

Eudoxos & Co. – Die Anfänge der wissenschaftlichen Astronomie ©

Von den Anfängen der geometrischen Astronomie bei Eudoxos über die
Kosmologie des Aristoteles und das heliozentrische Weltbild des Aristarchos
bis zum Almagest des Ptolemaios

Norbert Froese

Stand: 18.01.2018



© Dieser Text unterliegt der Lizenz [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode) (siehe: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode>).

Der Text ist unter <http://www.antike-griechische.de/Eudoxos.odt> im odt Format verfügbar, die verwendeten Abbildungen können über die folgende Adresse herunter geladen werden:

http://www.antike-griechische.de/Eudoxos_Abbildungen.zip.

Zu den Copyright Regelungen für die verwendeten Abbildungen siehe Anhang „Abbildungen“.

Dieser Text gehört zum Projekt *Griechische Antike* auf <http://www.antike-griechische.de>.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	3
Eudoxos, ein vielseitiger Gelehrter.....	5
Eudoxos, der einflussreiche Astronom.....	6
Die astronomischen Modelle des Eudoxos von Knidos.....	7
Stärken und Schwächen der Eudoxos Modelle.....	10
Die Überarbeitung der Eudoxos Modelle durch Kallippos.....	11
Die mysteriöse 27. Sphäre des Eudoxos.....	12
Die Viel-Sphären-Kosmologie des Aristoteles.....	13
Unterschiedliche Angaben zur Anzahl der bei Aristoteles benötigten Sphären.....	16
Das heliozentrische Weltbild des Aristarchos von Samos.....	17
Der Almagest – Die Krönung des geozentrischen Denkens.....	20
Das Konzept der zwei Bewegungen.....	21
Apollonios: Der Epizykel.....	21
Hipparchos: Die Sonnenbahn als Exzenter.....	22
Ptolemaios: Der Äquant.....	23
Die Modellierung.....	25
Der Almagest als Beispiel für mathematisierte empirische Wissenschaft in der Antike.....	26
War Ptolemaios ein Kosmologe?.....	27
Ptolemaios als Astrologe.....	28
Nachtrag: Herakleides Pontikos.....	29
Von Kopernikus bis Newton – ein kurzer Ausblick.....	30
Kopernikus.....	30
Galilei.....	30
Kepler.....	31
Newton.....	31
Anhang.....	32
Abbildungen.....	32
Empfehlungen.....	32
Bücher.....	32
Links.....	32

Einleitung

Astronomie gehört zum kleinen Kreis der Weltbild-Wissenschaften. Ihre Ergebnisse haben Einfluss auf unser aller Selbstverständnis. Ihre wissenschaftlichen Revolutionen berühren nicht nur die Denkwelten der jeweiligen Fachexperten.

Die Geschichte der *wissenschaftlichen* Astronomie lässt man gern mit *Eudoxos (Eudoxus)* beginnen.¹ Er hat als erster versucht ein geometrisches Modell zur Erklärung der *retrograden Bewegungsphasen* von Planetenbahnen zu liefern.² *Eudoxos* ist damit der Autor des ältesten geometrisch-astronomischen Modells mit wissenschaftlichem Anspruch (das wir kennen). In seinen geozentrischen Modellen wird *erstmal*s detaillierte Beobachtung astronomischer Phänomene mit mathematischer Modellbildung kombiniert. *Eudoxos* hat damit den Anfangspunkt der *wissenschaftlichen* Astronomie gesetzt. Er verwendet in seinen geometrischen Modellen mehrere ineinander geschachtelte, homozentrische Kugeln. Er lässt diese Kugeln um verschiedene Achsen rotieren und nutzt die dadurch entstehenden geometrischen Effekte zur Modellierung delikater Himmelsphänomene:

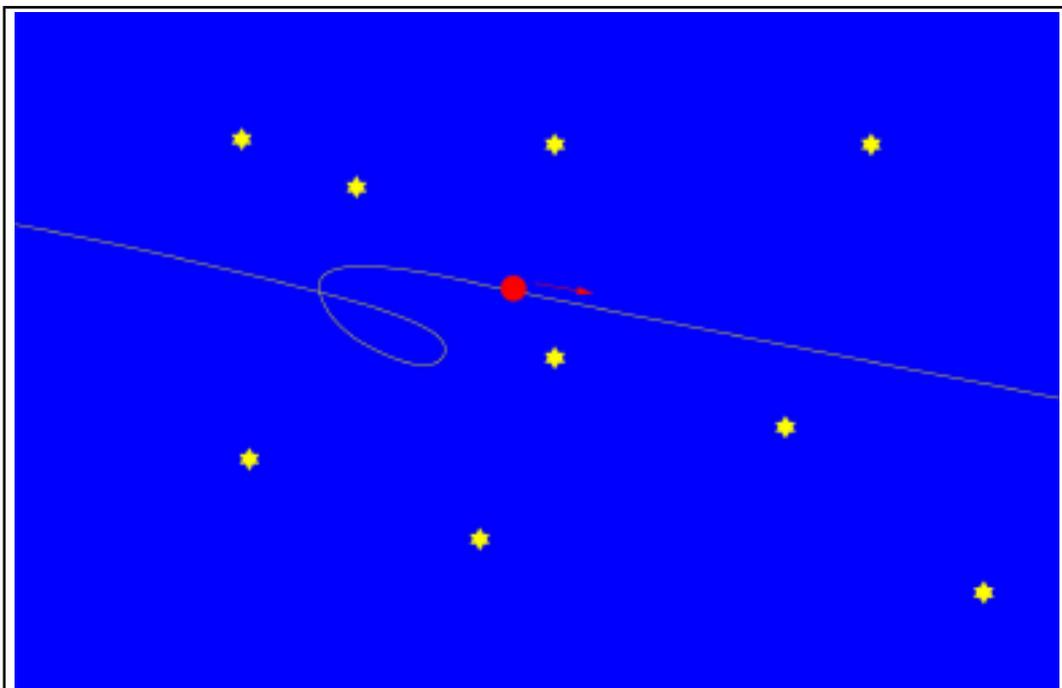


Abbildung 1: Die von der Erde aus beobachtbare Marsbahn zeigt einen Mars, der bei der täglichen Rotation meist etwas hinter den Fixsternen „zurückbleibt“. Manchmal zeigt der Mars jedoch auch eine (vor dem Hintergrund des Fixsternhimmel) retrograde Bewegungsphase (siehe die schematische Skizze).

Eudoxus` hypothesis of concentric spheres, devised for the purpose of explaining stationary points and retrogradations in the motion of the planets, was the first attempt to furnish a mathematical basis for astronomy, and is a remarkably elegant piece of pure spherical geometry. We are indebted to Aristotle and his commentator Simplicius for

- 1 Wo genau man den Übergang von *vorwissenschaftlich* zu *wissenschaftlich* ansetzt, ist auch immer ein bisschen Geschmacksfrage. Die Geschichte der *wissenschaftlichen* Astronomie mit Eudoxos beginnen zu lassen ist vertretbar und für dieses Papier ungemein praktisch.
Zu den astronomischen Konzepten, die die griechischen Vorsokratiker vor Eudoxos entwickelten, siehe: *Von Thales bis Heraklit* unter www.antike-griechische.de/Vorsokratik-1.pdf sowie *Von Xenophanes bis Demokrit* unter www.antike-griechische.de/Vorsokratik-2.pdf.
- 2 Dass die *Erklärung* retrograder Bewegungsphasen der Planeten ein wichtiges, ja eigentlich das zentrale Ziel der Eudoxos-Modelle war, ist die gängige Standardinterpretation. Diese blieb jedoch nicht unbestritten. Beim Thema *Geschichte der antiken Wissenschaften* wird eben beinahe alles von irgend jemand irgendwie bestritten.

what we know of the details. The hypothesis was purely geometrical; there was nothing mechanical about it.³

Das Phänomen der *retrograden Bewegungsphasen* war schon den Babyloniern bekannt. Aber sie nahmen es nicht zum Anlass eines tieferen Nachdenkens über den Aufbau des Kosmos. Erst die griechische Antike sah darin ein Rätsel, das es mit den Mitteln des Verstandes zu lösen galt.

Für neue, gute Ideen ist die griechische Antike der ideale Nährboden. Und so findet sich in *Kallippos* ein Astronom, der die Ideen und Ansätze von Eudoxos aufnimmt und die Modelle sogar noch weiter verbessert.

Aristoteles (384 - 322 v.Chr.) erkennt die Bedeutung der Eudoxos-Kallippos-Modelle und integriert diese Modelle zu einer geozentrischen Kosmologie. Diese Kosmologie hat Nachwirkungen, die bis tief in die europäische Renaissance hinein spürbar sind. Die in der Scholastik einsetzende Dogmatisierung der aristotelischen Lehren ist eines der Haupthindernisse für eine freie und offene Diskussion über heliozentrische Alternativen.

Heliozentrische Gegenentwürfe zur geozentrischen Kosmologie gab es bereits in der Antike. *Aristarchos von Samos* legt ein heliozentrisches Weltbild vor, das in seinen Grundzügen bereits dem kopernikanischen Weltbild entspricht. Aristarchos gewinnt in der Antike jedoch kaum Anhänger. Er kann einige recht kluge Einwände gegen die heliozentrische Weltsicht nicht überzeugend entkräften. Die Antike bleibt im wesentlichen geozentrisch gestimmt.

Da aber selbst die von *Kallippos* verbesserten *Eudoxos* Modelle nicht besonders zuverlässig sind, wird bald an neuen geozentrischen Weltmodellen gearbeitet. Ausgehend von *Apollonios* über *Hipparchos* bis hin zu *Ptolemaios* werden die Methoden zur Modellierung geozentrischer Systeme immer wieder verbessert.

Stück für Stück entfernt man sich dabei vom ursprünglichen antiken Ideal der geozentrischen Himmelsmechanik: der gleichförmigen Kreisbewegung mit der Erde im Mittelpunkt. Das Repertoire der Werkzeuge zur Modellierung der Himmelsmechanik wird Stück für Stück erweitert.

Die dadurch neu gewonnenen Freiheitsgrade nutzt die Antike mit Erfolg für die Modellierung astronomischer Phänomene. Der *Almagest* von *Ptolemaios* krönt diese Entwicklung. Das dort vorgestellte geozentrische Weltbild bleibt für ca. 1500 Jahre in puncto Zuverlässigkeit und Genauigkeit unübertroffen.

Noch *Kopernikus* scheitert am Versuch, dessen Genauigkeit zu übertrumpfen. Erst *Kepler* gelingt es die Zuverlässigkeit der ptolemäischen Prognosen zu überbieten. Der entscheidende Vorteil *Keplers* gegenüber *Kopernikus*: Er unterstellt keine gleichförmig durchlaufenen Kreisbahnen (wie *Kopernikus*), sondern verwendet Ellipsen, die von den Planeten mit veränderlicher Geschwindigkeit durchlaufen werden.

Dieser Text schildert die Hauptetappen der antiken Astronomie von *Eudoxos* bis *Ptolemaios*.

Wie so viele andere Wissenschaften auch, verdankt die Astronomie ihre Anfänge dem intellektuell so fruchtbaren Boden der griechischen Antike.

3 Thomas Heath: Greek Astronomy. Dover Publications 1991. Einleitung, S. xlv f. **Hinweis:** Obwohl gegen diese Sichtweise von einigen modernen Autoren Einwände erhoben werden, schließt sich dieser Text der hier von Heath formulierten Standardinterpretation zur *Zielsetzung* der Eudoxos Modelle ohne Vorbehalt an. Im Interesse der Lesbarkeit dieses Textes wird auf eine Diskussion der einschlägigen (und mir wenig überzeugend erscheinenden) Gegenpositionen verzichtet. Auch dass man bezweifeln kann, dass Eudoxos der *erste* war, der sich hieran versuchte, soll in *diesem* Papier *nicht* weiter vertieft werden. Es sei hiermit allerdings kurz erwähnt, dass es gut möglich ist, dass sich die Pythagoreer bereits *vor* Eudoxos mit dem Problem des irregulären Laufs der Wandelsterne beschäftigt haben und sich *vielleicht* sogar an einer geometrischen Modellierung dieser Bahnirregularitäten versuchten. Das ist jedoch alles sehr unsicher, allerdings auch nicht vollständig unplausibel. Siehe hierzu auch den Abschnitt *Pythagoras und die Pythagoreer* in: *Von Thales bis Heraklit* unter www.antike-griechische.de/Vorsokratik-1.pdf

Eudoxos, ein vielseitiger Gelehrter

Der Archytas-Schüler *Eudoxos* (ca. 408 – 347 v.Chr.) war nicht nur Astronom, sondern zugleich der bedeutendste voreuklidische Mathematiker. Eudoxos ist die herausragende Gestalt der athenischen Periode der Mathematik. In puncto Vielseitigkeit eiferte er dabei seinem Lehrer Archytas nach. Archytas (ca. 428 – 365 v.Chr.) war der letzte bedeutende Mathematiker der ionischen Periode und zugleich der letzte bedeutende Pythagoreer (zumindest wenn man von Neu-Pythagoreern aus einer deutlich späteren Zeit absieht). Die Vielseitigkeit des Eudoxos-Lehrers Archytas, wie das beinahe genauso breite Spektrum seines Schülers Eudoxos, können einen modernen Mitteleuropäer nur vor Neid erbleichen lassen. Hier zunächst eine Kurzcharakteristik des Eudoxos Lehrers Archytas:



Abbildung 2: Die Wirkungsstätten des Eudoxos von Knidos

Die Vielseitigkeit dieses ausserordentlichen süditalienischen Doriers (Archytas; NF) ist sogar für seine Zeit unerreicht. Er hat durch eine raffiniert ausgeklügelte stereometrische Konstruktion das berühmte Delische Problem, die Würfelverdoppelung, gelöst. Er hat nicht nur im Rahmen seiner Musiktheorie Sätze über Zahlenproportionen und Ungleichheiten über die drei Mittel (arithmetisches, geometrisches, harmonisches Mittel; NF) hergeleitet, sondern das ganze Buch VIII der *Elemente* mit seiner arithmetischen Theorie der stetigen Proportion, der ähnlichen Zahlen usw. ist grösstenteils sein Werk. Auch zur Theorie der irrationalen Größen (der inkommensurablen Größen; NF) hat er einen wichtigen Beitrag geliefert. PTOLEMAIOS nennt ihn mit Recht den bedeutendsten pythagoreischen Musiktheoretiker, (...). Er war sehr befreundet mit PLATON, der hauptsächlich durch ihn in die exakten Wissenschaften und die Philosophie der Pythagoreer eingeweiht wurde. In seiner Vaterstadt Tarent war er als Staatsmann hoch angesehen: Sieben Jahre wurde er immer wieder zum Strategen (militärischen Befehlshaber; NF) gewählt, obwohl das Gesetz nur eine einjährige Amtszeit erlaubte, und er hat keine Schlacht verloren.⁴

Da wirkt es fast natürlich, wenn der Archytas Schüler Eudoxos nicht nur einfach Astronom war, sondern auch eine Ausbildung als Arzt besaß, Beiträge zur Geografie verfasste und entscheidend an der Gesetzgebung seiner Heimatstadt Knidos mitwirkte. In der Mathematik schuf Eudoxos die Proportionenlehre, die Buch V der *Elemente* Euklids füllt. Er hat (wie sein Lehrer) eine neue Lösung des delischen Problems gefunden und ist zudem für große Teile von Buch XII der *Elemente* (Stereometrie) verantwortlich.⁵ Er leitete in der am Marmarameer gelegenen Stadt Kyzikos eine wissenschaftliche Schule, wobei er sich als Philosoph, Astronom und Mathematiker profilierte. 368 übersiedelte er nach Athen, trat der Akademie bei und hat dort Platon (während dessen 2. Sizilien-Reisen) als Leiter der Akademie vertreten. Er starb etwa 347 in seiner Geburtsstadt Knidos.⁶

Obwohl er ein Schüler von Archytas war, ist Eudoxos *kein* Pythagoreer. Eudoxos ist, im Gegensatz zur pythagoreischen Tradition, kein Freund der Zahlenmystik. Auch ansonsten hielt er nichts von magischem Denken, Okkultem oder Mystischem.

He was a *man of science* if there ever was one. No occult or superstitious lore appealed to him;⁷

4 B.L. van der Waerden: *Erwachende Wissenschaft*. Bd. 1. Basel, Stuttgart: Birkhäuser Verlag 1956. S. 247f

5 Weitere Informationen hierzu findet man in *Pythagoras & Co. - Griechische Mathematik vor Euklid* unter www.antike-griechische.de/Pythagoras.pdf und *Euklid und die Elemente* unter www.antike-griechische.de/Euklid.pdf

6 Die Eudoxos Biografie ist nicht ganz unstrittig. Insbesondere *Lasserre* (Lasserre: Die Fragmente des Eudoxos von Knidos) vertritt hier andere Positionen.

7 Thomas Heath: *A History of Greek Mathematics*. Volume I. New York: Dover Publications 1981. S. 323

Eudoxos, der einflussreiche Astronom

Als vielfach interessierter Gelehrter beschäftigte sich *Eudoxos* auch mit den Rätseln der Astronomie. Bereits die Babylonier wussten, dass es das eigentümliche Phänomen gibt, dass Planeten gelegentlich rückwärts zu laufen scheinen (siehe Abb. 1). Frühe mesopotamische Zeugnisse beschreiben dieses Phänomen beeindruckend präzise:

Auf dem Höhepunkt seiner Kraft begann Mars zu glänzen und blieb so mehrere Wochen lang, wurde rückläufig, um danach wieder seine gewohnte Bahn aufzunehmen, durchlief so zwei- und dreimal denselben Weg. Die Größe des dergestalt dreimal durchlaufenen Weges war 20 Grad.⁸

Solche Sternbeobachtungen waren in der babylonischen Kultur aber mehr Bestandteil der Astrologie, als Teil einer astronomisch interessierten Verstandeskultur. Später, bei der Eroberung des persischen Großreiches durch *Alexander den Großen*, hat sich die griechische Kultur dann selbst mit dem babylonischen Bazillus der Astrologie gründlich infiziert. Leider hat sich dadurch die Plage der babylonischen Astrologie bis heute in die westlich geprägten Kulturen vererbt.

Nichts desto trotz sind aber die babylonischen Sternbeobachtungen eine der wichtigen (vorwissenschaftlichen) Quellen der griechischen Astronomie. Der massive Import des babylonischen Wissens um Himmelsphänomene in den griechischen Kulturraum beginnt mit *Thales von Milet* (ca. 625 – 550 v.Chr.). Das Wissen um die (scheinbar) retrograden Bewegungsphasen bei Planetenbahnen dürfte im griechischen Kulturraum also schon 100 – 200 Jahre verfügbar gewesen sein, als *Eudoxos* sein Modell zur Erklärung dieses Phänomens vorlegte.

Wenn hier von *Planeten* die Rede ist, ist das ein wenig unpassend. Passender ist der Begriff *Wandelstern*.⁹ Neben Sonne und Mond kannten die antiken Griechen fünf *Wandelsterne*: Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn.¹⁰ Zudem gab es natürlich noch den Fixsternhimmel. Die Wandelsterne wurden wegen ihrer veränderlichen (wandelbaren) Position gegenüber dem Fixsternhimmel (mit den unwandelbaren Sternbildern) abgegrenzt.

Über das moderne Wissen zur Typologie der Himmelsobjekte (Sonne/Sterne, Planeten, Monde) verfügte man damals natürlich noch nicht. Jedoch wurde bereits in der griechischen Antike die Frage diskutiert, ob tatsächlich *alle* sichtbaren Himmelskörper über *eigenes* Licht verfügen oder ob *einige* vielleicht nur das Licht anderer Quellen *reflektieren*. Der in Athen lehrende ionische Naturphilosoph *Anaxagoras von Klazomenai* (ca. 500 – 428 v.Chr.) gehörte zu denen, die das Mondlicht zum Widerschein des Sonnenlichts erklärten.¹¹ Das war damals für die Athener eine revolutionäre These. Wegen der damals noch irritierenderen Behauptung, dass die Sonne eine glühende Gesteinsmasse größer als der Peloponnes sei, wurde er dann um 436 v.Chr. in Athen wegen Leugnung der Götter angeklagt und zu Verbannung sowie einer Geldstrafe verurteilt. Die Beschäftigung mit Astronomie kann ein recht gefährliches Geschäft sein. Das hat über 2.000 Jahre später auch Galileo Galilei erleben müssen.

Eudoxos hat sich zum Glück durch derartiges nicht davon abhalten lassen, seine astronomischen Forschungen voranzutreiben und zu veröffentlichen.

8 Mesopotamische Sternbeobachtung aus dem 7. oder 6. vorchristlichen Jahrhundert. Zitiert nach:

André Pichot: Die Geburt der Wissenschaft: Von den Babyloniern zu den frühen Griechen. Köln: Parkland Verlag 2000 (Sonderausgabe). S.121

9 Laut Fremdwörterlexikon ist ein Planet ein Himmelskörper der einen Stern umkreist und kein eigenes Licht besitzt. Obwohl „Planet“ etymologisch über passende griechische Wurzeln verfügt, verwende ich ab jetzt das weniger mit modernen Vorstellungen aufgeladene Wort „Wandelstern“. Es steht heute der antiken Idee eines „Planeten“ näher.

10 Die weiter außen liegenden Planeten sind ohne Hilfsmittel wie Fernrohr oder Teleskop nicht zu entdecken. Allen antiken Kulturen, und keineswegs nur den Griechen, waren deswegen die äußeren Planeten entgangen.

11 Zum ionischen Naturphilosophen Anaxagoras siehe auch: Von *Xenophanes bis Demokrit* unter: www.antike-griechische.de/Vorsokratik-2.pdf

Die astronomischen Modelle des Eudoxos von Knidos

Die Rekonstruktion der astronomischen Modelle von *Eudoxos* ist trotz des Verlustes seiner Werke möglich, weil wir glücklicherweise zwei einschlägige antike Quellen haben, die die Leistung des *Eudoxos* besprechen: Einerseits das *Kapitel 8 aus dem XII. Buch der Metaphysik* von *Aristoteles*, sowie andererseits die Ausführungen des spätantiken *Aristoteles* Kommentators [Simplikios \(Simplicius\)](#).

Eudoxos ging von einer Kugelgestalt der Erde aus. Er kannte 7 astronomische Objekte, die sich relativ zum Fixsternhimmel bewegen: Sonne, Mond und die fünf Wandelsterne Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Für jedes dieser 7 astronomischen Objekte hat *Eudoxos* je ein *eigenes* Modell entwickelt. Sie bestehen jeweils aus der äußeren Fixstern-Sphäre und 2 oder 3 inneren Sphären. Die innerste Sphäre trägt dabei jeweils das astronomische Objekt. Im Zentrum der homozentrischen Sphären ruht die Erde. Sie führt auch keine Eigendrehung aus. Mit jedem der 7 Modelle kann nur die Bahn eines *einzig*en der 7 Himmelskörper modelliert werden.

Die Fixstern-Sphäre dreht sich einmal pro ([siderischem](#)) Tag¹² um 360°. An der Fixstern-Sphäre ist die erste innere Sphäre über eine Drehachse befestigt. So wird die erste innere Sphäre einerseits mit der Fixstern-Sphäre mitgeführt, andererseits dreht sie sich aber auch relativ zur Fixstern-Sphäre. Ganz analog ist die *zweite* innere Sphäre an der *ersten* inneren Sphäre befestigt. Für die Modellierung der Sonnen- und Mondbahn verwendet *Eudoxos* jeweils nur zwei innere Sphären. Dort ist das astronomische Objekt (eben Sonne oder Mond) auf der zweiten inneren Sphäre befestigt. Bei der Modellierung der Wandelsterne Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn setzt *Eudoxos* aber drei innere Sphären ein. Hier ist dann der Wandelstern auf der dritten inneren Sphäre befestigt.

Der in der Skizze dargestellte Querschnitt (s. Abb. 3, nächste Seite) bezieht sich auf eine Situation die (wenn überhaupt) nur äußerst selten eintritt: alle Drehachsen liegen in einer Ebene. Das ist natürlich im Regelfall nicht so. Der Querschnitt einer typischeren Situation wäre allerdings nicht so informativ.

Durch die *Winkel*, die die Drehachsen miteinander bilden, die *Orientierung* der Drehung und die unterschiedlichen *Winkelgeschwindigkeiten* der verschiedenen Drehungen lassen sich sehr komplexe Muster der Bewegung gegenüber der Fixstern-Sphäre erzeugen. Und das, obwohl die Winkelgeschwindigkeit an jeder einzelnen Drehachse *konstant* ist.

Einerseits können so komplexe Bewegungsabläufe und auch *retrograde* Bewegungsphasen modelliert werden, *andererseits* werden die Bewegungen der Himmelskörper durch Überlagerung perfekt kreisförmiger Bewegungen nachgeahmt.¹³

Damit verbindet *Eudoxos* in seinen sieben Modellen das Streben nach genauer Modellierung der Naturphänomene mit philosophisch-ästhetischen Grundsätzen wie wir sie z.B. auch von *Platon* kennen. Für *Platon* kamen nämlich nur gleich- wie kreisförmige Bewegungen als Grundlage der Himmelsmechanik in Betracht:¹⁴

Wie eine wichtige Quelle, der *Aristoteles*-Kommentator *Simplikios*, unter Berufung auf *Eudemos* und *Sosigenes* berichtet, hat *Eudoxos* damit eine von *Platon* gestellte Aufgabe in Angriff genommen. Denn *Platon* hatte den Astronomen das Problem gestellt, jene

12 Der *bürgerliche* Tag von Sonnenhöchststand zu Sonnenhöchststand dauert bekanntlich 24 Stunden. Der *siderische* Tag ist ca. 4 Minuten kürzer. Aus moderner Sicht gesprochen ist ein siderischer Tag die Zeit, die die Erde benötigt, um sich relativ zum Fixsternhimmel einmal um die eigene Achse zu drehen. *Eudoxos* wusste wahrscheinlich schon, dass die scheinbare Umdrehung des Fixsternhimmels weniger Zeit benötigt, als ein Sonnentag dauert. Wie genau er damals schon die Zeitdifferenz bestimmen konnte, ist allerdings unklar.

13 Eine detaillierte Diskussion der *Eudoxos* Modelle hat *Henry Mendell* (California State University, Los Angeles) unter der Adresse <http://web.calstatela.edu/faculty/hmendel/Ancient%20Mathematics/Eudoxus/Astronomy/EudoxusHomocentricSpheres.htm> ins Netz gestellt.

14 Siehe hierzu auch: *Platon – Mathematik, Ideenlehre und totalitäre Staatsutopien* unter <http://www.antike-griechische.de/Platon.pdf> (Abschnitt: Platons Akademie)

gleichmäßigen und geordneten Bewegungsformen zu finden, mit denen man die Bewegungen der Planeten erklären könnte. (...)

Es sieht manchmal so aus, als bewegten sich die Planeten ziemlich schnell; dann scheinen sie auf einmal stehenzubleiben, es folgt sogar eine rückläufige Bewegung, und nach einiger Zeit setzen sie die früher unterbrochene Bewegung wieder fort. Aber es kann doch nicht möglich sein, daß Gestirne, diese nach griechischer Auffassung »unsterblichen Wesen«, ohne Regeln sind; die Unregelmäßigkeit kann doch bloß scheinbar sein. Darum hat Platon den Astronomen zum Ziel gesetzt, Bewegungsformen zu finden, die die »Phänomene retten«, d.h. die zeigen, daß das scheinbare unregelmäßige Herumirren dieser Himmelskörper in Wirklichkeit doch wohlgeordnete Bewegung ist.¹⁵

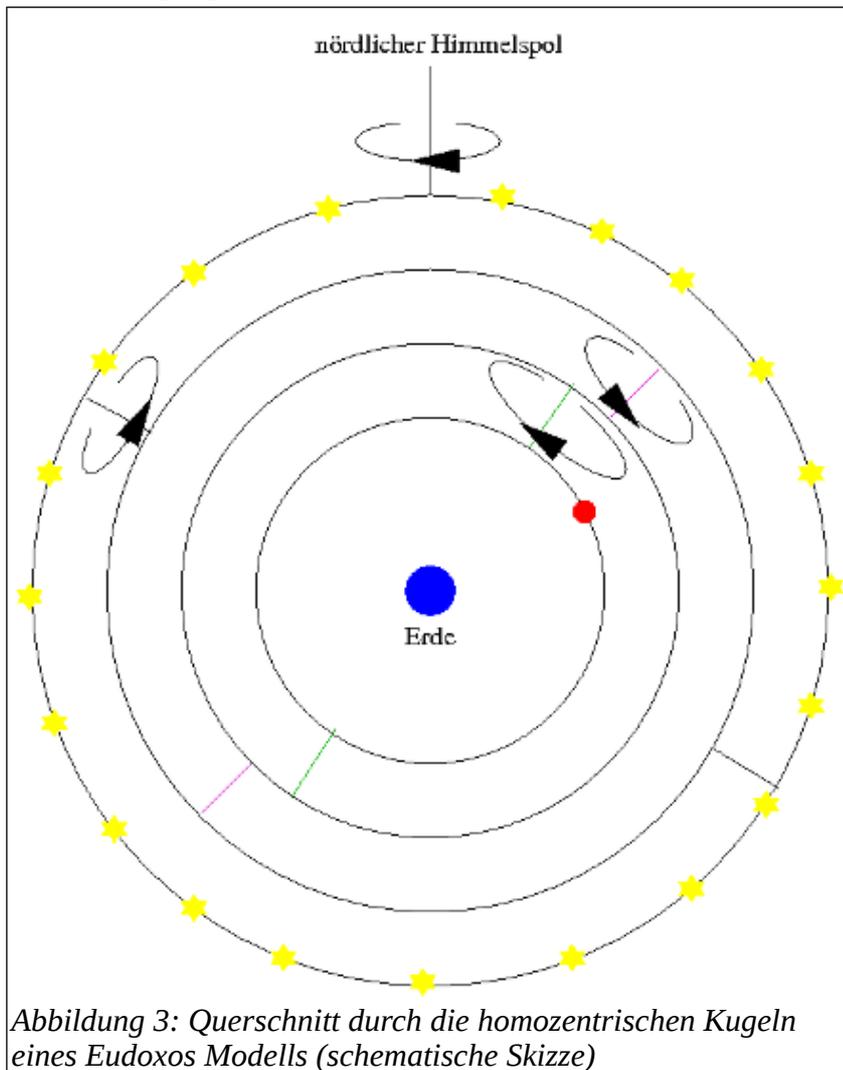


Abbildung 3: Querschnitt durch die homozentrischen Kugeln eines Eudoxos Modells (schematische Skizze)

Ob Platon, wie hier unterstellt, tatsächlich den entscheidenden Anstoß zur Entwicklung der Eudoxos-Modelle lieferte, ist allerdings fraglich. Platons Bedeutung für die antike Mathematik und Astronomie wurde und wird nämlich gern etwas übertrieben. Aber Szabo hat sicherlich in soweit recht, dass die Lösung des Problems der Wandelsternbahnen mittels *gleichmäßiger Kreisbewegungen* Platon ein Herzensanliegen war. Die *Simplikios* Stelle, auf die Szabo im Zitat Bezug nimmt, liest sich übrigens in der Übersetzung von Heath wie folgt:

And, as Eudemus related in the second book of his astronomical history, and Sosigenes also who herein drew upon Eudemos, Eudoxos of Cnidos was the first of the Greeks to concern himself with hypotheses of this sort, Plato having, as Sosigenes says, set it as a problem for all earnest students of this subject to find

what are the uniform and ordered movements by the assumption of which the phenomena in relation to the movements of the planets can be saved. (Simplicius, on *De caelo*)¹⁶

Ob nun in Erledigung einer von Platon gestellten Aufgabe oder vielleicht doch etwas mehr aus eigenem Antrieb, Eudoxos hat den Reigen der wissenschaftlich-geometrischen Modelle der griechischen Astronomie eröffnet. Bei ihm (wie bei vielen seiner Nachfolger) sind dabei *gleichmäßige Kreisbewegungen* das bevorzugte Mittel der Modellbildung.

15 Arpad Szabo: Das geozentrische Weltbild. München. dtv 1992. S. 37f

16 Zitiert nach: Thomas Heath: Greek Astronomy. Dover Publications 1991. S.67. **Hinweis:** Sosigenes lebt im 2. Jahrhundert n. Chr., Platon starb im 4. Jahrhundert v.Chr.; Sosigenes, auf den sich *Simplikios* hier an der entscheidenden Stelle beruft, war also nicht gerade ein Augenzeuge der Vorgänge, über die er berichtet.

Eine echte Kosmologie liefern die 7 Modelle des *Eudoxos* allerdings noch nicht. Erst *Aristoteles* hat die Sphärenmodelle des *Eudoxos* zu einer einheitlichen Kosmologie weiter entwickelt.¹⁷ *Aristoteles* ist an astronomischen Fragen deutlich interessiert und kennt die Ergebnisse des *Eudoxos*, die er ja in seiner eigenen Kosmologie verwendet, bestens:

Daß nun die bewegten Körper (Sonne, Mond und Planeten; NF) mehrere Bewegungen haben, ist selbst denen offenbar, die sich nur wenig mit der Sache beschäftigt haben; denn jeder von den Planeten hat mehr als eine Bewegung. Wieviel ihrer aber sind, darüber geben wir jetzt der Übersicht wegen die Angaben einiger Mathematiker an, damit man in Gedanken eine bestimmte Zahl annehmen kann; übrigens muß man teils selbst untersuchen, teils diejenigen befragen, welche die Sache untersuchen; und wenn sich dann bei dieser Beschäftigung etwas von dem jetzt Gesagten Abweichendes ergibt, so muß man zwar beide schätzen, aber den genaueren Folgen.

Eudoxos nun nahm an, daß die Bewegung der Sonne und des Mondes in je drei Sphären geschehe; die erste davon sei die Sphäre der Fixsterne, die zweite habe ihre Richtung mitten durch den Tierkreis, die dritte gehe in schräger Richtung durch die Breite des Tierkreises, schräger aber durchschneide den Tierkreis die Sphäre in welcher der Mond, als die, in welcher die Sonne sich bewegt. Jeder der Planeten bewege sich in vier Sphären; unter denen sei die erste und zweite mit den entsprechenden von Sonne und Mond einerlei, weil sowohl die Sphäre der Fixsterne alle in Bewegung setze, als auch die ihr untergeordnete, in der Richtung der Mittellinie des Tierkreises bewegte allen gemeinsam sei; für die dritte lägen die Pole bei allen Planeten in dem durch die Mittellinie des Tierkreises gelegten Kreise; die vierte Sphäre bewege sich nach der Richtung eines gegen die Mitte der dritten Sphäre schiefen Kreises. Für die dritte Sphäre hätten die übrigen Planeten jeder seine eigenen Pole, Venus und Merkur aber dieselben. (*Aristoteles*: *Metaphysik*. Buch 12, Kap. 8, 1073b)¹⁸

Dieses *Aristoteles* Zitat stellt klar, dass *Astronomie* von *Aristoteles* zwar als mathematisierte, aber dennoch empirische Wissenschaft aufgefasst wurde: *übrigens muß man teils selbst untersuchen, teils diejenigen befragen, welche die Sache untersuchen; und wenn sich dann bei dieser Beschäftigung etwas von dem jetzt Gesagten Abweichendes ergibt, so muß man zwar beide schätzen, aber den **genaueren** Folgen*. Das bedeutet natürlich noch nicht, dass es ein Bewusstsein für den Status-Unterschied zwischen einer Formal- oder Strukturwissenschaft wie der Mathematik einerseits und den empirischen Wissenschaften (wie z.B. der *Astronomie*) andererseits gab, aber die gelegentlich geäußerte These, dass die Griechen alle Probleme durch reines Nachdenken lösen wollten, trifft hier offensichtlich nicht zu.

Der zweite überaus wichtige Punkt, der bei diesem Zitat deutlich wird, ist, dass *Eudoxos* *sieben getrennte* Modelle entwickelte, wobei jedes der Modelle *über eine eigene Fixstern-Sphäre* verfügt. Bei *Eudoxos* müssen wir, je nachdem, für welchen Himmelskörper wir uns interessieren, das jeweils einschlägige Modell benutzen. Dabei wird die Fixstern-Sphäre in allen sieben Modellen einerseits identisch modelliert, andererseits als jener Hintergrund benutzt, vor dem sich die Bewegungen von Sonne, Mond und Planeten abspielen.

Mit den Mitteln der heutigen Technologie könnte man allerdings mit ein paar Glaskugeln und Achsen samt Elektromotoren (und sehr viel Bastelei) alle 7 Modelle bauen und dann anstelle eines Modells der Erde jeweils eine kleine Videokamera ins Zentrum setzen. Würde man dann die Bilder aller 7 Videokameras *überblenden*, so erhielte man eine *Gesamtschau* der Prognosen der 7 Einzelmodelle von *Eudoxos*.

¹⁷ Ich nehme an, *Eudoxos* hat auf eine Integration seiner sieben Modelle zu einem einheitlichen kosmologischen Modell bewusst verzichtet. Der Trick, den *Aristoteles* anwendet, um aus den sieben Modellen *eins* zu machen, ist nämlich relativ simpel. Hätte *Eudoxos* angefangen, über eine Integration seiner sieben Modelle nachzudenken, wäre ihm die von *Aristoteles* benutzte Konstruktionsmethode sicherlich sofort ins Auge gesprungen. *Eudoxos* war schließlich ein exzellenter Mathematiker und hat wesentlich schwierigere Probleme gelöst. Vielleicht hätte er aber auch die von *Aristoteles* verwendete Methode als zu plump verworfen.

¹⁸ *Aristoteles*: *Metaphysik*. Übersetzt von Hermann Bonitz. Reinbek: Rowohlt 1999, 2. Auflage. S. 322

Stärken und Schwächen der Eudoxos Modelle

Analysieren wir die Modellierung der Wandelsterne Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn etwas näher. Bei jedem dieser fünf Wandelsterne benutzt Eudoxos 4 homozentrische Sphären. Betrachten wir diese 4 Sphären von außen nach innen:

- Die *äußerste* Kugel repräsentiert jeweils den Fixsternhimmel. Sie dreht sich einmal pro (siderischem) Tag um die eigene Achse. Ihr Mittelpunkt (wie der Mittelpunkt aller anderen Sphären auch) soll die als ruhend gedachte Erde sein.
- Vor dem Hintergrund des Fixsternhimmels läßt sich eine Bewegung der (realen) Wandelsterne im Tierkreis (oder Zodiak) beobachten. Der Tierkreis ist ein schmaler Gürtel von ca. 20° Breite an der Himmelskuppel der Fixsterne. Das Band des Tierkreises ist gegenüber der Äquatorebene der Erde deutlich geneigt. Die *zweite* Sphäre des Eudoxos modelliert eine (Grund-)Bewegung der Wandelsterne im Tierkreis. Die (modellierten) Wandelsterne durchwandern jetzt schon ein Mal den Fixsternhimmel im Band des Tierkreises. Die Bewegung vor dem Hintergrund der Fixstern-Sphäre ist aber noch absolut gleichmäßig.
- Die real beobachtbare Bewegung der Wandelsterne ist aber nicht gleichmäßig. Sie steigen im Tierkreis mal etwas nach oben auf, sinken dann wieder herab. Und insbesondere: Es gibt retrograde Bewegungsphasen! Zur Modellierung all dieser Effekte stehen Eudoxos nur die *beiden inneren* Sphären zur Verfügung. Betrachtet man *nur* diese beiden inneren Sphären, so dienen sie Eudoxos dazu, eine Bewegung entlang einer *Hippopede* genannten Figur zu erzeugen. Ganz grob entspricht diese Figur einer acht bzw. unserem Zeichen für unendlich. (siehe hierzu die Erläuterungen sowie die Animationen auf <http://web.calstatela.edu/faculty/hmendel/Ancient%20Mathematics/Eudoxus/Astronomy/EudoxusHomocentricSpheres.htm>. Überlagert man die Bewegung auf der *Hippopede* mit der Bewegung der 2. Sphäre, so kann man eine grobe Näherung der (relativ zur Fixstern-Sphäre) retrograden Bewegungen erzielen.

Obwohl wir gar nicht alle Parameter kennen, die Eudoxos in seinen Modellen verwendete, lässt sich trotzdem die Qualität dieser Modelle *grob abschätzen*:

Während man die 3-Sphären-Modelle für Sonne und Mond einigermaßen zum funktionieren bringen kann, sieht es für die Planeten durchmischtes aus. Mit jeweils 4 Sphären sind gute Modelle für Jupiter und Saturn (und mit Abstrichen für Merkur) möglich. Bei der Venus sieht es dann schon deutlich schlechter aus und beim Mars gibt es einfach nur noch riesige Probleme. Dessen Bahnirregularitäten allein mittels des Durchlaufs durch eine Hippopede modellieren zu wollen, funktioniert einfach nicht.

To sum up. For the sun and moon the hypothesis of EUDOXUS sufficed to explain adequately enough the principal phenomena, except the irregularities due to the eccentricities, which were either unknown to Eudoxus or neglected by him. For Jupiter and Saturn, and to some extent for Mercury also, the system was capable of giving on the whole a satisfactory explanation of their motion in longitude, their stationary points and their retrograde motions; for Venus it was unsatisfactory, and it failed altogether in the case of Mars.¹⁹

Daneben gab es in der Antike noch einen Kritikpunkt, der auch bei Simplicios erwähnt wird: Die variierende Helligkeit der Planeten kann *nicht* erklärt werden. Die Planeten sind ja gemäß Modell stets gleich weit von der Erde entfernt. Wieso erscheinen sie dann aber mal heller und mal weniger hell? Dieses Problem betrifft alle geozentrischen Ansätze, die mit homozentrischen Kugeln arbeiten. Auch die (späteren) astronomischen Modelle von Kallippos und Aristoteles sind deswegen entsprechenden Einwänden ausgesetzt.

19 Thomas Heath: Aristarchus of Samos. Elibron Classics 2007. S. 211

Die Überarbeitung der Eudoxos Modelle durch Kallippos

Kallippos von Kyzikos (ca. 370 – 300 v.Chr.) war ein sowohl theoretisch wie beobachtend arbeitender Astronom. Er hat damals schon die Länge des astronomischen Jahres auf 365¼ Tage bestimmt. Das weicht vom heutigen Messwert nur um ein paar Minuten ab. Außerdem ermittelte er erstaunlich exakte Werte für die genaue (astronomische) Länge der vier Jahreszeiten. Und er hat, was hier am meisten interessiert, am Lykeion in Athen (zusammen mit *Aristoteles*?) an der Verfeinerung der *Eudoxos* Modelle arbeitete.

Obwohl die *Eudoxos* Modelle viele Eigenheiten der von der Erde aus beobachtbaren Bahnen von Himmelskörpern *qualitativ* gut nachahmen konnten, waren sie in puncto *quantitativer* Genauigkeit der Vorhersagen (auch nach den Maßstäben der Antike) noch nicht befriedigend.

Die Probleme, die bei einer geozentrischen Modellierung der Bahnen von Sonne, Mond und Wandelsternen zu bewältigen sind, sind allerdings auch beträchtlich. Nutzen wir unser modernes Wissen, um einen kurzen Blick auf die Ursachen dieser Probleme zu werfen:

Die Erdachse steht *nicht* senkrecht auf der Ebene der Umlaufbahn um die Sonne.

Die Umlaufbahn der Erde um die Sonne, wie die aller anderen Planeten, beschreibt keinen Kreis, sondern ist elliptisch.²⁰

Die Geschwindigkeit der Planeten auf ihren Bahnen ist nicht konstant, sondern variiert in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sonne.

Die Planetenbahnen liegen nicht alle in einer Ebene.

Die Herausforderung, die Position eines Wandelsterns am Fixsternhimmel im Rahmen eines geozentrischen Modells vorherzusagen, ist folglich nicht zu unterschätzen.²¹ Es ist also nicht verwunderlich, dass mit dem ersten Wurf von *Eudoxos* noch nicht alle Probleme vom Tisch waren. Es beginnt vielmehr der lange und bis heute noch nicht abgeschlossene Prozess der Verbesserung unserer astronomischen Modelle. Den Beitrag *Kallippos* dazu fasst *Aristoteles* in seiner *Metaphysik* kurz zusammen:

Kallippos stimmte in Betreff der Lage der Sphären, d.h. der Ordnung ihrer Abstände mit Eudoxos überein, auch schrieb er dem Jupiter und dem Saturn dieselbe Anzahl von Sphären zu wie jener; doch der Sonne und dem Mond, meinte er, müssten noch je zwei hinzugefügt werden, wenn man die wirklichen Erscheinungen darstellen wolle, und jedem anderen der übrigen Planeten noch eine. (*Aristoteles*, *Metaphysik*, Buch XII, Kapitel 8, 1073b)²²

Stellt man die Unterschiede zwischen den früheren Eudoxos- und den späteren Eudoxos-Kallippos Modellen tabellarisch gegenüber, so ergibt sich für die Anzahl der verwendeten Sphären (bzw. inneren Sphären) folgendes Bild:

Modell	Sonne	Mond	Merkur	Venus	Mars	Jupiter	Saturn	Summe
Eudoxos	3 (2)	3 (2)	4 (3)	4 (3)	4 (3)	4 (3)	4 (3)	26 (19)
Eudoxos-Kallippos	5 (4)	5 (4)	5 (4)	5 (4)	5 (4)	4 (3)	4 (3)	33 (26)

Auf der Grundlage der durch *Kallippos* bearbeiteten *Eudoxos* Modelle formuliert dann *Aristoteles* sein kosmologisches Modell im Buch XII der *Metaphysik*.²³

20 Dabei ist die Erdbahn allerdings längst nicht so weit von einem Kreis entfernt, wie dies z.B. beim Mars der Fall ist.

21 Ist man an wirklich langfristigen Prognosen interessiert, so kommen übrigens noch weit delikater Probleme hinzu. Einschlägige Stichworte sind z.B.: Perihel- oder Apsidendrehung der Planetenbahnen und taumelnde Erdachse (langperiodische Präzession, kurzperiodische Nutation).

22 *Aristoteles*: *Metaphysik*. Übersetzt von Hermann Bonitz. Reinbek: Rowohlt 1999, 2. Auflage, S. 322

23 Eine ausführlichere Diskussion des Beitrags von Kallippos findet man z.B. bei Friedrich Heglmeier: *Die griechische Astronomie zur Zeit des Aristoteles* in Antike Naturwissenschaft und ihre Rezeption VI (1996).

Die mysteriöse 27. Sphäre des Eudoxos

Bei der Frage, wieviele Sphären Eudoxos insgesamt bei seiner astronomischen Modellierung verwendet, ist ein echtes Kuriosum zu vermelden. Der unbedarfte Leser, der dem Text bis hierher gefolgt ist, wird auf diese Frage mit „26“ antworten: 5 Planeten-Modelle à 4 Sphären sowie die Modelle für Sonne und Mond mit je 3 Sphären ergibt einfach 26.

Die Angabe **26** ist als Antwort auf die gestellte Frage auch nicht ganz unüblich,²⁴ aber doch in einer deutlichen Minderheiten-Position. Und das betrifft nicht nur das Web mit seiner Vielzahl an Auftritten mit nur beschränkter Seriosität. Nein, auch wenn man wissenschaftliche Fachliteratur zu Rate zieht, liest man häufig eine **27**.

Nur drei Beispiele für international ausgewiesene, höchst renommierte Fachwissenschaftler aus der **27-Fraktion**:

Demnach besteht das gesamte Universum nach Eudoxos aus 27 ineinandergelegenen Sphären, die ein gemeinsames Zentrum haben.²⁵

[Arpad Szabo, Altphilologe und langjähriger Professor für Wissenschaftsgeschichte](#)

Mitglied der Akademien der Wissenschaften in Athen, Budapest, Lucca und Turku. Er war Fellow des Wissenschaftskolleg zu Berlin und des Center for Advanced Studies in Stanford

EUDOXOS hat schließlich 27 Sphären benötigt, um die Ergebnisse der Beobachtungen am Sternenhimmel zu beschreiben.²⁶

Dr. Ing. Dr. phil. Karoly Simonyi, Professor für Elektrotechnik, angesehener Wissenschaftshistoriker, Leiter der atomphysikalischen Abteilung der Ungarischen Akademie der Wissenschaften

Thus, with three spheres for the sun, three for the moon, four for each of the planets and one for the daily rotation, there are 27 spheres at all.²⁷

[Sir Thomas Heath](#), englischer Altphilologe und Mathematikhistoriker, Fellow der Royal Society

Sollte man sich angesichts dieser Voten überaus renommierter Gelehrter nicht doch besser einfach der 27-Fraktion anschließen? Aber auf Grund welcher Argumente? Ich sehe keine und so bleibe ich der Minderheits-Fraktion, die nur 26 Eudoxos-Sphären zählt, treu, zumal es hier gute, [historisch arbeitende Physiker](#) gibt.

Wie ich mittlerweile vermute, beginnt die Geschichte mit der 27. Sphäre bereits 1874 beim italienischen Astronom [Schiaparelli](#). In der Übersetzung seiner Arbeit zu den Eudoxos-Modellen durch W. Horn (Abhandlungen zur Geschichte der Mathematik, 1877, S. 101ff) lesen wir zur ominösen 27. Sphäre auf S. 115: „Die Gesamtzahl der bewegenden Sphären betrug also 26 und noch eine dazu für die Fixsterne“. Ich habe den Verdacht, dass sich die Geschichte mit der 27. Sphäre von hier aus (durch ungeprüfte Übernahmen) in der wissenschaftlichen Literatur verbreitet hat.

Wenn man sich das hier auf Seite 9 vorgelegte Aristoteles Zitat (Metaphysik. Buch 12, Kap. 8, 1073b) genau ansieht, dann wird man schnell merken, dass irgendein Bedarf für eine Extra-Sphäre zur Modellierung der täglichen Drehung (der „daily rotation“ bei Heath) oder zur Aufnahme der Fixsterne (s. [Schiaparelli](#) und viele andere) nicht besteht. Jedes der sieben Eudoxos Modelle verfügt nämlich unzweideutig über eine Sphäre für die Fixsterne. Und diese Sphäre dreht sich einmal pro Tag um ihre Achse.

24 Siehe hierzu z.B. die Ausführungen zu Eudoxos in der meisterhaften Darstellung der griechischen Astronomie von [B.L. van der Waerden](#): Die Astronomie der Griechen. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1988. S. 93ff.

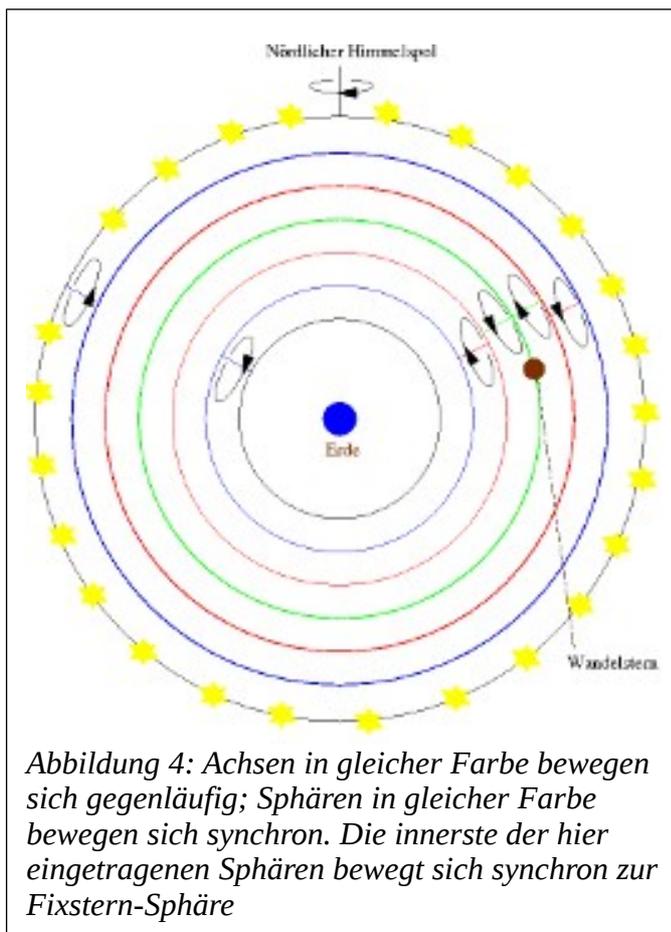
25 Arpad Szabo: Das geozentrische Weltbild. München: dtv 1992. S. 38

26 Károly Simonyi: Kulturgeschichte der Physik. Frankfurt am Main: Harri Deutsch Verlag, 3. Auflage, 2001. S. 84

27 Thomas Heath: Aristarchus of Samos. Elibron Classics 2007. S. 196

Die Viel-Sphären-Kosmologie des Aristoteles

Zurück zum eigentlichen Thema: der antiken Astronomie. Unmittelbar nach der Besprechung der Vorleistungen von *Eudoxos* und *Kallippos* kommt *Aristoteles* auf seine Theorie des Kosmos zu sprechen (Metaphysik Buch XII, Kapitel 8, 1074a). Ausgehend von den durch *Kallippos* bearbeiteten 7 Modellen des *Eudoxos* wird ein einziges Sphärenmodell zur Beschreibung des gesamten Kosmos vorgestellt. Die Prognosekraft der aristotelischen Kosmologie stimmt dabei in allen *Stärken* wie *Schwächen* mit den 7 Eudoxos-Kallippos-Modellen überein. Diese aristotelische Kosmologie hat die philosophische Diskussion um den Aufbau des Kosmos bis tief in die Renaissance hinein geprägt.



Der Trick, den *Aristoteles* benutzt, um die 7 Modelle zu einem einzigen Modell zu integrieren, ist relativ einfach. Über das Einschleiben zusätzlicher Zwischen-Sphären verschafft er sich immer wieder neue Sphären, die sich synchron mit der Fixsternsphäre bewegen. Man beginne mit der Modellierung des Saturn. Hierzu übernimmt man 1 zu 1 das Eudoxos-Kallippos-Modell für den Saturn. Bevor man jetzt mit der Modellierung des Jupiter beginnt, schiebt man **3 neue** Zwischen-Sphären ein. Bei jeder der 3 neuen Sphären ist die *Lage* der *Drehachsen* und der *Betrag* der *Winkelgeschwindigkeit* in *Übereinstimmung* mit jeweils einer (anderen) der 3 inneren Sphären des Eudoxos-Kallippos-Modells für den Saturn. Sie hat jedoch jeweils die genau *entgegengesetzte Orientierung* der *Drehrichtung* (s. Abb. 4)

Das Resultat: Die *innerste* der neu eingefügten Zwischen-Sphären bewegt sich *synchron* zur *äußersten* Sphäre: Der *Fixsternsphäre*. *Aristoteles* hat sich also eine Art *2. Fixsternsphäre* verschafft. An dieser *2. Fixsternsphäre* (die allerdings

keine Fixsterne trägt, das bleibt das Privileg der 1. Fixsternsphäre) werden jetzt die *inneren* Sphären des Eudoxos-Kallippos-Modells für den 2. Wandelstern, den Jupiter aufgehängt. Da sich die *2. Fixsternsphäre* genau so bewegt wie die *1. Fixsternsphäre*, stimmt der prognostische Gehalt für die Jupiter-Position vor dem Hintergrund des Fixsternhimmels mit dem Eudoxos-Kallippos-Modell für den Jupiter überein. So kann man also die beiden Eudoxos-Kallippos-Modelle für Saturn und Jupiter zu einem einzigen Modell integrieren.

Um den Mars integrieren zu können, verschafft man sich wiederum durch Einschlebung neuer, zurückführender Zwischen-Sphären eine *3. Fixsternsphäre*. Und so kann man fortfahren, bis alle 7 Modelle in ein einziges Modell integriert sind.

Wie viele Sphären benötigt man bei diesem Vorgehen zur Integration der Eudoxos-Kallippos-Modelle?

Die Rechnung ist einfach:

1 Fixsternsphäre		1
3 innere Sphären für Saturn	+ 3 zurückführende Sphären	6
3 innere Sphären für Jupiter	+ 3 zurückführende Sphären	6
4 innere Sphären für Mars	+ 4 zurückführende Sphären	8
4 innere Sphären für die Sonne	+ 4 zurückführende Sphären	8
4 innere Sphären für Venus	+ 4 zurückführende Sphären	8
4 innere Sphären für Merkur	+ 4 zurückführende Sphären	8
4 innere Sphären für den Mond		4

Summe		49

Verblüffender Weise nennt aber *Aristoteles* die Zahl **55**! Nun, da ist *Aristoteles* wohl eine kleine Nachlässigkeit unterlaufen. Allerdings muss man *Aristoteles* dabei zugute halten, dass er die Details des Sphärenmodells nicht besonders ausführlich diskutiert und insbesondere die Gesamtanzahl der benötigten Sphären nur mal eben so überschlägt:

Da nun der Sphären, in welchen die Planeten selbst bewegt werden, 8 und 25 sind, und von diesen nur diejenigen nicht brauchen zurückgeführt zu werden, in welchen der unterste Planet sich bewegt, so ergeben sich 6 Sphären, welche die der beiden obersten zurückführen, und 16 für die folgenden, und als Anzahl der gesamten Sphären, der bewegenden sowohl als der zurückführenden, **55** (Hervorhebung von N.F.). (*Aristoteles*: *Methaphysik*, Buch XII, Kapitel 8, 1074a)²⁸

Die Anzahl der (notwendigen) zurückführenden-Sphären bestimmt *Aristoteles* korrekt mit $6 + 16$. Er benötigt aber gar nicht alle 33 ($8 + 25$) Sphären aus den 7 Eudoxos-Kallippos-Modellen. Diese enthalten nämlich *pro* Modell eine Fixsternsphäre. Davon *benötigt Aristoteles* aber nur eine *einzig*e Fixsternsphäre. Den Ersatz für die 2. - 7. Fixsternsphäre erzeugt er sich ja mittels seines kleinen Tricks mit den „zurückführenden“ Sphären. Genau dadurch ermöglicht er es ja, die 7 Modelle in einem *einzig*en Modell zu vereinen. Also ergibt sich, dass nur $(8 + 25) - 6 + (6 + 16) = 49$ Sphären benötigt werden, um die 7 Eudoxos-Kallippos-Modelle zu einem kosmologischen System zu integrieren.

Aristoteles, der bestimmt nicht vor hatte überflüssige Sphären in sein kosmologisches System aufzunehmen, überschätzt also die Anzahl der tatsächlich benötigten Himmels-sphären hier etwas. Beruhigend, dass auch großen Denkern solche kleinen Nachlässigkeiten unterlaufen.

Aber die ganz genaue Anzahl der Sphären ist für *Aristoteles* (zumindest an dieser Stelle) sowieso nicht das zentrale Anliegen. Freimütig räumt er nämlich ein, dass, wenn man auf den Nachvollzug der ein oder anderen Erweiterung der Eudoxos-Modelle durch *Kallippos* verzichtet, man auch mit weniger (als den von ihm benannten 55) Sphären in der Kosmologie auskommen könne.

Zentrales Anliegen ist wohl eher der Nachweis, dass sich die 7 verschiedenen Modelle zu einem *einzig*en Modell integrieren lassen. Welche präzise Zahl an Sphären sich dabei ergibt, ist für *Aristoteles* eher sekundär. Wichtig ist hingegen, dass nun, nachdem gezeigt wurde, dass sich die 7 Modelle zu einem Gesamtmodell *vereinigt werden können*, es viel leichter möglich ist, den (vorher eher als geometrisches Hilfsmittel zur Modellierung von Himmelsphänomen benutzten) Sphären eine *reale* Existenz als Bestandteil unseres Kosmos zuzusprechen.

²⁸ *Aristoteles*: *Metaphysik*. Übersetzt von Hermann Bonitz. Reinbek: Rowohlt 1999, 2. Auflage. S. 323

In der Kosmologie des *Aristoteles* spielen diese (für ihn real existierenden) Sphären eine zentrale Rolle. Die unterste (die uns nächste Sphäre) trägt den Mond und trennt die *sublunare* Welt des Veränderlichen wie Vergänglichen von den *Himmelsphären* des Ewigen, Unveränderlichen und Unvergänglichen.

Sublunar gibt es für *unbelebte* Körper nur eine Art von natürlicher Bewegung, die ohne *unmittelbare* Einwirkung von außen möglich ist, und die geht immer in Richtung des „natürlichen“ Ortes. (Das meint *Fallen* in Richtung Erdmittelpunkt für *Schweres* und *Aufsteigen* in Richtung lunarer Sphäre für *Leichtes*.) In der himmlischen Welt hingegen kann eine gleichförmige Kreisbewegung auch ohne *unmittelbare* kausale Einwirkung von außen Bestand haben.

Ganz unerklärt sollen diese Kreisbewegungen aber nicht bleiben. Für die Existenz von Bewegungen bei den Gestirnen des Himmels macht *Aristoteles* *unbewegte Beweger* (*erste Beweger*) verantwortlich, und zwar je einen pro Sphäre der Himmelsmechanik (s. [Metaphysik, Buch XII, Kap. 6-10](#) und [Physik, Buch VIII](#)). Die Art und Weise, in der diese *unbewegten Beweger* für Bewegung sorgen ist allerdings vertrackt. Der ewige Kosmos mit seiner Himmelsmechanik gilt nämlich als unerschaffen und unveränderlich. Die *unbewegten Beweger* können deswegen die Bewegung *nicht* in einem einfach zu verstehenden *kausalen* Sinne verursacht haben. Trotz dieser Verwicklungen werden in der Scholastik die *unbewegten Beweger* des *Aristoteles* kurzer Hand zum *christlichen Gott* umgedeutet.

[Obwohl die im Mittelalter erfolgende Wiederentdeckung einer Vielzahl aristotelischer Schriften für die etwas traurig anmutende Bildungslandschaft des katholischen Europas erst einmal ein immenser Zugewinn war, hat sich die dann erfolgende Dogmatisierung der aristotelischen Lehren als ein Hemmnis für den immer freiere werdenden Verstandesgebrauchs in der Renaissance herausgestellt.²⁹]

Aber wenn auch nur die himmlischen Sphären das Privileg des Ewigen und Unveränderlichen haben, das Zentrum der Welt, um das sich *wortwörtlich* alles dreht, ist die *Erde*. Wahrscheinlich auch, weil sie der menschlichen Eitelkeit so sehr entgegen kommt, findet diese Sicht der Dinge bei den Griechen viel Anklang. Die antiken Griechen, die (nicht ganz grundlos) einen ausgeprägten Stolz auf ihr Hellenentum besaßen, neigten sowieso schon dazu, sich für die Krönung der Menschheit zu halten. Wenn die Hellenen die Krönung der Menschheit sind, so wie die Menschen die Krönung des irdischen Lebens sind und jetzt auch noch die Erde der Mittelpunkt der Welt ist, dann klingt das doch nach einer, zumal für griechische Ohren, ganz akzeptablen Weltdeutung.

Trotz dieser etwas süffisanten Zwischenbemerkung:

Der von *Eudoxos* eingeführte und von *Kallippos* weiter verfolgte Ansatz zur Kombination von astronomischem Beobachtungswissen mit mathematischer Modellierung (*verbunden mit dem Streben nach Genauigkeit der Vorhersagen*), war nicht mehr und nicht weniger als die Begründung der Tradition der *wissenschaftlichen* Astronomie. Wenn wir heute so viel mehr über den Aufbau des Himmels wissen als *Eudoxos* und *Kallippos*, dann deswegen, weil sich die von ihnen begründete Tradition als so fruchtbar erwies.

Aristoteles hat die Bedeutung der Leistungen von *Eudoxos* und *Kallippos* sofort erkannt und hat sich daran versucht, deren mathematisch-geometrischen Modelle zu einem Bild des Kosmos fortzuentwickeln. Man kann ihn dabei schlecht für die Borniertheit seiner Anhänger in späteren Jahrtausenden verantwortlich machen.

Bis heute sind möglichst genaue Beobachtungsdaten, mathematisches know how und das Streben nach einer Orientierung in dieser Welt die Grundlage für wissenschaftliche Fortschritte in der Astronomie. Und so, wie die Antike ihre Fehler gemacht hat, so machen wir heute unsere. Fortschritt besteht meist nur darin, überlieferte Irrtümer durch neue, intelligentere Irrtümer zu ersetzen.

29 Siehe auch: *Aristoteles: Logik und Methodik in der Antike* (www.antike-griechische.de/Aristoteles.pdf).

Unterschiedliche Angaben zur Anzahl der bei Aristoteles benötigten Sphären

Der Leser wird wohl nicht verblüfft sein, wenn ich ihm mitteile, dass die hier herausgearbeitete Zahl von nur **49** benötigten Sphären keineswegs allgemeiner Standard ist. Mit dem Altmeister *Sir Thomas Heath* bin ich bei *dieser* Frage allerdings absolut *d'accord*. Heath erläutert zunächst den Ansatz von Aristoteles auf eine Weise, die der hier vertretenen Deutung entspricht:

Aristotle, as we shall see, transformed the purely abstract and geometrical theory into a mechanical system of spheres, i.e. spherical shells in actual contact with one another; this made it almost necessary, instead of assuming separate sets of spheres, one set for each planet, to make all the sets part of one continuous system of spheres.³⁰

Aristoteles setzt ja seine Kosmologie auf die 33 Sphären der Eudoxos-Kallippos Modelle auf. Auch *Sir Thomas Heath* zählt hier 33 Sphären, von ihm *Deferent spheres* genannt. Von einer benötigten extra Sphäre für „daily rotation“ (s. Die mysteriöse 27. Sphäre des Eudoxos) ist hier nicht mehr die Rede.³¹ Und das Lesen seiner Kommentare zur aristotelischen Integration der Modelle zu einer Kosmologie hat mir echtes Vergnügen bereitet:

The innermost of the $n - 1$ reacting spheres (zurückführende Sphären; NF) moves, as above shown, in the same way as the sphere of the fixed stars. But the first sphere of the next nearer planet (as of all the planets) is also a sphere with the same motion as that of the fixed stars, and consequently we have just two spheres, one just inside the other, with one and the same motion, that is, doing the work of one sphere only. (...) he could have saved six spheres out of his total number.³²

Man könnte also hoffen, dass sich die Variation der Angaben zur Anzahl der benötigten aristotelischen Sphären auf die Alternative **55** oder **49** beschränkt. **55** ist der Wert den Aristoteles angibt, **49** ist der Wert an *benötigten* Himmels sphären, der sich ergibt, wenn man das Verfahren durchdenkt und dabei nachrechnet.

Zu meinem Erstaunen sind jedoch selbst bei renommierten Autoren auch andere Werte nachzulesen. Ich will es hier bei einem (allerdings sehr prominenten) Beispiel belassen:

Wichtig ist, daß Aristoteles seinen Nachfolgern eine äußerst komplizierte Himmelsmaschine, bestehend aus fünfundfünfzig Planetensphären zuzüglich des Fixsternhimmels hinterließ.³³

[David C. Lindberg](#), Professor für Wissenschaftsgeschichte (Hilldale Professor) an der University of Wisconsin–Madison

Getreu der *Maxime and one for the pot* wird die Anzahl der Sphären fröhlich um 1 erhöht. Der Verweis auf eine *extra* Fixstern-Sphäre, die angeblich zusätzlich benötigt wird, ist schon etwas kurios. Lindberg verweist nämlich im Fußnotenapparat etliche mal auf *Aristarchus of Samos* von *Thomas Heath*, das Werk aus dem die obigen Zitate stammen.

Aber Mathematik oder mathematisierte Wissenschaften sind (trotz seiner Ausbildung als Physiker) einfach nicht Lindbergs Ding. Er mag mehr den Zauber des religiös verzückten Mittelalters. Wenn es hingegen um Mathematik geht, dann bringt er es schon mal fertig, das Parallelenaxiom Euklids seinen Lesern als „*eine Aufzählung der Bedingungen unter denen sich Geraden schneiden*“³⁴ vorzustellen (das ist wirklich wahr!).

30 Thomas Heath: *Aristarchus of Samos*. Elibron Classics 2007. S. 217

31 Andere Autoren bleiben auch bei *Kallippos* der Idee der „benötigten“ *extra* Sphäre treu und zählen dort 34 Sphären.

32 Thomas Heath: *Aristarchus of Samos*. Elibron Classics 2007. S. 218f. Es soll nicht verheimlicht werden, dass Heath anschließend darauf zu sprechen kommt, dass eventuell noch zusätzliche Sphären unterhalb des Mondes benötigt werden. Diese Sphären haben allerdings nichts mehr mit den Eudoxos-Kallippos-Modellen zu tun, sondern wären der aristotelischen Theorie der Kometen geschuldet.

33 David C. Lindberg: *Von Babylon bis Bestiarium*. Stuttgart, Weimar: Verlag J.B. Metzler 1994. S. 102. Trotz manch gravierender Schwächen immer noch eines der besten Bücher, wenn es um einen schnellen Überblick zur Wissenschaftsgeschichte zwischen Antike und Renaissance geht.

34 David C. Lindberg: *Von Babylon bis Bestiarium*. Stuttgart, Weimar: Verlag J.B. Metzler 1994. S. 94

Das heliozentrische Weltbild des Aristarchos von Samos

Aristarchos (Aristarch, Aristarchus) von Samos (ca. 310 – 230 v.Chr.) war Mathematiker und Astronom. Er war ein brillanter Denker und erhielt schon in der Antike den Beinamen *der Mathematiker*. Wir verfügen über einige Hinweise zu seiner Ausbildung:

We are told that Aristarchus of Samos was a pupil of Strato of Lampsacus, a natural philosopher of originality,³⁵

Aristarchos war also ein Schüler von [Straton](#) (Strato) von Lampsakos (ca. 340 – 267 v.Chr.). Straton war Philosoph und Physiker und vor allem war er von 287 bis 269 der Leiter der von Aristoteles gegründeten peripatetischen Schule. Straton war ein Anhänger des antiken Atomismus und strebte eine Verbindung der atomistischen Lehren von Demokrit mit Teilen der aristotelischen Theorie an. Straton war das strikte Gegenteil eines in der Verehrung der Tradition erstarrten Peripatetikers (wie man sie aus der Zeit der Spät-Scholastik kennt). So lehnte Straton z.B. große Teile der philosophischen Theologie des Aristoteles einfach ab. Er konnte weder mit dem aristotelischen Konzept des *unbewegten Bewegers* noch mit der Vorstellung eines *unsterblichen Seelenteils* etwas anfangen. Auch glaubte er (im Gegensatz zu Aristoteles) an die Möglichkeit des *leeren Raums* und soll bereits Methoden zur Herstellung eines Vakuums vorgeschlagen haben.

Aristarchos hatte in Straton also einen recht frei denkenden Lehrer gefunden und er sollte selbst als eine der besonders frei denkenden Geistesgrößen der Antike berühmt werden. Aristarchos wurde aber nicht nur wegen seines Konzepts eines heliozentrischen Weltbildes bekannt. Er galt zudem als einer der wenigen universell gebildeten Gelehrten:

he is included by Vitruvius among the few great men who possessed an equally profound knowledge of all branches of science, geometry, astronomy, music &c. Men of this type are rare³⁶

So war die Entwicklung eines heliozentrischen Weltmodells keineswegs die einzige Großtat des Aristarchos. Er hat auch eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der Entfernungen von Erde->Mond und Erde->Sonne ersonnen. Das Dreieck Sonne, Erde, Mond ist bei Halbmond rechtwinklig (s Abb. 5). Dies wollte Aristarchos ausnutzen. Modern

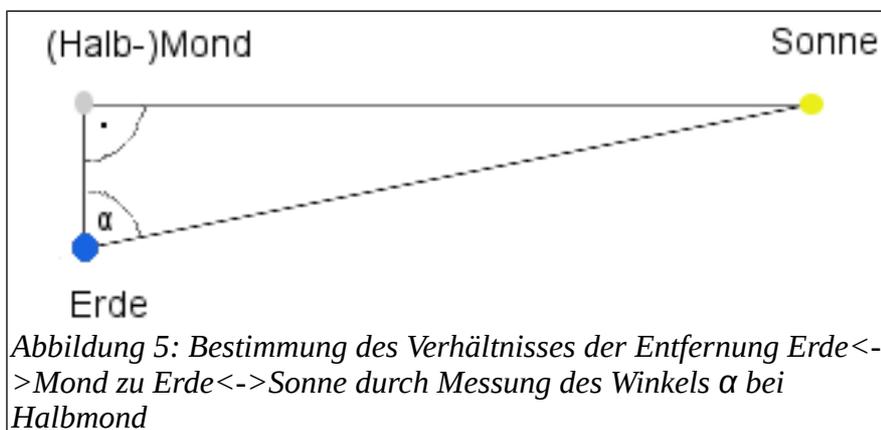


Abbildung 5: Bestimmung des Verhältnisses der Entfernung Erde->Mond zu Erde->Sonne durch Messung des Winkels α bei Halbmond

gesprochen: Man kann durch die Messung von α über $\cos(\alpha)$ das Verhältnis der beiden Entfernungen bestimmen. Lediglich messtechnische Probleme, darunter das Problem der genauen Winkel-Messung, haben Aristarchos daran gehindert, mit seinem Einfall zu einem durchschlagenden Erfolg zu kommen. Da aber das von ihm ersonnene

Verfahren sehr sensibel auf Messfehler reagiert, hat er den tatsächlichen Wert deutlich verfehlt (er misst α mit 87° , dabei ist $\alpha > 89,8^\circ$). Die Schrift in der Aristarchos diese Überlegungen ausführt ([Von den Größen und Entfernungen der Sonne und des Mondes](#)) wurde überliefert und steht (in Auszügen) online auf deutsch zur Verfügung.

Dieser Text von Aristarchos ist Teil einer langen Liste antiker Arbeiten unter dem Motto *Wir vermessen die Welt*. Ein Projekt, das bis heute noch nicht abgeschlossen ist.

35 Thomas Heath: Aristarchus of Samos. Elibron Classics 2007. S. 299

36 Thomas Heath: Aristarchus of Samos. Elibron Classics 2007. S. 299

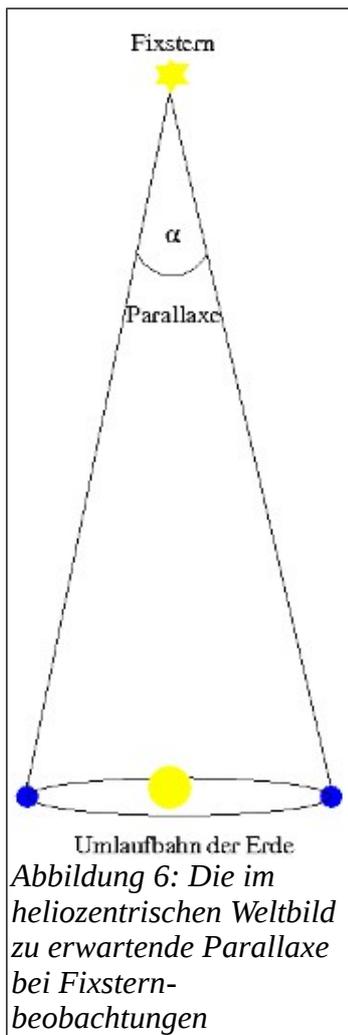


Abbildung 6: Die im heliozentrischen Weltbild zu erwartende Parallaxe bei Fixsternbeobachtungen

Die heliozentrischen Schriften von *Aristarchos* wurden leider nicht überliefert, so dass wir für eine Rekonstruktion seiner heliozentrischen Ideen auf die leider nicht sehr ergiebigen Sekundärquellen angewiesen sind. Soviel ist aber klar: Aristarchos ging von einer Eigendrehung der Erde als Ursache für den Tag/Nacht Rhythmus, wie einem jährlichen Umlauf um die Sonne als Ursache für den Wechsel der Jahreszeiten aus.³⁷

Aristarch von Samos gab die Erörterung gewisser Hypothesen heraus, in welchen aus den gemachten Voraussetzungen erschlossen wird, daß der Kosmos ein Vielfaches der von mir angegebenen Größe sei. Es wird nämlich angenommen, daß die Fixsterne und die Sonne unbeweglich seien, die Erde sich um die Sonne, die in der Mitte der Erdbahn läge, in einem Kreise bewege, die Fixsternsphäre aber, deren Mittelpunkt die Sonne bilde, so groß sei, daß die Peripherie der Erdbahn sich zum Abstände der Fixsterne verhalte wie der Mittelpunkt der Kugel zu ihrer Oberfläche. (Archimedes: Die Sandzahl)³⁸

Darauf gestützt formuliert Kurt von Fritz wie folgt:

In dem Widmungsbrief, mit dem Archimedes seinen berühmten Sandrechner, ein System zur Erzeugung beliebig großer Zahlen, an Gelon, den Sohn und Mitherrscher Hierons übersandt hat, teilt er mit, Aristarch habe angenommen, daß die Sonne im Mittelpunkt der Fixsternsphaere ihren Platz habe, die Fixsternsphaere still stehe und die Erde sich in einem Kreis um die Sonne bewege. Die Größe des Kosmos, d.h. die Entfernung der Fixsternsphaere sei so groß, daß im Verhältnis dazu die Erdbahn um die Sonne wie ein Punkt erscheine. Damit wird das heliozentrische System, soweit es die Drehung der Erde um ihre Achse wie auch die Drehung der Erde um die Sonne angeht, von einem Zeitgenossen Aristarchs, der nur um ca. 25 Jahre

jünger war, bezeugt, zugleich aber auch, was fast noch wichtiger ist, daß Aristarch das Fehlen einer beobachtbaren Parallaxe der Fixsterne aus dem ungeheuren Umfang der Fixsternsphaere erklärt.³⁹

Auch wenn mir diese Bestimmtheit in den Formulierungen zum Thema Parallaxe etwas übertrieben erscheint: Das *Archimedes* Zitat stützt deutlich die Annahme, dass Aristarchos, als in Geometrie geschulter Mathematiker und Astronom, sich darüber im Klaren war, dass ein heliozentrisches Weltbild nach einer parallaktischen Verschiebung der Fixsternpositionen im Wechsel der Jahreszeiten verlangt. D.h. die Positionen der Fixsterne müssen im Wandel der Jahreszeiten mit anderen Winkeln gemessen werden (s. Abb. 6). Da eine Parallaxe damals nicht messbar war, konnte das (aus heliozentrischer Sicht) nur bedeuten, dass die Fixsterne eine Entfernung zur Erde haben, die mit riesig nicht einmal annähernd angemessen beschrieben ist.

Die Parallaxe existiert. Beim erdnächsten Stern (Proxima Centauri) beträgt sie 0,772".⁴⁰ Das lag weit außerhalb der Messmöglichkeiten der Antike. Erst im 19. Jahrhundert konnte erstmals die Existenz einer Parallaxe für Fixsterne nachgewiesen werden (Bessel, 1838). Noch *Kopernikus* hätte wohl sein letztes Hemd für den Nachweis einer solchen Parallaxe gegeben. Aber auch er hatte keine Chance.

37 Das Auftreten scheinbar retrograder Bewegungsphasen bei Wandelsternen ergibt sich in einem heliozentrischen Modell, indem alle Planeten um die Sonne kreisen, dann ganz natürlich.

38 Archimedes: Über Spiralen, Kugel und Zylinder [u.a.]. Frankfurt am Main: Deutsch, 1996. S. 349f

39 Kurt von Fritz: Grundprobleme der Geschichte der antiken Wissenschaft. Berlin: Walter de Gruyter 1971. S. 186f

40 Das ist weniger als der millionste Teil eines Vollkreises. Dieser Wert bezieht sich allerdings auf die Parallaxe, die sich beim Radius (und nicht wie in Abb. 6 dargestellt dem Durchmesser) der Erdumlaufbahn ergibt.

Wir wissen nicht, wie intensiv sich Aristarchos in die Ausarbeitung seines heliozentrischen Systems vertieft hat. Überraschend genaue Prognosen wird er damit jedenfalls nicht erzielt haben. Er wird wohl die gleichen Erfahrungen gemacht haben wie *Kopernikus* ca. 1800 Jahre später: Es ist verdammt schwierig, ein quantitativ brauchbares heliozentrisches Modell zu entwickeln, solange man an der Idee der kreisförmigen Umlaufbahnen festhält.

Insgesamt bleibt das heliozentrische Weltbild in der Antike eine etwas exotische Außenseiterposition.⁴¹ Wir haben keine unmittelbare Wahrnehmung der Bewegung der Erde, eine Parallaxe ist nicht messbar und prognostisch hoch potente Modelle fehlen.

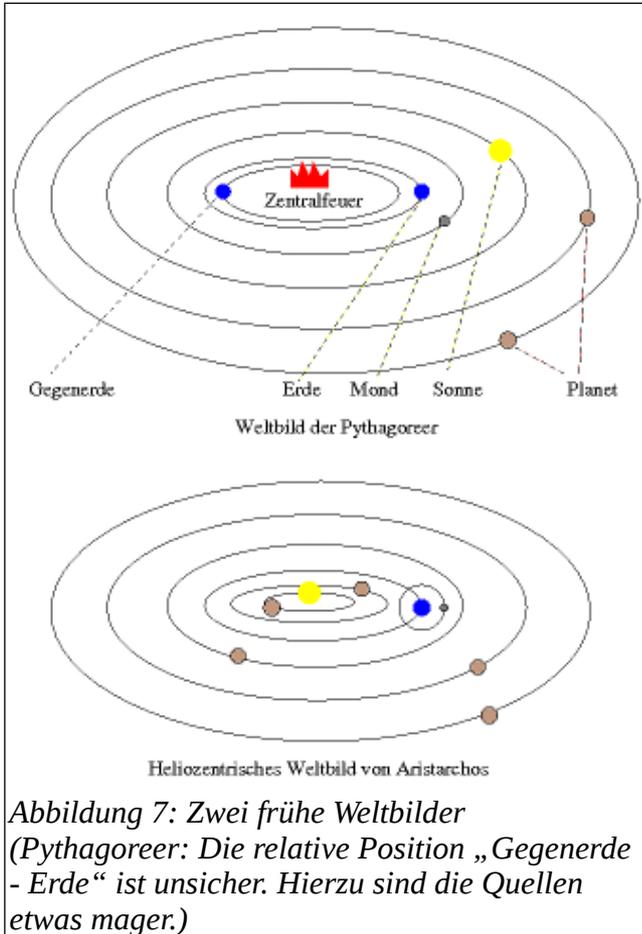


Abbildung 7: Zwei frühe Weltbilder (Pythagoreer: Die relative Position „Gegenerde - Erde“ ist unsicher. Hierzu sind die Quellen etwas mager.)

Vor dem Hintergrund der späteren Konflikte um das kopernikanische Weltmodell und dem Prozess gegen Galilei drängt sich die Frage auf, ob Aristarchos, wegen seines heliozentrischen Modell, verfolgt wurde: Von einer irgend gearteten Verfolgung des Aristarchos oder einem seiner wenigen Anhänger haben wir keine verlässlichen Nachrichten.⁴²

Aristarchos war übrigens keineswegs der erste, der die Erde in einer Umlaufbewegung sah. Die Pythagoreer, eine von Pythagoras gegründete mathematisch-religiöse Bruderschaft (mit leicht feministischem Einschlag), bevorzugten ebenfalls eine *nicht* geozentrische Sicht der Dinge. Das wohl auf den Pythagoreer Philolaos (ein Zeitgenosse von Sokrates) zurückgehende Modell hat allerdings zwei kuriose Besonderheiten. Zum *einen* geht es von der Existenz einer *Gegenerde* aus, die aber auf Grund ihrer Bahn von uns nie am Himmel auszumachen ist. Zum *anderen* wird unterstellt, dass die Sonne kein eigenes Licht hat, sondern nur im Widerschein eines *Zentralfeuers* erstrahlt. Dass wir das Zentralfeuer noch nicht bemerkt haben, erklären die Pythagoreer so:

Die Erde umrundet einmal am Tag das Zentralfeuer. Dabei wendet sie dem Zentralfeuer stets die selbe Seite zu. Diese ist aber eben wegen des Zentralfeuers viel zu heiß, um bewohnbar zu sein. Wir leben auf der anderen Halbkugel und sehen deswegen nur die im Widerschein des Zentralfeuers erstrahlende Sonne.

Diese beiden Annahmen (Gegenerde, Zentralfeuer) können wohl nicht als durch Beobachtung und/oder theoretische Überlegungen innerhalb eines astronomischen Denkhorizonts inspiriert gelten. Es ist deswegen durchaus vernünftig, Aristarchos als den ersten zu betrachten, der innerhalb der Tradition der *wissenschaftlichen* Astronomie für einen *Umlauf* der Erde um ein Zentralgestirn eintrat.⁴³

41 Immerhin ein antiker Anhänger des heliozentrischen Weltbildes von Aristarchos ist namentlich bekannt: Der griechische Astronom https://de.wikipedia.org/wiki/Seleukos_von_Seleukia (um 150 v.Chr.).

42 Zumindest ein Anhänger der Philosophenschule *Stoa* (Kleathenes von Assos) hielt ein heliozentrisches Weltbild jedoch wohl für Religionsfrevel. Ob es allerdings deswegen zu einer Anklage gegen Aristarchos (Aristarch) kam, ist höchst zweifelhaft. Siehe hierzu auch den [Wikipedia Eintrag](#).

43 So etwas ist allerdings auch immer etwas Geschmacksfrage. Ein belastbares, trennscharfes Kriterium zur Unterscheidung zwischen *wissenschaftlich* einerseits und *vorwissenschaftlich* andererseits existiert nicht.

Der *Almagest* – Die Krönung des geozentrischen Denkens

Almagest ist der aus dem Arabischen stammende Name des astronomischen Hauptwerks von *Klaudios Ptolemaios* (Ptolemäus, Ptolemeius). Der griechische Mathematiker, Astronom und Geograph (ca. 100 – 160 n.Chr.) lebte und wirkte in Alexandria. Der griechische Originaltitel seines astronomischen Hauptwerks lautet: *Megale syntaxis*.⁴⁴

Es wurde um 800 ins Arabische übersetzt. Nachdem man im katholischen Europa des frühen Mittelalters den Kontakt zur antiken Bildungs- und Wissenskultur weitgehend verloren hatte, wurde es dann im katholischen Europa des späten Mittelalters auf dem Umweg über die islamische Kultur wieder entdeckt. Daher der arabisch-stämmige Name. 1175 wurde der *Almagest* ins Lateinische übersetzt. Bei der Wiedererschließung des *Almagest* griff man neben arabischen auch auf griechische (byzantinische) Quellen zurück. 1496 wurde das Werk in Venedig erstmals gedruckt.

Der *Almagest* war für ca. 1500 Jahre das Referenzwerk der wissenschaftlichen Astronomie. Er basiert auf einem geozentrischen Weltbild und gestattet erstaunlich zuverlässige Prognosen zur Position der Wandelsterne.

Eine Lebensdauer von anderthalb Jahrtausenden ist für eine Theorie, deren Voraussagen Tag für Tag mit den Beobachtungen verglichen werden können, aller Ehren wert.⁴⁵

Die erstaunlich hohe Zuverlässigkeit erreichte *Ptolemaios*, indem er verschiedene Typen geometrischer Konstruktionen aufs Geschickteste miteinander kombinierte. Er steht dabei am Ende einer langen Tradition griechischer Mathematiker und Astronomen. Die Hauptetappen dieser Entwicklung sollen hier kurz nachgezeichnet werden. Von besonderem Interesse ist dabei, wie sich die hellenistische Astronomie langsam von der radikal geozentrischen Vorstellung des *Aristoteles* abwendet und ihre Erfolge mit einem gemäßigt geozentrischen Weltbild erzielt.

Im Weltbild des *Aristoteles* werden die Positionsveränderungen der Gestirne durch Überlagerung von Kreisbewegungen modelliert. Das bleibt auch bei *Ptolemaios* so. Aber bei *Ptolemaios* befindet sich die Erde *nicht* immer im Zentrum der zur Modellierung herangezogenen Kreise und die Bewegung auf den Kreisen ist auch *nicht* immer gleichförmig (die Winkelgeschwindigkeit ist *nicht* immer konstant).

Diese Lockerung der Geozentrik verschafft den Spielraum, der zur Erstellung eines zuverlässigen Modells benötigt wird.

Der immense Erfolg des *Almagest* verursacht für die Geschichtsschreibung der antiken Astronomie auch gewisse Probleme. Man sah in der Antike einfach nur noch wenig Grund, die älteren Texten der früheren Astronomen weiterhin zu kopieren. So gingen etliche Schriften unwiederbringlich verloren. Bei vielen Fragen zur Geschichte der antiken Astronomie sind wir deswegen auf im *Almagest* eingestreute Bemerkungen zu den Verdiensten früherer Astronomen angewiesen.

Ein Großteil der im folgenden geschilderten astronomischen Theorien wurde am Museion in Alexandria entwickelt. Diese, von *Alexander dem Großen*⁴⁶ auf seinem Feldzug in Ägypten gegründete Stadt, hatte sich mit ihrer Bibliothek und ihrem Museion zu dem Zentrum der Wissenschaften entwickelt. Hier wurde auch die Astronomie entscheidend vorangebracht. Selbst für die Astronomen die nicht in Alexandria arbeiteten, war die Kommunikation mit den Wissenschaftlern am Museion eine Selbstverständlichkeit.

44 Das bedeutete *Große Zusammenstellung*. Neben diesem Standardwerk der antiken Astronomie hat *Ptolemaios* auch ein Standardwerk zur Astrologie verfasst: *Tetrabiblos*. Die heutige deutliche Unterscheidung zwischen dem Aberglauben Astrologie und der Wissenschaft Astronomie war *Ptolemaios* noch fremd.

45 Károly Simonyi: Kulturgeschichte der Physik. Frankfurt am Main: Harri Deutsch Verlag, 3. Auflage, 2001. S. 97

46 Zu *Alexander dem Großen* siehe auch *Alexander der Große – Ein Feldzug verbreitet griechische Kultur* unter www.antike-griechische.de/Alexander-der-Grosse.pdf.

Das Konzept der zwei Bewegungen

Schon beim Konzept der homozentrischen Sphären des Eudoxos wurde klar zwischen zwei Typen von Bewegung unterschieden:

- Der einfach zu modellierenden täglichen Drehung der Fixstern-Sphäre;
- Den schwierig zu modellierenden Bewegungen von Sonne, Mond und den fünf (damals bekannten) Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn.

Zur Modellierung der Fixstern-Sphäre reichte Eudoxos eine einzige in Drehung versetzte Kugel. Es waren die komplizierten Bewegungen von Sonne, Mond und Planeten, die Eudoxos zur Entwicklung von 7 getrennten Modellen mit ihren jeweils unterschiedlich justierten inneren Sphären veranlassten.

Auch der *Almagest* des Ptolemaios schätzt die Situation so ein, dass der Astronom mit der Fixstern-Sphäre leichtes Spiel hat, dass aber die Bewegungen, die vor dem Hintergrund der Fixsternsphäre stattfinden, dafür jedoch umso mehr Probleme machen. Dementsprechend wird die Fixstern-Sphäre in wenigen Absätzen abgehandelt, wohingegen der Rest der 13 Bücher des *Almagest* den Methoden, Problemen und Resultaten der Modellierung der Bewegungen vor dem Hintergrund der Fixstern-Sphäre gewidmet ist.

In Buch 1 Kapitel 8 des *Almagest* macht Ptolemaios den Leser mit der Unterscheidung zwischen *erster* und *zweiter* Bewegung vertraut:

Die erste Bewegung ist diejenige, von welcher alle Gestirne ewig gleichmäßig und mit gleicher Geschwindigkeit von Osten nach Westen geführt wird. Sie bewirkt die Herumführung auf Parallelkreisen, welche natürlich um die Pole dieser aller Gestirne gleichförmig herumführen Sphäre beschrieben werden. Der größte dieser Parallelkreise heißt der Äquator (...).

Die zweite Bewegung ist diejenige, vermöge welcher die Sphären der Gestirne in der zum vorherbeschriebenen Umschwung entgegengesetzten Richtung gewisse Ortsveränderungen um andere Pole bewirken, nicht um dieselben, wie in der ersten Umdrehung (d.h. nicht um die Pole des Äquator).

(Ptolemaios: *Megale syntaxis*. Buch 1, Kap.8. Hei26 – Hei27)⁴⁷

Getreu dem Schwerpunkt des *Almagest* werden auch wir uns nach dieser Klarstellung hier nur noch mit den *zweiten* Bewegungen, den Bewegungen vor dem Hintergrund der Fixstern-Sphäre, beschäftigen.

Hierbei werden die im *Almagest* eingesetzten Haupt-Instrumente der mathematisch-geometrischen Modellierung der *zweiten* Bewegungen in ihrer historischen Reihenfolge vorgestellt. Zusammen mit dieser Vorstellung wird auch jeweils der „verantwortliche“ Astronom benannt und knapp charakterisiert.

Apollonios: Der Epizykel

Apollonios (Apollonius) von Perge (ca. 260 – 190 v.Chr.) lebte als Mathematiker und Astronom in Alexandria. Als Mathematiker ist er vor allem wegen seiner Lehre der Kegelschnitte bedeutend. Begriffe wie *Ellipse*, *Parabel* und *Hyperbel* entstanden zuerst bei der Diskussion von *Kegelschnitten*. Das Werk von *Apollonios* zu *Kegelschnitten* war bis zum Aufkommen der analytischen Geometrie (also über 1500 Jahre) *Stand der Wissenschaft*. Noch *Galilei* und *Kepler* haben ihren *Apollonios* studiert. Die besondere Leistung des Apollonios als Astronom war die Verwendung von *Epizyklen*.

47 Karl Manitius: [Des Claudius Ptolemäus Handbuch der Astronomie. Bd 1. Leipzig: Teubner 1912. S. 20f](#)

Er ist der erste für uns klar erkennbare griechische Astronom, der *Epizyklen* zur Modellierung der Bahnen von Wandelsternen einsetzt.⁴⁸

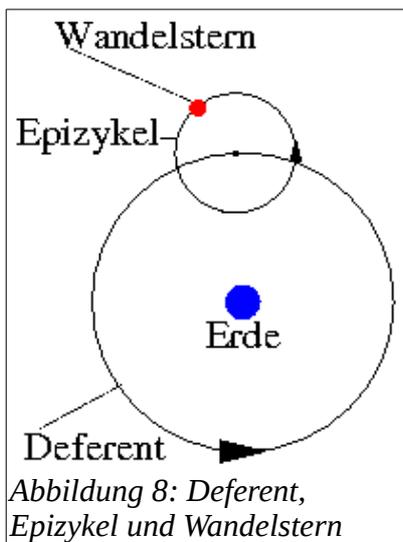


Abbildung 8: Deferent, Epizykel und Wandelstern

Die Grundidee der *Epizyklen* ist einfach. Auf einem Kreis, in dessen Mittelpunkt die Erde liegt, befindet sich ein zweiter Kreis. Letzterer ist mit seinem Mittelpunkt auf der Kreislinie des Ersteren „befestigt“ und trägt an seinem Rand einen Himmelskörper (s. Abb. 8). Wenn sich nun beide Kreise um ihre jeweiligen Mittelpunkte drehen, beschreibt der Himmelskörper eine Bahn, die sich aus der Überlagerung der beiden Kreisbewegungen ergibt.

Der Hauptkreis, in dessen Mittelpunkt die Erde liegt wird *Deferent* genannt. Der zweite Kreis, dessen Mittelpunkt auf der Kreislinie des *Deferenten* liegt, heißt *Epizykel* (Nebenkreis).

Durch Variation der Radien wie der Winkelgeschwindigkeiten der beiden Kreise lässt sich eine Vielzahl von Bahnen modellieren. Insbesondere die von der

Erde aus retrograd erscheinenden Bewegungsphasen von Wandelsternen können so, zumindest qualitativ, gedeutet werden.

Das Epizykelkonzept ist ein erstes, vorsichtiges Abrücken von der *radikal* geozentrischen Sicht bei *Aristoteles*. *Epizyklen* haben *nicht* mehr die Erde als Mittelpunkt. Allerdings liegt ihr Mittelpunkt auf der Kreislinie eines *Deferenten*, in dessen Mittelpunkt dann die Erde liegt. Dadurch bleibt doch ein deutliches Maß an Geozentrik gewahrt.

Hipparchos: Die Sonnenbahn als Exzenter

Hipparchos (Hipparch) von Nicaea (ca. 190 – 125 v.Chr.) war Astronom, Geograph und Mathematiker. Er lebte und wirkte (wahrscheinlich) auf Rhodos. *Hipparchos* ist in der Mathematik dafür bekannt, dass er ein Tafelwerk zur Sehnentheorie (einer Vorform unserer heutigen Trigonometrie) verfasst hat.⁴⁹ Solche Sehnentafeln spielen bei vielen astronomischen Rechnungen eine entscheidende Rolle. Als Astronom gilt er als der bedeutendste griechische Astronom der ganzen Antike. Er war in seinem Denken ungewöhnlich frei und hat in vielen Bereichen neue Wege beschritten:

Hipparchos, den man nicht genug loben kann, entdeckte einen neuen Stern, der zu seiner Zeit erschienen war ... Er begann sich zu wundern und zu fragen, ob solche Ereignisse nicht öfters stattfinden und jene Sterne, die wir als Fixsterne bezeichnen, vielleicht doch Bewegungen ausführen. Er tat, was selbst einem Gotte Kühnheit abforderte: er zählte die Sterne und Sternbilder ab und gab ihnen Namen. Zu diesem Zwecke konstruierte er Meßinstrumente, mit denen er Lage und Form eines jeden Sternes bestimmen konnte. Dank seiner Bemühungen können wir jetzt nicht nur mühelos feststellen, ob ein Stern erlischt oder geboren wird, sondern auch, ob er sich aus seiner Lage fortbewegt hat oder sogar, ob seine Helligkeit angewachsen ist oder nicht.

So hinterließ er den Sternenhimmel als Erbe allen die ihn nach ihm in Besitz nehmen wollen. (Plinius: *Historia naturalis*)⁵⁰

48 Obwohl erst mit Apollonios die für uns eindeutig greifbare, gesicherte Geschichte der Epizyklen-Astronomie beginnt, scheint es aber durchaus möglich, dass in der griechischen Astronomie auch schon früher Epizyklen verwendet wurden. So meint z.B. van der Waerden, dass es bereits vor Apollonios eine primitive Epizykeltheorie der Pythagoreer gegeben habe (vgl. z.B.: van der Waerden: *Astronomie der Griechen*. S. 40ff).

49 Dass er auch der Erfinder dieser antiken Form der Trigonometrie war, traut ihm van der Waerden jedoch nicht zu. Vgl.: van der Waerden: *Die Astronomie der Griechen*. Darmstadt: Wissenschaftl. Buchgesellschaft 1988. S. 180ff

50 Zitiert nach: Károly Simonyi: *Kulturgeschichte der Physik*. Frankfurt: Harri Deutsch Verlag, 3. Auflage, 2001. S. 99

Neben vielen anderen Verbesserungen des Apollonios-Modells hat *Hipparchos* auch einen exzentrischen Umlauf der Sonne in die geozentrische Astronomie eingeführt. Exzentrisch heißt hierbei einfach, dass der Kreis die Erde umspannt, die Erde aber *nicht* im Mittelpunkt des Kreises liegt.

Hipparchos hat sich mit der genauen Länge des astronomischen Jahres und der (astronomischen) Jahreszeiten beschäftigt. Um die Unterschiede in der Länge der vier astronomischen Jahreszeiten zu erklären, nahm er eine exzentrische Bahn der Sonne um die Erde an.

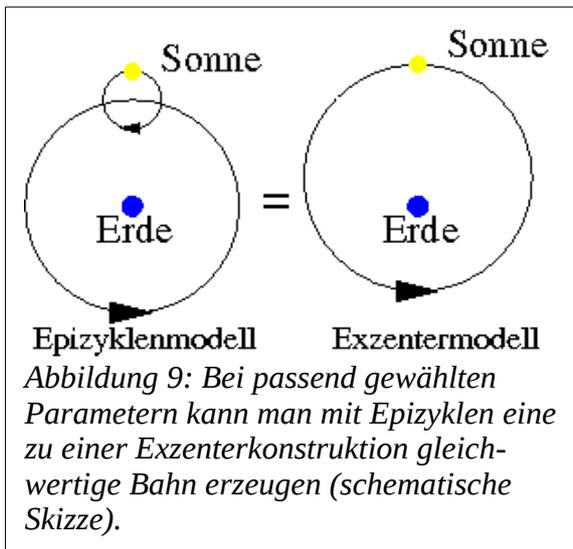


Abbildung 9: Bei passend gewählten Parametern kann man mit Epizykeln eine zu einer Exzenterkonstruktion gleichwertige Bahn erzeugen (schematische Skizze).

Das war gemessen an den damaligen Denkwelten durchaus kühn. Psychologisch war damit ein weiterer Schritt zur Aufweichung der radikalen Geozentrik des *Aristoteles* getan.

Man kann allerdings bei geschickter Wahl der Parameter in einem Epizykelmodell ebenfalls eine exzentrische Bahn modellieren. Zumindest *Ptolemaios* wusste dies.⁵¹

Die Exzenter des *Hipparchos* waren aber trotzdem ideengeschichtlich ein wichtiger Schritt vorwärts. Durch die Einführung der Exzenterbahn der Sonne verliert die Erde ganz offensichtlich ihre Stellung als Zentrum der ganzen Welt.

Ptolemaios: Der Äquant

Mit Epizykel und Exzenter hat die Erde ihre Stellung als unbestrittener Mittelpunkt aller Drehbewegungen des Kosmos bereits verloren. Aber noch wird von allen Drehbewegungen verlangt, dass sie gleichförmig erfolgen. Noch kennt man keine Beschleunigungen oder Verzögerungen auf den Kreisbahnen.

Es ist *Ptolemaios* selbst, der das Prinzip der unbedingt konstanten Winkelgeschwindigkeit verabschiedet. Vor *Ptolemaios* konnten zwar die verschiedenen an einer Modellierung beteiligten Kreisbewegungen unterschiedliche Winkelgeschwindigkeiten und sogar entgegengesetzte Orientierungen haben, aber jede Kreisbewegung *für sich* betrachtet hatte eine konstante Winkelgeschwindigkeit: Sie war gleichförmig.

Die Art und Weise, in der *Ptolemaios* mit der Forderung nach gleichförmiger Kreisbewegung bricht, verrät, dass er sich dabei nicht ganz wohl gefühlt hat.

Er gewinnt die *ungleichförmige* Bewegung auf einem Kreis A durch Konstruktion mittels einer *gleichförmigen* Bewegung auf einen *Hilfskreis* B. Man versteht die Grundidee am schnellsten, wenn man von einem *Hilfskreis* B mit dem Radius r_B ausgeht (s. Abb. 10, nächste Seite).

⁵¹ Den Hinweis zum antiken Wissen um die Modellierbarkeit von Exzentern durch Epizyklen verdanke ich Frau *Sandra Trosien*. Sie hat mich auf die hierfür relevanten Stellen im Buch 3, Kapitel 3 des *Almagest* hingewiesen. Dort wird insbesondere ab *Hei* 226 die Möglichkeit der Modellierung von exzentrischen Bahnen durch Epizykeln zur Sprache gebracht. Vgl. z.B.: K. Manitius (Hrsg); *Ptolemaios: Handbuch der Astronomie*, Bd. 1; B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1963. S.148ff.

Einige Formulierungen in Buch XII, Kap. 1 des *Almagest* legen nahe, dass *Ptolemaios* davon ausging, dass dies auch schon *Apollonios* und *Hipparchos* bekannt war.

Sei B unser *Hilfskreis*, auf dessen Kreislinie sich ein Punkt P gleichförmig (mit konstanter Winkelgeschwindigkeit) bewegt. Nun denken wir uns einen Zeiger, der im Mittelpunkt M_B des *Hilfskreises* B und einem Kreispunkt P befestigt sei. Er wird von P durch dessen Bewegung auf der Kreisbahn um M_B gedreht. Halten wir gedanklich die Bewegung von P einen Augenblick an. Markieren wir jetzt im *Hilfskreis* B einen Punkt M_A und ziehen dann mit dem Radius r_B einen Kreis um diesen Punkt ($r_A = r_B$). Die Stelle, an der der Zeiger den Kreis A schneidet, nennen wir P'. Wir „befestigen“ P' so am Zeiger, dass er (auf der Kreislinie von A verbleibend) dem Zeiger folgen muss.

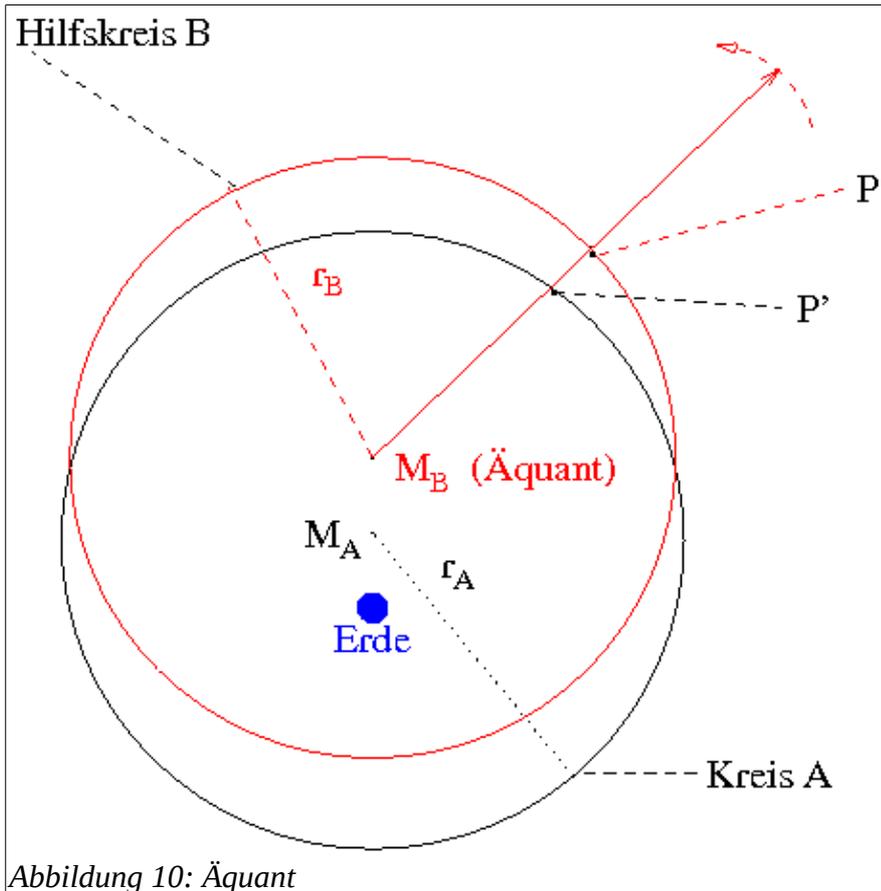


Abbildung 10: Äquant

Jetzt starten wir die gleichförmige Bewegung von P neu. Auch P' bewegt sich. Aber seine Bewegung ist *keine* gleichförmige Bewegung auf dem Kreis A. Die Winkelgeschwindigkeit von P' auf dem Kreis A ist *nicht* konstant. *Ptolemaios* nennt sie aber gleichförmig relativ zu M_B , dem Mittelpunkt des *Hilfskreises* B.⁵²

Von dieser Konstruktion ausgehend ist es nur noch ein kleiner Schritt bis zum Äquantenkonzept. Der Kreis A sei ein Exzenter, also ein exzentrischer Kreis, der die Erde „umschließt“. Zusätzlich sei der Abstand von M_A zu M_B gleich dem Abstand *Erdmittelpunkt* zu M_A . Wenn jetzt noch alle drei Punkte (M_A , M_B , *Erdmittelpunkt*) auf einer Geraden liegen, dann heißt der Hilfskreis B *circulus äquans* (Ausgleichskreis) und dessen Mittelpunkt *punctum äquans* oder kurz *Äquant*..

Solche über Äquanten konstruierten ungleichmäßigen Kreisbewegungen auf einem Exzenter betrachtet *Ptolemaios* als zulässiges Konstruktionselement bei der astronomischen Modellierung.

Immerhin: Die Bewegung besitzt eine konstante Winkelgeschwindigkeit in Bezug auf den Mittelpunkt des *Hilfskreises* (*punctum äquans*). Und damit ist nach *Ptolemaios* der Forderung nach *gleichförmiger* Bewegung hinreichend genüge getan. Er hat sich also geschickt von der allzu strengen Forderung nach *gleichförmiger* Kreisbewegung deutlich weg bewegt, ohne ganz mit ihr zu brechen.

52 Letzteres macht mathematisch gesehen durchaus Sinn.

Die Modellierung

Zur geozentrischen Modellierung der Bahnen von Wandelsternen, Sonne und Mond benutzt *Ptolemaios* im *Almagest* neben dem gewöhnlichen zentrischen Kreis (Erde im Mittelpunkt) die eben vorgestellten Hilfsmittel: Epizykel, Exzenter, Äquant.

Diese Werkzeuge werden ganz nach Bedarf miteinander kombiniert. So können einem Exzenter, dem über eine Äquantenkonstruktion eine ungleichförmige Bewegung zugeordnet wurde, zusätzlich Epizyklen beigegeben werden. Oder *Ptolemaios* lässt den Mittelpunkt eines Exzenters auf einem Kreis um die Erde rotieren.

Durch gut angepasste Konstruktionen, die Variation der Ebenen, in denen die Kreise liegen, die passende Wahl der Orientierungen sowie der Winkelgeschwindigkeiten der verschiedenen Drehbewegungen, gelingt es *Ptolemaios*, ein erstaunlich zuverlässiges Prognose-Instrument zu entwickeln.

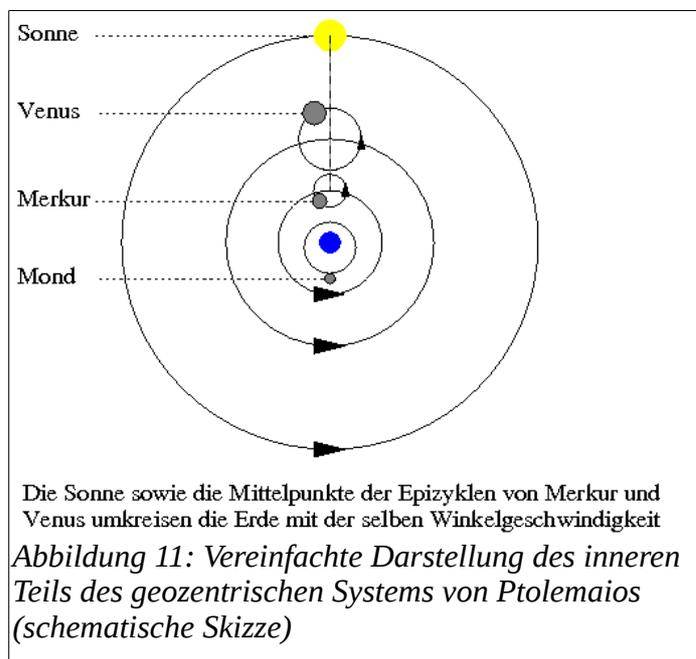
Um dieses Ziel zu erreichen, hat sich *Ptolemaios* von zwei im griechischen Kulturraum sehr beliebten Dogmen trennen müssen. Bei *Ptolemaios* ist die Erde *nicht* der Mittelpunkt aller Kreisbewegungen. Und bei *Ptolemaios* sind die Kreisbewegungen *nicht* immer gleichförmig. Da die auf diesem Weg erzielten Fortschritte aber erheblich sind, verzeiht man *Ptolemaios* die kleinen Abweichungen vom Konzept der *radikalen* Geozentrik.

Die Erfolge des astronomischen Systems des *Ptolemaios* sind allerdings doch nicht ganz so groß und ganz so beeindruckend, wie der *Almagest* uns glauben lassen will. *Ptolemaios* schön und glättet seine astronomischen Daten gern etwas. Die Übereinstimmung von Theorie und Empirie ist längst nicht immer so perfekt, wie von *Ptolemaios* behauptet. Das Problem der geschönten Zahlen und manipulierten Daten ist also keine rein neuzeitliche Plage. Bereits die Antike hatte ihre Probleme damit.⁵³

Die *gemäßigte* Geozentrik des *Ptolemaios* wird trotzdem schnell zur vorherrschenden Theorie und bleibt für ca. 1500 Jahre das beste astronomische System. Während dieser Zeit werden allerdings immer mal wieder Kleinigkeiten im Ptolemäischen System modifiziert, um so eine bessere Übereinstimmung mit astronomischen Daten zu erreichen.

Daneben hat das System des *Ptolemaios* aber auch seine strukturellen Probleme. Es gelingt nicht die Variation der *Helligkeit* der Wandelsterne auf natürliche Weise in das System des *Almagest* zu integrieren. Um deren Veränderungen von scheinbarer Größe und Helligkeit auch nur halbwegs passend

modellieren zu können, muss *Ptolemaios* seine Zuflucht zu unbefriedigenden ad hoc Konstruktionen nehmen. Dieses lästige Problem konnte erst im Rahmen moderner heliozentrischer Weltbilder überwunden werden. Hier harmonieren dann die Bestimmung der Position eines Planeten und die Erklärung seiner scheinbaren Größe ganz natürlich.



53 Vgl. hierzu: van der Waerden: Die Astronomie der Griechen. Darmstadt: Wissenschaftl. Buchgesellschaft 1988. S. 252ff

Der Almagest als Beispiel für mathematisierte empirische Wissenschaft in der Antike

Die Astronomie des Almagests ist sicherlich kein Beispiel für elegante Theoriebildung, aber der Almagest ist ein lehrreiches Beispiel dafür, wie eine mathematisierte empirische Wissenschaft im Zusammenspiel von grundlegenden Vorüberlegungen, mathematischer Modellbildung und Messungen bereits in der Antike funktionierte:

- a) Von welchen Grundannahmen bei der Modellbildung auszugehen ist, wird im Almagest genauso thematisiert wie
- b) die mathematischen Theorien, die bei der Modellbildung verwendet werden und
- c) die Messdaten, die bei der Modellierung zu berücksichtigen sind.

Zu a) Die Verteidigung des geozentrischen Standpunktes:

(...) nun so müßten sie (die Anhänger eines heliozentrischen Weltbildes; NF) doch zugeben, daß die Drehung der Erde die gewaltigste von ausnahmslos allen in ihrem Bereich existierenden Bewegungen wäre, daß alles, was auf ihr nicht ruht- und nagelfest wäre, scheinbar immer in einer einzigen Bewegung begriffen sein müßte, welche der Bewegung der Erde entgegengesetzt verlief.

(Ptolemaios: *Megale syntaxis*. Buch 1, Kap.7. Hei25)⁵⁴

Zu b) Die Nutzung der Sehnentheorie als antike Vorform der Trigonometrie:

Im Begriff zu den speziellen Beweisen überzugehen, von denen unseres Erachtens derjenige an erster Stelle zu stehen hat, durch welchen festgestellt wird, wie groß der zwischen den oben genannten Polen (des Äquators und der Ekliptik) liegende Bogen des durch sie gezogenen größten (Kolor-) Kreises ist, sehen wir uns genötigt, vorher die Lehre von dem Größenbetrag der Geraden im Kreis (d.i. der Sehnen) mitzuteilen, da wir unsere Absicht durchzuführen gedenken ein für allemal alle Lehrsätze auf Grund von geometrischen Konstruktionen zu beweisen.

(Ptolemaios: *Megale syntaxis*. Buch 1, Kap.9. Hei30 – Hei31)⁵⁵

Zu c) Das Ringen um das Problem der genauen Länge des Jahres:

Unter allen Aufgaben, welche die Theorie der Sonne uns stellt, ist die erste die Länge des Jahres zu finden. Die Meinungsverschiedenheit und Unsicherheit, welche bei den Alten über diesen Punkt herrscht, können wir aus ihren Schriften ersehen und besonders aus den des keine Mühe scheuenden *Hipparch*. Denn auch ihm verursacht in hohem Grade Unsicherheit über den fraglichen Punkt der Umstand, daß bei der an die Wendepunkte und Nachtgleichen geknüpften scheinbaren Wiederkehr die Länge des Jahres kürzer befunden wird als der Zusatz eines Vierteltags über volle 365 Tage, *länger* dagegen bei der auf die Fixsterne theoretisch bezogenen Wiederkehr.

(Ptolemaios: *Megale syntaxis*. Buch 3, Kap.1. Hei191 – Hei192)⁵⁶

Das Ziel des Almagest ist im übrigen ganz eindeutig, das bestmögliche geozentrische Modell zu entwickeln, das mit den Mitteln Epizykel, Exzenter und Äquant erreichbar ist. Es wird hier nach quantitativer Genauigkeit gestrebt statt nach philosophischem Tiefsinn:

Nach Erledigung vorstehender Beweisführungen dürfte es die nächstgelegene Aufgabe sein, unser Augenmerk auf die bei jedem der fünf Wandelsterne eintretenden kleinsten und größten *Rückläufigkeitsstrecken* zu richten und nachzuweisen, daß auch die zahlenmäßigen Beträge dieser Bewegungen sich aus den erklärten Hypothesen in denkbar bester Übereinstimmung mit den Beobachtungsergebnissen ableiten lassen.

(Ptolemaios: *Megale syntaxis*. Buch 12, Kap.1. Hei450)⁵⁷

54 Karl Manitius: [Des Claudius Ptolemäus Handbuch der Astronomie. Bd 1. Leipzig: Teubner 1912. S. 19](#)

55 Karl Manitius: [Des Claudius Ptolemäus Handbuch der Astronomie. Bd 1. Leipzig: Teubner 1912. S. 24](#)

56 Karl Manitius: [Des Claudius Ptolemäus Handbuch der Astronomie. Bd 1. Leipzig: Teubner 1912. S. 130f](#)

57 Karl Manitius: [Des Claudius Ptolemäus Handbuch der Astronomie. Bd 2. Leipzig: Teubner 1913. S. 267](#)

War Ptolemaios ein Kosmologe?

Häufig wird *Ptolemaios* als ein zwar begnadeter Modellbildner, aber eben als kein richtiger Kosmologe vorgestellt. Sein *Almagest* kann, so eine gängige These, zwar *die Phänomene retten*, liefert aber keine echte Kosmologie wie die *Metaphysik* des *Aristoteles*. So wird *Ptolemaios* auf die Rolle des Technikers einer klug ausgedachten Himmelsmechanik reduziert, wohingegen *Aristoteles*, dessen an *Eudoxos* und *Kallippos* angelehnte Kosmologie längst keine so guten Prognosen gestattete, als philosophisch tiefsinniger gilt, weil er verstehen wollte, wie die Welt *wirklich* aufgebaut ist.

Ich denke, diese Beurteilung ist nicht ganz stimmig. Es lassen sich drei bedeutende Einwände gegen eine solche Sichtweise vorbringen:

1. *Ptolemaios* entscheidet sich sehr bewusst gegen ein heliozentrisches und für ein geozentrisches Weltbild. *Ptolemaios* kannte den ungefähren Erdumfang ($\pm 30\%$) und konnte abschätzen, welche hohen Geschwindigkeiten auftreten müssen, wenn die Erde einmal binnen 24 Stunden um die eigene Achse rotiert. (Am Äquator liegt die Geschwindigkeit oberhalb der Schallgeschwindigkeit.) Er hält den Anhängern eines heliozentrischen Weltbildes vor, wie sie es denn angesichts dieser Geschwindigkeiten erklären wollen, dass Wolken genauso gut nach Osten wie nach Westen ziehen können. Dass wir weder eine direkte Wahrnehmung der Eigenrotation der Erde, noch ihres Umlaufs um die Sonne haben, war lange Zeit für alle Vertreter eines heliozentrischen Weltbildes ein echtes Problem. Und natürlich kannte *Ptolemaios* auch den zweiten Haupteinwand gegen ein heliozentrisches Weltbild: Das Fehlen einer messbaren Fixsternparallaxe.
2. *Ptolemaios* hat eine Viel-Sphären-Kosmologie vorgelegt. Diese Viel-Sphären-Kosmologie verarbeitet die Erfolge seiner Konstruktionen zur Positionsbestimmung der Gestirne zu einer kosmologischen Gesamtschau, ganz analog, wie die Kosmologie des *Aristoteles* die (deutlich geringeren) Erfolge der Eudoxos-Kallippos Modelle verarbeitet.
3. Alle Probleme, die die geozentrische Kosmologie des *Ptolemaios* hat, hat die Kosmologie des *Aristoteles* ebenfalls und häufig sogar in einer schärferen Form. So wirken die Methoden mit denen *Ptolemaios* die Veränderungen der (scheinbaren) Größe und Helligkeit erklärt zugegebenermaßen nicht sehr elegant und überzeugend. *Aristoteles* jedoch konnte im Rahmen seiner Kosmologie die Änderungen der scheinbaren Größe und Helligkeit der Gestirne überhaupt *nicht deuten*. Und dies wurde übrigens schon in der Antike als Einwand gegen die Kosmologie des *Aristoteles* vorgebracht.

Angesichts dieser Tatsachen ist es mir etwas unverständlich, warum *Ptolemaios* auch heute noch immer wieder als bloßer Techniker und Modellbildner vorgestellt wird. Er war nicht mehr oder weniger Kosmologe als *Aristoteles*. Wenn man *Aristoteles* als einen Kosmologen sieht, dann ist *Ptolemaios* das auch. Dabei wäre es allerdings für beide, *Aristoteles* wie *Ptolemaios*, aber wohl kein großer Punkt gewesen, in ihren geometrischen Modellen ein paar Parameter zu ändern, wenn dadurch die Prognosen hätten verbessert werden können. Die Details waren für *beide* nichts weiter als geschickt gewählte Konstruktionen zur Erreichung einer guten Übereinstimmung mit der Empirie.

Dass das aristotelische Modell in den philosophischen Diskussionen stets eine größere Rolle als das ptolemäische Modell spielte, dürfte weniger mit einem (angeblich) größeren Tiefsinn des aristotelischen Modells zu tun haben, als vielmehr damit, dass das ptolemäische Modell für die allermeisten Philosophen mathematisch zu anspruchsvoll war.⁵⁸

58 Etliche moderne „Experten“ für antike Philosophie scheinen sogar bereits durch die Komplexität des aristotelischen Modells überfordert zu sein. Wenn ich z.B. [Otfried Höffe: Aristoteles \(3.Auflage\) auf S. 157](#) konsultiere, dann habe ich *nicht* den Eindruck, dass der Autor die Grundidee der aristotelischen Kosmologie wirklich verstanden hat. Sein Verständnis antiker Texte hält Autor [Höffe](#) jedoch für durchaus ausreichend, um seinem Publikum selbst die dunklen *Substanzbücher* aus der *Metaphysik* des *Aristoteles* erklären zu können. Etwas worauf ich lieber verzichte.

Ptolemaios als Astrologe

Die griechische Astronomie kannte und nutzte die Daten wie Methoden der babylonischen Astronomie. Die babylonische Astronomie war aufs Engste mit der Astrologie verbunden. Ungewöhnliche Himmelsereignisse wie Mond- und Sonnenfinsternisse oder retrograde Bewegungsphasen der Planeten sollten Aufschluss über das Staats- und Königsschicksal geben. Aus der babylonischen Kultur wanderte dieses astrologisches Denken in den griechischen Kulturraum ein. Die Astrologie wird dabei „demokratisiert“, es geht jetzt nicht mehr nur um das Schicksal des Königshauses, sondern jedermann kann die Sterne befragen. Das damit beginnende allgemeine Interesse an zuverlässigen Horoskopen war in der Geschichte der Astronomie häufig eine der Haupttriebfedern für das Bemühen um eine Verbesserung der astronomischen Tabellenwerke. Genauere Messungen und Rechnungen wurden gar nicht so selten vor allem als Dienst an der Astrologie geleistet.

Die antike Astrologie unterschied sich in einem wichtigen Punkt von der heutigen Astrologie: Noch vom magisch-astrologischen Denken völlig ungetrennt, thematisiert die griechische Astrologie auch die physikalischen Effekte der Gestirne (wie z.B. der Einfluss des Mondes auf die Gezeiten oder der der Sonne auf das Pflanzenwachstum). Ptolemaios war gleichermaßen der führende Astronom wie Astrologe seiner Zeit. Sein astrologisches Hauptwerk heißt *Tetrabiblos*:

Zuvörderst liegt es mehr als augenscheinlich auf der Hand und bedarf keiner wortreichen Versicherung, daß die Kräfte vom Himmel auf alles Irdische, das den Veränderungen der Allnatur unterworfen ist, niederströmen; so in der sublunaren Grundelemente, in Feuer und Luft, die durch die himmlischen Bewegungen erregt werden, und welche alles übrige Untergeordnete in sich tragen und also Erde und Wasser, Pflanzen und Tiere beeindrucken. Denn die Sonne beeinflusst alles Irdische zusammen mit dem Himmel nicht nur immer anders infolge der vier Jahreszeiten, denen das Wachstum in der Tierwelt, die Fruchtbarkeit der Pflanzenwelt, das Fließen der Gewässer und die Veränderungen in den Körpern entsprechen, sondern wirkt selbst durch ihren täglichen Lauf erwärmend oder feuchtend, dörrend oder erfrierend in ganz bestimmter Weise und im Einklang mit den Stellungen der übrigen Gestirne, je nach Breite unseres Ortes.

Der Mond scheint ebenso seinen Einfluß auf alles Erdhafte geltend zu machen, da fast alles Beseelte und Unbeseelte die Kraft des Mondes und seine Wirkung zu empfinden vermag. Die Gewässer wachsen und fallen mit ihm, es ahmen seinen Auf- und Niedergang Ebbe und Flut des Meeres nach, Pflanzen und Tiere, sei es nun ganz, sei es in einzelnen Teilen, beginnen zu schwellen und zu strotzen, wenn er im Zunehmen ist, und versiegen und dörren, wenn er wieder abnimmt. (...)

Was jedoch die Geburtsastrologie betrifft und das Urteil über die einzelnen Charakteranlagen, so macht nebenher noch vieles Andere seine Wirkung geltend, was die Eigenschaften in der Vermischung verändert ... Ferner bringen die verschiedenen Gegenden nicht übersehbare Unterschiede an den Geborenen hervor, selbst wenn die Samen dem gleichen Geschlechte der Wesen angehören, wie beispielsweise der Menschen; und mag selbst der Zustand des Himmels bei der Geburt der gleiche sein, so sind doch die Unähnlichkeiten in den verschiedenen Weltgegenden groß, bezüglich der Körpergestalt ebenso wie der Seele. Und nehmen wir letztlich an, daß selbst alles Ebenerwähnte übereinstimmen würde, so erzeugen trotzdem Erziehung und Lebensgewohnheit Unterschiede in einem Teil der seelischen Anlage, oder der sittlichen oder im Lebensgange.⁵⁹

Sicherlich nicht so bedeutend wie der *Almagest*, aber wiederum auch nicht so peinlich, dass man von den astrologischen Neigungen des Ptolemaios unangenehm berührt wird.

59 Ptolemaios: *Tetrabiblos*. Zitiert nach: Jürgen Hamel: *Geschichte der Astronomie*. Magnus Verlag 2004. S. 118f

Nachtrag: *Herakleides Pontikos*

Beim Schnelldurchgang durch die Geschichte der geometrischen Weltmodelle der antiken Griechen wurde *Herakleides Pontikos* übersprungen. *Herakleides Pontikos* (ca. 388 – 315 v.Chr.) war ein Zeitgenosse von Eudoxos und weilte, wie Eudoxos, für einige Zeit an der Akademie Platons. Neben seinen astronomischen Schriften hat er auch philosophische Arbeiten verfasst. Unsere Kenntnis der astronomischen Arbeiten von Herakleides beruht auf wenigen Fragmenten. Ein wirklich solides und umfassendes Bild können wir uns von seinem astronomischen Modell nicht machen.

Als gesichert kann gelten, dass Herakleides von einer Drehung der Erde um ihre eigene Achse ausging. Für ihn stand also die Erde nicht vollständig still. Die sehr wenigen Hinweise die wir darüber hinaus zum astronomischen Modell des Herakleides haben, lassen sich am natürlichsten deuten, wenn man davon ausgeht, dass *Herakleides* ansonsten ein antiker Vorläufer des Astronomen *Tycho Brahe* war. Heath fasst die Position des *Herakleides Pontikos* in diesem Sinne wie folgt zusammen:⁶⁰

Heraclides declared in the first place that the apparent daily rotation of the heavenly bodies is due, not to a rotation of the heavenly sphere about an axis through the centre of the earth, but to the rotation of the earth itself about its own axis. Secondly, Heraclides discovered that Venus and Mercury revolve round the sun like satellites.⁶¹

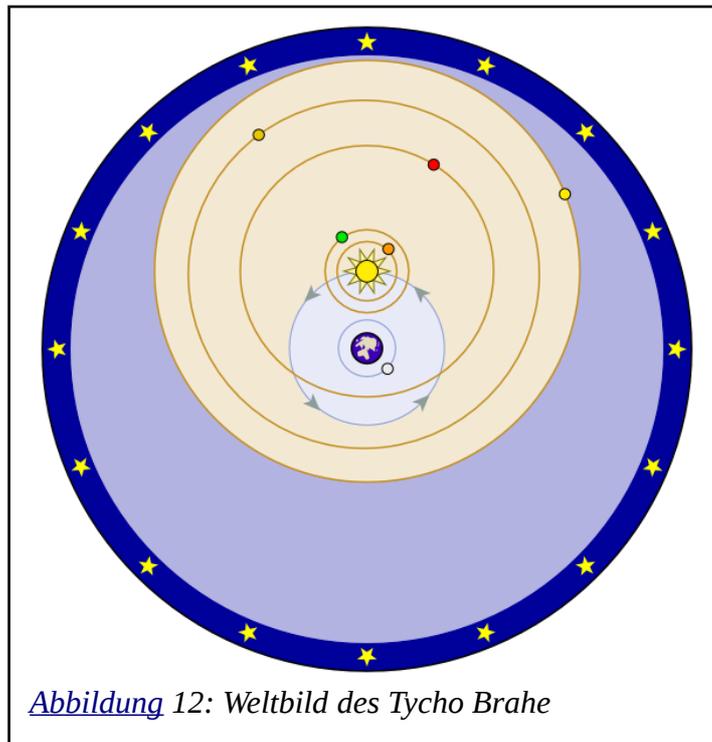


Abbildung 12: Weltbild des Tycho Brahe

Auf jeden Fall kann *Herakleides* in gewisser Weise als Vorläufer von *Aristarchos* gelten. Er kannte zwar keine Umlaufbewegung der Erde um ein Zentralgestirn, aber bereits die Annahme einer Eigendrehung der Erde war ein revolutionärer Schritt.⁶²

60 Im astronomischen Modell von *Tycho Brahe* (1546 – 1601) drehen sich alle Planeten – mit der entscheidenden Ausnahme *Erde* – um die Sonne. Die Sonne aber, dreht sich wie der Mond – zusammen mit ihrem Kranz aus Planeten – um die Erde. Die Erde des Tycho Brahe steht dabei aber vollständig still und kennt auch *keine* Eigendrehung. Die Deutung von Herakleides als antiker Vorläufer von Tycho Brahe (Herakleides = Tycho Brahe plus Eigendrehung der Erde) ist zwar gängig, aber gemessen an der Quellenlage durchaus etwas riskant.

61 Thomas Heath: *Greek Astronomy*. Dover Publications 1991. Einleitung, S. xlvi

62 van der Waerden meint (erstaunlicher Weise) sogar Anhaltspunkte dafür finden zu können, dass Herakleides bereits einen Umlauf der Erde um die Sonne annahm. (Vgl.: van der Waerden: *Astronomie der Griechen*. S. 105ff)

Von Kopernikus bis Newton – ein kurzer Ausblick

Kopernikus

Nikolaus Kopernikus (Copernikus) lebte von 1473 – 1543. Durch ihn wird die Tradition heliozentrischer Weltbilder neu belebt. Wie Aristarchos versucht er sich an einem Modell mit kreisförmigen Planetenbahnen um die Sonne. Unglücklicherweise nimmt er ausgerechnet an den Äquantenkonstruktionen bei *Ptolemaios* besonderen Anstoß. Er verpflichtet sich auf ein Modell mit *gleichförmig* durchlaufenen Kreisen. In dieser Hinsicht steht *Kopernikus* den Idealen der frühen Antike näher als der *Almagest*. Und genau dies macht die Bemühungen, ein heliozentrisches Weltbild mit verbesserter quantitativer Genauigkeit zu kombinieren, chancenlos. Obwohl *Kopernikus* sich jahrzehntelang abquält: Seine Versuche den *Almagest* in puncto Zuverlässigkeit deutlich zu übertrumpfen, scheitern alle. Um wenigstens mit der Qualität des *Almagest* in etwa mithalten zu können, ist Kopernikus sogar gezwungen unappetitliche Epizyklen in sein heliozentrisches System einbauen.

Trotzdem finden die kopernikanischen Ideen in der europäischen Wissenschaftselite einigen Anklang.

Galilei

Galileo Galilei (1564 – 1642) bekennt sich zwar zum kopernikanischen Weltbild, aber an der sehr mühseligen Suche nach einem auch prognostisch hochwertigen heliozentrischen Weltbild beteiligt sich *Galilei* (praktisch) nicht. Mit dem von ihm verbesserten Fernrohr gelangen ihm aber wichtige astronomische Beobachtungen. Er entdeckt die Jupitermonde und die Sonnenflecken. Dadurch ist einerseits klar gestellt, dass sich nicht alles im Universum um die Erde dreht, und andererseits ist gezeigt, dass die Himmelskörper keineswegs überirdisch perfekt sind. Beides ist für Anhänger des damals vorherrschenden, stark dogmatisierten aristotelischen Weltbildes sehr irritierend.

Dem Problem der nicht direkt wahrnehmbaren Bewegung der Erde rückt *Galilei* mit seinen Überlegungen zur *Trägheit* zu Leibe. Er ist kurz davor, das *Trägheitsprinzip* der klassischen Physik zu formulieren:

Ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, verharrt im Zustand der Ruhe oder bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit fort.

In dieser Deutlichkeit und Klarheit wird es aber erst von *Descartes* und *Newton* herausgearbeitet. Manchmal jedoch liegen die Formulierungen *Galileis* nur noch knapp daneben.

Galilei büßt sein Eintreten für die kopernikanische Lehre mit lebenslanger Haft. In einem legendär gewordenen Prozess der Inquisition wird er unter Androhung von Folter zu einer demütigenden Abschwörungsprozedur gezwungen und zu einer Haftstrafe mit *unbestimmter* Dauer verurteilt. Diese muss er als lebenslangen Hausarrest verbüßen. *Galilei* stirbt als unfreier Mann.

Gemessen an den Maßstäben der Inquisition ist *Galilei* dabei noch glimpflich davongekommen. Im Jahre 1600 (also zu Lebzeiten Galileis) wurde der Naturphilosoph *Giordano Bruno* wegen unliebsamer Thesen über *andere Welten* von der Inquisition auf dem Scheiterhaufen verbrannt. Vielleicht war es das internationale Ansehen *Galileis* (er galt schon zu seinen Lebzeiten als einer der bedeutendsten Wissenschaftler seiner Zeit), das ihn wenigstens vor diesem Schicksal bewahrt hat.

Kepler

Johannes Kepler (1571 – 1630) gelingt bei der Suche nach einem heliozentrischen Weltbild der entscheidende Durchbruch. 1627 erscheinen seine *Rudolfinischen Tafeln*. Erstmals wird der *Almagest* in puncto Zuverlässigkeit übertroffen und das auf der Grundlage eines *heliozentrischen* Weltbildes. *Keplers* Erfolg ruht auf drei Säulen:

Den vom dänischen Astronomen Tycho Brahe gesammelten astronomischen Daten;

Der Bereitschaft, immer wieder Wochen über Wochen, Monate über Monate mit mühseligen astronomischen Rechnungen zu verbringen;

Dem durchschlagenden Einfall, *ungleichförmig* durchlaufene Ellipsen statt gleichförmig durchlaufene Kreise als Grundform der Planetenbewegungen zu unterstellen.

Die von ihm gefundenen drei *Keplerschen* Gesetze sind die stechenden Trümpfe im Kampf um die vorherrschende Kosmologie. Nun sind die Tage des geozentrischen Weltbildes gezählt.

Newton

Isaac Newton (1642 – 1727) gelingt es, mit Hilfe des Gravitationsgesetzes die Kernpunkte der keplerschen Planetengesetze im Rahmen seiner Mechanik abzuleiten. Damit ist der Übergang von der *Kinematik* zur *Dynamik* vollbracht. Während in der *Kinematik* nur nach Regeln der Bewegungen gesucht wird, zielt die *Dynamik* auf ein (kausales) Verstehen mit Hilfe von Kräften und Wechselwirkungen. *Keplers Kinematik* ist einfach genug, um den Übergang zur *Dynamik* zu ermöglichen. Auf der Grundlage des geozentrischen *Almagests* wäre dies wohl kaum möglich gewesen. Die *Kinematik* ist dort derart komplex aufgebaut, dass wohl kein menschlicher Genius das dort formulierte Regelwerk als Ausdruck einer unterliegenden *Dynamik* hätte verstehen können.

Da *Newton* aus denselben Voraussetzungen nicht nur *Keplers Kinematik* der Planetenbewegungen, sondern auch *Galileis Fallgesetz* herleiten kann, beginnt jetzt auch der moderne Traum von der verstehbaren *Einheit der Natur* Gestalt anzunehmen. Die von *Aristoteles* formulierte (und ab der Scholastik lange dogmatisch tradierte) Trennung zwischen *sublunar* und *himmlisch* wird endgültig hinfällig.

Mit Hilfe der dynamischen Sichtweise *Newtons* gelingt es in den folgenden Jahrhunderten, die Bewegungen der Himmelskörper noch viel genauer zu berechnen, als dies allein auf Grundlage der keplerschen Gesetze möglich gewesen wäre.

Bis zum Auftritt der *Allgemeinen Relativitätstheorie* im Jahr 1915 bleibt die newtonsche Physik das beste Instrument zur Analyse der Himmelsbewegungen.

Anhang

Abbildungen

Die Abbildung auf der Titelseite (Fantasieportrait aus der Neuzeit) wird manchmal als Darstellung von Eudoxos, häufig aber auch als Ptolemaios Portrait eingestuft.

Ich überlasse dem Leser die Wahl. Die Abbildung ist gemeinfrei.

Abbildung 12 auf Seite 29 (Weltbild des Tycho Brahe – Tychonian_system.svg) wurde vom Benutzer Fastfission erstellt und ist gemeinfrei (in the public domain). Der Abbildung wurde ein Hyperlink unterlegt, der zur Referenzseite in der Wikimedia führt (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tychonian_system.svg).

Alle anderen Abbildungen wurden selbst erstellt und sind gemeinfrei.

Empfehlungen

Bücher

[B.L. van der Waerden: Die Astronomie der Griechen](#)

Eine ausgezeichnete Darstellung der antiken griechischen Astronomie. Leider nur noch antiquarisch verfügbar.

[Dieter B. Herrmann: Die Harmonie des Universums](#)

Eine *kurze Geschichte* der Weltbilder: Ausgehend von den Babyloniern über die griechische Antike, Renaissance und Neuzeit wird der Bogen bis hin zu Einsteins Leistungen und der Entdeckung der aberwitzigen Eigentümlichkeiten der Quantenwelt gespannt. Das besondere Augenmerk liegt dabei auf dem verbindenden Element dieser so unterschiedlich anmutenden Weltbilder: Das zuerst Verwirrende an der Welt soll als Ausdruck einer tieferliegenden Harmonie verständlich gemacht werden.

Zur [Literaturliste \(Literaturempfehlungen\)](#) auf www.antike-griechische.de.

Links

[Vorlesungsmanuskript zur Geschichte der Astronomie von Prof.Dr. Dieter Schlüter](#)

Das PDF-Dokument (123 S.) beginnt mit seiner Darstellung bei der Astronomie der frühen Hochkulturen und verfolgt die Geschichte der Astronomie bis Ende des 19. Jahrhunderts.

[Reader der Uni Graz zur Geschichte der Naturwissenschaften](#)

Umfasst auch die frühen Anfänge in der griechischen Antike, insbesondere auch antike Astronomie.

[http://web.calstatela.edu/faculty/hmendel/Ancient
%20Mathematics/Eudoxus/Astronomy/EudoxusHomocentricSpheres.htm](http://web.calstatela.edu/faculty/hmendel/Ancient%20Mathematics/Eudoxus/Astronomy/EudoxusHomocentricSpheres.htm)

Eine ausführliche Diskussion der Eudoxos-Modelle von Henry Mendell (California State University, Los Angeles).

<http://www.archive.org/details/aristarchusofsam00heatuoft>

Aristarchus of Samos von Thomas Heath – schönes Buch. Trotz der These mit den 27 Sphären des Eudoxos höchst lesenswert.

<http://www.archive.org/details/desclaudiusptole01ptoluoft>

Der Almagest auf deutsch – Buch I - VI

<http://www.archive.org/details/desclaudiusptole02ptoluoft>

Der Almagest auf deutsch – Buch VII - XIII