



## Planetenentstehung

# Aus Staub geboren

HUBERT KLAHR | THOMAS HENNING

*Planeten entstehen gemeinsam mit ihren Zentralsternen im Urnebel aus Gas und Staub. Auf welche Weise das Wachstum vom mikroskopischen Staubkorn bis zum Planeten in allen Entwicklungsstufen vor sich geht, ist noch längst nicht geklärt. Seit der Entdeckung extrasolarer Planeten lassen sich aber erstmals Theorien an einer Vielzahl von Planetensystemen überprüfen.*

Die ersten naturwissenschaftlichen Theorien über den Ursprung des Sonnensystems stammen aus dem 18. Jahrhundert. Aus der Tatsache, dass sich alle Planeten in gleicher Richtung und mehr oder weniger in einer Ebene um die Sonne bewegen schlossen Immanuel Kant und Pierre-Simon Laplace, dass das Sonnensystem aus einer Staub und Gasscheibe entstanden sein muss, die einst um die junge Sonne rotierte.

Ein grundlegendes Problem dieses Modells liegt aber im gewaltigen Drehimpuls, den eine solche Scheibe mit ihrer riesigen Ausdehnung und Masse haben muss. Während die Masse unseres Sonnensystems in der Sonne konzentriert ist, sind 98 % des Drehimpulses in den Riesenplaneten gebunden [2]. Eine Theorie der Planetenentstehung muss deshalb auch die Umverteilung dieses Drehimpulses erklären, was zum damaligen Zeitpunkt unmöglich schien.

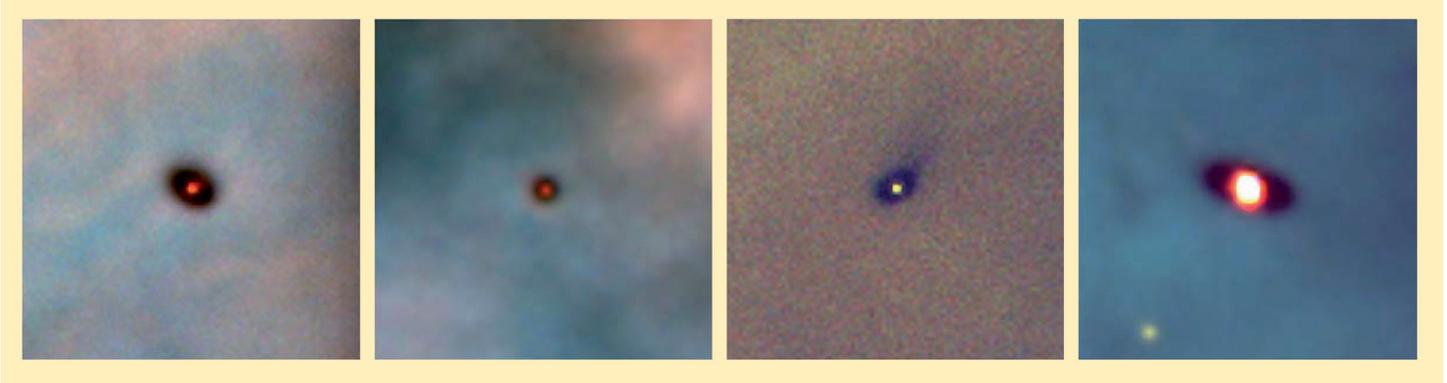
In den 1940er Jahren beschäftigte sich Carl Friedrich von Weizsäcker mit Fragen der Planetenentstehung [3]. Er hatte die geniale Idee, den Drehimpulstransport im Sonnennebel mit turbulenter Reibung zu erklären. Die Turbulenz erzeugt Viskosität, die den Drehimpuls nach außen fließen lässt, während die Masse nach Innen strömt. Dies war die Geburtsstunde des heutigen Modells der Planetenentstehung in einer turbulenten Scheibe aus Staub und Gas. Damit war auch klar, dass die Planetenentstehung ein „natürlicher Nebeneffekt“ der Sternenentstehung ist. Heute schätzt man auf Grund von Beobachtungen, dass 10 % aller sonnenähnlichen Sterne über Gasriesen wie Jupiter verfügen [1]. Der Anteil an kleineren Planeten wird vermutlich noch viel höher sein.

Die genaue theoretische Beschreibung der Planetenentstehung hinkt dem fast explosionsartig anwachsenden Datenmaterial zu extrasolaren Planetensystemen und protoplanetaren Scheiben hinterher, wobei anzumerken ist, dass die Entstehung von Planeten bis heute noch nie direkt beobachtet wurde (siehe „Begrenzte Beobachtungsmöglichkeiten“ auf Seite 7). Zudem sind fast alle bekannten Planetensysteme fertig ausgebildet. Das trifft natürlich auch auf unser eigenes zu, dessen Alter 4,56 Milliarden Jahre beträgt. Dies wissen wir von Altersbestimmungen der ältesten Gesteine insbesondere vom Mond, aber auch von Meteoriten. Nur in Detektivarbeit können wir etwas über die Reihenfolge der Bildung von festen Körpern im Sonnensystem



**Bis Ende 1995 galt unser Sonnensystem als typisch im Universum. Dies änderte sich schlagartig mit der Entdeckung extrasolarer Planetensysteme. Insbesondere die massereichen „heißen Jupiter“, die ihren Zentralstern in sehr geringem Abstand umkreisen, geben den Astronomen Rätsel auf (Grafik: IAU).**





**Abb. 1** Mit dem Weltraumteleskop Hubble gelang es erstmals, protoplanetare Scheiben um junge Sterne abzubilden. Diese Scheiben sind im optischen Bereich undurchsichtig und heben sich als Schatten vor dem leuchtenden Gas des Orion-Nebels ab. (Foto: NASA/ESA).

erfahren. Hierbei spielen Altersbestimmungsmethoden eine wichtige Rolle.

Sterne entstehen noch heute, und seit einigen Jahren ist es möglich, die Staub- und Gasscheiben, die viele der jungen Sterne umgeben, räumlich aufgelöst zu beobachten (Abbildung 1). Man kann so davon ausgehen, dass man zumindest den Anfangs- und Endzustand der Planetenentstehung gut kennt. Es ist die Aufgabe der Theorie, diese beiden Zustände mit einem konsistenten Ablauf physikalischer Prozesse miteinander zu verbinden.

Beschrieb von Weizsäcker die Planetenentstehung in seinem Artikel 1943 noch auf 37 Seiten, so füllte Victor Safronov zwanzig Jahre später bereits ein ganzes Buch mit seinem detaillierten Modell der Planetenentstehung [4]. Darin beschrieb er erstmals die meisten physikalischen Effekte, die wir heute als Grundlage zur Entstehung von Planeten benötigen. Diese Arbeit begründete das heutige Bild der graduellen Entstehung von Planeten aus der Zusammenlagerung von kleinsten Staubkörnern zu immer größeren Körpern [5].

Bis zum Jahre 1995 war die Theorie der Entstehung eines Planetensystems ausschließlich an einem einzigen Studienobjekt kalibriert: unserem Sonnensystem. So ist es nicht verwunderlich, dass die Theorie auch nur Planetensysteme vorhersagte, die in ihrer Struktur dem unsrigen ähneln. Unser Sonnensystem ist dadurch gekennzeichnet, dass die kleinen kompakten erdähnlichen Planeten (Merkur, Venus, Erde und Mars) sich nah der Sonne aufhalten und die massereichen Gasriesen (Jupiter und Saturn) sowie die Eisriesen (Uranus und Neptun) weit entfernt die Sonne umrunden.

Riesenplaneten brauchen mehr Baumaterial und sollten daher nur in ausreichender Entfernung von der Sonne auftreten können. Auch wenn in einer protoplanetaren Scheibe die Dichte nach außen hin abnimmt, so befindet sich dennoch der Hauptanteil der Masse bei großen Radien. In diesen Bereichen liegen die Temperaturen so niedrig, dass gasförmige Substanzen wie Wasser als Eis vorliegen. Flüssiges Wasser gab es im Urnebel nicht, da der Gasdruck für diesen Aggregatzustand zu niedrig war. In der Nähe der Sonne verdampfte das Eis, und das verbleibende Material wie

Silikate, also Sandkörner, reichte gerade aus, um Planeten bis zur Erdmasse zu bilden. Die Trennlinie, jenseits derer die häufigsten Gase ausfrieren, nennt man Schneegrenze. Sie befindet sich in unserem Sonnensystem je nach Modell bei 3 bis 5 Astronomische Einheiten (AE). 1 AE entspricht der mittleren Entfernung Sonne-Erde von 149,6 Mio. km. Die Schneegrenze trennt somit das innere Sonnensystem mit den terrestrischen Planeten vom Reich der Gas- und Eisriesen.

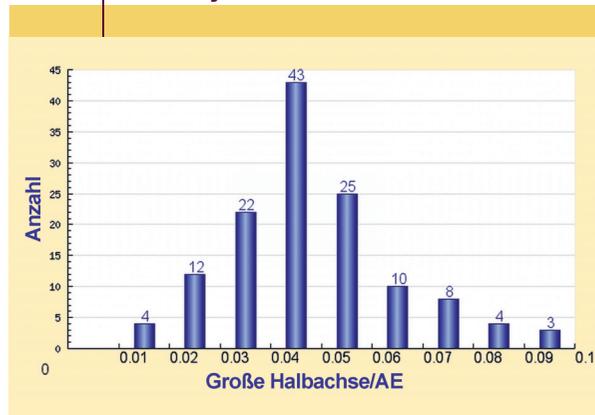
Die im Vergleich zur Erde 100- bis 300-mal massereicheren Planeten Saturn und Jupiter bildeten zunächst einen Eis- und Gesteinskern mit etwa 10 Erdmassen, der dann in der Lage war, Gase, wie Wasserstoff und Helium, aus dem Urnebel aufzusammeln. So entstanden ihre gewaltigen Atmosphären, die heute 90 % der Gesamtmasse ausmachen. Man erwartet, dass sich im Innern von Jupiter ein fester Planetenkern von knapp dreifachem Erddurchmesser befindet.

Deshalb waren die Planetenforscher vollkommen überrascht, als 1995 die Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz einen Planeten von annähernd Jupitermasse entdeckten, der seinen Mutterstern 51 Pegasi in einem Abstand von nur 0,05 AE umkreist. Laut gängiger Theorie war das unmöglich. Mittlerweile kennen wir rund 470 extrasolare Planeten und 47 Sterne mit mehreren Planeten (Stand: Juli 2010, siehe [exoplanet.eu](http://exoplanet.eu)). Die meisten Systeme sehen ganz anders aus als unser Sonnensystem (Abbildungen 2 und 3). Dies ist zum Teil ein durch die Entdeckungsmethode hervorgerufener Auswahlereffekt. Dennoch bleibt das Problem der extrem nahe am Zentralstern existierenden Riesenplaneten.

Diese Entdeckung war die Initialzündung für neue theoretische Modelle. Neue Effekte wurden entdeckt, und alte Theorien, die in der Schublade verschwunden waren, wurden wieder hervor geholt.

Heutige Modelle müssen zum einen unser Sonnensystem erklären können. Hierbei geht es mittlerweile um viele Details, wie die chemische Zusammensetzung von Meteoriten in Abhängigkeit vom Abstand zur Sonne oder die Isotopenhäufigkeit in Kometen. Zum anderen müssen sie

**ABB. 2 HEISSE JUPITER**



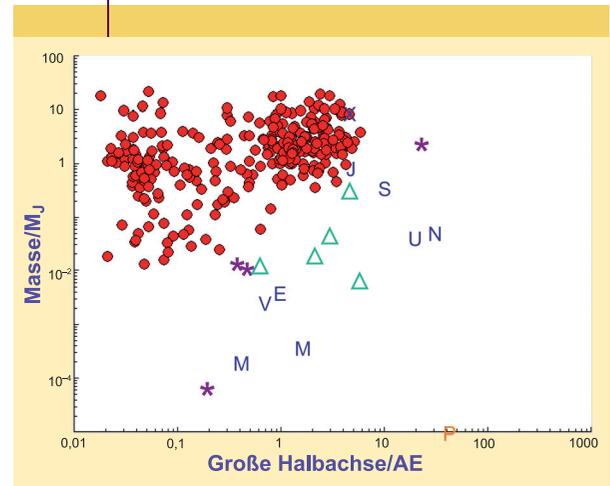
Dieses Diagramm belegt, dass 131 von rund 470 bekannten extrasolaren Planeten ihre Sterne innerhalb von 0,1 AE umkreisen. (aus exoplanet.eu).

die Mannigfaltigkeit an unterschiedlichen extrasolaren Planetensystemen erklären. Mittlerweile lassen sich nicht mehr nur die Massen und Bahneigenschaften bestimmen, sondern in einigen Fällen sind auch die mittleren Dichten und in ersten Ansätzen sogar die chemische Zusammensetzung einiger Planetenatmosphären bekannt. Damit bekommen die Theoretiker immer mehr Randbedingungen für ihre Modelle. Widmen wir uns nun den Entwicklungsstufen (Abbildung 4).

**Die Geburt in der zirkumstellaren Scheibe**

Alles beginnt in der zirkumstellaren Scheibe eines jungen Sterns. Die Scheibe unserer jungen Sonne besaß wohl 3 % bis 5 % der Sonnenmasse. Sie bestand aus 78 % Wasserstoff,

**ABB. 3 MASSEN UND BAHNRADIEN**



Die Massen und Bahnradien von rund 300 extrasolaren Planeten im Vergleich zu den Planeten unseres Sonnensystems. Letztere sind durch die Anfangsbuchstaben ihrer Namen gekennzeichnet. Die vier Sterne stehen für Planeten, die um einen Pulsar, also einen kompakten Sternrest, kreisen. Grüne Dreiecke: mit Mikrogravitationslinseneffekt entdeckt (nach exoplanet.eu).

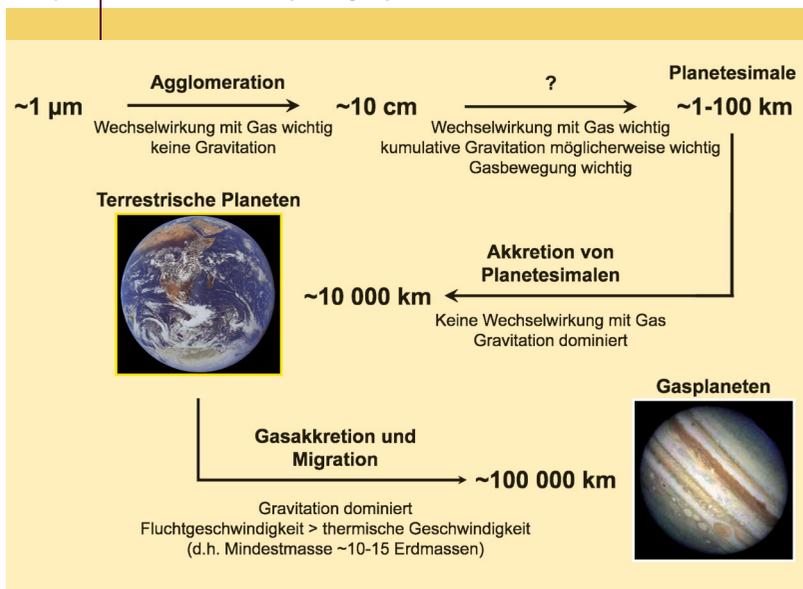
20 % Helium und ungefähr 2 % schwereren Substanzen, wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Silizium und Eisen. Dies spiegelt sich noch heute in der chemischen Zusammensetzung der Sonnenmaterie wider.

Solche protoplanetaren Scheiben lassen sich seit einigen Jahren direkt beobachten. Dabei stellt sich heraus, dass sowohl die Masse als auch die räumliche Ausdehnung dieser Scheiben schwankt. Manche Scheiben sind mit Durchmessern um 100 AE etwa so groß wie unser Sonnensystem, manche sind 3- bis 10-mal größer. Außerdem fand man heraus, dass in vielen dieser Scheiben noch Material auf den Zentralstern strömt. Dieser Vorgang heißt Akkretion. Um diesen Materietransport zum Mittelpunkt in der rotierenden Scheibe, also gegen die Zentrifugalkraft, erklären zu können, muss man annehmen, dass Drehimpuls durch Turbulenz nach außen transportiert wird. Die beobachtete Akkretion bestätigt somit von Weizsäckers Idee. Auf direktem Wege lässt sich die vermutete Turbulenz jedoch nur schwer beobachten.

Aus der Beobachtung der Scheibenhäufigkeit bei unterschiedlich alten Sternen, kann man zudem schließen, dass die mittlere Lebenserwartung einer Scheibe einige Millionen Jahre beträgt. Die Akkretion sowie möglicherweise das Verdampfen der Scheibe durch intensive Sternstrahlung begrenzen ihre Lebensdauer. Dies setzt eine Obergrenze für den Zeitrahmen der Planetenentstehung zumindest der Gas- und Eisriesen.

Darüber hinaus kann man den Beobachtungsdaten entnehmen, dass sich die Scheiben auch chemisch und physikalisch entwickeln [6]. So wird die Verteilung von chemischen Substanzen und Staubpartikeln unterschiedlicher Zusammensetzung, Größe und Kristallisationsgrad gemessen.

**ABB. 4 PLANETENENTSTEHUNG**



Phasen der Planetenentstehung (Grafik: J. Blum, TU Braunschweig).

Gerade die Staubentwicklung in zirkumstellaren Scheiben lässt in Beobachtungen die erste Stufe der Planetenentstehung erkennen. Die beobachteten Staubteilchen sind bereits größer als jene im interstellaren Raum.

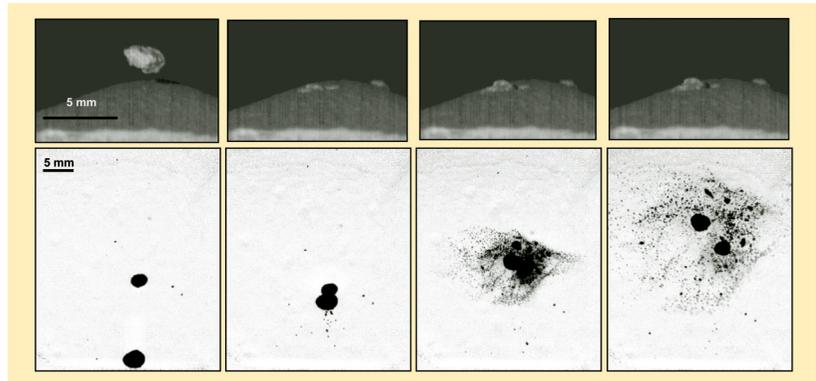
Die erste Stufe des Staubwachstums in der protoplanetaren Wolke wird durch die Brownsche Molekularbewegung angetrieben. Stoßen zwei Staubkörner zusammen, so haften sie aneinander. Wir reden hier von Mikrometer großen Partikeln, bei denen die Deformierbarkeit der Oberfläche noch eine Rolle spielt. Zwei Staubkörner haften quasi wie zwei Seifenblasen aneinander, die einen gemeinsamen Hals ausbilden und ihre Oberfläche dabei verringern.

Die Staubkörner befinden sich eingebettet im Gas der Scheibe um den jungen Stern. Wachsen diese dann auf Grund der Kollisionen, so beginnen sie in Richtung Mittelebene „auszuregnen“ [7]. Um diesen Vorgang zu verstehen, muss man wissen, dass in der Scheibe der Druck, also Dichte und Temperatur, mit der Entfernung vom Stern und mit zunehmender Höhe über der Mittelebene abnehmen. Dies erzeugt einen Druckgradienten, der mit der Zentrifugalbeschleunigung gemeinsam der Gravitation des Sterns entgegenwirkt. Die Scheibe ist also nicht in einem reinen Gravitations- und Zentrifugalgleichgewicht. Wäre dies der Fall, so würden sich alle Teilchen auf Kepler-Bahnen bewegen. In einer zirkumstellaren Scheibe wird etwa 99 % Prozent der Gravitation durch die Rotation ausgeglichen und der Rest durch die Druckschichtung. Dadurch rotiert die Scheibe mit ein paar Promille unter dem Keplerschen Wert. In vertikaler Richtung – senkrecht zur Scheibenebene – kann die Rotation jedoch nicht gegen die Anziehung des Sterns wirken. Hier ist es allein der Druckgradient der zum Gleichgewicht führt.

Staubkörner spüren auf Grund ihrer hohen Dichte nichts von dem Druckgradienten und befinden sich daher nicht im Kräftegleichgewicht, wenn sie in ihrer Rotation von der Gasscheibe mitgenommen werden. Wenn sie wachsen, nimmt das Verhältnis zwischen der Reibungskraft mit dem Gas (abhängig von der Querschnittsfläche) und der Masse (abhängig vom Volumen) immer mehr ab. Als Folge davon können sich Partikel jetzt relativ zum Gas bewegen.

Alle Körper fallen nach Galilei zwar gleich schnell, aber eben nur unter Vernachlässigung der Reibung mit der Luft, also dem umgebenden Gas. So hat eine Feder ein höheres Verhältnis von Querschnittsfläche zu Masse als beispielsweise ein Stein. Deshalb wird auch ein großes Staubkorn im freien Fall schneller als ein kleines Staubkorn. Mit der Zeit regnen millimeter- bis zentimetergroße Partikel zur Mittelebene der Scheibe aus. Dabei wachsen sie weiter an, weil sie kleinere Partikel auf ihrem Weg einsammeln, die langsamer sedimentieren.

Diese Bewegung kommt jedoch in der Mittelebene nicht zur Ruhe, da die Gasscheibe einen radialen Druckgradienten besitzt und sich mit einer Geschwindigkeit von ein paar Promille unter dem Keplerschen Wert der Gesteinscheibe dreht. Dies hat zur Folge, dass die Gesteinsbrocken nicht nur zur Mittelebene sedimentieren, sondern auch radial weiter



**Abb. 5** Experimente von Physikern an der TU Braunschweig zeigen, wie einige Millimeter große Staubteilchen bei einer Relativgeschwindigkeit von 1,8 m/s auf wenige Zentimeter großen Staubteilchen haften bleiben. Millimetergroße Partikel zerstören sich gegenseitig, wenn sie mit 5 m/s oder mehr zusammenstoßen (Foto: J. Blum, TU Braunschweig).

auf den Stern zu driften. Bei metergroßen Objekten beträgt diese Driftgeschwindigkeit schon 100 m/s. Ein solcher Brocken würde deshalb innerhalb von rund hundert Jahren von der Sonne verschluckt werden. Er entgeht diesem Schicksal nur, wenn er schnell weiterwächst. Je größer und massereicher er wird, desto geringer ist die Reibungskraft und die radiale Driftgeschwindigkeit nimmt wieder ab. Doch wir werden nun sehen, dass genau dieses weitere Wachstum sehr problematisch ist.

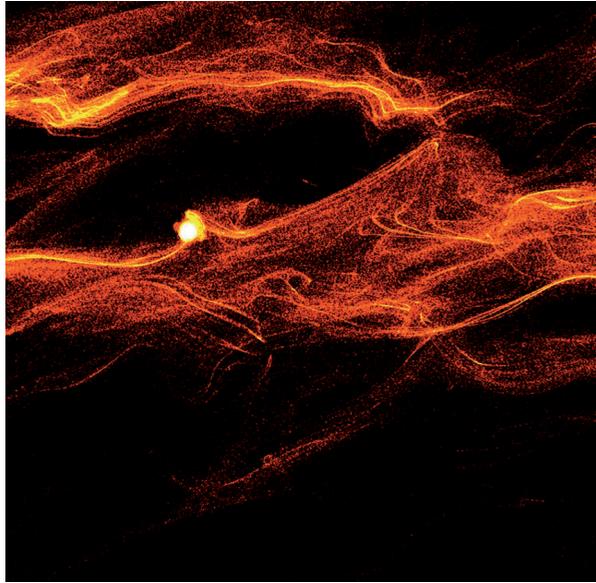
### Das Überwinden der Meterbarriere

Durch die beschriebene Sedimentation zur Mittelebene der Scheiben können die Staubteilchen Durchmesser von einigen Zentimetern erreichen. Mit Laborexperimenten versucht man seit einigen Jahren, solche Partikel entstehen zu lassen und untersucht dann deren Eigenschaften, wie die Formstabilität. Hierbei will man wissen, bis zu welcher Relativgeschwindigkeit, mit der die Teilchen kollidieren, diese auch wirklich aneinander haften und sich nicht gegenseitig zerstören [8].

### BEGRENZTE BEOBACHTUNGSMÖGLICHKEITEN

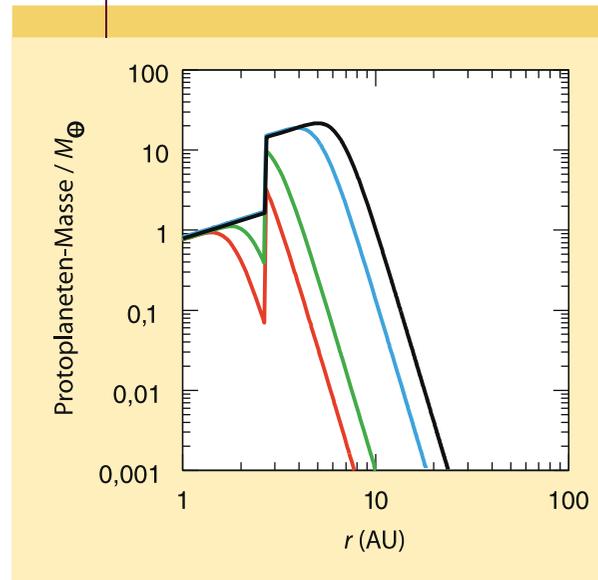
Aus Spektralbeobachtungen zirkumstellarer Scheiben kann man auf die Größenverteilung der Staubteilchen in diesen Scheiben schließen. Dies geht jedoch nur bis zu Teilchen mit Größen im Zentimeterbereich. Körper mit Durchmessern von einem Meter oder mehr sind kaum mehr nachweisbar. Zum einen sind diese Objekte viel größer als die Wellenlängen, die uns aus dem stellaren Spektrum und aus der Wärmestrahlung der Scheibe zur Verfügung stehen. Zum anderen sinkt

mit zunehmender Größe der Objekte bei gleichbleibender Masse der Gesamtpopulation die aufsummierte Fläche, die mit der Strahlung wechselwirken kann. Je größer die Teilchen werden, desto „durchsichtiger“ werden die Scheiben also. Die nächsten Daten mit denen wir unsere Modelle heutzutage vergleichen können, sind dann die „fertigen“ Planeten. Die meisten von ihnen sind mehrere Milliarden Jahre alt. Der jüngste bekannte extrasolare Planet ist acht Millionen Jahre alt.



**Abb. 6** Momentaufnahme einer Modellrechnung, die die Staubverteilung in einem Ausschnitt der protoplanetaren Scheibe zeigt. An einer Stelle hat sich so viel Materie versammelt, dass hier ein lokaler gravitativer Kollaps eingesetzt hat. Diese Verdichtung bleibt in der turbulenten Strömung stabil, sammelt weitere Materie aus ihrer Umgebung auf und wächst weiter an, bis sie die Masse eines mehrere hundert Kilometer großen Kleinplaneten erreicht [9].

#### ABB. 7 | WACHSTUM



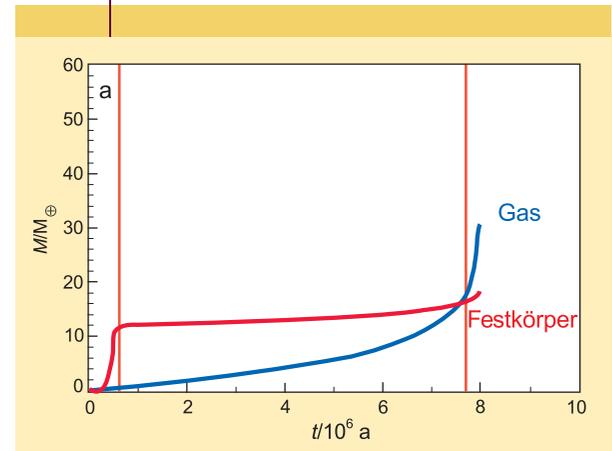
Das Wachstum der Planetenkerne. Bei Zusammenstößen von Planetesimalen entstehen die Kerne der Planeten. Nah am Stern laufen diese Prozesse schneller ab, da die Umlaufgeschwindigkeiten größer sind. Sie erreichen jedoch nur kleine Kernmassen, da weniger Material zur Verfügung steht als weiter außen. Deutlich lässt sich die Schneegrenze im Sonnenebel erkennen. Nur außerhalb gibt es genug Staub und Eis, damit sich ein Kern groß genug für die Entstehung von Jupiter (mehr als 10 Erdmassen,  $M_{\oplus}$ ) bilden kann (nach: E. Thommes, Northwestern University).

Diese Experimente zeigen, dass die Kollisionen nur mit höchstens 1 m/s erfolgen dürfen, sonst droht vollkommene Zerstörung (Abbildung 5). Andere Untersuchungen belegen aber, dass in der Scheibe turbulente Bewegungen auftreten, die zu Relativgeschwindigkeiten von typischerweise 10 m/s führen. Größere Brocken im Bereich von einem Meter prallen mit kleinen Partikeln wahrscheinlich mit noch höheren Geschwindigkeiten zusammen. Hierbei werden die Teilchen unweigerlich zerstört. Damit sind wir bei einem der großen Rätsel der Planetenentstehung angekommen: Allem Anschein nach können Teilchen dieser Größe durch einfaches Kollidieren und Haften nicht weiter anwachsen. Ist der Nebel turbulent, wie es Beobachtungen zeigen und von Weizsäckers Theorie vorhersagt, so zerreiben die Sandstürmen ähnelnden turbulenten Bewegungen das Baumaterial der Planeten wieder zu mikrometerkleinem Staub. Ist die Scheibe hingegen „windstill“, so driften die metergroßen Körper zu schnell in den Zentralstern hinein, um vorher zu Planetesimalen anwachsen zu können.

Es scheint eine natürliche Grenze für Agglomerate von der Größe etwa eines Tennisballs zu geben, über die sie nicht hinaus wachsen können. Und doch muss es irgendwie möglich sein. Welchen Ausweg hat die Natur gefunden?

Eine mögliche Erklärung könnten Wirbel sein [9, 10]. Computersimulationen unserer Gruppe belegen, dass sich in der turbulenten Scheibe Inseln mit höherer Gasdichte ausbilden können (Abbildung 6). Diese Gebiete haben in mancher Hinsicht Ähnlichkeit mit rotierenden Hochdruckgebieten in der Erdatmosphäre. In solchen Bereichen kön-

#### ABB. 8 | GASRIESEN



Die Entwicklung von Gasriesen wie Jupiter benötigt in den meisten Modellen einige Millionen Jahre. Zunächst wächst der Kern (rote Kurve); in der zweiten Phase wird allmählich Gas auf den Kern akkretiert (blaue Kurve), wobei der Gasstrom von den Kühleigenschaften des jungen Planeten begrenzt wird. Solange noch Planetesimale in die staubreiche undurchsichtige Atmosphäre stürzen, kühlt diese sehr langsam und die Gasmasse steigt nur langsam an. Erst wenn die Atmosphäre besser abkühlt, folgt eine Phase der rasanten Gas-Akkretion.

nen sich zentimetergroße Teilchen schnell und effektiv ansammeln, ohne aus der Scheibe auszuregnen. Dadurch erhöht sich lokal die Materiedichte, und die Kollisionsgeschwindigkeiten verringern sich. Dies ermöglicht ein Wachstum zu Körpern mit einigen Kilometern Durchmesser, sogenannten Planetesimalen. Es kann sogar zu einer spontanen Bildung von Planetesimalen durch einen Gravitationskollaps in der Staubschicht kommen. Hierbei handelt es sich um einen kollektiven Effekt: Zwei Teilchen alleine wären viel zu massearm, um sich mit ihrer Schwerkraft zusammenzulagern. Erst das Ensemble von Teilchen ermöglicht in seiner Gesamtheit diesen Vorgang.

In Computerrechnungen haben wir diesen Prozess mit Millionen von Partikeln simuliert. In der Tat bildeten sich spontan Planetesimale von vielen Kilometern Durchmesser. Diese entstanden direkt aus den zentimetergroßen Gesteinen, ohne dass zuvor Einzelobjekte von 10 oder 100 Metern vorhanden sein mussten. Derzeit wird untersucht, wie eine realistische Massenverteilung der Planetesimale aus diesem turbulenz- und gravitationsgetriebenen Prozess aussehen müsste. Diese Ergebnisse könnte man dann mit der Verteilung der Asteroiden in unserem Sonnensystem vergleichen und hätte so die Möglichkeit, die Rechnungen zu falsifizieren oder weiterzuentwickeln.

### Vom Planetesimal zum Planetenkern

Haben die Objekte erst einmal die Zentimeterbarriere überschritten und Planetesimale gebildet, dann gibt es für den weiteren Aufbau eines Planeten grünes Licht. Die Planetesimale sind trotz des Gases in der Scheibe groß und mobil genug, um sich gegenseitig anzuziehen. Die resultierenden Kollisionen untereinander können durchaus zu Zerstörung führen, jedoch verbleibt das meiste Material im eigenen Gravitationspotential gefangen, und es bildet sich ein neues Planetesimal noch höherer Masse. Dieser Prozess fährt so lange fort, bis eine maximal mögliche Masse erreicht ist. Das ist dann der Fall, wenn der größte Körper sich alle anderen Planetesimale einverleibt oder sie verdrängt hat.

Diese maximal mögliche Masse hängt vom Abstand vom Zentralstern ab und vom lokal zur Verfügung stehenden Material an Staub und Planetesimalen. Deshalb sind die jungen Planetenkerne nahe der Sonne sehr massearm. Die Ur-Erde konnte nur bis auf etwa Marsgröße anwachsen, dann war die Nachbarschaft an Planetesimalen leergefegt. Wie die Erde dann später noch auf die heutige Größe anwachsen konnte, behandeln wir später. Weiter von der Sonne entfernt konnten sich viel massereichere Kerne bilden, weil in der Scheibe mehr Material vorhanden war und der störende Einfluss der Gravitation durch die junge Sonne viel geringer war. Hier entstanden die Gas- und Eisriesen. Bei diesen Objekten tritt jedoch ein anderes Problem auf.

Die Geschwindigkeit, mit der sich aus Planetesimalen Planetenkerne bilden, hängt von der Häufigkeit der Kollisionen unter den Planetesimalen ab (Abbildung 7). Diese ist proportional zur Umlauffrequenz und somit nahe am Stern viel höher als weiter außen. So dauert es rund 100 000 Jah-

re, bis die terrestrischen Planeten bis zu ihrer kritischen Masse angewachsen sind, bei Jupiter werden dagegen in den meisten Modellen schon mehr als zehn Millionen Jahre benötigt. Bei Uranus und Neptun übersteigt die Entstehungszeit in den Modellsimulationen aber die Lebenserwartung des Sonnenebels (oder im allgemeinen der protoplanetaren Scheibe) bei weitem.

Es geht heute deshalb nicht mehr nur darum herauszufinden, wie sich die Planeten bilden können, sondern auch wie schnell. Die beobachtete Lebensdauer von Scheiben um junge Sterne von einer bis zehn Millionen Jahren stellt eine Obergrenze dar, innerhalb der sich auch die Gasriesen gebildet haben müssen. Später stand kein Gas mehr zur Verfügung um den Kern mit einer Atmosphäre zu bedecken. Dieser Teil der Planetenentstehung ist bislang nur teilweise verstanden.

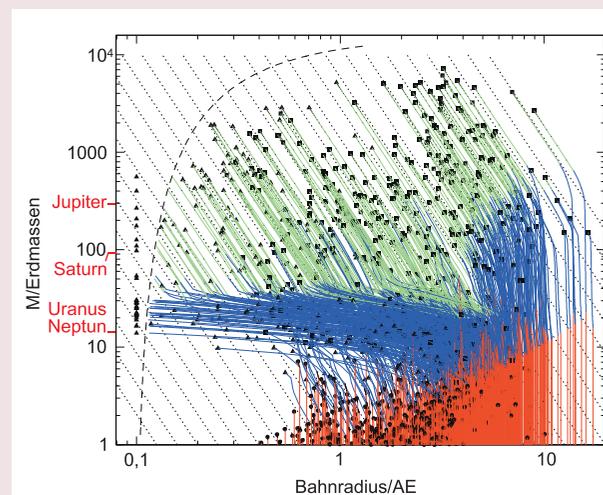
### POPULATIONSSYNTHESE

Diese Monte-Carlo-Simulation zeigt, welche Planetenmassen man bei welchen Abständen von einem sonnenähnlichen Stern finden sollte. Das Modell beinhaltet unser derzeitiges Wissen über Staub und Gasscheiben um junge Sterne sowie die aktuellsten Theorien zu verschiedenen Planetenentstehungsprozessen. Bei jedem Simulationslauf wird ein „Planetenkern“ mit 0,6 Erdmassen anfänglich in einer zufälligen Entfernung zum jungen Stern in einer Scheibe mit zufällig ausgewählten Eigenschaften platziert. Diese Anfangsbedingungen liegen innerhalb der beobachteten statistischen Streuung echter Scheiben.

Diese Planetenkerne beginnen am unteren Rand des Diagramms zu wachsen, indem sie zunächst Planetesimale und später Gas aufsammeln. Die

jeweilige Kurve steigt senkrecht nach oben. Dann migrieren sie nach innen (farbige Kurven), wobei die Migrationsgeschwindigkeit von der Masse des Planeten und der Masse in der Gasscheibe abhängt. Je nach Migrationstyp wurde eine andere Farbe für den Entwicklungsweg gewählt. Wenn die Scheibe sich letztendlich auflöst, erreicht der Planet seine endgültige Position, gekennzeichnet mit einem schwarzen Symbol. Man erkennt, dass auch unsere Gasriesen in diesem Modell vorhergesagt werden.

Da es noch keine gesicherte Erkenntnis über den Haltemechanismus für heiße Jupiter gibt, würden in diesem Modell einige Planeten in den jungen Stern stürzen. Für diese Planeten wird die Evolution willkürlich bei 0,1 AE gestoppt.



**Monte-Carlo-Simulationen der Entwicklung von Planetenkernen**  
(C. Mordasini, W. Benz, Y. Alibert, Universität Bern).

Wächst ein Planetenkern bis zu einer kritischen Masse an, so bildet sich durch Akkretion von Gas aus der Umgebung schnell eine dichte und massereiche Atmosphäre um den Planeten aus (Abbildung 8). Im Fall von Jupiter übersteigt die letztendliche Masse des gebundenen Gases die Masse des ursprünglichen Kerns um den Faktor von ungefähr 30. Und damit sind wir bei einem weiteren Problem in unserem Verständnis der Planetenentstehung. Wie bei jedem Gravitationskollaps kann das System nur so schnell komprimiert werden und neue Materie binden, wie es thermische Energie abgeben kann.

Wenn der junge Planet mit seiner noch dünnen aber sehr staubreichen Atmosphäre nicht effektiv abkühlen kann, so kann er auch nicht in seiner Masse anwachsen, da die Akkretion ständig neue potentielle Energie freisetzt. Umgekehrt würde auch die Erde ihren Rest an Atmosphäre verlieren, wenn wir sie so stark erhitzen würden, dass die mittlere thermische Geschwindigkeit des Gases die Fluchtgeschwindigkeit übersteigt. Dies ist übrigens auch der Grund, warum die Erde weder Helium oder Wasserstoff langfristig in der Atmosphäre binden kann. Die thermische Geschwindigkeit dieser leichten Gase ist selbst bei Zimmertemperatur so hoch, dass sie sich ins Weltall verflüchtigen.

Viele Modelle zur Entstehung von Jupiter und Saturn und deren Atmosphären kommen so auf Entstehungszeiten, die länger sind als die oben geforderten zehn Millionen Jahre. Ein Ausweg könnte darin bestehen, dass der Staub die Atmosphäre effizienter kühlt, als man heute annimmt. Eine andere derzeit viel diskutierte Möglichkeit, die Entste-

hungszeit zu verkürzen, besteht in der radialen Wanderung des Planeten durch die Scheibe. Darauf kommen wir gleich zu sprechen.

### Junge Planeten auf Wanderschaft

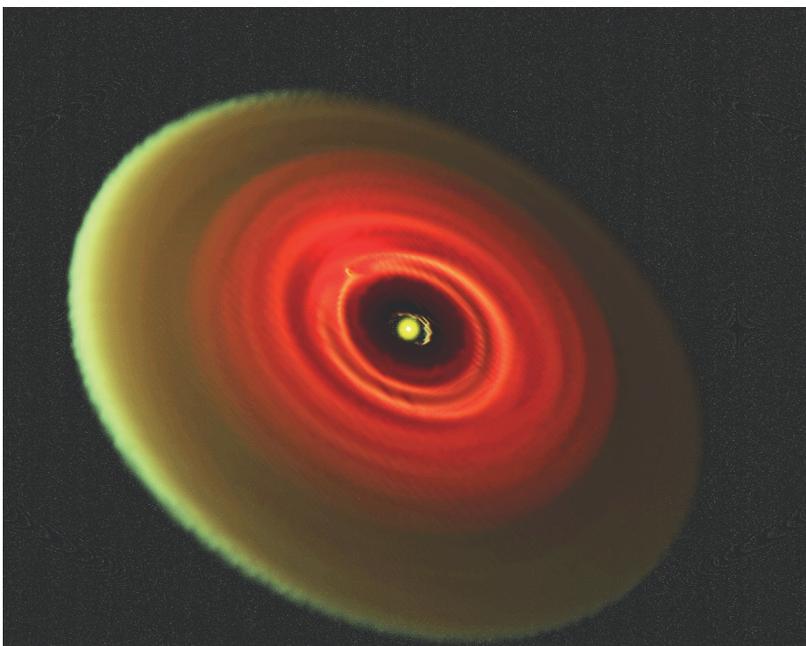
Die Kerne von Gasriesen wie Jupiter oder Saturn dürften fünf bis zehn Erdmassen schwer sein. Heutige Modelle können solche Werte für den Bereich jenseits der Schneegrenze nachvollziehen. Sie scheitern jedoch völlig, die Entstehung des Planeten von 51 Pegasi zu erklären. So nahe am Stern (0,05 AE) ist es schon schwierig, eine Merkurmasse zusammenzutragen, geschweige denn mehrere Erdmassen. Die dazu benötigten Mengen an Planetesimalen nahe am Stern übersteigen alles, was man derzeit aus Beobachtungen und Modellen ableiten kann. Diese wohl unrealistische Menge an Planetesimalen wäre jedoch die einzige Möglichkeit, eine Entstehung dieser sogenannten heißen Jupiter so nahe am Stern zu erklären. Bleibt man hingegen bei der Annahme, dass sich Gasriesen jenseits der Schneegrenze bilden, dann muss man daraus folgern, dass diese Körper von dort in Richtung Stern gewandert oder „migriert“ sind.

Die Idee der Planetenmigration wurde keinesfalls erst nach der Entdeckung des ersten heißen Jupiters entwickelt. Sie wurde schon 14 Jahre zuvor von Bill Ward vom Southwest Research Institute in Boulder, USA, geäußert. Modelle der Planetenmigration basieren auf der Wirkung von Gezeitenkräften innerhalb der zirkumstellaren Scheibe. Der Planet „deformiert“ mit seiner Schwerkraft die Scheibe, weshalb das Gas in der Nähe des Planeten nicht mehr auf reinen Keplerbahnen läuft. Dies führt zu Asymmetrien in der Gasverteilung und in der Folge summieren sich die Gravitationskräfte des Scheibengases nicht mehr zu Null auf. Dadurch wirkt ein Drehmoment auf den Planeten, so dass ihm Drehimpuls entzogen wird. Dieser Drehimpulsverlust zwingt ihn zur Wanderung zu engeren Bahnen um den Zentralstern.

Nach der Entdeckung der heißen Jupiter fand das Modell der Planetenmigration große Beachtung, und man begann, die Geschwindigkeiten zu berechnen, mit denen Planeten auf ihren Zentralstern zuwandern sollten. So braucht ein Planet von der Größe Saturns etwa 100 000 Jahre, um den Abstand zur Sonne zu halbieren.

Mit der Migration ließen sich mehrere Probleme lösen. Zum einen erklärt sie die Existenz von jupitergroßen Planeten nahe am Stern. Zum anderen wachsen Planeten schneller an, weil sie auf ihrer Wanderung durch Gebiete mit „unverbrauchtem“ Staub und Gas kommen, das sie aufsammeln können. Allerdings wäre hierfür eine mäßiger Form der radialen Wanderung von Planeten mit nur etwa 2 % der theoretisch vorhergesagten Wanderungsrate erforderlich. Dieser Faktor ist nur eine beste Schätzung, um die beobachtete Verteilung von Planeten zu erklären.

Es werden weitere Untersuchungen notwendig sein, um diesen Prozess besser zu verstehen. Hier bietet sich wiederum die Turbulenz innerhalb der Scheibe und insbesondere das genaue thermodynamische Verhalten des Gases



**Abb. 9** Diese Simulation zeigt, wie junge Planeten die Struktur der protoplanetaren Scheiben beeinflussen. Die erzeugten Spiralmuster, Lücken sowie die heißen ausgedehnten Atmosphären der Planeten sollten in naher Zukunft beobachtet werden können.

als ein Ansatz an. Jüngste Untersuchungen deuten an, dass Letztere sogar eine Umkehr der Migration von Planeten bewirken kann. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse einer der bisher wenigen thermodynamisch selbstkonsistenten Simulationen zur Migration von Planetenkernen.

Schließlich gibt es noch ein grundsätzliches Problem des Migrationsmodells. Wenn die Planeten erst einmal radial wandern, dann gibt es kein Halten mehr. Letztlich stürzen sie in den Zentralstern hinein. Derzeit sucht man nach Mechanismen, um diesen Prozess zu stoppen. Mögliche Lösungen können Gezeitenkräfte durch den Zentralstern oder Magnetfelder sein. Außerdem zeigen Beobachtungen, dass viele zirkumstellare Scheiben in der Mitte ein materiefreies Gebiet besitzen kann. Die nahe Umgebung des Sterns ist hier nahezu frei von Gas und Staub. Möglicherweise kommt die Migration zum Stillstand, wenn der Planet in diese Lücke hineingerät.

Wenn das Gas aus der Scheibe verschwunden ist, muss das Planetensystem noch lange nicht seine endgültige Konfiguration erreicht haben. Zwischen den Planeten und den verbleibenden Planetesimalen wirken ja noch weiterhin die Gravitationskräfte, und in einem „finalen Gerangel“ sucht jeder seinen Platz.

Der massereichste Planet Jupiter spielt hier natürlich in unserem Sonnensystem die dominierende Rolle. Er verhinderte, dass sich im Asteroidengürtel die Planetesimale zu einem Planeten zusammenlagern konnten. Er schleuderte Material und Planeten im inneren Teil des Sonnensystems so durcheinander, dass durch Kollisionen vier der ursprünglich wahrscheinlich vielen Planetenkerne zu den heutigen Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars anwachsen konnten. Dieses Planetenbillard dürfte zwischen 100 und 300 Millionen Jahre gedauert hat. Einer dieser durch Jupiter ausgelösten Zusammenstöße zwischen der fast fertigen Erde und einem Körper von der Größe des Mars führte nach heutigem Wissen zur Entstehung des Mondes. Auch im äußeren Sonnensystem ist Jupiter tonangebend. So wird beispielsweise spekuliert, dass sich die Kerne von Saturn, Uranus und Neptun in Jupiters Nachbarschaft gebildet haben, dann aber von ihm auf ihre späteren Umlaufbahnen gedrängt wurden.

Alle diese Teilprozesse lassen sich derzeit noch nicht in allen Details innerhalb eines einzigen Computermodells simulieren. Sie werden noch separat behandelt, wobei es darauf ankommt, in möglichst einfachen parametrisierten Modellen Vorhersagen für die statistischen Eigenschaften von Planeten zu treffen. Das Ergebnis der bislang aufwendigsten Simulationen zeigt „Populationssynthese“ auf S. 9.

Ziel ist es natürlich, mehr und mehr Teile zusammenzufügen, um schließlich die ganze Vielfalt der Planetensysteme verstehen zu können. Nur wenn die oben beschriebenen Teilprozesse in ihren quantitativen Vorhersagen über Verteilung von Staub und Planetesimalen, über die Zeitspanne der Planetenkernebildung, das Aufsammeln von Gas und die Wanderung der Planeten richtig sind, werden sie in ihrer Kombination in Populationssynthesen zu Systemen

führen, die man auch beobachtet (siehe „Populationssynthese“). So lange noch Widersprüche zwischen den vorhergesagten Häufigkeiten für Bahnen und Massen von Planeten und den gefunden Systemen bestehen, müssen wir die zugrundeliegenden Prozesse besser verstehen lernen. Beobachtungen werden auf diesem Weg mit Sicherheit noch weitere Überraschungen bereithalten, wie dies bei 51 Pegasi der Fall war.

### Zusammenfassung

*Die Entdeckung von extrasolaren Planetensystemen hat die Theorie der Planetenentstehung vor neue Herausforderungen gestellt. Das grundlegende Modell zur Entstehung unseres Sonnensystems aus einer Staub- und Gasscheibe um die junge Sonne besteht zwar unverändert seit der Mitte des letzten Jahrhunderts, es wurde jedoch im Laufe der Zeit um mehr und mehr Details bereichert. Auch heute sind noch viele Fragen offen, wie unser Sonnensystem oder die Planetensysteme um ferne Sterne entstanden sind.*

### Literatur

- [1] D. N. C. Lin, The Chaotic Genesis of Planets, *Scientific American*, Mai 2008.
- [2] J. Lissauer, Planet Formation, in: *Ann. Rev. Astron. and Astroph.* **1993**, 31, 129.
- [3] C. F. von Weizsäcker, *Zeitschrift für Astrophysik* **1943**, 22, 319.
- [4] V. Safronov, *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets*, Nauka Press, Moskau 1969; *NASA TTF* **1972**, 677.
- [5] H. Klahr, W. Brandner, *Planet Formation: Theory, Observation and Experiments*, Cambridge University Press, Cambridge 2006.
- [6] Th. Henning, Early phases of planet formation in protoplanetary disks, *Physica Scripta T*, **2008**, 130, 014019.
- [7] H. Klahr, *New Ast. Rev.* **2008**, 52, 78.
- [8] J. Blum, G. Wurm, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **2008**, 46, 21.
- [9] H. Klahr, A. Johansen, Graviturbulent planetesimal formation, *Physica Scripta T*, **2008**, 130, 014018.
- [10] A. Johansen et al., *Nature* **2007**, 448, 1022.

### Die Autoren



Thomas Henning, nach Physikstudium in Greifswald und Jena (Promotion), Post Doc in Prag und am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Nach der Leitung einer Arbeitsgruppe der Max-Planck-Gesellschaft an der Universität Jena und einer Professur an der dortigen Universität ist er seit 2001 Direktor am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und Professor an den Universitäten Heidelberg und Jena. Am MPI für Astronomie leitet er die Abteilung für Planeten- und Sternentstehung.



Hubert Klahr studierte in Karlsruhe Physik, promovierte in Jena, und verbrachte Post-Doc-Aufenthalte in Potsdam und an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz. Er habilitierte sich in Tübingen und leitet heute die Theoriegruppe der Abteilung für Planeten- und Sternentstehung am Max-Planck-Institut für Astronomie.

#### Anschrift

Dr. habil. Hubert Klahr, Prof. Dr. Thomas Henning, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg. [Klahr@mpia.de](mailto:Klahr@mpia.de)