

Entwicklungsphasen zu unterschiedlichen Zeiten erfolgte. Die Entwicklung von Vorläufern der inneren Planeten (Planetesimale) startete bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt, als die Sonne selbst noch im Entstehen begriffen war. Die Entstehung der äußeren Planeten begann in einer zweiten Welle erst ca. eine halbe Milliarde Jahre später, kam aber deutlich rascher zum Abschluss als die erste Welle.

Die Entstehungsorte der Planeten hängen unmittelbar mit der Lage der sogenannten Schnee- oder Eislinien zusammen. Unter der (Wasser-) Schneelinie wird die Übergangsgrenze um den Protostern in einer protoplanetaren Scheibe verstanden, außerhalb der Wasser vom gasförmigen in den festen Zustand übergeht. Diese Form des Übergangs wird als Desublimation bezeichnet (in Gegenrichtung: Sublimation) und findet bei Wasser unterhalb eines Druckes von 6 mbar statt, da hier Wasser nicht mehr in flüssiger Form existiert. Die entsprechende Temperatur liegt bei -100°C ⁶.

Innerhalb der Schneelinie entstanden die Gesteinsplaneten mit einem anfangs hohen Wassergehalt. Dass sich dieser im Lauf der Planetenentwicklung stark verringerte, hängt mit den Eigenschaften des radioaktiven Isotops Aluminium-26 zusammen. Dieses in der ursprünglichen Staubscheibe enthaltene Isotop wurde bei der Entstehung der Planetesimale eingebunden. Al-26 zerfällt mit einer relativ niedrigen Halbwertszeit von 700 Tausend Jahren und setzt dabei sehr viel Energie frei, die die Planetesimale aufheizte und zum Schmelzen brachte. Dabei formten sich die Metallkerne durch Absinken der schweren Elemente (vor allem Eisen) und Wasser und andere flüchtige Verbindungen verdampften zum großen Teil ⁷. Für die Herkunft des heutigen Oberflächenwassers auf der Erde präferieren die Wissenschaftler derzeit in erster Linie spätere Einschläge wasserhaltiger Asteroiden. Die anderen Gesteinsplaneten unseres Sonnensystems verloren dieses Wasser später wieder größtenteils in den Weltraum. Beim Mars waren dafür vor allem die geringe Schwerkraft und das schwindende Magnetfeld (fehlender Schutz der Atmosphäre vor der Teilchenstrahlung der Sonne) verantwortlich, bei der Venus war es in erster Linie die hohe Oberflächentemperatur und beim Merkur eine Kombination dieser Faktoren.

Nach Entstehung der Planetesimale des inneren Sonnensystems wanderte die Schneelinie durch den Einfluss der sich durch die Sonne aufheizenden Gas- und Staubscheibe nach außen, wo es zu einer zweiten Welle der Planetesimal-Entstehung kam. In diesem Zeitabschnitt war ein großer Teil des radioaktiven Al-26 bereits zerfallen, so dass deutlich weniger flüchtige Elemente abdampften und die Gas- und Eisriesen in ihrer heutigen Zusammensetzung entstehen konnten.

Die Diskussion um die Entstehungsorte der Planeten im Zusammenhang mit Schneelinien wurde u.a. durch Fotos von protoplanetaren Scheiben des ALMA-Observatoriums der ESA neu angefangen (**Bild 2**). Auf den Aufnahmen sind Materieringe durch dazwischenliegende Lücken getrennt (s.u.). Es ist bekannt, dass es außer der Schneelinie für Wasser weitere Grenzlinien für andere chemische Verbindungen gibt. Davon sind vor allem zwei für die Entstehung unseres Sonnensystems von Bedeutung ⁹. Zum einen gab es eine innere Linie sehr nahe bei der jungen Sonne, wo eine Temperatur von über 1100°C herrschte. Innerhalb dieser Zone konnten gesteinsbildende Silikatverbindungen nur gasförmig existieren, so dass dort eine Entstehung von Planeten nicht möglich war. Für die Planetenbildung war außer der Wasser-Schneelinie die weiter außen liegende Kohlenmonoxid-Schneelinie von Bedeutung, außerhalb der unter -240°C auch CO gefriert. An den Schneelinien fiel der Druck im Gas-Staub-Gemisch von innen nach außen ab. Die sich aus Staubkörnchen gebildeten Klumpen („Pebbles“) bewegten sich unter der Schwerkraft des Zentralgestirns allmählich nach innen und wurden an diesen Druckschwellen

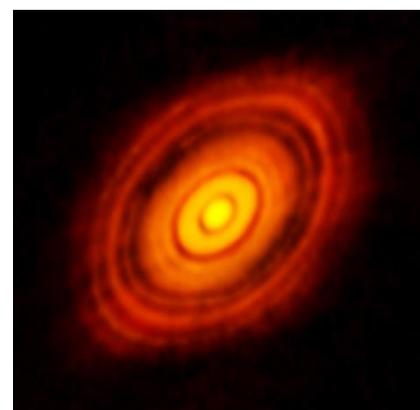


Bild 2: Protoplanetare Scheibe um HL Tauri ⁸

ausgebremst, so dass sie sich konzentrieren und weiter zusammenklumpen konnten, auch weil sie nach und nach eine eigene steigende Schwerkraft entwickelten. Man geht davon aus, dass die Materieringe in **Bild 2** mit diesen Druckschwellen in Verbindung stehen ¹⁰. Zumindest für die Entstehung der inneren Planeten erscheint die „Druckschwellentheorie“ plausibel. Bei den Gasplaneten wird davon ausgegangen, dass ihr Entstehungsort etwas außerhalb der Wasser-Schneelinie lag. Hier gibt es jedoch noch weiteren Forschungsbedarf.

Jenseits der CO-Grenze entstanden die meisten Kuipergürtel-Objekte (Zwergplaneten wie Pluto, Kleinstplaneten und Asteroiden), aber keine Gasriesen mehr ¹¹.

Zur Entstehung des Asteroidengürtels zwischen Mars und Jupiter wurde früher angenommen, dass hier ein kleiner Planet durch Kollisionen zerstört wurde. Heute wird bevorzugt die Hypothese vertreten, dass ein weiteres Zusammenballen der in diesem Bereich vorliegenden Materiebrocken durch den gravitativen Einfluss des Jupiters verhindert wurde ¹².

Erschwerend bei der Erarbeitung einer durchgängigen Theorie zur Entwicklung unseres Sonnensystems wirken sich u.a. folgende Faktoren aus:

- Die Position der Schneelinien war nicht fix, sondern änderte sich im Laufe der Zeit. Sie drifteten, wie oben für die Wasser-Schneelinie erwähnt; durch die anfangs zunehmende Sonnenaufheizung zunächst nach außen, um dann später durch die allmähliche Abkühlung der protoplanetaren Scheibe wieder nach innen zu wandern.
- Durch Migrationsprozesse haben sich die Planetenbahnen in den Jahrmilliarden seit Entstehung des Sonnensystems mehrfach geändert. Ursachen dafür waren komplexe Wechselwirkungen von Planeten untereinander und mit anderen Bestandteilen des Sonnensystems. So führte eine 1:2-Bahnresonanz (ganzzahliges Verhältnis der Umlaufzeiten) zwischen Jupiter und Saturn ca. 650 Millionen Jahre nach Entstehung des Sonnensystems u.a. dazu, dass Uranus und Neptun ihre Plätze tauschten.

Abschließend soll betont werden, dass der vorliegende Beitrag zum einen nur einen kleinen Ausschnitt der bekannten Theorien und Hypothesen zur Entwicklung des Sonnensystems darstellt. Zum anderen handelt es sich hier um eine Momentaufnahme. Weitere Forschungen werden zeigen, inwieweit die derzeitigen Theorien künftig bestätigt werden können, modifiziert werden müssen, zu verwerfen oder durch bessere Alternativen zu ersetzen sind.

Quellen

- 1 https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter_2022_02.pdf
- 2 <https://www.sternenforscher.de/sonnensystem/>
- 3 <https://www.mpg.de/18087609/baumaterial-fuer-erde-und-mars-stammt-aus-innerem-sonnensystem>
- 4 <https://www.uni-muenster.de/news/view.php?cmdid=8952>
- 5 <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2021/01/wie-unsere-planetentstanden-sind.html>
- 6 <https://de.wikipedia.org/wiki/Eislinie>
- 7 <https://idw-online.de/de/news761710>
- 8 ALMA-Observatoriums der ESA https://de.wikipedia.org/wiki/Protoplanetare_Scheibe
- 9 <https://oiger.de/2021/12/31/erde-wuchs-zwischen-silkat-dampf-und-schneelinie-im-all/181698>
- 10 <https://idw-online.de/de/news786162>
- 11 <https://www.wissenschaft.de/astronomie-physik/ringe-erklaeren-struktur-des-sonnensystems/>
- 12 <https://de.wikipedia.org/wiki/Asteroideng%C3%BCrtel>