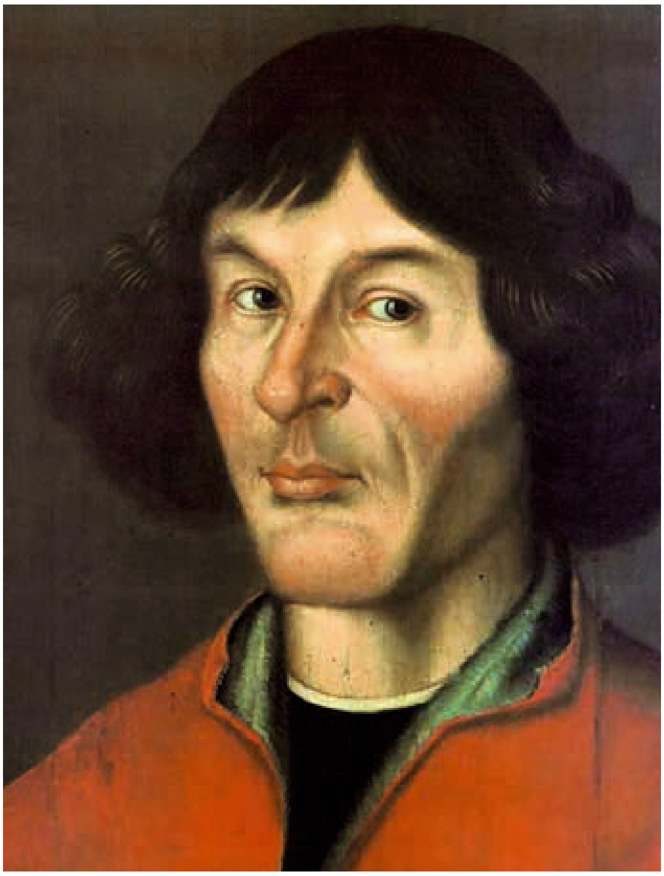
Die kopernikanische Wende

Ptolemäische Astronomie in der Renaissance



Auch in der Frühen Neuzeit stand die Astronomie auf der Grundlage, die Ptolemäus im 2. Jahrhundert n. Chr. geschaffen hatte: Nicht nur die Anhänger seines geozentrischen Weltbildes beriefen sich auf ihn – auch die Astronomie des Kopernikus, Tychos oder Keplers ist nur zu verstehen, wenn man sich mit Ptolemäus beschäftigt.

Von N. M. Swerdlow

Abb. 1: Nikolaus Kopernikus (1473–1543).

ABB.: G. HERMANOWSKI, NIKOLAUS KOPERNIKUS, 1985

DIE BEZEICHNUNG „ptolemäische Astronomie“ wird generell in zweifachem Sinn gebraucht. Allgemein bezieht sie sich auf das geozentrische Weltbild, in dem sich Sonne, Mond, Planeten und Sterne um die Erde herum bewegen, die unbeweglich im Zentrum steht. Im Speziellen bezieht sie sich auf die Astronomie des Ptolemäus, die im „Almagest“ und in anderen Schriften erläutert wird. Beide Systeme waren in der Renaissance und der Frühen Neuzeit von Bedeutung: in der allgemeinen Anwendung für eines von drei Weltbildern (das ptolemäische, das kopernikanische und das tychonische) und speziell als Hauptquelle für die Methoden der mathematischen Astronomie. Die Astronomie, ob elementar oder fortgeschritten, stand auf der Grundlage, die Ptolemäus geschaffen hatte – und nicht nur die spätere Astronomie derer, die Anhänger des ptolemäischen Weltbildes blieben. Auch die Astronomie des Kopernikus, Tychos und Keplers ist nur zu verstehen, wenn man sich eingehend mit Ptolemäus beschäftigt hat.

Überlieferung der ptolemäischen Werke

Die meisten Werke des Ptolemäus wurden im 9. und 10. Jahrhundert ins Arabische übersetzt und von arabischen Wissenschaftlern auf höchst originelle Weise erweitert und modifiziert. Nicht so gut gerieten die Übersetzungen ins Lateinische. Der „Almagest“ wurde im späten 12. Jahrhundert zweimal ins Lateinische übersetzt: Es gibt eine anonyme Fassung aus dem Griechischen, die in Sizilien angefertigt wurde und kaum verbreitet war, und eine weithin bekannte Fassung von Gerhard von Cremona in Spanien aus dem Arabischen übersetzt und 1515 gedruckt. 1528 wurde in Rom eine Übersetzung aus der Mitte des 15. Jahrhunderts von Georg von Trapezunt veröffentlicht, die sich auch in späteren Editionen findet. Der griechische Text wurde 1538 zusammen mit Theons Kommentar gedruckt, aber beide Texte scheinen selten benutzt worden zu sein.

Etwa Mitte des 15. Jahrhunderts schrieb Giovanni Bianchini, ein Finanz- und Regierungsbeamter in Ferrara, eine ausführliche Erläuterung zu den Büchern I bis VI des „Almagest“, und Georg von Trapezunt verfasste einen Kommentar zum gesamten Werk, doch weder das eine noch das andere wurde gedruckt. Zwischen 1460 und 1463 schrieben Georg Peuerbach und Johannes Regiomontanus auf Anfrage von Kardinal Basilius

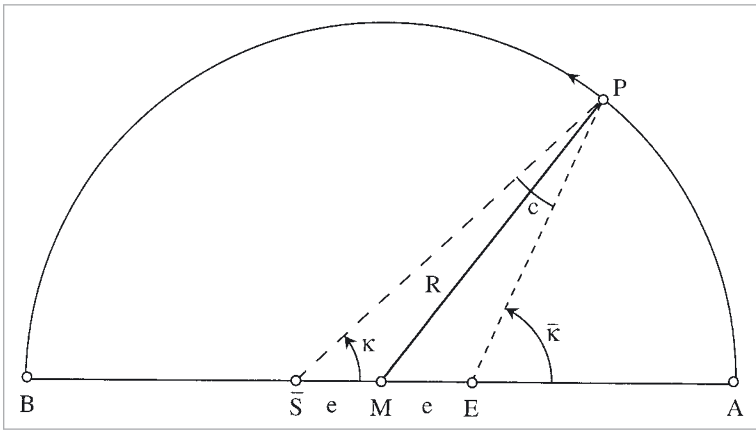


Abb. 2: Ptolemäus' Modell für die Bewegung eines Planeten in heliozentrischer Darstellung.

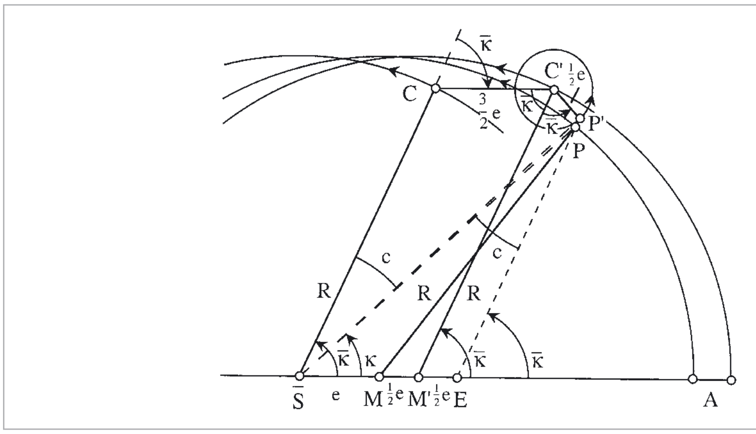


Abb. 3: Kopernikus' Modell für die Bewegung eines Planeten in zwei Formen, im Vergleich mit dem ptolemäischen Modell.

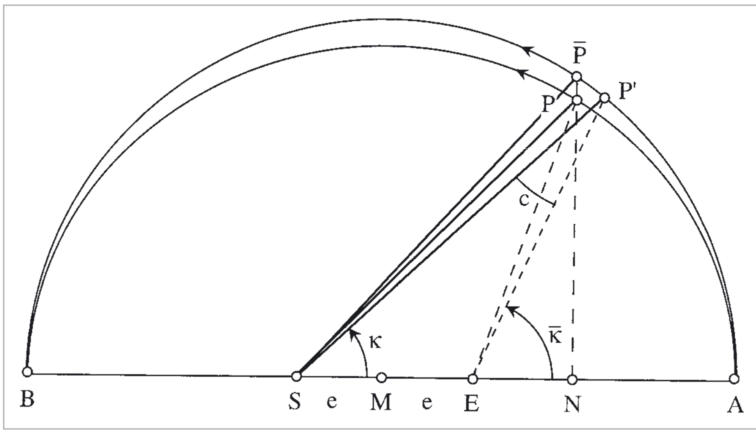


Abb. 4: Keplers Modell für die Bewegung eines Planeten im Vergleich mit dem ptolemäischen Modell.

Bessarion eine ausgezeichnete Kurzfassung in strikt mathematischer Form, die „Epitoma in almagestum Ptolomei“, die 1496, 1543 und 1550 gedruckt wurde und als fortgeschrittenes Textbuch für mathematische Astronomie im 16. Jahrhundert diente. Durch all diese Übersetzungen und besonders durch die „Epitoma“ hatten die Europäer Zugang zu Ptolemäus' mathematischer Astronomie.

Ptolemäus' Astronomie: streng empirisch und streng mathematisch

Ptolemäus' Methode lässt sich einfach charakterisieren: Sie ist streng empirisch und streng mathematisch. Jede Hypothese bzw. jedes Modell wird entweder aus Beobachtungen abgeleitet oder durch sie bestätigt – wenn auch nicht alle Beobachtungen im Text wiedergegeben werden –, und jeder numerische Parameter wird durch strikt mathematische Verfahren aus Beobachtungen abgeleitet. Darin bestand Ptolemäus' wichtigste methodische Lektion für die nachfolgenden Astronomen, obwohl nur wenige sie so konsequent anwandten wie er. Zwei Beispiele sollen die Bedeutung der mathematischen Astronomie des Ptolemäus veranschaulichen. Dabei geht es um das Verhältnis, in dem die Planetentheorien von Kopernikus und Kepler jeweils zu denen des Ptolemäus stehen. Unser Augenmerk liegt dabei nicht auf dem Weltbild, das von der Lage und Bewegung der Erde abhängt, sondern auf der Bewegung des Planeten selbst und seiner ersten zodiakalischen Ungleichheit. Da jedoch sowohl Kopernikus als auch Kepler Ptolemäus' Theorie heliozentrisch umgeformt haben, werden wir die Planetentheorien auf heliozentrischer Basis vergleichen.

Vergleich mit Kopernikus und Kepler

Das grundlegende Ziel von Ptolemäus' Modell für die erste Ungleichheit ist, *Richtung* und *Abstand* des Planeten gesondert zu unterscheiden. Abbildung 2 zeigt in heliozentrischer Form Ptolemäus' Modell für die erste Ungleichheit eines oberen Planeten und der Venus (Merkur bereitet zusätzliche Komplikationen). In diesem Modell liegt der Mittelpunkt M der exzentrischen Kreisbahn mit dem Radius R des Planeten auf der Apsidenlinie mit der höchsten Apsis A und der niedrigsten Apsis B. Die mittlere Sonne $\bar{S}$, die das Zentrum der heliozentrischen Bewegung der Erde bildet, hat eine Exzentrizität von $e=\bar{S}M$. Symmetrisch zu M, mit der gleichen Exzentrizität $e=ME$, liegt der Punkt E, genannt Äquant (Ausgleichspunkt), der der Mittelpunkt des exzentrischen Ausgleichskreises ist, von dem aus gesehen die mittlere Winkelbewegung $\bar{\kappa}$ des Planeten P auf seiner exzentrischen Kreisbahn gleichförmig ist. Die Mittelpunkte M und E unterscheiden die Exzentrizität $\bar{S}M=e$, die den Abstand des Planeten $\bar{S}P$ definiert, von der Exzentrizität $\bar{S}E=2e$, die seine Richtung $\bar{S}P$ definiert. Das heißt, die Exzentrizität e, die den Abstand bestimmt, *halbiert* die

ABB.: N. M. SWERDLOW

Exzentrizität $2e$, die die Richtung bestimmt. Die Korrektur der Richtung EP zur Richtung $\bar{S}P$ und der mittleren Bewegung $\bar{\kappa}$ in Bezug auf E zur wahren Bewegung κ in Bezug auf $\bar{S}$ ist der Winkel $c=EP\bar{S}$ und wird Mittelpunktsgleichung genannt. Es gilt also $\kappa = \bar{\kappa} \pm c$.

Wie wir sehen werden, war Ptolemäus' Modell die beste Darstellung für die erste Ungleichheit der Planeten vor Kepler. Allerdings blieb es nicht ohne Kritik, und zwar nicht wegen seiner Ungenauigkeit – die damals niemand erkannte –, sondern aus physikalischen Gründen. Denn in Ptolemäus' „Planetenhypothesen" und späteren arabischen Werken wird das Modell physikalisch durch Sphären dargestellt, die feste Körper sind, welche sich nur gleichförmig um eine Achse bewegen können, die durch ihre Mitte verläuft. So verläuft in Abbildung 2 die Achse der Sphäre, die senkrecht zur Ebene der Figur steht, durch M. Die Sphäre kann nicht um E rotieren, denn täte sie das, würde sie ihre Position verändern. Deshalb ist die einzige physikalisch mögliche Bewegung eine gleichförmige Kreisbewegung um eine Achse, die durch M verläuft. Der arabische Astronom Ibn al-Haiṭam kritisierte unter anderem diese Dezentralität der Sphärenrotation in seinen „Einwänden gegen Ptolemäus", bot aber selbst keine Lösung an. Später griffen Astronomen, die in der Sternwarte von Marāgha im nordwestlichen Persien arbeiteten, seine Kritik auf. Ihre Lösung bestand darin, die eine Bewegung des Ptolemäus in zwei oder mehr gleichförmige Kreisbewegungen zu zergliedern, die dadurch zustandekommen, dass die Sphären gleichförmig um Achsen rotieren, die durch ihren Mittelpunkt verlaufen, wobei sie ihre gleichförmige Bewegung um E und einen (beinahe) gleichbleibenden Abstand von M beibehalten. Auf welchem Weg ihre Erfindungen aus dem Arabischen im Osten ins Lateinische im Westen überliefert wurden, ist nicht bekannt – sehr wahrscheinlich gelangten sie im 15. Jahrhundert über Reisende zwischen Venedig und der Levante nach Italien. Doch es steht fest, dass der Lösungsansatz des Astronomen Ibn al-Šāṭir aus Damaskus (1304–1375) identisch ist mit dem Modell, das Kopernikus, der von 1496 bis 1503 in Italien lebte, in seinem Frühwerk, dem „Commentariolus" (ca. 1510/14), benutzte. Auch seine Modelle in „De revolutionibus" (1543) haben Entsprechungen in den Modellen der so genannten „Schule von Marāgha". Die Übereinstimmungen zwischen den Planetentheorien der Marāgha-Schule und des Kopernikus sind derart tiefgehend, vielschichtig und zahlreich, dass man eine voneinander unabhängige Erfindung ausschließen kann.

Ptolemäus' Modell für die erste Ungleichheit und Kopernikus' Modell in zwei Formen sind in Abbildung 3 in heliozentrischer Darstellung übereinandergelegt, wobei $\bar{S}$ die mittlere Sonne und $\bar{S}A$ die Apsidenlinie mit A als der höchsten Apsis ist. In Ptolemäus' Modell bewegt sich der Planet in einem Kreis mit dem Radius R und dem Mittelpunkt M gleichförmig um den Äquanten E durch den Winkel $\bar{\kappa}$, wobei wie zuvor gilt: $\bar{S}M=e$ und $\bar{S}E=2e$. In Kopernikus' Modell im „Commentariolus" bewegt sich der Mittelpunkt C eines Epizykels gleichförmig in einem Kreis mit dem Radius R durch $\bar{\kappa}$ um $\bar{S}$, und der Radius CC' rotiert in entgegengesetzter Richtung gleichförmig durch $\bar{\kappa}$ um C, so dass CC' parallel zur Apsidenlinie bleibt. Auf einem zweiten Epizykel mit dem Mittelpunkt C' und dem Radius C'P' bewegt sich der Planet P' gleichförmig durch $2\bar{\kappa}$ in einer der Bewegung von CC' entgegengesetzten und von CC' aus gemessenen Richtung, so dass P', wenn C auf der Apsidenlinie liegt, auf CC' am nächsten an C liegt. Vorausgesetzt, dass $CC'=\frac{3}{2}e$ und $C'P'=\frac{1}{2}e$, beträgt ihre Summe $2e$, und ihre Differenz e und P' liegt immer in Richtung EP über P und fällt auf der Apsidenlinie mit P zusammen. Dementsprechend bewegt sich P' ebenfalls gleichförmig um den Äquanten E und erhält eine (beinahe) konstante Distanz zum Mittelpunkt M aufrecht, was das Ziel von Kopernikus' Modell ist und was hier, genau wie in den Marāgha-Modellen, mithilfe von gleichförmigen Kreisbewegungen erreicht wird. In „De revolutionibus" wird der Epizykel CC' durch eine gleiche Exzentrizität $\bar{S}M=\frac{3}{2}e$ ersetzt. Es gilt wie zuvor $C'P'=\frac{1}{2}e$ und C' bewegt sich jetzt um M' in einem Kreis mit dem Radius R durch $\bar{\kappa}$. P' bewegt sich von M'C aus gemessen in entgegengesetzter Richtung um C' durch $\bar{\kappa}$ und ist am dichtesten an M', wenn C' auf der Apsidenlinie liegt. P' befindet sich in beiden Formen des Modells an derselben Stelle. Die Mittelpunktsgleichung c, $EP\bar{S}$ im ptolemäischen Modell und $EP'\bar{S}$ oder $C\bar{S}P'$ im kopernikanischen, ist beinahe identisch, und wieder gilt $\kappa = \bar{\kappa} \pm c$. Allerdings bewegt sich der Planet nicht mehr in einem perfekten Kreis, weil der Abstand $\bar{S}P'$ im kopernikanischen Modell ein wenig größer ist als $\bar{S}P$ im ptolemäischen (was Kepler „Exorbitation" von einem Kreis nennt) und sich nur auf der Apsidenlinie mit $\bar{S}P$ deckt. Allerdings waren die beiden Modelle zu dieser Zeit durch Beobachtung nicht zu unterscheiden; für den Mars mit e=0,1, wobei R=1, können die Richtungen höchstens um ±3' und die Abstände höchstens um +0,005' abweichen.

Abb. 5: Abbildungen der Planetenmodelle, die Quṭb al-Dīn al-Šīrāzī in seinem Werk „al-Tuḥfa al-Šāhiyya“ (Das Königliche Geschenk) in der Tradition der so genannten Marāgha-Schule beschrieb. Diese Modelle sind Vorläufer derjenigen, die Ibn al-Šāṭir entwarf und im späten 15. Jhdt. Einfluss auf Kopernikus ausübten. Die Darstellungen mit menschlichen Figuren, die die Sphären der Planeten halten, erinnern an die Abbildungen der Sternbilder bei al-Ṣūfī (vgl. den Artikel von Paul Kunitzsch, S. 18). Tehran, Reza Abbasi Museum, Hs. 571, fol. 1b–2a.

ABB.: Z. VESEL ET AL. (ED.), IMAGES OF ISLAMIC SCIENCES, VOL 1, S. 85

Ptolemäus’ Modell für die erste Ungleichheit mit seiner halbierten Exzentrizität und dem Ausgleichspunkt scheint vom Modell Keplers recht verschieden zu sein: In Keplers Modell bewegt sich der Planet in einer Ellipse, wobei die Linie, die den Planeten mit der Sonne verbindet, eine Fläche beschreibt, die sich proportional zur Zeit verhält. Physikalisch gesehen ist dies auch der Fall; mathematisch gesehen ist das ptolemäische Modell jedoch die dichteste Annäherung an Keplers Planetenbewegung vor Kepler selbst. In einem frühen Stadium seiner Überlegungen zur Planetenbewegung war Kepler aus physikalischen Gründen zu zwei Schlussfolgerungen gekommen: Die Zeit, die von verschiedenen – resp. von einem einzelnen – Planeten benötigt wird, um gleiche Kreisbögen um die Sonne zu beschreiben, verhält sich proportional zum Abstand von der Sonne; diese Bewegung wird von einer physikalischen Kraft verursacht, die von der Sonne selbst ausgeht. Folglich verzichtete Kepler auf die kopernikanischen Sphären als Ursache von Bewegung und kehrte zu Ptolemäus’ Theorie von halbierter Exzentrizität und Ausgleichspunkt zurück, die er jetzt sowohl geometrisch als auch physikalisch betrachtete. So stellte er fest, dass die Zeit, die für gleiche Kreisbögen benötigt wird, in der Nähe der Apsidenlinie beinahe proportional zum Abstand zur Sonne ist. Wie Kepler von diesen Prinzipien zu seinem endgültigen Modell der Planetenbewegung gelangte, ist eine lange und komplizierte Geschichte, die er ausführlich in der „Astronomia nova“ (1609) wiedergibt, der „Neue[n], ursächlich begründete[n] Astronomie oder Physik des Himmels. Dargestellt in Untersuchungen über die Bewegungen des Sternes Mars. Aufgrund der Beobachtungen Tycho Brahes“. Diese Geschichte, die wohl die interessanteste der Astronomie ist, wurde schon oft erzählt und soll hier nicht wiederholt werden. Aber durch den Vergleich zwischen dem keplerschen und dem ptolemäischen Modell wird deutlich, warum Ptolemäus’ Modell so erfolgreich war.

In Abbildung 4 sehen wir das ptolemäische Modell, allerdings mit der wahren Sonne S anstelle der mittleren Sonne. Der Planet P’ bewegt sich in einem Kreis mit dem Mittelpunkt M und der mittleren Bewegung $\bar{\kappa}$ um den Äquanten E, wobei SM=e und SE=2e. Die Mittelpunktsgleichung ist c, und die wahre Bewegung in Bezug auf S ist $\kappa = \bar{\kappa} \pm c$. Angenommen, dass in eben diesem Kreis der mittlere Planet $\bar{P}$ sich so bewegt, dass die Gerade $S\bar{P}$ eine Fläche $AS\bar{P}$ beschreibt, die sich proportional zur Zeit verhält, so erhalten wir Keplers erstes Modell. Er verwendete eine Beschreibung von Fläche, die als leichterer Ersatz für eine mühsame Herleitung aus dem physikalischen Prinzip diente, dass die Zeit, die der Planet benötigt, um gleiche (kleine) Bogenbewegungen zu beschreiben, sich proportional zu seinem Abstand von der Sonne verhält, was eine riesige Summe von berechneten Abständen erforderte. Die Berechnung ergab jedoch, dass die Richtungen $\bar{S}P$ im Falle des Mars von Keplers Standard – den er in einem Äquantenmodell unter dem Namen „vikariierende Hypothese“ festgelegt hatte – von der korrekten Planetenrichtung um ma-

ximal ungefähr ±8' abwich (bei einem Winkel von ±45° von der Apsidenlinie). Um die Position des Planeten in Keplers endgültigem Modell, dem der Ellipse, zu finden, verlängere man die Ordinate $\bar{P}N$ bis zur Apsidenlinie und teile sie bei P in dem Verhältnis, das die kleinere Achse zur größeren Achse der Ellipse hat. P ist dann der Punkt auf der Ellipse, an dem sich der Planet befindet. Wenn man S als den Brennpunkt der Ellipse ansetzt, an dem sich die Sonne befindet, beschreibt die Gerade SP eine Fläche ASP innerhalb der Ellipse, die sich proportional zur Zeit verhält, so wie $S\bar{P}$ eine Fläche $AS\bar{P}$ im Kreis mit Mittelpunkt M, dem Haupthilfskreis der Ellipse, beschreibt. Dieses Modell stimmte mit der vikariierenden Hypothese in den Richtungen SP absolut, und mit den (weniger gesicherten) Abständen SP, die Kepler durch Beobachtung herausfand, immerhin ziemlich gut überein. Und da gezeigt werden konnte, dass das Modell aus einer physikalischen Ursache herleitbar war, schloss er, dass es richtig sei. Wenn wir uns nun wieder dem ptolemäischen Modell zuwenden, werden wir, wie Kepler, feststellen, dass die Richtung des Planeten SP' in der $S\bar{P}$ im Kreis entgegengesetzten Richtung von der vikariierenden Hypothese und von SP in der Ellipse um höchstens ±8' bei einem Winkel von ±45° von der Apsidenlinie abweicht. Die Abstände SP' und $S\bar{P}$ weichen vom korrekten Abstand SP in der Ellipse um höchstens +0,005' ab, wobei der Radius des Kreises 1 ist. Daher ist das ptolemäische Modell mit der halbierten Exzentrizität und dem Ausgleichspunkt ähnlich präzise in Bezug auf Richtung und Abstand eines Planeten wie Keplers ursprüngliches Modell, in dem er Flächenbewegung in einem Kreis benutzte. (Das kopernikanische Modell ist sogar mit mehr Fehlern behaftet, da Kopernikus zusätzlich zu den Fehlern, die Ptolemäus gemacht hatte, noch eigene machte.) Aufgrund der Tatsache, dass im ptolemäischen Modell SM=*e* und SE=2*e* und dass sich in Keplers endgültigem Modell die Sonne S im Brennpunkt der Ellipse befindet, entspricht der Äquant E genau dem leeren Brennpunkt der Ellipse. In Bezug auf den leeren Brennpunkt ist die Bewegung von P in der Ellipse beinahe gleichförmig, weil die Richtungen EP', wenn man sie gleichförmig beschreibt, und EP ebenfalls um nicht mehr als ±8' bei 45° von der Apsidenlinie abweichen. Aus eben dem Grund, dass der Kreis mit Mittelpunkt M der große Hilfskreis und der Äquant der leere Brennpunkt von Keplers Ellipse ist, ist das ptolemäische Modell sowohl für die Richtung als auch für den Abstand so erfolgreich.

Fazit

Wir haben hier nur zwei bemerkenswerte Beispiele dafür gesehen, wie die sehr weit fortgeschrittene Astronomie der Renaissance und Frühen Neuzeit mit der Astronomie des Ptolemäus verknüpft ist. Es ließen sich viele weitere Beispiele für Ptolemäus' Sphärentheorie, Sonnentheorie, Mondtheorie, die Berechnung von Eklipsen und Breitengraden der Planeten finden, die Kopernikus wiederzuentdecken versuchte – denn er war, wie Kepler bemerkte, „hauptsächlich darum bemüht, Ptolemäus darzustellen, nicht die Natur" – und die Kepler verbesserte, obwohl Ptolemäus selbst, wie Kepler später feststellte, dieselben Ausbesserungen schon in den „Planetenhypothesen" vorgenommen hatte. Ptolemäus bot zu Beginn des Zeitalters der modernen Wissenschaft das genaueste Paradigma für korrekte Methoden in der mathematischen Astronomie und, so darf man wohl hinzufügen, in allen angewandten mathematischen Wissenschaften.

DER AUTOR

N. M. Swerdlow ist Professor Emeritus im Department of Astronomy and Astrophysics der University of Chicago und Visiting Associate in der Division of Humanities and Social Sciences des California Institute of Technology. Sein Forschungsgebiet ist die Geschichte der Naturwissenschaften, insbesondere der mathematischen Astronomie, von der Antike bis zum 17. Jahrhundert.