



Zusätzliche Super-Erde würde Sonnensystem instabil machen

Wir nehmen es als selbstverständlich hin, dass unser Sonnensystem stabil ist und unsere Erde konstant um die Sonne kreist. Tatsächlich wäre es auf lange Sicht anders, wenn sich zwischen Mars und Jupiter nicht die Asteroiden befänden, sondern eine sogenannte Super-Erde von der Größe zwischen der Erde und dem Planeten Uranus bzw. Neptun.

Albrecht Ehrmann

Wäre das Sonnensystem stabil, wenn es einen weiteren Planeten zwischen Mars und Jupiter gäbe? Diese Frage stellte sich Stephen R. Kane, Professor für Astronomie und planetare Astrophysik an der University of California, Riverside (KANE 2023). Als hypothetischen Planeten wählte er einen vom Typ Super-Erde: Planeten dieser Größe sind schwerer und größer als die Erde, aber kleiner als die Eisriesen Uranus und Neptun (vgl. Abb. 1). Im Exoplanetenzen-sus stellen sie sich als sehr häufiger, wenn nicht häufigster Planetentyp heraus.

Bedingungen für Stabilität des Planetensystems

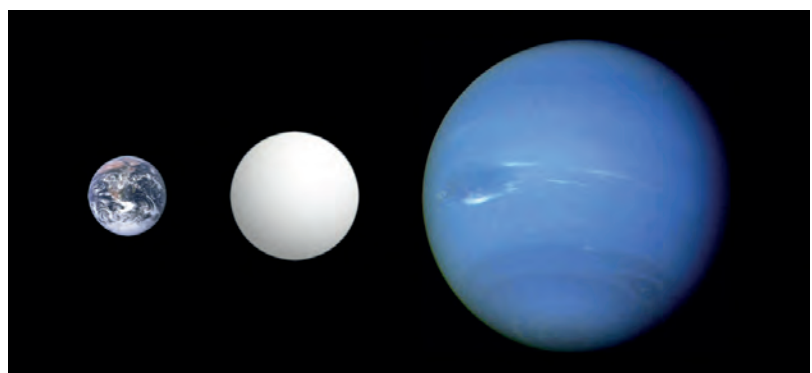
Ob ein Planetensystem stabil ist, hängt davon ab, wie sehr sich die Planeten gegenseitig stören können. Zwei einzelne Körper umkreisen sich auf Ellipsenbahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt und sind dynamisch stabil (sog. „Keplerbahn“). Kommen weitere Körper hinzu, stören sie sich gegenseitig und die Bahnen sind keine perfekten Ellipsenbahnen mehr. Die Bahnabstände und Massenverhältnisse im Son-

nensystem sind jedoch so, dass ein einzelner Planet näherungsweise eine Keplerbahn um die Sonne beschreibt, da die Anziehungskräfte der anderen Planeten auf den betrachteten Planeten im Vergleich zur Anziehungskraft der Sonne gering sind und deshalb die Bahnparameter nur wenig beeinflussen. Über viele Umläufe kumuliert kann es aber prinzipiell zu massiven Änderungen kommen. Dies ist bei Bahnresonanzen* der Fall, wenn Umlaufzeiten von Planeten ganzzahlige Verhältnisse bilden: Die Exzentrizität* einzelner Bahnen kann dadurch so stark zunehmen, dass sie andere Bahnen kreuzen können. Dadurch kann es zu nahen Begegnungen von

Introbild Unser Sonnensystem mit den acht Planeten und ihren größten Monden. Abstände stark verkürzt. Eine Super-Erde zwischen Mars und Jupiter würde das System instabil machen (Cac-tiStacingCrane, CC BY-SA 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Mit einem Stern* ver-sehene Begriffe werden im Glossar erklärt.

Abb. 1 Super-Erde (Mitte) in einer Größe zwischen Erde und Neptun. (Aldaron, CC BY-SA 3.0)



Glossar

Astronomische Einheit (AE): 1 AE ist der Abstand zwischen Erde und Sonne, genauer gesagt die große Halbachse der Erdbahn.

Exzentrizität: Verhältnis der Entfernung zwischen Brennpunkten einer Ellipse und dem Zweifachen der großen Halbachse einer Ellipsenbahn. Je exzentrischer, desto weniger kreisförmig.

Bahnresonanz: Wenn die Umlaufzeiten von Planetenbahnen in einem ganz-

zahligen Verhältnis stehen, überholt der innere den äußeren Planeten immer an derselben Stelle der Bahn; diese bei jedem Umlauf an derselben Stelle der Bahn angreifenden Störkräfte sorgen dafür, dass sich die Exzentrizitäten der Bahnen verstärken.

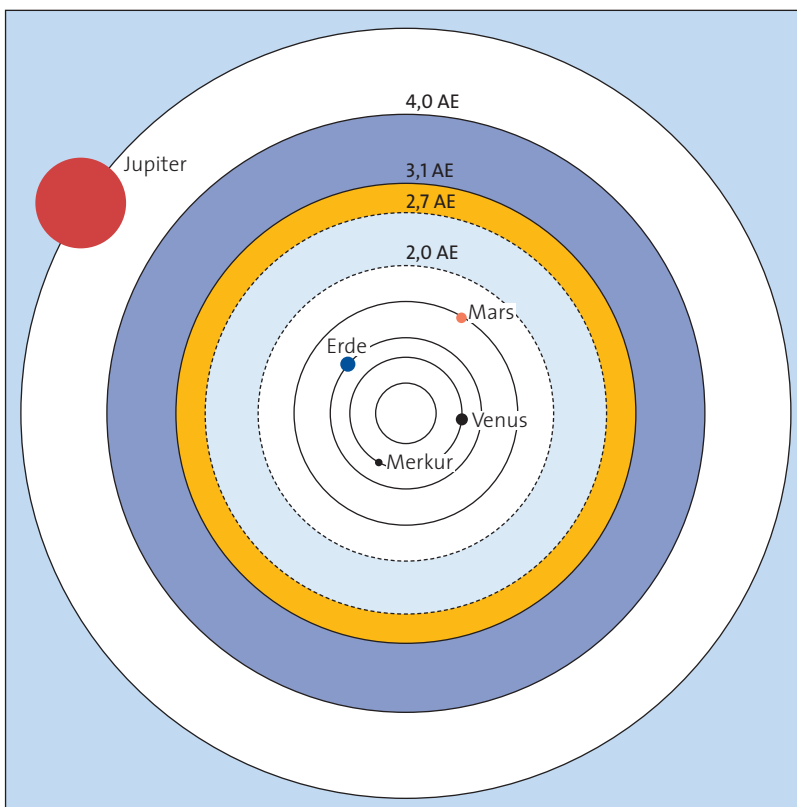
Eislinie: Abstand vom Zentralgestirn, jenseits dessen Wassermoleküle nicht mehr gasförmig sind, sondern ausfrieren und verklumpen können.

Simulationsrechnung kompakt

Super-Erde	1 bis 10 Erdmassen
Anfangsbedingungen	Kreisbahnen mit Radius zwischen 2,0 bis 4,0 AE in Schritten von 0,01 AE
simulierter Zeitraum	10 Mio. Jahre

Planeten mit anschließendem Auswurf aus dem Planetensystem oder zu Kollisionen kommen. Mit Hilfe von Rechnungen haben verschiedene Autoren von LASKAR (1994) bis HOANG (2022) herausgefunden, dass das Sonnensystem, so wie es ist, langzeitstabil ist. Simulationen ergaben Stabilitätszeiten von fünf Milliarden Jahren und länger, einzig für Merkur gibt es ein geringes Risiko von Instabilität. Stattdessen kommt es lediglich zu Bahnparameter-Oszillationen mit geringer Amplitude. Bezogen auf die Erde wurden diese Oszillationen von MILANKOVIC (1941) untersucht. Neben anderen Para-

Abb. 2 Planetenbahnen von Merkur, Venus, Erde, Mars und Jupiter mit den in ihrer Auswirkung unterschiedlichen Bereichen der simulierten Super-Erde zwischen 2,0 AE und 4,0 AE (Planetengrößen nicht ganz maßstäblich).



metern schwankt die Exzentrizität der Erdbahn über die Jahrhunderttausende zwischen 0,0006 und 0,058; derzeit ist sie 0,0167.

Simulation mit zusätzlicher Super-Erde

Was würde nun passieren, wenn sich eine Super-Erde im Bereich des Asteroidengürtels befände, der zwischen Mars und Jupiter liegt? In der Simulation platziert KANE statt der Masse des Asteroidengürtels von 0,0006 Erdmassen dort einen Planeten mit bis zu zehn Erdmassen.

Als Startpunkt für die Positionierung im Sonnensystem wählte KANE für seinen Planeten eine Kreisbahn, die in derselben Ebene liegt wie die Erdbahn. Mit Tausenden Simulationsläufen ließ er bis 10 Millionen Jahre in die Zukunft rechnen.

Im Auswertungskapitel seiner Veröffentlichung präsentiert er zunächst Fälle, in denen Planeten innerhalb des Simulationszeitraums aus dem Sonnensystem ausgeworfen werden: einmal alle vier inneren Planeten, ein anderes Mal Uranus, Mars und die Super-Erde selbst. Neben diesen spektakulären Fällen lässt sich feststellen, dass es drei Bereiche gibt, die sich in ihrem Verhalten unterscheiden (Abb. 2). Mit der Super-Erde im Bereich von 2,0 bis 2,7 AE* erhöht sich die Exzentrizität der Marsbahn stark. Der mittlere Bereich mit der Super-Erde zwischen 2,7 und 3,1 AE ist hingegen im betrachteten Zeitraum ziemlich stabil. Im Bereich von 3,1 AE bis 4,0 AE kommt es zu Störungen sowohl der äußeren als auch der inneren Planeten. Die Super-Erde wechselt auf Bahnen höherer Exzentrizität, und vermittelt durch Erde und Venus wird vor allem die Merkurbahn gestört. Nach außen hin, vermittelt durch Bahnstörungen von Jupiter und Saturn, die selbst nicht so stark sind, kommt es zu starken Störungen für Uranus und Neptun.

Die Architektur des Sonnensystems ist nicht beliebig, sondern erfordert für ihre Stabilität wie für viele andere Dinge eine Feinabstimmung.

Stephen KANES Interesse gilt nicht nur dem Verständnis des Sonnensystems, sondern von Planetensystemen generell. Nach neuesten Untersuchungen besitzen nur ca. 10 % der Exoplanetensysteme Gasriesen wie Jupiter und Saturn jenseits der Eislinie* (WITTENMYER 2020; FULTON 2021). Seine hier durchgeführte Simulation hatte auch den Zweck, herauszufinden, ob durch Hinzufügen einer Super-Erde ein System, das Gasriesen enthält, stabil bleibt oder

nicht. Kane erwähnt auch, dass MULDERs et al. (2021) Planetenbildung simulierten und dabei herausgefunden haben, dass die Häufigkeit von Super-Erden nah an ihrem Stern antikorreliert ist mit der Häufigkeit von Gasriesen weiter außen, d. h. dass die Bildung von Super-Erden unterdrückt wird, wenn sich Gasriesen bilden.

Fazit

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Anwesenheit dieses hypothetischen zusätzlichen Planeten die Planetenbahnen im Sonnensystem in weiten Bereichen des abgetasteten Parameterbereichs früher oder später instabil machen würde. Die Architektur des Sonnensystems ist nicht beliebig, sondern erfordert für ihre Stabilität wie für viele andere Dinge eine *Feinabstimmung*. Das gilt auch für die Exzentrizität: Die Lebensfreundlichkeit der Erde würde einen starken Anstieg vermutlich nicht verkraften; er hätte verheerende Auswirkungen. Die dämpfende Wirkung der Atmosphäre auf Strahlungsunterschiede im Jahresverlauf ist nur für die tatsächlich vorhandene Exzentrizität ausreichend.

Schon vor einigen Jahren war eine ähnliche Untersuchung mit Variationen von Bahn und Größe des Planeten Saturn durchgeführt wor-

den, in der sich ebenfalls gezeigt hatte, dass die tatsächlichen Verhältnisse für eine Langzeitstabilität notwendig sind (KOREVAAR 2012).

Literatur

- FULTON BJ, ROSENTHAL LJ et al. (2021) California legacy survey. II. Occurrence of giant planets beyond the Ice Line. *Astrophys. J.* 255, 14.
- HOANG NH, MOGAVERO F & LASKAR J (2022) Long-term instability of the inner Solar system: numerical experiments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 514, 1342–1350.
- KANE SR (2023) The dynamical consequences of a super-earth in the solar system. *Planet. Sci. J.* 4, 38.
- KOREVAAR P (2012) Die Stabilität der Erdbahn. *Stud. Integr. J.* 19, 34–37.
- LASKAR J (1994) Large-scale chaos in the solar system. *Astron. Astrophys.* 287, L9–L12.
- MOGAVERO F, HOANG NH & LASKAR J (2023) Timescales of chaos in the inner Solar System: Lyapunov spectrum and quasi-integrals of motion. *Phys. Rev. X* 13, 021018.
- MULDERs GD, DRAŻKOWSKA J, VAN DER MAREL N, CIESLA FJ & PASCUCCI I (2021) Why do M dwarfs have more transiting planets? *Astrophys. J. Lett.* 920, L1.
- WITTENMYER RA, WANG S, HORNER J et al. (2020) Cool Jupiters greatly outnumber their toasty siblings: occurrence rates from the Anglo-Australian Planet Search. *Monthly Not. R. Astron. Soc.* 492, 377–383.
- MILANKOVIC M (1941) Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. *Académie royale Serbe. Éditionsspeciales*; 132 [vielm. 133]: XX, 633, Belgrad 1941.