigen Daten wären zuerst die Beobachtungen von C.A.F. Peters (1845) in Pulkovo zu nennen, deren Rang von Verdun und Beutler (2000) hervorgehoben

wird. Auch Peters beobachtete den Polarstern, allerdings in dem noch kürzeren Intervall 11. März 1842 bis 30. April 1843, und seine Reduktionskonstanten sind dieselben wie bei Bessel (1856). Seine inneren Fehler sind noch kleiner als die Bessel'schen (wobei zu beachten ist, dass er wahrscheinliche Fehler angibt), aber er beobachtet keine reflektierten Bilder und muss die Biegung des Instruments daher als freien Parameter mitbestimmen. Peters hält, wie alle damaligen Forscher, nur die Euler'sche Periode für die freie Kreiselbewegung für möglich und setzt daher Bedingungsgleichungen für deren Amplitude nur mit dieser Periode an. Er erhält eine Amplitude von $0.''079$ mit $0.''017$ wahrscheinlichem Fehler, d. h. mit einem mittlerem Fehler von $0.''025$. Da Peters seine Daten in das Prokrustesbett der Euler'schen Periode gezwängt hat, ist nicht klar, ob diese Amplitude zumindest für seinen kurzen Beobachtungszeitraum als Chandler-Amplitude angesehen werden darf. Trägt man die 18 Mittelwerte (Peters, 1845, Spalte 125 f.) über der Zeit auf, so zeigt sich 1842 ein Maximum im Frühjahr, ein Minimum im Spätsommer, ein Maximum im Spätherbst und 1843 ein Minimum im Frühjahr. Bis auf letzteres ist das ein ähnliches Verhalten wie bei den Bessel'schen Werten (genau genommen würden diese Änderungen, wenn sie vom Chandler wobble stammen, in Königsberg wegen seiner 10° westlicheren Länge etwa zwölf Tage später eintreten). Die Amplituden sind ebenfalls vergleichbar.

Die Beobachtungen von Peters und andere frühe aus Pulkovo sind neuerdings von Miller und Prudnikova (2009) gemeinsam analysiert worden. Ihre Datenbasis umfasst den Zeitraum 1840–1848, also auch den der hier behandelten Bessel'schen Daten. Es werden statistische Filter angewendet; von systematischen Korrekturen ist nicht die Rede. Der Chandler wobble hat nach Fig. 7 (unten) im Frühjahr 1843 seine maximale Auswirkung auf die Breite von Pulkovo, die jährliche Variation ihre minimale – ersteres in Übereinstimmung mit unserem Befund, letzteres mit unserer a priori Annahme.

Die Kleinheit der Chandler-Amplitude im Zeitraum um 1845 trat in allen bisherigen Studien zutage. Solange nicht auch die Phase fassbar ist, kann man dieses Faktum aber nur im Sinne einer oberen Grenze interpretieren. Die hier festgestellte ungefähre Übereinstimmung der Phase ist ein Argument dafür, dass wirklich ein Signal der Größenordnung $0.''1$ gemessen wurde.

Wie schon eingangs betont, ist die Ausweitung der Datenbasis in der Vergangenheit angesichts der Seltenheit niedriger Chandler-Amplituden-Perioden im neueren Material sehr zu wünschen.

Bei der Verfolgung dieses Ziels sollte folgendes bedacht werden:

- A) Weil gerade bei kleinen Chandler-Amplituden diejenige der jährlichen Variation von gleicher Größe wird, muss man letztere unbedingt a priori eliminieren. Es ist eine Verständigung darüber zu erzielen, wie das geschehen soll. Über die hier benutzte Verwendung konstanter Werte hinaus könnte man versuchen, ei-

nen Zusammenhang mit meteorologischen Proxi-Daten für die atmosphärische Zirkulation zu bestimmen und zu benutzen.

- B) Es ist festzustellen, nach welchen Prinzipien die Daten gewonnen worden sind. Zenitalen Beobachtungen ist der Vorrang einzuräumen.

Bessel und seine Zeitgenossen konnten mit Recht hoffen, die Refraktion in der Höhe des Polarsterns genauer als $0''.1$ festzulegen, weil ihren Annahmen damals keine Messungen der Schichtung in der freien Atmosphäre gegenüberstanden. Selbst um 1900 haben ja noch Leipziger Astronomen und unter ihnen der später als Mathematiker brillierende Hausdorff versucht, die Refraktion durch Bodenbeobachtungen mit solcher Genauigkeit zu modellieren, was letzten Endes misslang (Hausdorff 2006).

Von heute aus gesehen, würden wir die relativ großen Rest-Streuungen und die systematischen Probleme mit Bessels Werten am ehesten der Refraktion zuschreiben. Eine Vereinheitlichung, etwa durch Anwendung moderner Tafeln würde nur neue Mittelwerte einbringen, die differenziellen Effekte aber so gut wie gar nicht beeinflussen. Ob auch hier der sicher sehr aufwendige Versuch zur Einbringung großräumiger meteorologischer Daten noch Aussicht auf Verbesserungen hätte, wagen wir nicht zu beurteilen.

Literatur

- Bessel, F. W.: Über den Einfluss der Veränderungen des Erd-Körpers auf die Polhöhen. *Z. für Astronomie* 5, S. 25–30, 1818.
- Bessel, F. W.: Untersuchung des Reichenbach'schen Meridiankreises. Abhandlungen von Friedrich Wilhelm Bessel (hrsg. von R. Engelmann), Leipzig 1878, 2. Band, Teil III. Theorie der Instrumente Nr. 62, hier bes. S. 42 links. Wiederabdruck von: *Astronomische Beobachtungen*, Kgl. Univ.-Sternwarte Königsberg 6. Abt., 1821.
- Bessel, F. W.: *Tabulae Regiomontanae reductionum observationum astronomicarum ab anno 1750 ad annum 1850 computatae*. Königsberg 1830.
- Bessel, F. W.: *Ueber Maass und Gewicht im Allgemeinen*. Schumachers Jahrbuch für 1840, S. 134.
- Bessel, F. W.: Neue Untersuchung der Reductionselemente der Declinationen und Bestimmung der Declinationen der Fundamentalsterne. *Astron. Nachrichten* 422, S. 217–236, 1841.
- Bessel, F. W.: Erste Leistungen eines, auf der Königsberger Sternwarte befindlichen Repsoldischen Meridiankreises. *Astron. Nachrichten* 481, S. 1–16, und 482, S. 17–30, 1843.
- Bessel, F. W.: *Populäre Vorlesungen über wissenschaftliche Gegenstände*. Hrsg. v. H.[einrich] C.[hristian] Schumacher, Hamburg 1848, S. 342.
- Bessel, F. W.: *Beobachtungen an dem Repsoldischen Meridiankreise in den Jahren 1842, 1843 und 1844 [Bessel's letzte Beobachtungen]*. *Astronomische Beobachtungen*, Kgl. Univ.-Sternwarte Königsberg 27. Abt., 1. Teil, 1856.
- Brosche, P.: *Küstner's Observations of 1884–85: the Turning Point in the Empirical Establishment of Polar Motion*. In: *Polar Motion: Historical and Scientific Problems*. ASP Conference Series, Vol. 208 (eds. S. Dick, D. McCarthy and B. Luzum), S. 101–107, 2000.
- Carlsberg Meridian Catalogue La Palma Number 4, Copenhagen University Observatory, Royal Greenwich Observatory, Real Instituto u Observatorio de la Armada en San Fernando, 1989.
- Chandler, S. C.: Variation of latitude from Bessel's and Struve's observations. *Astron. J.* vol. 22 No. 515, S. 89–91, 1902.
- Explanatory Supplement to the *Astronomical Almanac* (ed. P. Kenneth Seidelmann). Mill Valley, California 1992.
- Fedorov, E. P., Korsun, A. A., Mayor, S. P., Pantscheenko, N. I., Tarady, V. K., Yatskiv, Y. S.: *Dvizhenie polyusa Zemli s 1890.0 po 1969.0*. Naukova dumka, Kiev 1972.
- Felber, H. J. (Hrsg.): *Briefwechsel zwischen Alexander von Humboldt und Friedrich Wilhelm Bessel*. Beiträge zur Alexander-von-Humboldt-Forschung. Akademie-Verlag Berlin 1994.
- Franz, J.: *Eduard Luther (Nekrolog)*. *Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft*. 23. Jg., S. 3–8, Leipzig 1888.
- Hausdorff, E.: *Gesammelte Werke Bd. V. Kommentar zu den Arbeiten zur Refraktion*, 4. und 5. Abschnitt, S. 209–211, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2006.
- Humboldt, Alexander von: *Kosmos* 1. Band, Stuttgart und Tübingen bei Cotta. 1845, S. 312 und 472.
- IERS Annual Report 2007, Bericht 3.5, Frankfurt 2009.
- Malkin, Z., Miller, N.: *Chandler wobble: two more phase jumps revealed*. *Earth Planets Space* 62, S. 943, 2010.
- Miller, N. O., Prudnikova, E. Ya.: *Rannie Pulkovskie nabludeniya shiroti (Frühe Pulkovoer Breitenbeobachtungen)*. *Izvestiya Glavnogo Astro-nomicheskoy observatorii v Pulkove* No. 219, vypusk 4, St. Peterburg 2009, S. 229–234.
- Munk, Walter H., MacDonald, Gordon J. F.: *The Rotation of the Earth*. Cambridge 1975.
- Okuda, T.: *Local Non-Polar Variation of Latitude*. *Proc. Japan Acad.* 45, S. 278–283, 1969.
- Panzram, Heinz: *Internationaler Reisewetterführer*. S. 100, Ravensburg 1982.
- Peters, Christian A. F.: *Numerus constans nutationis ex ascensionibus rectis stellae polaris in Specula Dorpatensi A. 1822–38 observatis deductus*, Petropoli 1842.
- Peters, Christian A. F.: *Resultate aus Beobachtungen des Polarsterns am Ertelschen Vertikalkreise der Pulkowaer Sternwarte (Beschluß)*. *Astron. Nachrichten* Bd. 22, No. 512, Spalte 119–128, 1845.
- Przybyllok, Erich: *Polhöhen-Schwankungen*. Vieweg, Braunschweig 1914.
- Przybyllok, Erich: *F. W. Bessel als Entdecker der Polhöhen-Schwankungen*. *Astronomische Nachrichten* Bd. 242, No. 5804, Spalte 365–368, 1931.
- Schaub, Werner: *Vorlesungen über Sphärische Astronomie*, Leipzig 1950.
- Seitz, F.: *Zur Anregung der Chandler-Schwingung*. *zfv* 130, S. 166, 2005.
- Ševalrić, Branislav, M.: *Sur le problème de la variation des latitudes et du mouvement du pôle instantané de rotation à la surface de la terre*. *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* No. 5, 1957.
- Struve, Wilhelm: *Sur le coefficient constant dans l'aberration des étoiles fixes*. *Mem. Petersburg* 1843.
- Verdun, A., Beutler, G.: *Early Observational Evidence of Polar motion*. ASP Conference Series, Vol. 208 (eds. S. Dick, D. McCarthy and B. Luzum), S. 67–81, 2000.
- Verdun, A.: *Wechselwirkung zwischen Theorie und Beobachtung: Beispielen aus der Geschichte der klassischen Positions-Astronomie*. *Orion*, S. 10–22, 3/2002
- Vondrák, J.: *Earth Rotation Parameters 1899.7–1992.0 after reanalysis within the Hipparcos frame*. *Surveys in Geophysics* 20, S. 169–195, 1999.
- Wanach, B.: *Die Polhöhen-Schwankungen*. *Die Naturwissenschaften* 7, S. 451–456, 1819.
- Wielen, R., Jahreiß, H., Dettbarn, C., Lenhardt, H., Schwan, H.: *Polaris: astrometric orbit, position and proper motion*. *Astronomy and Astrophysics* 360, S. 399–410, 2000.

Anschrift der Autoren

Univ.-Prof. Dr. Peter Brosche
 Observatorium Hoher List des Argelander-Instituts für Astronomie der
 Universität Bonn
 54550 Daun
 pbrosche@astro.uni-bonn.de

Dr.-Ing. Helmut Lenhardt
 Astronomisches Rechen-Institut
 Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg
 Mönchhofstraße 12–14, 69120 Heidelberg
 lenhardt@ari.uni-heidelberg.de