

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Band: 60 (2002)
Heft: 310

Artikel: Wechselwirkung zwischen Theorie und Beobachtung : Beispiele aus der Geschichte der klassischen Positions-Astronomie
Autor: Verdun, Andreas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898490>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wechselwirkung zwischen Theorie und Beobachtung:

Beispiele aus der Geschichte der klassischen Positions-Astronomie

ANDREAS VERDUN

Beweise und Beweisen in der Astronomie

Astronomie ist eine *exakte* Wissenschaft, weil sie mit mathematischen Methoden arbeitet und ihre Theorien und Modelle in der Sprache der Geometrie und Analysis formuliert. Sie ist eine physikalische Wissenschaft, die mit ihren Instrumenten den Himmel vermisst und die Strahlung der Himmelskörper analysiert. Die Beobachtung der physischen Welt und die Entdeckung neuer Phänomene und Himmelsobjekte spielen eine zentrale Rolle. Entdeckungen gelten als «*Existenzbeweise*», die bisherige Ansichten untermauern oder neue Tatsachen schaffen. Scheinentdeckungen sind zwar unvermeidbar, aber unproblematisch. *Beweise* gelten als erbracht, wenn Theorie und Beobachtung auf statistisch signifikante Weise in Einklang gebracht werden können.

Komplizierter wird die «*Beweisla-ge*» und das *Beweisen*, wenn mittels Positions-, Helligkeits- oder Zeit-Messungen gewisse Effekte nachgewiesen werden müssen oder wenn (an Stelle des mathematischen Beweises) der *eindeutige Nachweis* eines Phänomens bzw. die *signifikante Detektion* eines Signales des elektromagnetischen Spektrums tritt. Die Signale müssen nämlich als solche erkannt (*identifiziert*) und die Messungen erklärt (*interpretiert*) werden. Das *Identifizieren* erfordert genaue Kenntnisse der Messvorgänge und der Messgrößen. Das *Interpretieren* setzt Theorien und Modelle voraus, um Aussagen über die Qualität der Beobachtungen und der zu Grunde gelegten Theorien machen zu können. Beide Aspekte bedingen einander. *Beweisen* bedeutet *Modellieren der Phänomene durch «Vergleich» von Theorie und Beobachtung*.

Die zu untersuchenden Signale können gegenüber den störenden «*Nebeneffekten*» so schwach sein, dass sie nicht messbar wären, wenn die unerwünschten groben Effekte nicht modelliert würden. Mit genaueren Beobachtungen und/oder mit längeren Beobachtungsreihen können die Modelle verbessert werden. Der «*Preis*» für

die Verbesserung besteht darin, dass die Modelle komplizierter werden können. Verfeinerte Modelle erlauben dafür genauere Voraussagen über die Beobachtungen und die erforderliche Beobachtungs-Genauigkeit sowie schärfere Kriterien für geeignete Beobachtungsmethoden. Durch diesen Prozess können immer schwächere Signale gemessen und nachgewiesen werden. Das *Beweisen* ist somit geprägt durch die *Wechselwirkung* zwischen *Theorie* und *Beobachtung*. An diesem oft komplexen Prozess können verschiedene Faktoren beteiligt sein: mathematische, physikalische, technische, instrumentelle, methodologische, meteorologische, stochastische, psychologische und – bis vor wenigen Jahrhunderten – sogar philosophische und theologische.

Das Zusammenspiel von Theorie und Beobachtung läuft stets nach demselben Schema ab: Aus Beobachtungen astronomischer Phänomene leiten sich Vermutungen, Vorstellungen, mögliche Erklärungen und schliesslich astronomische bzw. physikalische Theorien ab. Auch die «*Störeffekte*», welche die Messungen beeinflussen, müssen in der Theorie berücksichtigt werden. Aus den Theorien lassen sich dann mathematische Modelle formulieren, die Vorausberechnungen (*Prädiktionen*) der Phänomene erlauben. Der Vergleich dieser Voraussagen mit neuen Beobachtungen kann entweder die Richtigkeit der Theorie bestätigen oder Korrekturen gemäss den festgestellten Abweichungen erfordern. Hat sich ein Modell als prinzipiell richtig erwiesen, geht es darum, es zu verbessern, indem die das Modell charakterisierenden Größen (die sog. *Parameter*) mit Hilfe neuer Beobachtungen genauer bestimmt werden. Je genauer und je umfangreicher die Beobachtungen sind, umso genauer können die Parameter mit Hilfe von mathematischen (statistischen) Methoden (sog. *Ausgleichsverfahren*) geschätzt werden. Systematische Abweichungen zwischen den theoretischen Voraussagen und den Beobachtungen weisen auf eine fehlerhafte oder ungenügende Modellierung hin. Nicht selten müssen völlig neue Theorien zur Erklärung der Phäno-

mene entwickelt werden. In fast allen Gebieten der Astronomie stellt diese *Parameterbestimmung* eine zentrale Methode zur Theorienbildung dar.

Obwohl diese Methode erst seit etwa zwei Jahrhunderten mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate statistisch einwandfrei durchgeführt wird, wurde sie im Prinzip schon viel früher angewandt. Massgebend ist die *Genauigkeit* der Beobachtungen sowie die *Länge* des Zeitraums, über den sich die Beobachtungs-Reihen erstrecken. JOHANNES KEPLER (1571-1630) hätte seine Gesetze der Planetenbewegung nie entdecken können, wenn er nicht *genaue* und *lange* Beobachtungsreihen zur Verfügung gehabt hätte. Die von TYCHO BRAHE (1546-1601) noch von blosser Auge durchgeführten Mars-Beobachtungen hatten eine Genauigkeit von 2 Bogenminuten und erstreckten sich über 20 Jahre (was etwa 10 Marsoppositionen entspricht). Diese Genauigkeit zwang KEPLER, die antiken Modelle der Planetenbewegungen aufzugeben und durch *elliptische Bewegungen* zu ersetzen, weil sein auf Kreisbahnen beruhendes Modell trotz Verbesserungen immer noch Abweichungen von den Beobachtungen von bis zu 8 Bogenminuten ergab. Nur wegen dieser winzigen Differenz verwarf KEPLER ein Modell, mit dem die antike Astronomie längst zufrieden gewesen wäre. KEPLERS Ringen um das Verständnis der Planetenbahnen gilt als Paradebeispiel für die Wechselwirkung zwischen Theorie und Beobachtung. Aber es gibt noch andere, ebenso prägnante Beispiele.

Beispiele aus der Geschichte der klassischen Positions-Astronomie

Die Beispiele, die wir im folgenden vorstellen, sind thematisch miteinander verknüpft. Es sind Beispiele aus der Geschichte der klassischen Positions-Astronomie, und es geht um die Messung immer kleinerer Winkel, von knapp einer Bogenminute ($1' = 60$ ster Teil eines Grades) bis hinunter zu Bruchteilen von Bogensekunden. Eine Bogensekunde ($1'' = 60$ ste Teil einer Bogenminute) ist jener Winkel, unter dem der Durchmesser eines Fünf-Franken-Stücks in der Entfernung von 6.4 km erscheint. Winkelmessungen sind deshalb so bedeutend, weil alle *Positionen* von, *Richtungen* zu und *Abstände* zwischen Himmelsobjekten als *Winkel* gemessen und registriert werden. Die Beispiele sollen zeigen, dass die durch sehr kleine Winkel charakterisierten Phänomene nur dank verbesserter Theorien messbar waren, mit denen die groben Effekte modelliert werden konnten.

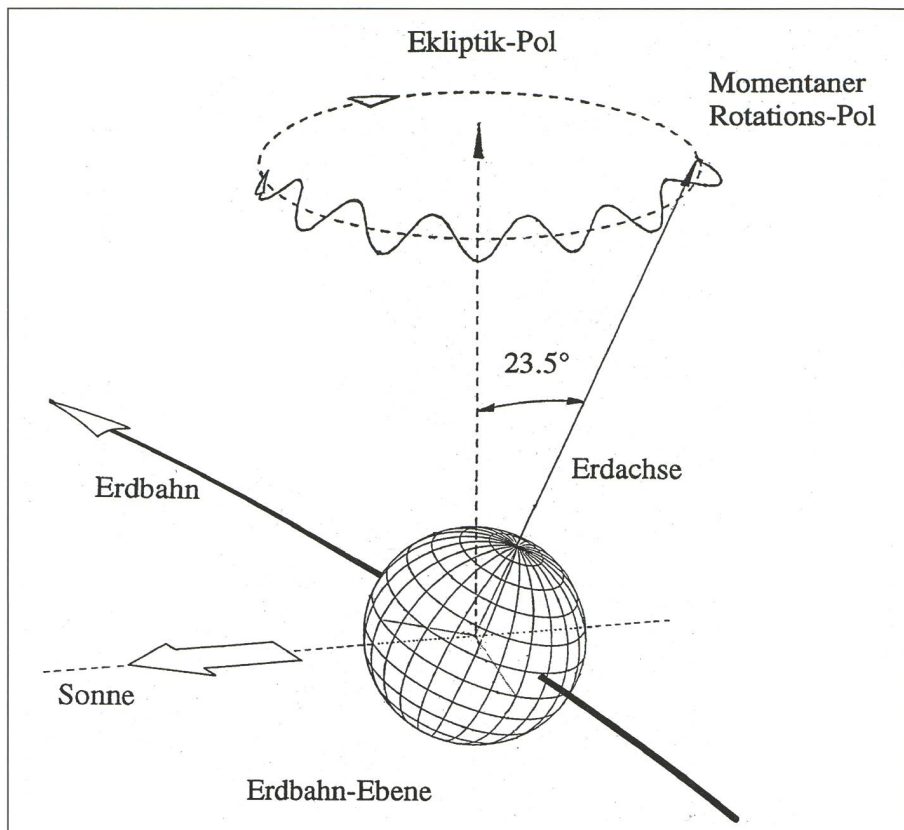
Wir beginnen mit dem Phänomen der Präzession (ca. $50''/\text{Jahr}$) und schildern die Entdeckungsgeschichte der jährlichen Aberration (ca. $20''$), der Nutation (ca. $9''$), der jährlichen Parallaxe (max. ca. $0.8''$) sowie der Polschwankung ($0.01'' - 0.4''$). Bei der Entdeckung dieser Phänomene spielten drei Sterne eine herausragende Rolle: der Polarstern (kurz Polaris genannt), der Stern Gamma im Sternbild des Drachens (γ Draconis) sowie der kleine unscheinbare 61. Stern im Sternbild Schwan (61 Cygni).

Präzession und Nutation

Die *Präzession*, das Fortschreiten der Tag- und Nachtgleichen oder die Drehung des Himmelspols um den sog. Ekliptikpol, war bereits Hipparch (ca. 190-125 vChr) bekannt. Aus dem Vergleich der beobachteten Sternpositionen mit sehr viel älteren Aufzeichnungen fand man eine deutliche Änderung (ein Anwachsen) ihrer ekliptikalen Längen. Aufgrund der grossen Zeitdifferenz konnte man eine Zunahme von etwa $1'$ pro Jahr bestimmen. Dieses jährliche Anwachsen der ekliptikalen Längen nennt man *Präzessionskonstante*. Zu ihrer Bestimmung benötigte es nicht besonders genaue Beobachtungen. Es genügte, dass sie Jahrhunderte auseinanderlagen, was einer sehr langen Messreihe gleichkommt.

Eine korrekte theoretische Begründung der Präzession war erst mit der Entdeckung der universellen Gravitation durch ISAAC NEWTON (1643-1727) möglich. Eine solche versuchte NEWTON in seinem vielzitierten Buch von 1687 zu liefern, den einwandfreien *analytischen Beweis* mit Hilfe des Gravitationsgesetzes erbrachten aber erst JEAN LE ROND D'ALEMBERT (1717-1783) und LEONHARD EULER (1707-1783) um 1749, nur ein Jahr nach Bekanntwerden einer weiteren periodischen Bewegung der Erdachse, der *Nutation*. Auch diesen Effekt konnten diese beiden Theoretiker mit der analytischen Mechanik herleiten.

Nach der Gravitationstheorie muss eine nicht ganz starre Erde nicht exakt kugelförmig, sondern an ihren Polen abgeplattet sein bzw. einen Wulst um ihren Äquator gebildet haben. Die Erdachse ist um etwa 23.5° gegen die Erdbahnebene geneigt. Die Anziehungskräfte von Sonne und Mond üben ein Drehmoment auf die abgeplattete Erde aus und versuchen, die Erdachse senkrecht zur Erdbahnebene aufzurichten. Diesem Zwang widersetzt sie sich, weicht aus und beschreibt eine Kreisbewegung, die sog. *Lunisolar-Präzession*, mit einer Periode von rund 26 000 Jahren und einer Amplitude von etwa 23.5° (Figur 1).



Figur 1: Die Rotationsachse der Erde ist um 23.5° gegen die Erdbahnebene geneigt. Die Anziehungskräfte von Sonne und Mond üben ein Drehmoment auf die abgeplattete Erde aus und versuchen, die Erdachse aufzurichten. Diese weicht aus, indem sie eine Kreis- oder Präzessionsbewegung mit Periode von 26 000 Jahren und Amplitude von 23.5° beschreibt. Zusätzlich verursacht der Mond eine kurzperiodische Schwankung der Erdachse, die sich der Präzession überlagert. Diese Nutation hat eine Periode von 18.6 Jahren und eine Amplitude von etwa $9''$ (in Schiefe).

Die tatsächliche Bewegung des Himmelspols um die Ekliptik ist nicht ganz regelmässig – infolge der sich ständig ändernden Geometrie der Himmelskörper Erde, Sonne und Mond. Der säkularen Präzession ist eine kurzperiodische Schwankung überlagert. Der Hauptteil dieser *Nutation* hängt mit der Mondbewegung zusammen. Die Erdbahnebene ist um 5.5° gegen die Erdbahnebene geneigt. Die Schnittgerade dieser beiden Ebenen (die sog. Knotenlinie) dreht sich einmal in 18.6 Jahren um 360° . Dadurch ändern sich auch die auf die abgeplattete Erde wirkenden Anziehungskräfte des Mondes. Sie erzeugen die der Präzession überlagerte Nutation der Erdachse mit eben dieser Periode von 18.6 Jahren und einer Amplitude von ca. $9''$ (in Schiefe).

Die empirische Entdeckung der Nutation ging aus der Suche nach einem ganz anderen Effekt hervor: aus dem Bemühen, die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne nachzuweisen. So einfach das scheinen mag, die Lösung dieses Problems und die Entdeckung der damit verbundenen Phänomene

war eine instrumentelle und beobachtungstechnische Meisterleistung ersten Ranges, die den besten Astronomen des 17. bis 19. Jhdts. alles abverlangte, sowohl theoretisches Wissen als auch praktisches Geschick im Umgang mit den vorzüglichsten Instrumenten ihrer Zeit.

Erfolgreiche Versuche zum Nachweis der jährlichen Parallaxe

Erste Vermutungen, dass die Erde sich um die Sonne bewegen könnte, reichen bereits in die Antike zurück. Im späten 15. Jhd. äusserte sich REGIOMONTANUS (1436-1476) über eine mögliche Bewegung der Erde. NICOLAUS COPERNICUS (1473-1543) zeigte, dass mit der von ihm postulierten Bewegung der Erde um die Sonne die scheinbaren Schleifenbewegungen der Planeten eine natürliche Erklärung finden. Man glaubte, ein empirischer Beweis für die jährliche Bewegung der Erde wäre erbracht, wenn es gelingen würde nachzuweisen, dass sich diese in den Positionen der Sterne widerspiegelt.

Diese scheinbare Bewegung ist für die meisten Sterne eine Ellipse. Nur Sterne, die *senkrecht* zur Erdbahnebene (der sog. Ekliptik) stehen, beschreiben einen Kreis. Für Sterne, die *in* der Ekliptik liegen, reduziert sich die Ellipse zu einer Strecke, auf der sich diese Sterne hin und her bewegen. Die jährliche Parallaxe oder Fixsternparallaxe ist jener Winkel, unter dem die grosse Halbachse der Erdbahn von einem Stern aus erscheint. Er ist die grosse Halbachse der elliptischen Bewegung des Sterns. Dieser parallaktische Winkel beträgt weniger als eine Bogensekunde.

Die im 16. Jhd. zur Verfügung stehenden Instrumente erlaubten es weder COPERNICUS noch TYCHO BRAHE, Sternpositionen mit einer Genauigkeit unter einer Bogenminute zu messen. Aus der Tatsache, dass keine Parallaxe festgestellt werden konnte, musste man schliessen, dass die Fixsterne entweder sehr weit entfernt sind, oder dass die Erde sich doch nicht bewegt. Die ersten Beobachtungen mit dem Fernrohr brachten zwar Phänomene zum Vorschein, die *für* das Copernicanische System sprachen: z.B. die Phasen der Venus, die mittels der Sonnenflecken bestimmte jahreszeitliche Stellung der Rotationsachse der Sonne sowie die Jupitermonde als kleines Abbild des Planetensystems. «Beweisen» konnte man die Bewegung der Erde *damit* aber nicht.

Obwohl man im 17. Jhd. wusste, dass die Parallaxe sehr klein sein musste, gab es Bestrebungen, diese nachzuweisen. Insbesondere wollte man die Behauptung der Gegner des Copernica-

nischen Systems widerlegen, dass die Unmöglichkeit eines Nachweises *für* eine ruhende Erde spreche. Das heliozentrische System hatte sich zwar schon aus anderen Gründen mittlerweile durchgesetzt, für viele Befürworter war die vermeintlich unbeobachtbare Parallaxe dennoch unbefriedigend. Einer von ihnen war ROBERT HOOKE (1635-1703).

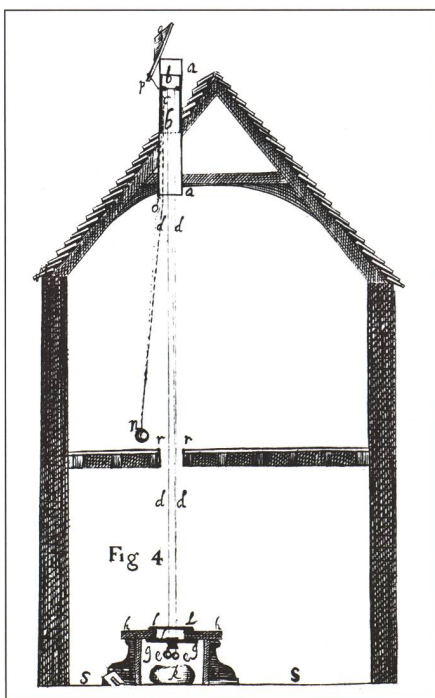
HOOKE konstruierte 1669 ein neues Teleskop, mit dem er Beobachtungen von bisher unerreichter Genauigkeit durchführen wollte. Er errichtete es in seinen Räumlichkeiten einzig und allein zum Zweck der Messung der jährlichen Parallaxe *eines* geeigneten Sterns. Die Beobachtungsmethode war ihrerseits eine Neuheit. Um das Problem der atmosphärischen Refraktion umgehen zu können, wählte HOOKE den Stern γ Draconis. Dieser kulminiert einmal täglich fast genau im Zenit von HOOKES Beobachtungsort. Bei einer Zenitdistanz von wenigen Bogenminuten glaubte HOOKE, die Refraktion vernachlässigen zu können. Er musste aber unbedingt verhindern, dass sich das Instrument unter dem Eigengewicht durchbog oder dass sich seine exakte Position durch tägliche und jahreszeitliche Temperatur- und Feuchtigkeits-Schwankungen veränderte. Das hätte Scheinbewegungen mit jährlicher Periode in den Positionen des Sterns verursacht. Die Schwierigkeiten hoffte er umgehen zu können, indem er die Richtung zum Stern relativ zu einer gut realisierbaren Lotrichtung mass. HOOKES Messvorrichtung war *genial*, seine Messmethode *äusserst einfach*, sein Resultat *miserabel*. Warum? Betrachten wir zuerst sein Instrument und dann seine Beobachtungen.

Ein Objektiv (Figur 2) von 36 Fuss Brennweite befindet sich in einem inneren Tubus, der sich in einem äusseren vertikal bewegen lässt, wodurch fokussiert werden kann. Der äussere Tubus ist fest am Hausdach montiert und lässt sich mit einer Klappe verschliessen. Das Objektiv wird durch eine Metallplatte gefasst, an der zwei etwa 36 Fuss lange Lote befestigt sind. Diese Lote hängen frei durch ein Loch im Fussboden des ersten Obergeschosses in eine Beobachtungs-Kabine des Erdgeschosses hinein. In dieser metallenen Kabine befindet

sich das Okular des Teleskopes sowie ein Mikrometer, das sich durch die Schwere der Lote automatisch in eine Lage stellt, die als Nullmarke der Positionsmessungen dient. Die Zenitdistanz von γ Draconis wird in dem Moment gemessen, wenn dieser Stern den Ortsmeridian durchquert. Dann wird die horizontale Verschiebung am Mikrometer abgelesen. Aus dieser Grösse und der Distanz zwischen Objektiv und Okular ergibt sich der Winkel zwischen der Vertikalen und dem Stern und somit die Zenitdistanz zum Zeitpunkt des Meridiandurchganges. Da es nur auf die Änderung dieses Winkels zu verschiedenen Epochen ankommt, spielt die Achsenverschiebung zwischen Okular und Objektiv keine Rolle. Wichtig ist nur, dass sich die *Lage* des Objektivs und des Okulars bezüglich der Lotaufhängungen im Laufe der Zeit nicht ändert, was ohne Zweifel sehr gut erfüllt ist – wie HOOKE meinte.

HOOKE beobachtete am 6. und 9. Juli, am 6. August sowie am 21. Oktober 1669 (alten Stils), dann musste er seine Messungen abbrechen, teils wegen der Witterung, teils aus gesundheitlichen Gründen und schliesslich, weil ihm auf all dies noch sein Okular zerbrach. Am 9. Juli beobachtete er dieselbe Zenitdistanz wie am 6. Juli. Am 6. August mass er eine um 6'' kleinere Zenitdistanz als am 6. Juli, und am 21. Oktober fand er sie sogar 22'' bis 24'' kleiner als am 6. Juli. Er glaubte, aus diesen vier Beobachtungen eine jährliche (Doppel-) Parallaxe von 27'' bis 30'' gefunden und damit das Copernicanische System bewiesen zu haben. Unnötig zu sagen, dass er mit derart wenigen Beobachtungen seine Zeitgenossen von seinem Resultat, das er in seinem *Attempt to Prove the Motion of the Earth* 1674 publizierte, nicht überzeugen konnte.

Was HOOKE nicht wissen konnte, war die zum Nachweis der jährlichen Parallaxe erforderliche Messgenauigkeit. Bei einer Brennweite von etwa 10 Metern und einer horizontalen Positionsgenauigkeit des Okulars von nur einem Millimeter beträgt der Messfehler bereits etwa 20''. HOOKE ging von einer realisierbaren Genauigkeit von wenigen Bogensekunden aus. Berechnet man unter Berücksichtigung aller heute bekannten Effekte die Zenitdistanzen von γ Draconis für die Beobachtungszeiten von HOOKE, findet man, dass sie für den 6. August um 7'' und für den 21. Oktober um 5'' grösser waren gegenüber jener vom 6. Juli. Ein Vergleich mit HOOKES Beobachtungen zeigt, dass zwischen seiner ersten und seiner letzten Messung ein relativer Fehler von 28'' besteht. Dieser erstaunlich grosse Fehler kann nur da-



Figur 2: HOOKES 36 Fuss langes Zenitteleskop. Im Dach befindet sich das vertikal verschiebbare Objektiv. In einem Messtisch auf dem Fussboden befinden sich Okular und Mikrometer, die an Loten am Objektiv hängen. Die Lotrichtung des Mikrometers dient als Ausgangsposition der Zenitdistanzmessung.

mit erklärt werden, dass eine Veränderung in seinem Instrument stattgefunden haben muss.

HOOKE war nicht der einzige, der sich um einen Nachweis der jährlichen Parallaxe bemühte. JEAN DOMINIQUE CASSINI (1625-1712) führte zusammen mit JEAN PICARD (1620-1682) auch Zenitdistanzmessungen zum Polarstern durch. Picard bemerkte in seiner 1680 erschienenen Arbeit, dass er seit 10 Jahren Variationen mit jährlicher Periode in den Positionen von Polaris festgestellt habe. Er konnte sich dieses Phänomen aber nicht erklären.

1692/93 bemerkte OLAUS RÖMER (1644-1710) ebenfalls periodische Positionsänderungen. Die Suche nach der jährlichen Parallaxe mit Hilfe von Deklinationsänderungen erachtete er aber als ungeeignet, weil das Refraktionsgesetz noch nicht genau genug bekannt war. Stattdessen hoffte er, durch Beobachtung der *Differenzen* zwischen den Rektaszensionen zweier Sterne zu verschiedenen Epochen (verteilt über das Jahr) der jährlichen Parallaxe auf die Spur zu kommen. Dazu musste er die Zeiten messen, in denen die Sterne einen bestimmten Meridian durchquerten. RÖMER baute ein Passageinstrument, das er im Fenster seines Hauses in Kopenhagen montierte (Figur 3). Die Durchgangszeiten bestimmte er mit Hilfe einer Pendeluhr, die er direkt neben seinem Instrument ohne Gehäuse aufstellte, damit er ihr Schlagen besser hören konnte. Diese Uhr verglich er von Zeit zu Zeit mit anderen Pendeluhren, die er im gleichen Zimmer aufstellte. Diese liess er aber in ihren Gehäusen, um einen möglichst gleichmässigen Gang zu erhalten. RÖMER konnte als obere Grenze für die Summe der jährlichen Parallaxen von Sirius und α Lyrae einen Wert von $1'$ bis $1.5'$ angeben.

Mit derselben Methode beobachtete PETER HORREBOW (1679-1764) zwischen 1701 und 1704 gleich mit zwei Passageinstrumenten die gleichen Sterne. Aus dem Mittelwert seiner Beobachtungen bestimmte er (unter Berücksichtigung der Präzession) die Summe der beiden Parallaxen in Rektaszension zu 4 Zeitsekunden, was einer Bogenminute entspricht und somit das Resultat von Rö-

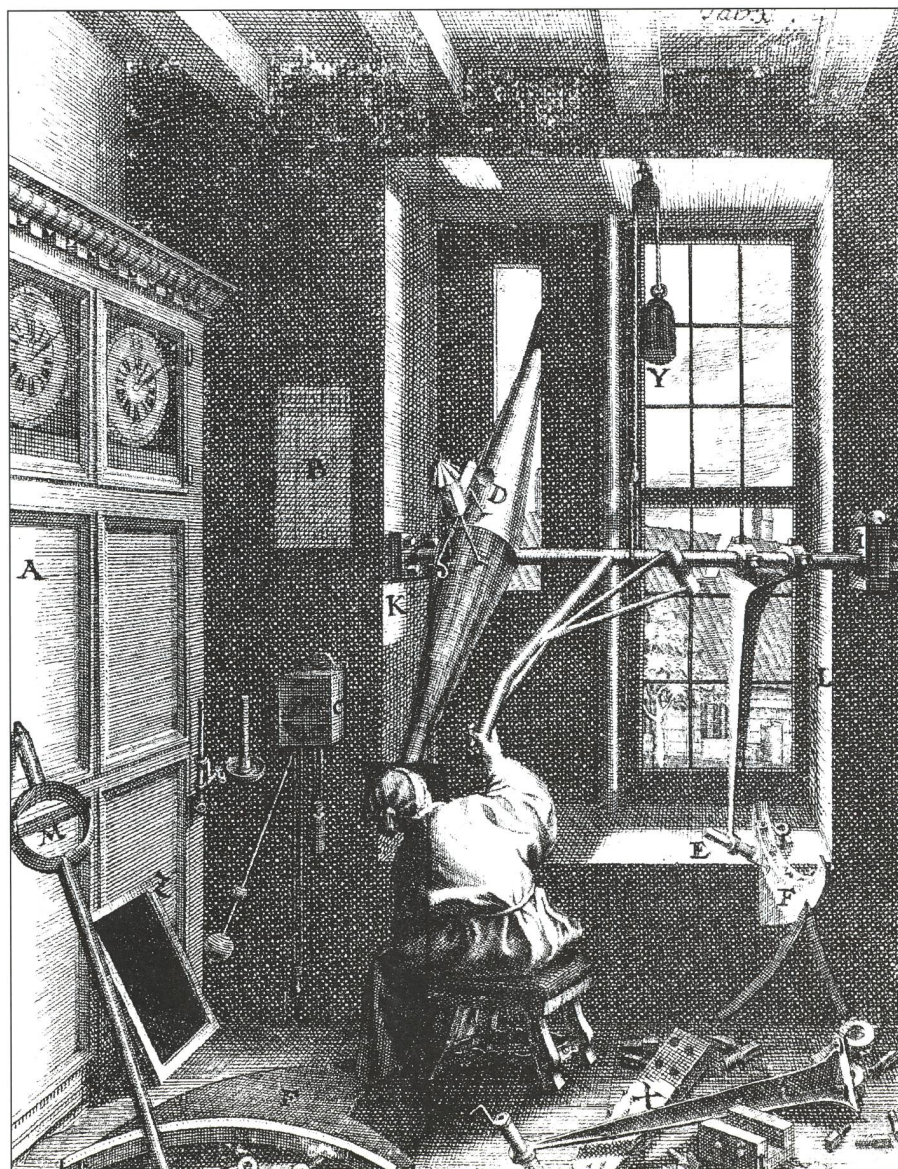
mer zu bestätigen schien. HORREBOW veröffentlichte den vermeintlich gefundenen Nachweis der jährlichen Parallaxe im Jahre 1727 in seiner Dissertation mit dem Titel *Copernicus triumphans*. Eine moderne Reduktion seiner Beobachtungen zeigt jedoch, dass zum Nachweis der Parallaxe nicht ein Zeitunterschied von 4 Sekunden, sondern von 0.1 Sekunden nötig gewesen wäre. Der Haupt-Fehler ist im wesentlichen auf den ungleichmässigen Gang der Uhren zurückzuführen, der stark von den tages- und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen beeinflusst wurde.

In der Folge scheiterten zahlreiche weitere Versuche zur Messung der jährlichen Parallaxe. Die Hauptprobleme bei den bislang angewandten Beobachtungsmethoden waren die Fehler der Instrumente und Uhren (vor allem aufgrund der täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen) sowie die immer noch ungenügend entwickelte

Theorie der atmosphärischen Refraktion (vor allem für Beobachtungen in grossen Zenitdistanzen).

Die Entdeckung der jährlichen Aberration

Ein halbes Jahrhundert nach HOOKES vergeblichen Versuchen nahmen SAMUEL MOLYNEUX (1689-1728) und JAMES BRADLEY (1692-1762) die von HOOKE entwickelte Methode wieder auf. MOLYNEUX liess vom bekannten Instrumentenbauer GEORGE GRAHAM ein Spezial-Teleskop von 24 Fuss Länge und einem Gesichtsfeld von etwa $7'-8'$ anfertigen, das er im Jahre 1725 im Kamin seines Hauses in der Nähe von London vom Dach bis zum Boden einbaute. Abgesehen von wenigen Konstruktionsverbesserungen folgten MOLYNEUX und BRADLEY dem von HOOKE eingeschlagenen Weg: Entwicklung und Bau eines speziellen Teleskopes, das nur für die Beobachtung genau eines einzigen Sternes und nur für genau



Figur 3: RÖMER beobachtete mit einem Passageinstrument D durch das Fenster seines Hauses. Den Zeitpunkt des Durchganges eines Sterns ermittelte er aus den Pendelschlägen einer Uhr C (links), deren Gang er mit weiteren Pendeluhren A verglich. Die Deklination las er am Teilkreis F mit einem Mikroskop E ab (rechts).

einen Zweck dienen sollte, nämlich der Messung der jährlichen Parallaxe. Die konstruktiven Änderungen betrafen zwei wesentliche Punkte: 1. Gegenüber HOOKES Konstruktion konnte das Teleskop von MOLYNEUX ein wenig in nord-südlicher Richtung bewegt werden. Dies hatte den Vorteil, dass man γ Draconis im Gesichtsfeld zentrieren konnte, indem das Teleskop entsprechend geneigt wurde. 2. Der Neigungswinkel wurde mittels eines Lotes an einem Teilkreis abgelesen, woraus direkt die Zenitdistanz folgte. MOLYNEUX begann die Messreihe am 3. Dezember 1725.

Die Zenitdistanzen wurden in jener Richtung durchgeführt, in welcher γ Draconis seine maximale südliche Abweichung aufgrund der jährlichen Parallaxe erreichte. Gemäss Theorie erwarteten MOLYNEUX und BRADLEY, dass diese scheinbare maximale südliche Abweichung Mitte Dezember erreicht wird und der Stern dann für einige Wochen stationär bleibt, sich in der Folge scheinbar nordwärts bewegt, bis er Mitte Juni durch die jährliche Parallaxe scheinbar in eine maximale nördliche Abweichung verschoben wird.

Die Messempfindlichkeit der Teleskop-Montierung sei bemerkenswert gewesen, wird berichtet. Die Anwesenheit von drei vollkommen stillstehenden Menschen habe genug Wärme und Luftbewegung erzeugt, um das Lot merkbar zu stören. Es erstaunt deshalb nicht, dass BRADLEY einige Tage *nachdem* der Stern seine vermeintlich südlichste Position hätte erreicht haben sollen, noch einmal den Stern beobachtete, um die Qualität der Montierung zu testen. Zu seinem Erstaunen fand er den Stern weiter südlich als erwartet. Diese südwärts gerichtete Bewegung hielt noch bis im März 1726 an. Der Stern erreichte schliesslich eine scheinbare Position, die mehr als 20" südlicher gelegen war als jene von Mitte Dezember. Im März hätte er sich aber aufgrund der jährlichen Parallaxe mit maximaler Geschwindigkeit scheinbar in nördlicher Richtung bewegen sollen. Dagegen schien er sich erst jetzt gegen Norden zu bewegen, erreichte dann seine Dezember-Position im Juni und seine nördlichste Position im September. Erst im Dezember 1726 kam er wieder exakt in seine Ausgangslage zurück. Daraus konnten MOLYNEUX und BRADLEY unter anderem schliessen, dass der beobachtete Effekt reell war und nicht auf einen instrumentellen oder Beobachtungsfehler hätte zurückgeführt werden können.

MOLYNEUX und BRADLEY vermuteten als erstes, dass eine jährliche periodische Richtungsänderung der Erdachse

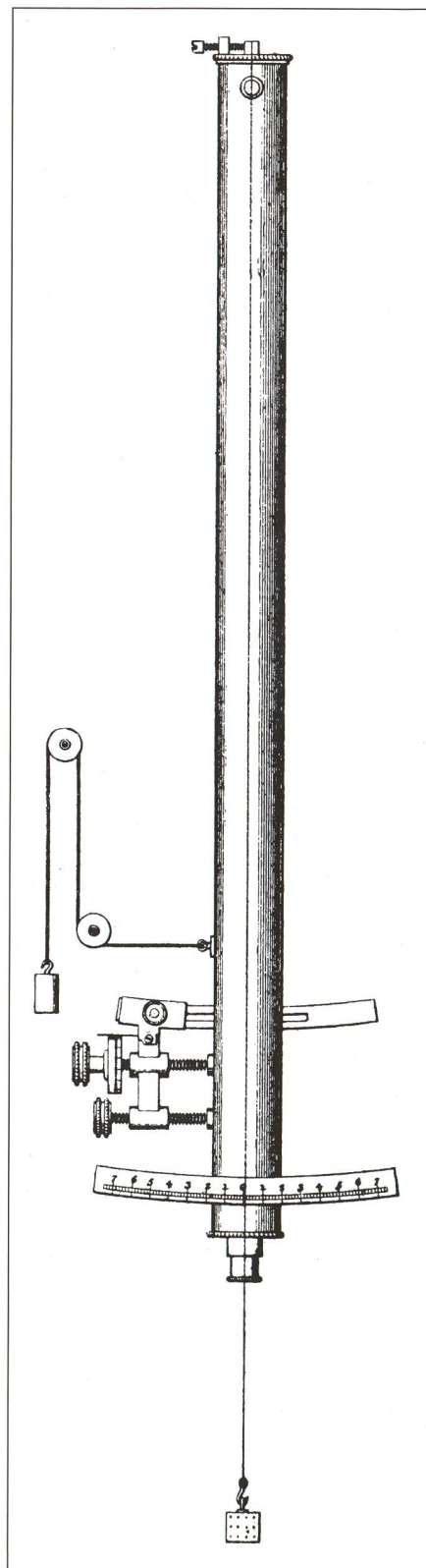
für das Phänomen verantwortlich war. Nach der Theorie wirken die Gravitationskräfte von Sonne und Mond auf die abgeplattete Erde und könnten neben dem bekannten Effekt der Präzession auch Bewegungen der Erdachse mit jährlicher Periode erzeugen. Eine Variation der Lotrichtung würde die gemessenen scheinbaren Positionsänderungen erklären. Diese Hypothese konnten sie jedoch ausschliessen, weil ein anderer Stern auf der Gegenseite des Pols, der ebenfalls durch den Zenit ging, nicht das dieser Hypothese folgende scheinbare Bewegungsmuster zeigte.

Auch eine zweite Hypothese liess sich nicht erhärten. Es wurde vermutet, dass die Erdatmosphäre nicht eine kugelförmige, sondern ebenfalls eine abgeplattete Form haben könnte. Die dadurch erzeugten Refraktions-Anomalien sollten die beobachteten scheinbaren Bewegungen hervorrufen. Doch auch die aus dieser Vermutung folgenden Bewegungsmuster liessen sich nicht bestätigen. Das Phänomen blieb vorerst unerklärt.

Eine dritte Hypothese schien erfolgversprechend zu sein. Sie vermuteten, dass das Phänomen etwas mit dem Abstand der Sonne von den Äquinoktial-Punkten zu tun haben musste. Es lagen aber zu wenig Beobachtungen vor, um diese Hypothese zu stützen. Zudem wurde MOLYNEUX zum Lord der Admiralität nominiert und hatte für weitere Nachforschungen keine Zeit mehr. BRADLEY musste die Sache also alleine weiterverfolgen.

Das dringendste Problem war die sichere Bestimmung der scheinbaren Bewegungsmuster möglichst vieler zenitnaher Sterne. Für diese Aufgabe benötigte BRADLEY ein Teleskop mit grösserem Gesichtsfeld. Er liess bei Graham ein neues Instrument anfertigen (Figur 4). Es wurde am 19. August 1727 im Hause seines Onkels in der Nähe von London installiert, das eine Ende des Teleskopes im Dach, das andere im Kohlenkeller. Das Eisenrohr wurde an zwei von Ost nach West gerichteten Zapfen aufgehängt. Das Objektiv befand sich nahe der Zapfen, durch deren

Mitte ein Lot über einen Teilkreis am unteren Ende des Rohres hängt. Das Rohr wurde mit einer Schnur mit Rolle und Gewicht gegen zwei parallel stehende Schrauben gehalten, von denen die eine als Mikrometerschraube mit Teilkopf versehen war. BRADLEY war mit seinem Instrument in der Lage, nicht weniger als 200 zenitnahe Sterne zu beobachten.



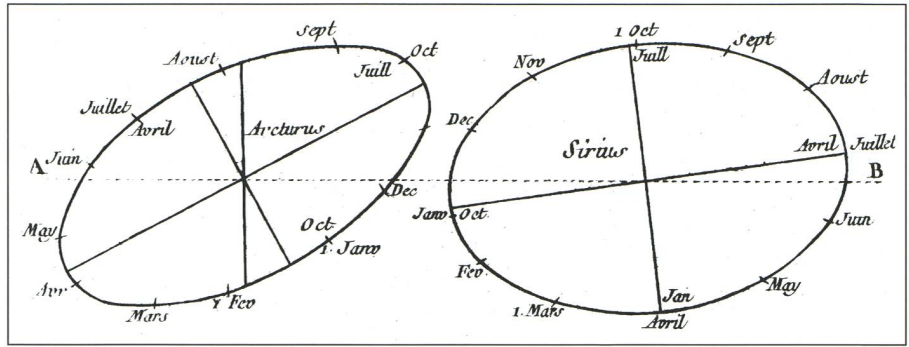
Figur 4: Der 12 Fuss lange Zenitsektor von BRADLEY hatte ein Gesichtsfeld von 12.5°. Er war am oberen Ende an zwei Bolzen in Ost-West-Richtung aufgehängt. Die Zenitdistanzen wurden mit Mikrometerschrauben eingestellt und bezüglich der Lotrichtung am Teilkreis gemessen.

Von diesen Sternen waren etwa ein Dutzend genügend hell, dass er sie auch tagsüber beobachten konnte. Die Genauigkeit der gemessenen Zenitdistanzen betrug weniger als 1".

Bis Anfang 1728 waren ihm die jahreszeitlichen Bewegungsmuster dieser Sterne völlig klar (Figur 5): sie erreichten ihre extremalen Abweichungen, wenn ihr Zenitdurchgang jeweils morgens und abends um 6 Uhr erfolgte, sie bewegten sich südwärts, wenn ihr Zenitdurchgang am Mittag, und nordwärts, wenn dieser um Mitternacht erfolgte. Dies korrespondierte mit den Jahreszeiten. Insbesondere bemerkte er, dass die maximale Abweichung eines Sterns sich mit dem Sinus seiner ekliptikalen Breite veränderte. Es war ein Effekt mit jährlicher Periode und konstanter Amplitude, gleich für alle Sterne, ob schwach oder hell, nur mit dem einzigen Unterschied, dass die Nord-Süd-gerichtete Amplitude von der Breite des Sternes abhing. Für Sterne in der Ekliptikebene verschwand diese Amplitude. Dies hätte genau dem Phänomen entsprochen, das durch die Theorie der jährlichen Parallaxe eigentlich hätte erwartet werden können.

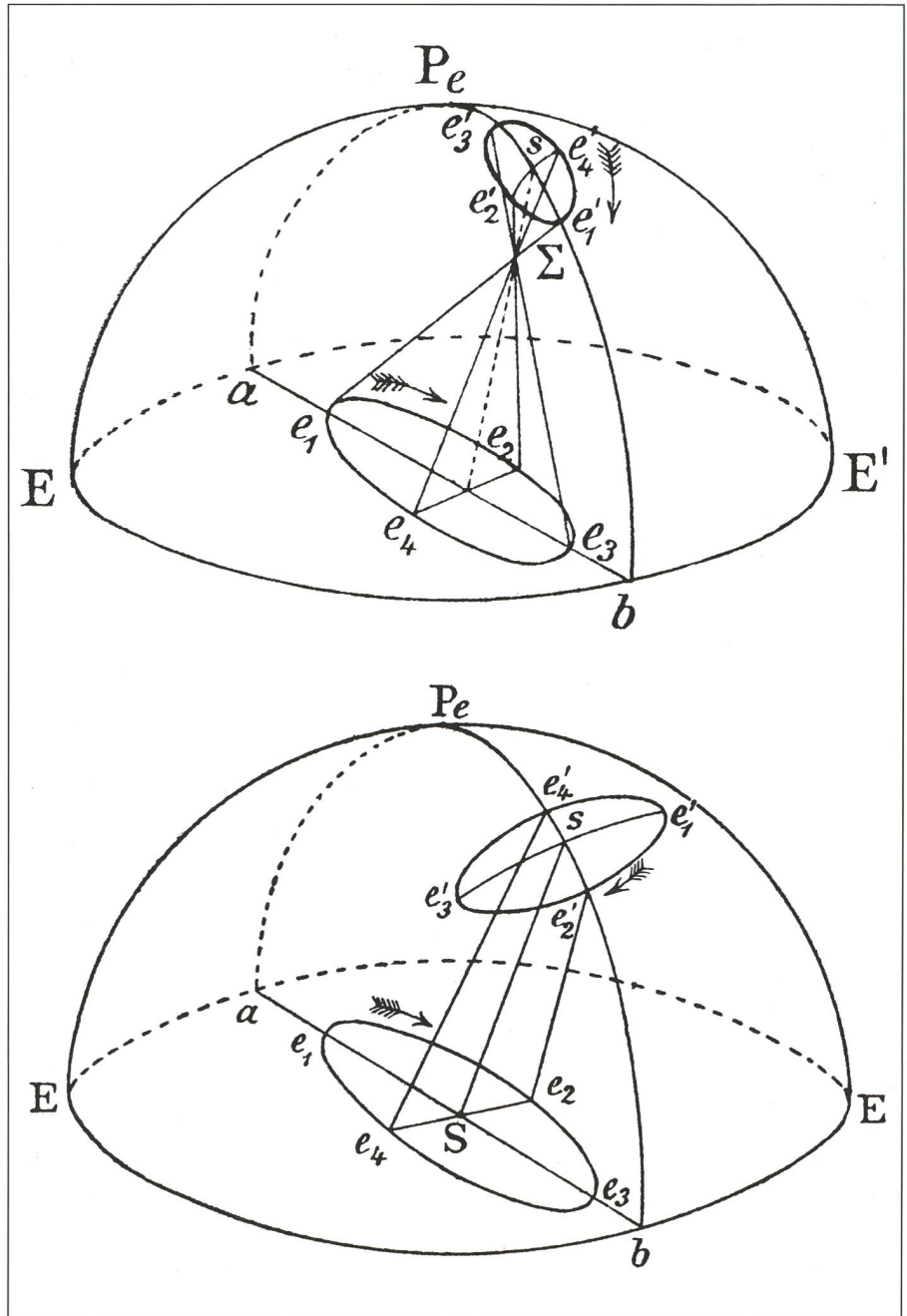
Zwei Merkwürdigkeiten mussten ihm an seinen Beobachtungen aufgefallen sein, die gegen eine jährliche Parallaxe als Ursache des Phänomens sprachen (Figur 6). 1. Die scheinbaren Abweichungen «vorauszuweichen» und gegenüber der vermeintlichen jährlichen Parallaxe mit einer «Phasenverschiebung» von 90° zu verlaufen, und 2. alle Sterne zeigten dieselbe (unerwartet grosse) Amplitude von etwa 20". Wäre dieser Effekt durch die jährliche Parallaxe hervorgerufen, hätte dies bedeutet, dass alle Sterne etwa gleich weit von der Erde entfernt wären. Dies war jedoch auszuschliessen, denn zu BRADLEYS Zeit nahm man an, dass alle Sterne etwa gleiche absolute Helligkeit besitzen und dass ihre unterschiedliche scheinbare Helligkeit lediglich von ihrer unterschiedlichen Entfernung von der Erde herrührt.

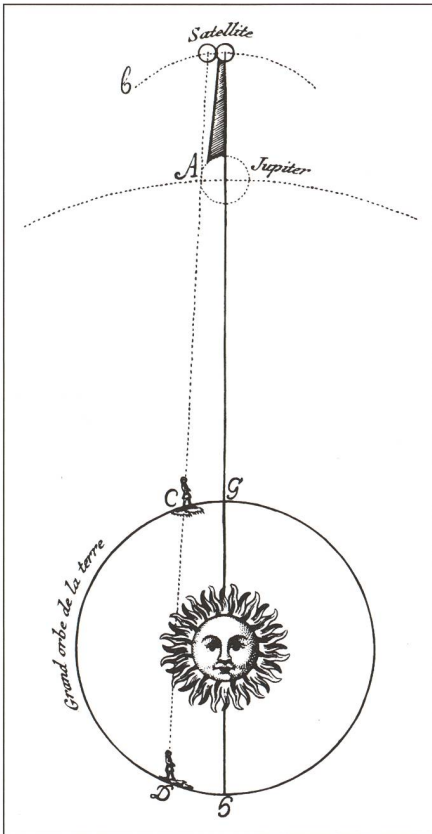
Im Sommer 1728 fand BRADLEY die Lösung. Er wusste, dass die Differenz zwischen den extremalen Abweichungen 40" und die Zeit zwischen Maximum und Minimum genau ein halbes Jahr beträgt. In dieser Zeit legt die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne den halben Bahnumfang zurück. RÖMER hatte 1675 anhand der Verfinsterungen der Jupitermonde gezeigt, dass sich das Licht mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet und dass es 16 Minuten benötigt, um die Strecke des Erdbahndurchmessers zurückzulegen (Figur 7). Analog zu den



Figur 5: Die scheinbaren Positionen der Sterne Arktur und Sirius im Laufe der Monate eines Jahres. Die Monatsangaben innerhalb der Ellipsen entsprechen den aus den jährlichen Parallaxen erwarteten Positionen. Die gestrichelte Linie AB verläuft äquator-parallel.

Figur 6: BRADLEYS Befund: Erwartete (theoretische) Parallaxen-Ellipse e_1, e_2, e_3, e_4 , korrespondierend zu den Punkten der Erdbahn e_1, e_2, e_3, e_4 (oben). Beobachtete Ellipse e'_1, e'_2, e'_3, e'_4 (unten) mit konstanter Amplitude von 20" und um 90° «phasenverschoben».





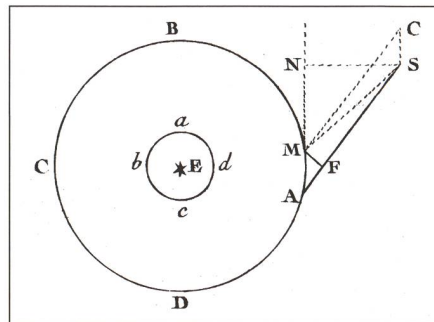
Figur 7: RÖMER bestimmte mit Hilfe der Verfinsterungen (A) von Jupitermonden (b) die Lichtgeschwindigkeit. Befindet sich die Erde auf ihrer Bahn (G) um die Sonne bei C, finden die Verfinsterungen gegenüber der Theorie 8 Minuten zu früh, in D dagegen 8 Minuten zu spät statt.

Überlegungen von RÖMER folgte BRADLEY, dass man jene Sterne in der Ekliptik, die gerade in *Konjunktion* zur Sonne stehen, erst 16 Minuten *später* sieht als jene, die gerade in *Opposition* zu ihr stehen. In der Zeit von 16 Minuten legt die Erde aber eine Strecke auf ihrer Bahn um die Sonne zurück, die *genau* den 40'' entspricht. Damit hatte BRADLEY eine quantitative Erklärung für *ekliptiknahe* Sterne gefunden. Er konnte aber noch nicht erklären, weshalb Sterne am *Ekliptikpol* ebenfalls diese Abweichungen zeigten, obwohl bei ihnen gar keine Differenz in der Ankunftszeit des Sternlichtes während den verschiedenen Jahreszeiten mehr auftreten konnte, da sie ja senkrecht über der Erdbahnebene stehen.

BRADLEY musste also eine geometrische Erklärung für das elliptische bzw. kreisförmige Bewegungsmuster für *ekliptikferne* Sterne finden. Da ihm aufgefallen ist, dass die Abweichungen stets der momentanen Position der Erde auf ihrer Bahn um 90° «voraus-eilen», musste dieser scheinbare Effekt mit der Bewegungsrichtung der Erde zusammen-

hängen. Dies führte ihn Mitte Dezember 1728 auf die Idee, die *Richtungen* der Geschwindigkeit der Erde mit jener der Lichtgeschwindigkeit so zu kombinieren, wie es das von VARIGNON und NEWTON formulierte Prinzip des Kräfteparallelogrammes vorschrieb. Die Länge der Richtungskomponenten entsprechen der Erd- resp. Lichtgeschwindigkeit (Figur 8).

Mit dieser Hypothese berechnete er die scheinbaren Positionen von γ Draconis als Funktion der Zeit und verglich diese mit 15 durch das Jahr verteilten Beobachtungen. Er fand, dass die rech-



Figur 8: BRADLEYS Erklärung der Aberration. Die Positionen A, B, C, D der Erde entsprechen zeitlich den beobachteten Abweichungen a, b, c, d des Sternes E, der sich senkrecht über der Erdbahnebene befindet. Sie scheinen der Erdbewegung «vorauszu-eilen». Die scheinbare Richtung AC von der Erde A zu einem Stern S der ekliptikalen Breite NMS entsteht durch Komposition der Richtung AM der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne und der Richtung SA des Sterns gemäss dem «Kräfte-Parallelogramm». Die Längen der Komponenten sind durch die Erd- und Lichtgeschwindigkeit a priori gegeben.

nerisch bestimmten Positionen nicht mehr als etwa 1.5'' von den beobachteten abwichen. Gleich gute Übereinstimmung fand er auch für andere Sterne. Um ganz sicher zu sein, beobachtete er γ Draconis im Verlaufe eines Jahres noch über 70 mal und verglich diese Positionen mit den theoretischen Werten. Die Differenzen betragen nunmehr höchstens 2'', wofür er Witterungsverhältnisse verantwortlich machte.

Damit hatte BRADLEY nicht nur einen in der Astronomie bisher unbekanntem Effekt, nämlich die jährliche Aberration des Lichtes, entdeckt, sondern zugleich einen ersten wirklichen «Beweis» für die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne gefunden. Insbesondere wurde mit der Entdeckung der Aberration klar,

dass sämtliche bis dahin unternommenen Versuche zum Nachweis der jährlichen Parallaxe *nicht erfolgreich sein konnten*.

Gegen diesen «Beweis» könnte man nun aber einwenden, dass die Bewegung der Erde zur Erklärung des Resultates bereits vorausgesetzt werde und nicht aus der reinen Beobachtung folge. Das Phänomen liesse sich ja vielleicht auch anders interpretieren. Hier zeigt sich der Unterschied der Beweisführung zwischen Mathematik und Astronomie. In der Mathematik wäre ein derartiger, nur plausibler, aber nicht eindeutiger Rückwärtsschluss *nicht* erlaubt. In der Astronomie liegt der Beweis in der Richtigkeit der mit dem Modell berechneten Grösse: in diesem Fall aus der Kombination der Richtung der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne und der Richtung zum Stern, wobei die Längen der Komponenten der Erd- und Lichtgeschwindigkeit entsprechen. Diese beiden Werte konnten schon *vor* der Entdeckung der Aberration aus dem *heliocentrischen* Modell berechnet werden. Die Übereinstimmung der beobachteten mit den aus diesem Modell folgenden gerechneten Stern-Positionen bestätigte die Richtigkeit der Annahme, nämlich dass die Erde sich um die Sonne bewegt.

Die Entdeckung der Nutation

BRADLEY führte seine Beobachtungsreihe bis 1732 fort, wurde dann aber an die Stelle von HALLEY nach Oxford berufen, wo er seine Beobachtungen mit derselben Sorgfalt sofort weiterführte. Dies hatte seinen Grund. Die kleinen Differenzen zwischen den theoretischen und beobachteten Positionen verschwanden nicht, sondern schienen sich im Gegenteil noch auf mehrere Bogensekunden zu vergrössern. Schon Mitte September 1728 stellte er fest, dass die jährlichen Deklinationsänderungen der Sterne in der Nähe des Äquinoktial-Meridians zu gross sind gegenüber den aus der Präzessions- und Aberrations-Theorie folgenden Werten. Es resultierte eine um über 5'' zu grosse Präzessionskonstante. Wiederum konnte BRADLEY instrumentelle Fehler ausschliessen. Um die Ursache für *dieses* Phänomen herauszufinden, beobachtete er wiederum eine grosse Anzahl von Sternen. Diesmal war er in der komfortablen Situation, dass er *einen* wichtigen «Störeffekt» bereits rechnerisch eliminieren konnte, nämlich (neben der Präzession) die von ihm entdeckte jährliche Aberration. Zudem hatte er auch bereits eine Vermutung, worauf diese neuen Diskrepanzen zurückgeführt werden konnten. Bereits gegen 1690 hatte nämlich FLAMSTEED

(1646-1719) erfolglos versucht, eine kleine periodische Bewegung der Rotationsachse der Erde nachzuweisen, deren Existenz aus der Gravitationstheorie gefolgert wurde. Danach musste es neben der langperiodischen Präzession auch noch eine kurzperiodische Schwankung der Erdachse mit wesentlich kleinerer Amplitude geben, die durch den Mond alleine verursacht wird. Es ist just jene Hypothese, die BRADLEY zuerst für die Erklärung der Aberration herangezogen hatte. Das Problem bestand wiederum darin, Periode und Amplitude dieses Effektes zu bestimmen. Falls die Theorie richtig war, musste die erwartete Periode mit der Mondbewegung verknüpft sein. Aus dem Kräfte-Modell liess sich ableiten, dass die Knotendrehung mit einer Periode von 18.6 Jahren eine bedeutende Rolle spielen musste. Um jeden Irrtum auszuschliessen, beobachtete BRADLEY daher geduldig über die Dauer einer vollen Knotenumdrehung von 1727 bis 1747. Aus seinen sehr umfangreichen Beobachtungen konnte er schliesslich neben der Periode auch die Amplituden bestimmen. In einem Brief vom 31. Dezember 1747 teilte er d'ALEMBERT seinen erfolgreichen Nachweis und damit die Entdeckung der Nutation mit. Er publizierte diese Entdeckung im Januar 1748 und regte damit die erwähnten theoretischen Arbeiten von d'ALEMBERT und EULER zur Präzessions- und Nutationstheorie an.

Der Nachweis der jährlichen Parallaxe

Mit der Entdeckung der jährlichen Aberration und der Nutation wurde allmählich klar, dass die eigentlich gesuchte jährliche Parallaxe noch viel kleiner sein musste als bisher angenommen. BRADLEY behauptete, dass die jährlichen Parallaxen der Sterne η Ursae majoris und γ Draconis weniger als eine Bogensekunde betragen müssten. Für letzteren konnte er sogar eine obere Grenze von 0.5" angeben.

Obwohl BRADLEYS Beobachtungsreihen eine erstaunlich hohe Genauigkeit aufwiesen, war es ihm aus drei Gründen unmöglich, mit Sicherheit eine jährliche Parallaxe bestimmen zu können:

1. Die mittlere Zenitdistanz der 24 beobachteten Sterne beträgt etwa 3°. Bei dieser Distanz beträgt die Refraktion bereits über 3" und ändert sich bei einer tages- oder jahreszeitlichen Temperaturschwankung von 20° um 0.3". Mit der damaligen Theorie war BRADLEY noch nicht in der Lage, die Refraktion mit der erforderlichen Genauigkeit zu berücksichtigen.

2. BRADLEY fehlten die theoretischen Grundlagen, mit denen er sowohl die Instrumentenfehler als auch die persönlichen Ablesefehler hätte in Rechnung stellen können.

3. Der wahrscheinlichste Wert einer Messgrösse wurde aus einer grossen Anzahl von (mit Fehlern behafteten) Beobachtungen noch um die Mitte des 18. Jhdts. durch Bildung eines Mittelwertes bestimmt. Eine Fehlertheorie zur statistisch korrekten Auswertung von Beobachtungen fehlte. Sogenannte Bedingungsgleichungen finden sich erstmals in einer Arbeit von EULER aus dem Jahre 1749. In der zweiten Hälfte des 18. Jhdts. wurden die Mittelungsmethoden sukzessive verfeinert, woraus sich schliesslich die noch heute zentrale Methode der kleinsten Quadrate entwickelte.

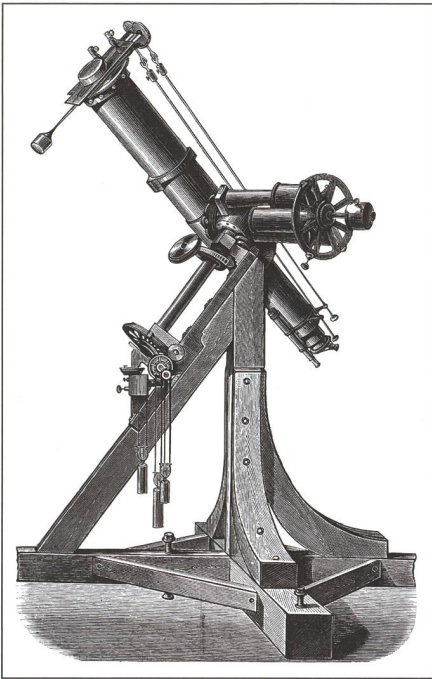
BRADLEY legte mit seinen Entdeckungen die Grundlagen für alle künftigen astrometrischen Messungen. Erst jetzt konnten Richtungsmessungen mit bislang unerreichter Genauigkeit reduziert und somit bessere Sternkataloge erstellt und exaktere Positionen der Himmelskörper als Funktion der Zeit bestimmt werden. Insbesondere erwies sich eine Behauptung von EDMOND HALLEY (1656-1742) aus dem Jahre 1718 als richtig. Dieser glaubte entdeckt zu haben, dass einzelne «Fixsterne» eigene Bewegungen hätten. Erste Bestimmungen dieser sog. *Eigenbewegungen* einer grösseren Anzahl von Sternen gelangen dank BRADLEYS Entdeckungen TOBIAS MAYER (1723-1762), der solche durch Vergleich seiner eigenen Beobachtungen mit denjenigen von RÖMER ermittelte und 1760 in der Schrift *De motu fixarum proprio* publizierte.

Verschiedene andere Versuche zur Entdeckung der jährlichen Parallaxe, insbesondere von NEVIL MASKELYNE (1732-1811), NICOLAS-LOUIS DE LACAILLE (1713-1762), GIUSEPPE CALANDRELLI (1749-1827) und GIUSEPPE PIAZZI (1746-1826) scheiterten dagegen immer noch aus den erwähnten Gründen. Diese Situation sollte noch bis zu Beginn des 19. Jhdts. andauern. Dann erst waren die theoretischen und instrumentellen Voraussetzungen gegeben, die Entdeckung der Eigenbewegungen definitiv zu bestätigen und einen Nachweis der jährlichen Parallaxe zu ermöglichen.

Mit der Entwicklung und dem Bau neuartiger Instrumente, die allein durch ihre Konstruktionsweise die Messfehler erheblich reduzierten, begann ein Wettlauf um den empirischen Nachweis der jährlichen Parallaxe. Wie sich herausstellen sollte, war es nicht nur der Ein-

satz neuer Instrumententypen, mit dem das Rennen entschieden werden konnte, sondern vor allem auch die neuartigen Beobachtungs- und Reduktionsmethoden, die in der ersten Hälfte des 19. Jhdts. stetig verbessert und *standardisiert* wurden. Diese Verbesserungen waren auch dringend nötig, denn je genauer die Winkelmessungen wurden, umso kleinere Effekte machten sich störend bemerkbar. Die von der Zenitdistanz abhängige winzige Durchbiegung des Teleskopes, die elliptische und aplannare Form des Teilkreises sowie die Temperaturabhängigkeit der verschiedenen Instrumententeile mussten daher auch modelliert werden. Insbesondere die Temperatureinflüsse auf die Beobachtungen bereiteten nach wie vor enorme Probleme. Die nach dem Tagesverlauf sich ändernde Sonneneinstrahlung auf Kuppel und Grundmauer des Observatoriums erwärmte die Luft im Beobachtungs-Saal unterschiedlich, was wiederum zu Refraktions-Anomalien führte, welche die Messungen verfälschen konnten. Sogar die Lampen, die zur Beleuchtung jener Stellen des Teilkreises verwendet wurden, an denen mit Mikroskopen abgelesen wurde, vermochten durch ihre Wärmeabstrahlung die Messungen bereits zu beeinflussen. Die mittleren Fehler waren deshalb immer noch etwa gleich gross wie die gesuchte Parallaxe. Viele vermeintliche Nachweise der jährlichen Parallaxe entpuppten sich als Scheineffekte. Mit diesen neuen Problemen hatten vor allem PIAZZI, JOHN BRINKLEY (1763-1835), JOHN POND (1767-1836), BERNHARD VON LINDENAU (1780-1854), DOMINIQUE-FRANÇOIS-JEAN ARAGO (1786-1853), CLAUDE-LOUIS MATHIEU (1783-1885), FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784-1846), FRIEDRICH WILHELM STRUVE (1793-1864) und THOMAS HENDERSON (1798-1844) zu kämpfen. Die drei letztgenannten kamen mit unterschiedlichen Methoden und Instrumenten zwar zu vergleichbar guten, aber immer noch nicht ganz überzeugenden Resultaten.

Der Durchbruch gelang schliesslich BESSEL in den späten 1830er Jahren. Der Einsatz eines sog. *Heliometers* ermöglichte ihm den statistisch einwandfreien Nachweis einer jährlichen Parallaxe am Stern 61 Cygni. Der Erfolg war nicht nur der hervorragenden Qualität des verwendeten Instruments zu verdanken, sondern vor allem der von BESSEL gewählten Beobachtungsmethode sowie dem Studium der Instrumentenfehler und ihrer Reduktion. Auf diesen Gebieten schuf BESSEL mit seiner *Fundamenta astronomiae* von 1818 wahrhaftig das Fundament für die künftige Positionsastronomie, nota bene unter Benutzung von BRADLEYS Beobachtungen!



Figur 9: Das FRAUNHOFERSCHE Heliometer, mit dem BESSEL der Nachweis der jährlichen Parallaxe am Stern 61 Cygni gelang. Es ist ein äquatorial montierter Refraktor, der mit einem Uhrwerk den Sternen nachgeführt werden konnte. Am «Kopf» des Instrumentes befindet sich das geteilte Objektiv, dessen Halblinsen über cardanisch aufgehängte Schrauben gedreht und verschoben werden konnten.

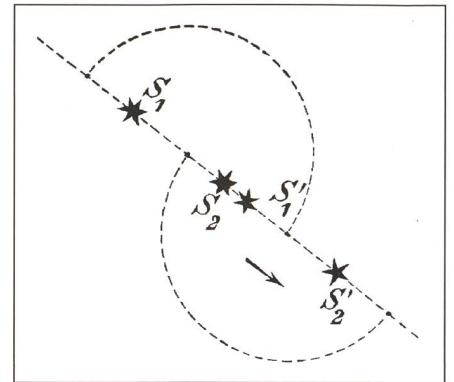
Das neue Instrument wurde von JOSEPH FRAUNHOFER (1787-1826) erbaut (Figur 9). Es war ein äquatorial montierter Refraktor, der mit einem Uhrwerk den Sternen nachgeführt werden konnte. Das Objektiv von 15.8 cm Durchmesser hatte eine Brennweite von 2.6 Metern und bestand aus zwei Hälften. Am Okularende waren zwei cardanisch drehbare Schrauben angebracht. Mit der einen liessen sich die Objektivhälften gegeneinander verschieben, mit der anderen konnte die Verschiebungsrichtung gedreht werden. Die Schraubenköpfe waren mit Teilungen versehen, an denen man die Tausendstel der Umdrehungen ablesen konnte, was 0.05'' entsprach. Der maximal messbare Winkel betrug knapp 2° (Figur 10).

Zur Messung des Winkelabstandes zwischen zwei Sternen musste man das Heliometer in seiner Achse so drehen,

Figur 10: Die Fassung der beiden Halblinsen des Heliometers. Die gegenseitige Verschiebung der Halblinsen erfolgte über eine Mikrometerschraube. Hier die Darstellung eines Heliometers aus dem 18. Jhd.

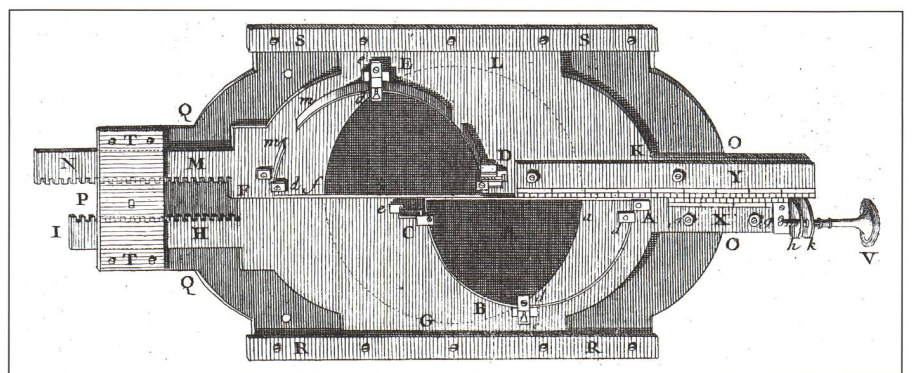
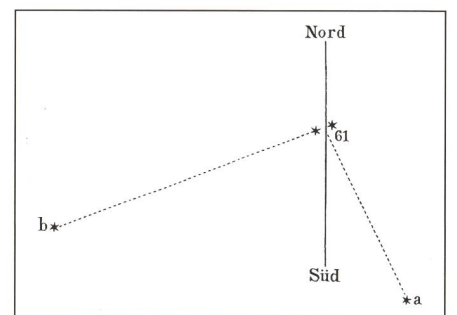
dass die Schnittlinie des Objektivs mit der Verbindungslinie der beiden Sterne zur Deckung kam. Dann wurden die Hälften des Objektivs gegeneinander verschoben, bis sich das Bild des einen Sternes von der einen Halblinse mit dem Bild des anderen Sterns von der anderen Halblinse vereinigte. Aus der Verschiebung der Halblinsen, die am Mikrometer abgelesen wurde, konnte man den gesuchten Winkelabstand bestimmen (Figur 11).

Sofort nach der Installierung des Heliometers untersuchte BESSEL das Instrument peinlichst genau und konnte seine hohe Qualität bestätigen. Im Sommer 1837 begann er mit systematischen Parallaxenmessungen. Der Erfolg war umso wahrscheinlicher, je näher der zu untersuchende Stern wäre. Aus verschiedenen Gründen wählte BESSEL den lichtschwachen Stern 61 Cygni, der mit 5. Grösse gerade noch von blossen Auge gesehen werden kann. Bei der Bearbeitung von BRADLEYS Beobachtungen wurde BESSEL auf die ungewöhnlich grosse Eigenbewegung dieses Sterns von 5.2'' pro Jahr aufmerksam. Dies war ein Indiz für seine Nähe. Zudem war 61 Cygni ein sog. physischer Doppelstern, der sich für die Messungen mit dem Heliometer wegen seines Doppelsterncharakters als besonders geeignet erweisen sollte. Seine Komponenten waren um 1835 etwa 20'' voneinander getrennt. Schliesslich war noch ein dritter Umstand von Bedeutung. In der Nähe von 61 Cygni befinden sich weitere Sterne, die noch innerhalb des Gesichtsfeldes des Heliometers liegen. Wegen ihrer Lichtschwäche wurde angenommen, dass sie viel weiter entfernt sind als 61 Cygni. Ihre Eigenbewegung war somit vernachlässigbar und sie konnten bei der Messung als Referenzsterne dienen. Den Doppelsterncharakter nutzte BESSEL, indem er die Abstände nicht der Komponenten dieses Doppelsterns selbst, sondern ihres Mittelpunktes von den Referenzsternen mass, da er zu Recht annahm, dass man durch eine Ver-



Figur 11: Das Messprinzip des Heliometers. Angedeutet sind die Abbildungen S_1 und S_2 bzw. S'_1 und S'_2 zweier Sterne in beiden Halblinsen. Das Objektiv wird gedreht, bis die Schnittlinie mit der Verbindungslinie der Sterne S_1 und S_2 übereinstimmt. Dann werden die Objektiv-Hälften mit dem Mikrometer gegeneinander verschoben, bis das Bild des einen Sterns S_2 der einen Hälfte mit dem Bild des anderen Sterns S'_1 der zweiten (verschobenen) Hälfte zur Deckung kommt. Die Grösse der Verschiebung ist ein Mass für den Winkelabstand der beiden Sterne.

Figur 12: Die Referenz-Konstellation mit 61 Cygni sowie den Bezugsternen a und b. Diese befanden sich in einem Abstand von 7'42'' resp. 11'45'' vom Mittelpunkt M der beiden Komponenten des Doppelsterns 61 Cygni entfernt. Die Verbindungslinien aM und bM standen beinahe senkrecht aufeinander. Weil aM minimal war, wenn bM maximal war (und umgekehrt), hatte BESSEL eine gut nachprüfbare Korrelation zwischen den Abständen aM und bM.



schiebung der Halblinsen des Objektivs die Bilder der Vergleichssterne mit grösserer Genauigkeit auf diesen Mittelpunkt bringen konnte. BESSEL musste sich lediglich vergewissern, dass 61 Cygni wirklich ein physischer, nicht ein optischer Doppelstern ist. Aus Positionsmessungen der Jahre 1690 bis 1813 konnte er letzteres ausschliessen und berechnete sogar eine Umlaufperiode von 350 Jahren. Die gegenseitige orbitale Verschiebung der Komponenten während der Beobachtungszeit konnte daher vernachlässigt werden.

Als Referenz wählte BESSEL zwei lichtschwache Sternchen von 9. und 10. Grösse, die er mit *a* und *b* bezeichnete und die ca. 11' resp. 7' vom Mittelpunkt *M* von 61 Cygni entfernt waren (Figur 12). Die Verbindungslinien zwischen diesen Sternchen und dem Mittelpunkt standen beinahe senkrecht aufeinander. Die Besonderheit dieser Konstellation spielte bei der Beurteilung der Richtigkeit der Resultate eine überaus wichtige Rolle. Ein Vergleichssterne hätte zur Messung der Parallaxe bereits genügt. Doch BESSEL wählte deren zwei, um zwei voneinander unabhängige Resultate zu erhalten, die sich gegenseitig ent-

weder bestätigten oder in Frage stellten. Aus der Theorie konnte er Orientierung und Exzentrizität der erwarteten Parallaxen-Ellipse berechnen. Daraus liess sich für jeden Zeitpunkt des Jahres das Verhältnis der sich ändernden Winkelabstände zwischen dem Mittelpunkt von 61 Cygni und den beiden Vergleichssterne bestimmen. Der minimale Abstand des einen Vergleichssterne und der maximale des andern traten etwa gleichzeitig ein.

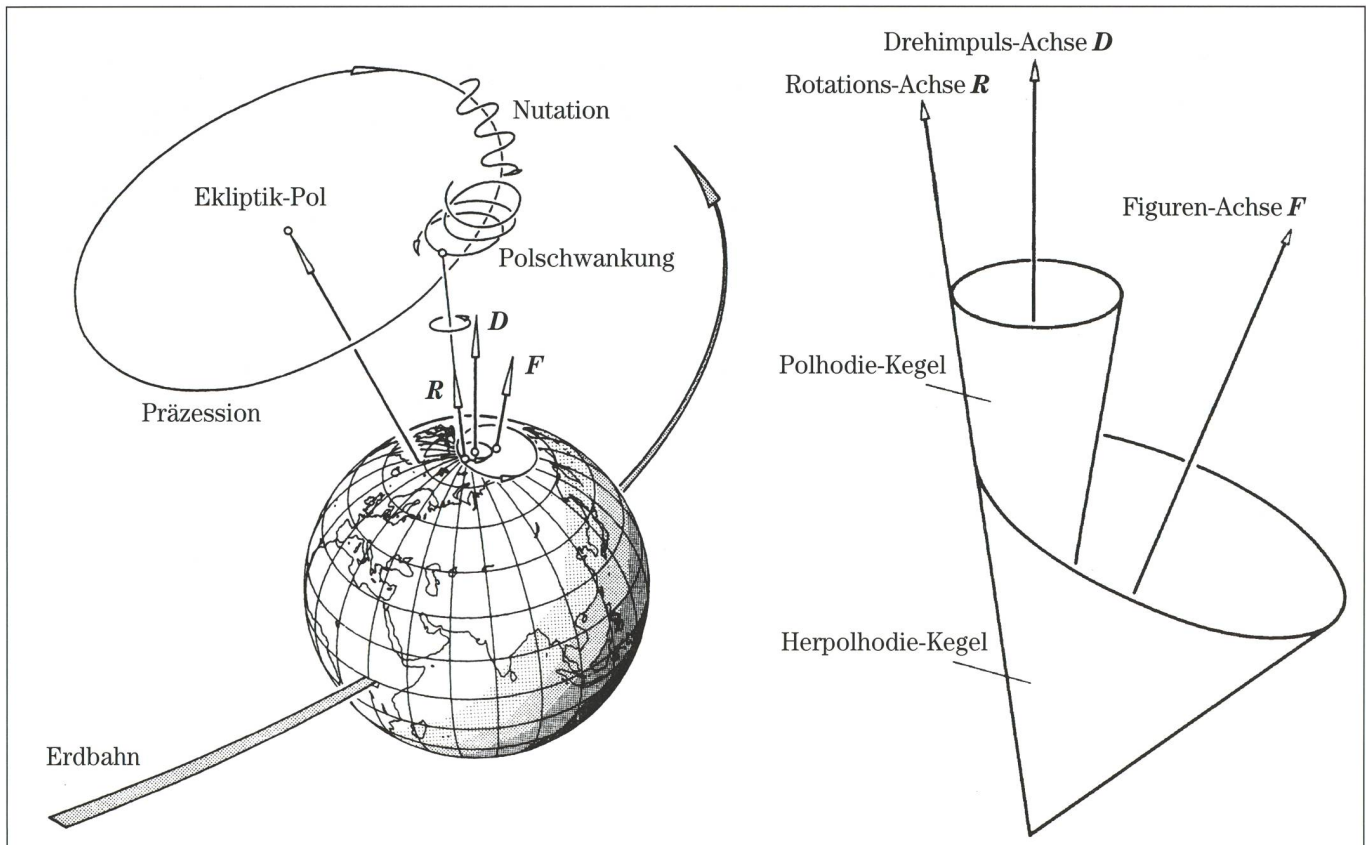
Eine ganze Jahresperiode umfasste BESSELS Beobachtungsreihe. In dieser Zeit bestimmte er 85 Abstände des Sternes *a* und 98 Abstände des Sternes *b* vom Mittelpunkt von 61 Cygni. Jeder Abstand war eine Mittelung aus durchschnittlich 16 Einzelmessungen, so dass die gesamte Messreihe aus über 2900 Einzelmessungen bestand. BESSEL stellte für die ermittelten Abstände 183 Bedingungsgleichungen auf und löste diese mit der Methode der kleinsten Quadrate nach den beiden Einzelparallaxen bezüglich der Vergleichssterne auf. Er erhielt für die Parallaxe einen Wert von $0.3136'' \pm 0.0202''$. Dieser stimmt innerhalb der Fehlergrenze mit dem heutigen Wert überein.

Um jeglichen systematischen Instrumentenfehler ausschliessen zu können, führte BESSEL bis im März 1840 weitere 103 Abstandsmessungen zu Stern *a* und 116 zu Stern *b* durch, wobei er zuvor das Instrument vollständig auseinandergenommen, gereinigt und einige Konstruktionsverbesserungen vorgenommen hatte. Aus den insgesamt 402 Abstandsmessungen beider Beobachtungsreihen bestimmte BESSEL eine Parallaxe von $0.3483'' \pm 0.0095''$ und konnte damit sein erstes Resultat bestätigen. Die Entdeckung der jährlichen Parallaxe wird BESSEL zugeschrieben, weil sein Resultat gegenüber jenen von STRUVE und HENDERSON einen weitaus kleineren mittleren Fehler aufwies.

Theoretische und empirische Entdeckung der Polschwankung

BESSELS grosses Verdienst besteht darin, dass er die Theorie der Instrumenten- und Beobachtungsfehler weiterentwickelte und die Beobachtungsmethoden wesentlich verfeinerte und verbesserte. Nach der Entdeckung der jährlichen Parallaxe wurde es zu einer wichtigen Aufgabe für die sog. Astrometrie, die Präzessions-, Nutations- und

Figur 13: Bezüglich eines raumfesten Koordinatensystems bewegt sich die Rotationsachse *R* der Erde auf dem Polhodie-Kegel um die Drehimpulsachse *D*. Die Figurenachse *F* bewegt sich als Symmetrieachse des Herpolhodie-Kegels, der auf dem Polhodie-Kegel abrollt. Bezüglich eines erdfesten Koordinatensystems bewegt sich *R* um einen mittleren Pol. Diese sog. Polschwankung wurde von EULER theoretisch vorausgesagt und von POISSON geometrisch interpretiert.



Aberrations-Konstanten mit hoher Präzision zu bestimmen. Dadurch erhoffte man sich eine Verbesserung ihrer Modellierung. Die Aufmerksamkeit galt insbesondere einem weiteren, bisher nur theoretisch vorausgesagten Effekt, dessen Existenz noch empirisch nachgewiesen werden musste.

Nach den theoretischen Arbeiten zur Präzession und Nutation der Erde studierte EULER in den 1750er Jahren die Rotationsbewegungen starrer Körper und stellte die nach ihm benannten Kreisgleichungen auf. Unter der Annahme, dass auch die abgeplattete Erde als starrer Körper betrachtet werden kann und dass ihre Rotations- und Figurenachsen (Achse des maximalen Trägheitsmomentes) nicht exakt mit der Drehimpulsachse zusammenfallen, kam EULER zum Ergebnis, dass sich die Rotationsachse bezüglich eines erdfesten Koordinatensystems innerhalb des Erdkörpers um einen sehr kleinen Winkel bewegen muss. Er nannte diese Bewegung die *freie Nutation* und berechnete ihre Periode zu 234 Tagen (Heutiger Wert: 304 Tage).

1834 publizierte LOUIS POINSON (1777-1859) eine geometrische Interpretation dieser *Eulerschen freien Nutation* bezüglich eines *raumfesten* Koordinaten-

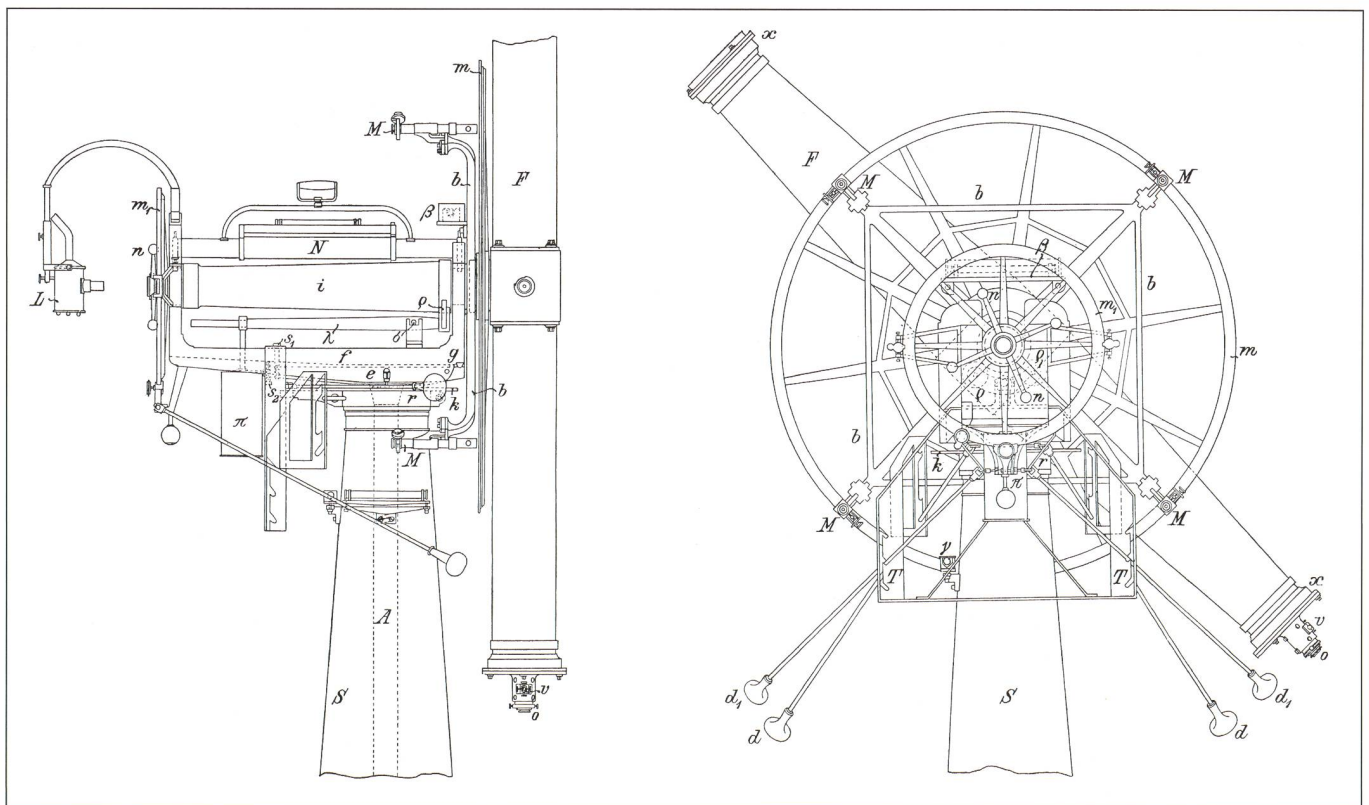
systems (Figur 13). Er nannte die Kreisbewegungen der Rotationsachse und der Figurenachse um die Drehimpulsachse der Erde die *Polhodie* bzw. *Herpolhodie*. In einem *erdfesten* System beschreibt der Durchstosspunkt der Rotationsachse mit der Erdoberfläche eine kreisähnliche Bahn mit veränderlichem Radius um einen mittleren Pol. Der Radius kann etwa zwischen 0 und 15 Metern variieren. Für dieses Phänomen hat sich die Bezeichnung *Polschwankung* etabliert. Das Zentrum der kreisähnlichen Polbewegung, der mittlere Pol, wandert ebenfalls langsam (säkular) auf der Erdoberfläche und fällt nicht mit dem Figurenpol zusammen.

In den ersten einfachen Modellen verstand man unter der Periode der *Polschwankung* das Zeitintervall für einen Umlauf der Rotationsachse um den Figurenpol. Den Winkel zwischen dem Ortsmeridian der Beobachtungsstation und der Verbindungslinie Figurenpol – momentaner Rotationspol nannte man *Phasenwinkel* oder kurz die *Phase* der *Polschwankung*. Die Strecke zwischen Figuren- und Rotationspol bezeichnete man als *Amplitude* der *Polschwankung*. Die *Polschwankung* bewirkt eine periodische Änderung der Polhöhen, was als *Variation der geographischen Breite* beobachtbar ist.

BESSEL führte bereits zu Beginn des Jahres 1820 Beobachtungen durch, um zu prüfen, ob es die Breitenvariation überhaupt gibt und mit welcher Amplitude sie allenfalls in Erscheinung tritt. In Zusammenhang mit seinen ersten Versuchen zum Nachweis der jährlichen Parallaxe war es wichtig, auch *diesem* Phänomen nachzugehen. Da er in seinen Beobachtungen keinen Hinweis fand, folgerte er, dass die Variation der Breite nicht existiert oder vernachlässigbar ist. Seine theoretischen Überlegungen schienen zu bestätigen, dass eine *Polschwankung* nicht möglich ist. In den Jahren 1841/42 stellte er aber fest, dass die Breite 0.15" grösser war als 1820 und 0.03" kleiner als zwischen 1836 und 1840. Er äusserte deshalb gegenüber ALEXANDER VON HUMBOLDT (1769-1859) in einem Brief vom 1. Juni 1844 die Vermutung, dass eine Variation der Breite doch nicht auszuschliessen sei. BESSEL dachte jedoch eher an eine geologische Ursache denn an eine wirkliche Richtungsänderung der Rotationsachse der Erde.

Drei Monate zuvor publizierte BESSELS Schüler CHRISTIAN AUGUST FRIEDRICH PETERS (1806-1880) eine Arbeit, in der er eine Amplitude der *Polschwankung* von $0.079'' \pm 0.017''$ aus 279 vollständigen Polaris-Beobachtungen (was über

Figur 14: Der ERTELSche Vertikalkreis des Pulkovo-Observatoriums im Auf- und Seitenriss. Mit diesem Instrument erstellten PETERS, GYLDÉN und NYRÉN Beobachtungsreihen von Polaris, aus denen NYRÉN eine Variation der Breite und CHANDLER die wahre Periode der *Polschwankung* ableiten konnten.

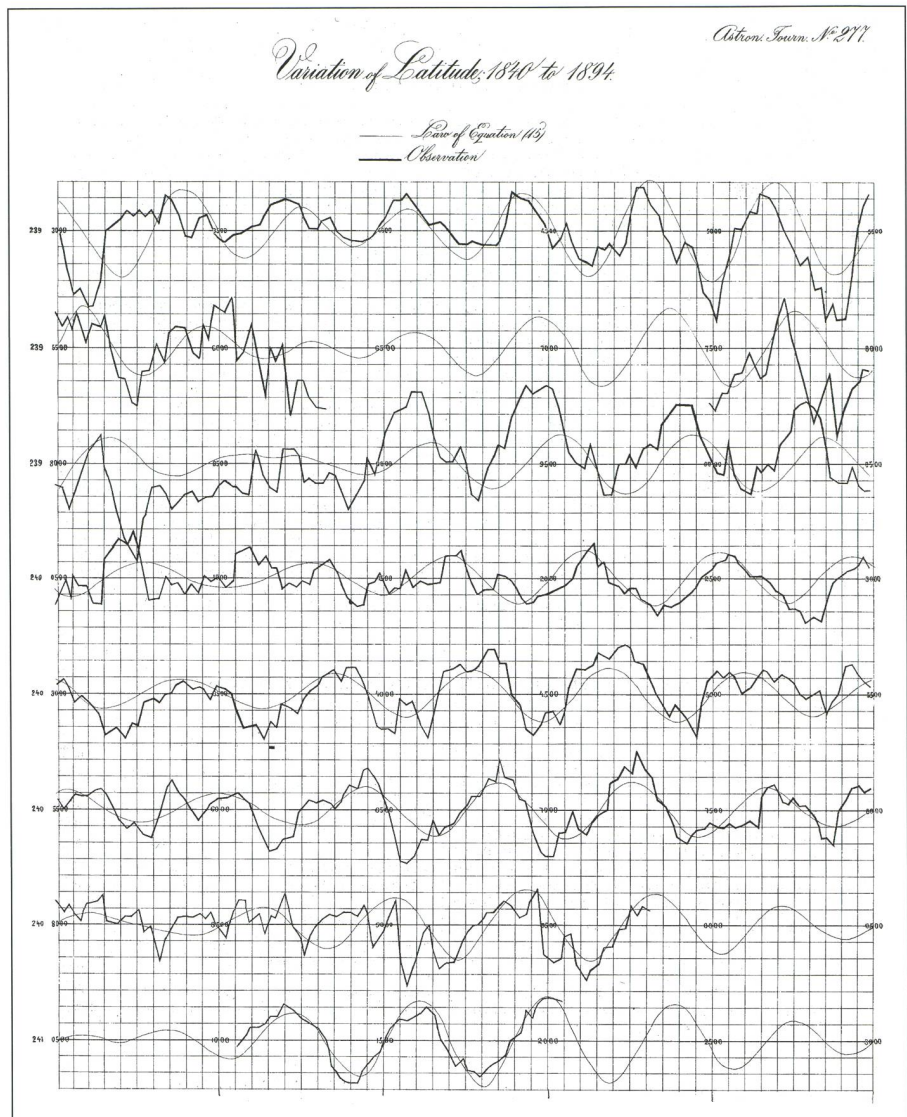


10 000 Einzelmessungen entspricht) bestimmen konnte, die er am neuen Ertschen Vertikalkreis des Pulkovo-Observatoriums zwischen dem 11. März 1842 und dem 30. April 1843 durchführte. PETERS realisierte, dass die Länge seiner Beobachtungsreihe noch zu kurz war, als dass er die vermeintliche Eulersche Periode von 10 Monaten einwandfrei hätte von einer allfälligen jährlichen Periode trennen können und führte daher seine Messreihe bis zum 2. November 1844 weiter. Leider wertete er seine insgesamt 371 Beobachtungen, die ein Zeitintervall von 966 Tagen umfassen, nicht mehr aus.

Der Vertikalkreis wurde 1838/39 von ERTEL gebaut (Figur 14), hatte eine Öffnung von 15 cm und eine Brennweite von knapp 2 m. Der Teilkreisdurchmesser betrug etwas über einen Meter, hatte eine Teilung von 2' und eine Ablesegenauigkeit von 0.1". Die Konstruktionsweise erlaubte ein leichtes Bestimmen der Instrumentenkonstanten sowie ein schnelles Wechseln der Lagen. Die Spezialkonstruktion sorgte für optimale Belastung und minimale Durchbiegung. Die Montierung besaß ein automatisches Lotausrichtungssystem und eine Zenitausrichtung des Kreises mittels eines Hauptniveaus. Zwei Kollimatoren ermöglichten die Horizontalausrichtung.

Die Beobachtungen an diesem Instrument wurden von JOHANN AUGUST HUGO GYLDÉN (1841-1896) vom 15. November 1863 bis zum 30. März 1870 und von MAGNUS NYRÉN (1837-1921) vom 19. Juni 1871 bis zum 1. Mai 1873 fortgeführt. NYRÉN verfügte mit diesen drei Messreihen über 762 vollständige Beobachtungen, die sich über mehr als 30 Jahre erstreckten. Er erhoffte sich, damit nicht nur die Resultate von PETERS und somit die Existenz der Polschwankung definitiv bestätigen zu können, sondern vermutete, sogar eine säkulare Änderung der Breite nachweisen zu können.

NYRÉN verwendete dasselbe Modell wie PETERS und bestimmte nach der Methode der kleinsten Quadrate neben anderen Parametern Amplitude und Phase der Polschwankung. NYRÉN ging jedoch (wie schon PETERS) von einer Eulerschen Periode von 304 Tagen aus und unterliess es, auch diesen Parameter zu schätzen. Warum hätte er dies auch tun sollen? Die Eulersche Periode folgte doch just aus jener Theorie der Rotation des starren Körpers, mit der EULER auf die Existenz der freien Nutation schliessen und die PETERS anscheinend auch empirisch nachweisen konnte. Es



Figur 15: CHANDLERS Entdeckung der Polschwankungs-Periode von 430 Tagen. Er benutzte dazu u.a. Beobachtungen von BRADLEY, POND, PETERS, GYLDÉN und NYRÉN. Die dargestellten Messreihen (von 1840 bis 1894) zeigen die beobachteten Amplituden der Polschwankung als Funktion der Zeit (fette Linien) sowie die von CHANDLER theoretisch gerechneten Breitenvariationen als Überlagerung einer jährlichen Periode mit der von ihm entdeckten 430tägigen Periode (dünne Linie).

bestand also kein Grund, an der Richtigkeit dieser Theorie zu zweifeln und im Modell die Eulersche Periode nicht konstant zu halten.

NYRÉN glaubte mit Sicherheit, eine säkulare Abnahme der Breite zwischen 1843 und 1872 von 0.226" mit einem mittleren Fehler von $\pm 0.014''$ gefunden zu haben. Die Amplituden bestimmte er für jede Messreihe einzeln und fand für jene von PETERS den Wert $0.101'' \pm 0.014''$, für jene von GYLDÉN $0.125'' \pm 0.017''$ und für seine eigene $0.058'' \pm 0.015''$. Dieses Resultat schien nicht nur die von PETERS bestimmte Amplitude zu bestätigen, sondern auch einen signifikanten Beweis für die Existenz der von EULER vorausgesagten Polschwankung darzustellen. Ein Ergebnis konnte sich

NYRÉN allerdings nicht erklären. Seine geschätzten Phasenwinkel, reduziert auf die Epoche 1868, wichen sehr stark voneinander ab. Er führte daher die Parameterbestimmung mit unterschiedlichen Werten für die Eulersche Periode durch, kam aber nicht auf die Idee, diesen Parameter selbst für die Ausgleichung ganz zu öffnen und ebenfalls zu schätzen.

Erst zu Beginn der 1890er Jahre fand SETH CARLO CHANDLER (1846-1913), unabhängig von jedem Modell der Polschwankung und vorwiegend gestützt auf historische Beobachtungen, unter anderen jenen von BRADLEY, POND, PETERS, GYLDÉN und NYRÉN, dass die Periode nicht 304, sondern 430 Tage beträgt (Figur 15). Eine Erklärung für diese Diffe-

