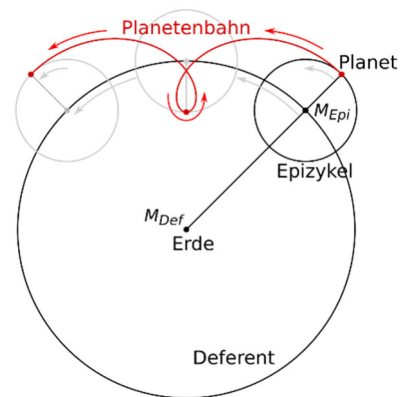


## Und sie bewegt sich doch

Laut dem Ptolemäischen (geozentrischen) Weltbild, das bis ins späte Mittelalter allgemein anerkannt war, bildet die Erde das Zentrum der Welt, um das sich alle anderen Himmelskörper auf kreisförmigen Bahnen bewegen. Um die beobachteten Planetenbewegungen (schleifenförmige Bahnen mit teilweise rückläufigen Abschnitten) hiermit in Übereinstimmung zu bringen, griff man auf sogenannte Epizykel zurück. Darunter verstand man zusätzliche kleine Kreisbahnen, deren Mittelpunkte sich auf einer großen Kreisbahn (Deferent) um die Erde bewegen (**Bild 1**).

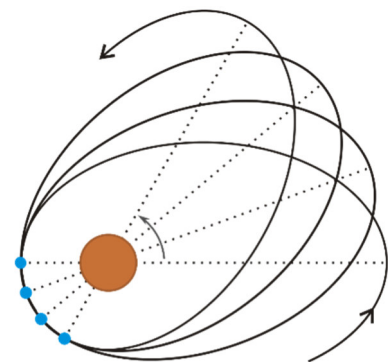


**Bild 1** Schleifenbahn eines Planeten nach der Epizykeltheorie <sup>1</sup>

Erst im 16. Jahrhundert wurde diese Theorie durch Kopernikus auf Basis eigener Beobachtungen und Überlegungen widerlegt. Das Kopernikanische (heliocentrische) Weltbild <sup>2</sup> postuliert die Bewegung der Erde und der anderen Planeten um die Sonne sowie die Bewegung des Mondes um die Erde.

Galileo Galilei wurde zu einem entscheidenden Verfechter dieses neuen Weltbildes. Dabei stützte er sich u.a. auf Beobachtungen der Venusphasen und der Bewegungen der vier großen Jupitermonde (später als Galileische Monde bezeichnet) mittels selbstgebaute Teleskope. Allerdings ging auch Galilei davon aus, dass sich Himmelskörper auf idealen Kreisbahnen bewegen müssten und kam nicht ohne Epizykel aus. Da diese neue Lehre angeblich der Bibel widersprach, geriet Galilei in die Fänge der Inquisition und musste, um der Todesstrafe zu entgehen, 1663 im greisenhaften Alter seine Lehre widerrufen. Nach nicht gesicherten Überlieferungen soll er beim Verlassen des Gerichtsortes „Und sie bewegt sich doch!“ gemurmelt haben.

Erst durch die Arbeiten von Johannes Kepler, die zu großen Teilen auf umfassenden Beobachtungsdaten von Tycho Brahe basierten, wurde die Epizykeltheorie Anfang des 17. Jahrhunderts überflüssig. Kepler kam zu der Erkenntnis, dass sich die Planeten auf elliptischen Bahnen mit der Sonne in einem der Brennpunkte der elliptischen Umlaufbahn bewegen. Dieses Prinzip gilt auch entsprechend z.B. für das System Erde-Mond. Genauer genommen bewegen sich die Umlaufkörper nicht um den Zentralkörper, sondern um ihr gemeinsames Schwerezentrum. Dieses liegt z.B. beim System Erde-Mond etwa 1.700 km unter der Erdoberfläche. Kepler entdeckte auch, dass die Bahngeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zum Zentralkörper variiert und ein Zusammenhang zwischen Bahngröße und Umlaufzeit besteht. Die genannten Zusammenhänge formulierte er mathematisch in den drei nach ihm benannten Gesetzen <sup>3</sup>.



**Bild 2** Periheldrehung einer Planetenbahn <sup>4</sup>  
(schematisch übertrieben)

Als physikalische Begründung beobachteter himmelsmechanischer Phänomene wurde durch Isaac Newton die Gravitation entdeckt und mathematisch beschrieben. In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts schuf er damit die Voraussetzung, Bahnen von Himmelskörpern nicht nur in Verhältnissen, sondern mit Absolutwerten zu bestimmen. Newton erkannte auch, dass die Keplerschen Ellipsen nur Näherungslösungen der realen Planetenbahnen sind, da die Vernachlässigung der

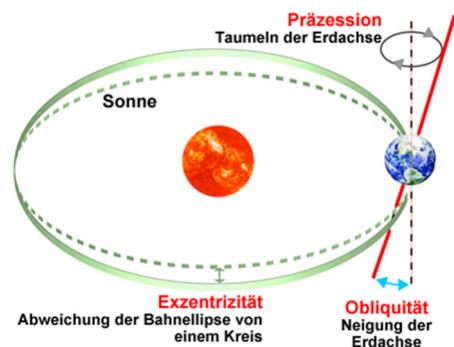
Anziehungskräfte der Planeten untereinander zu kleinen Abweichungen führt. Derartige Bahnstörungen sind z. B. die rosettenförmigen Periheldrehungen von Planetenbahnen (**Bild 2**), die dann im 18. Jahrhundert mit neuen mathematischen Methoden genauer berechnet werden konnten.

Die 1915 von Albert Einstein veröffentlichte allgemeine Relativitätstheorie schloss die Newtonsche Gravitationstheorie ein und erlaubte eine noch umfassendere Erklärung der Bewegung von Himmelsobjekten. Auch wenn die Newtonsche Mechanik nach wie vor für die meisten astronomischen Anwendungen ausreicht, müssen z. B. für sehr genaue Messungen oder im Einflussbereich starker Gravitationsfelder relativistische Effekte berücksichtigt werden. Dadurch konnte u.a. die Periheldrehung des Merkur noch genauer theoretisch untermauert werden, als das bis dahin der Fall war.

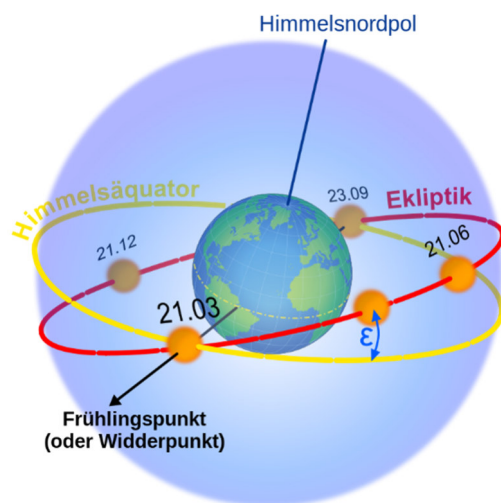
Neben den bisher beschriebenen Phänomenen der Planetenbewegung gibt es weitere, die teilweise schon lange bekannt sind, aber erst in den letzten Jahrzehnten genauer erfasst bzw. berechnet wurden. Bei der Rotation und dem Bahnverlauf (Revolution) der Erde spielen die folgenden Erscheinungen eine wesentliche Rolle (**Bild 3**):

- Exzentrizität<sup>6</sup>  
Die ellipsenförmige Erdumlaufbahn unterliegt unter dem gravitativen Einfluss der anderen Planeten periodischen Veränderungen mit Stauchungen der Ellipse zwischen ca. 0 und 5 % und einer Periodendauer von ungefähr 100.000 Jahren sowie einem zusätzlichen Maximum etwa alle 405.000 Jahre.
- Obliquität (Schiefe der Ekliptik)<sup>7</sup>  
Der Neigungswinkels der Erdbahnebene gegenüber der Ekliptik (Ebene der Planetenbahnen um die Sonne) schwankt durch Gravitationseinflüsse der Körper im Sonnensystem aufeinander zwischen 22,9° und 24,3° bei einer Periode von ca. 40.000 Jahren.
- Präzession<sup>8</sup>

Die Erdachse bewegt sich durch die Gezeitenkräfte von Mond und Sonne im Zusammenspiel mit der von der Kugelgestalt abweichenden Erdform (Rotations-ellipsoid) entlang einer Kegelfläche mit einer Periode von ca. 25.800 Jahren (= platonisches Jahr). Während die Erdachse heute in Richtung des Polarsterns zeigt, wird sie durch die Präzession in ca. 12.000 Jahren in Richtung Wega im Sternbild Leier weisen. Gleichzeitig führt die Präzession dazu, dass der Frühlingspunkt im Laufe eines platonischen Jahres einen vollen Umlauf auf der Ekliptik (Ebene der Erdbahn um die Sonne) vollführt. Der Frühlingspunkt ist die Verlängerungen der Schnittlinie zwischen Himmelsäquator (Projektion des Erdäquators auf die gedachte Himmelskugel) und Ekliptik und ist definitionsgemäß unendlich weit entfernt (**Bild 4**). Zum Frühlingsanfang auf der Nordhalbkugel steht die Sonne im Frühlingspunkt. Etwas verwirrend ist, dass in Fachkreisen



**Bild 3** Exzentrizität, Obliquität und Präzession<sup>5</sup>



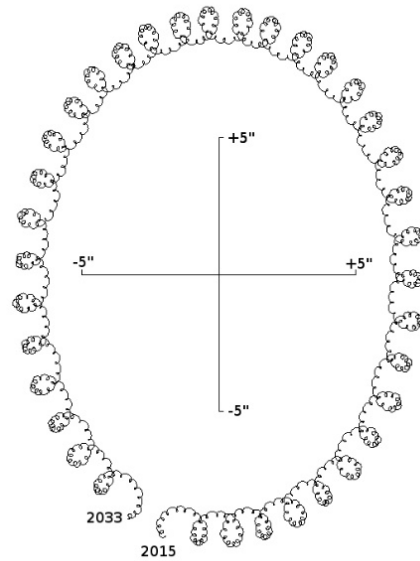
**Bild 4** Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Himmelsäquator, Ekliptik und Frühlingspunkt<sup>9</sup>

sowohl der Zeitpunkt des Frühlingsbeginns als auch der Schnittpunkt zwischen Himmelsäquator und Ekliptik als Frühlingspunkt bezeichnet wird<sup>10</sup>. Frühlings- und Herbstpunkt werden auch Äquinoktien (Tagundnachtgleiche) genannt.

- Nutation<sup>11</sup>

Insbesondere die Präzession der Mondbahn führt dazu, dass die Präzession der Erdachse relativ rasch schwankenden periodischen Störungen unterworfen ist. Die Hauptkomponente dieser Nutation hat eine Periode von 18,6 Jahren und wird von weiteren noch rascher schwingenden Komponenten überlagert (**Bild 5**).

Zusammenhänge zwischen diesen astronomischen Erscheinungen und dem Klima sind u.a. Gegenstand eines weiteren Newsletters.



**Bild 5** Nutation der Erdachse als Bestandteil der Präzession für den Zeitraum von 2015 bis 2033<sup>11</sup>

## Quellen

- <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/EpizykelBahn.png>
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Heliozentrisches\\_Weltbild](https://de.wikipedia.org/wiki/Heliozentrisches_Weltbild)
- [https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter\\_2021\\_07.pdf](https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter_2021_07.pdf)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Apsidendrehung>
- Thomas Laepple, Alfred-Wegener-Institut 2011  
[https://www.raonline.ch/pages/edu/cli/cli\\_ext04a03.html](https://www.raonline.ch/pages/edu/cli/cli_ext04a03.html)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdbahn>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Ekliptik>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A4zession>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%BChlingspunkt#/media/Datei:Ecliptic.svg>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%BChlingspunkt>
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Nutation\\_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Nutation_(Astronomie))