

Dynamik und Wärmehaushalt der Venus

1. Einleitung

Die Venus entstand wie die Erde aus Planetesimalen und besitzt einen vergleichbaren Radius, eine vergleichbare Masse und mittlere Dichte. Doch u.a. die Geologie ihrer Oberfläche lässt auf eine ungleiche Entwicklung schließen. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die planetare Dynamik und geht insb. auf die sog. Coronae ein.

2. Kruste

An der Oberfläche der Venus herrscht eine mittlere Temperatur von 470°C , welche aufgrund eines starken Treibhauseffektes hervorgerufen wird. Daher ist die Kruste des Planetens ausgetrocknet. Dies führt wiederum zu einer, im Vergleich zur Erde, größeren Temperatur im festen Teil des Mantels (*O'Rourke, 2020*).

Die meisten Oberflächen terrestrischer Planeten sind, aufgrund der verringerten internen Dynamik und damit fehlenden Prozessen wie bspw. Plattentektonik, alt und damit auch sehr kraterreich. Auf die Erde und die Venus trifft dies nicht zu. Ergaben erste Kraterzählungen auf der Venus ein Alter von 300 Mio. Jahre bis 1 Mrd. Jahre, kann der Wert aktuell auf 150 bis 250 Mio. Jahre präzisiert werden. Diese Präzisierung ist durch eine verbesserte Rückrechnung bzgl. der Anzahl an Impaktoren vor 1 Mrd. Jahren möglich. Auch der Grund dieses globalen „Resurfacing“ ist zum Verständnis der Dynamik wichtig. Nach *Smrekar et al. (2018)* erfolgte dies in kurzer Zeit. Ein möglicher Prozess, der zu solch einen Katastrophen-Ereignis führen könnte, wäre ein schneller Übergang von geschichteter zu ganzer Mantelkonvektion aufgrund eines endothermen Spinel-zu-Perovskite-Phasenüberganges. Es wird jedoch in anderen Studien angezweifelt, dass die entstehende Energie ausreichend wäre und verbesserte Theorien wie bspw. das Aufreißen und Einsacken der Lithosphäre werden aufgestellt. Neben dem Katastrophen-Ereignis wird auch die Möglichkeit einer kontinuierlichen Umwandlung einzelner Venus-Bereiche geprüft. Die Theorien fallen u.a. deswegen so verschieden aus, da man nicht weiß ob die Kruste vom lithosphärischen Teil des Mantels entkoppelt ist oder nicht. Die hohe Oberflächentemperatur könnte dafür sorgen, dass der untere Teil der Kruste weicher als der angrenzende Teil des Mantels ist, dies hätte eine Entkopplung zur Folge, die in den vorherigen Prozess-Beispielen nicht berücksichtigt wurde (*Smrekar et al., 2018*).

Auf der Venus besteht ein starker Zusammenhang zwischen der Schwere und der Topographie und so können Aussagen zu tektonischen Netzwerken gefolgert werden: Es konnten keine zusammenhängende Plattengrenzen gefunden werden. Ein Auflösungsproblem ist dabei auszuschließen, denn die Erde zeigt in selber Auflösung ganz klare (platten-) tektonische Strukturen wie bspw. Mittelozeanische-Rücken. Die Auflösung der Schweredaten ist dabei im Mittel Grad und Ordnung 70, was einer $\lambda/2$ von 272 km entspricht. Die horizontale Auflösung der Topographie ist 10-25 km. Dennoch ist die Oberfläche aus tektonischer Sicht nicht uninteressant, sondern weist Deformationen wie bspw. Dorsa (extraterrestrische höhenrückenartige Oberflächenstrukturen) auf (*Smrekar et al., 2018*).

Vulkanismus prägt nach *Smrekar et al. (2018)* auch maßgeblich die Oberfläche. Dabei bedecken vulkanische Ebenen ca. 80% der Oberfläche und bei einigen Hochländern können

Analogien zu irdischen Hotspots gezogen werden. Ein aktiver Vulkanismus ist nach Auswertung der Daten der „Venus-Express“ sehr wahrscheinlich. Diese zeigen thermische Signaturen. Oberflächenemissions-Daten zeigen zudem Unterschiede zwischen Bereichen mit frischem und (leicht) verwittertem Basalt auf. Nach *Smrekar et al. (2018)* befinden sich alle untersuchten Bereiche in Regionen an denen Mantelauftrieb oder Hotspots vermutet werden.

Geologische Facetten liefern Anhaltspunkte für die Dynamik des Planetens. Eine geologische Besonderheit stellen die Coronae dar. Diese ringförmigen Strukturen mit Radien zwischen 60 und 2.500 km bestehen meist aus Brüchen und Gräben, sind von topographischen Rändern umgeben und im Sonnensystem einzigartig. Coronae weisen zudem sehr viele vulkanische Eigenschaften wie bspw. Caldera auf. Dabei bedecken insgesamt 515 Coronae die Oberfläche der Venus. Es wird zwischen Coronae unterschieden, die aus Brüchen, Gräben und einem topographischen Rand bestehen (409) und Coronae, die lediglich einen topografischen Rand besitzen (106) (*Johnson & Richards, 2003*).

3. Mantel

Die durch die Akkretion bedingte Urwärme sowie die erzeugte Wärme aus dem Zerfall radioaktiver Elemente müssen aus dem Inneren abgeführt werden. Ein treibender Prozess zum Ausgleich der Temperaturdifferenz zwischen Kern und Kruste ist die Konvektion. Die Erde kühlt aufgrund der Plattentektonik sehr effizient ab. Auf der Venus gibt es jedoch keine Anzeichen für plattentektonische Prozesse und der Wärmefluss durch den festen Teil des Mantels ist reduziert (*O'Rourke, 2020*). Ob dies schon immer so war, ist eine Kernfrage zu der es z.Z. keine eindeutige Antwort gibt. Trotz des Fehlens von zusammenhängenden Plattengrenzen wird über die Existenz von Subduktionen nachgedacht. Nach *Smrekar et al. (2018)* zeigen ca. 10 Stellen topografische sowie tektonische Eigenschaften irdischer Subduktionszonen. Diese Überlegung kann jedoch widersprochen werden, da fast alle Stellen auch Anzeichen von aufsteigenden Mantelplumes, insb. eine positive Schwereanomalie, aufweisen. An zwei Coronae-Positionen findet eine Theorie zur plumegetriebenen Subduktion Bestätigung. Bei fehlender Plattentektonik hängt die Effizienz der Abkühlung nach *Smrekar et al. (2018)* hauptsächlich von der Variabilität der Viskosität im Mantel ab.

Smrekar et al. (2018) sowie *Johnson & Richards (2003)* deuten die Existenz von Coronae als thermisch bedingte Aufwölbungen des Mantels, die sich u.a. aufgrund der fehlenden Plattentektonik ausbilden. Zudem sind diese auch ein Zeichen für einen geringeren Kernwärmefluss als auf der Erde. Die großen Unterschiede im Durchmesser der Coronae lässt *Smrekar et al. (2018)* auf verschiedene Plume-Arten schließen. Sollten mehrere Arten, sowohl Plume von der Kern-Mantel-Grenze als auch Plume von einer Schicht innerhalb des Mantels, koexistieren können, so geht aus Modellrechnungen hervor, dass der Mantel heterogen aufgebaut und zudem mehrere Größenordnungen an Konvektion besitzen muss (*Smrekar et al., 2018*). Da Coronae mit unterschiedlichen Altern gefunden wurden (*Johnson & Richards, 2003*), scheinen sie nur vorübergehende Phänomene zu sein und es findet eine kontinuierliche Veränderung in der Dynamik statt. Nach *Johnson & Richards (2003)* stellen Coronae einen wichtigen Modus des internen Mantel-Wärmetrans-

portes, mit bis zu 25 %, dar. Der Wärmefluss aus dem festen Mantel zur Oberfläche wird nach *O'Rourke (2020)* auf ca. 20 TW abgeschätzt. Dies entspricht in etwa der Hälfte des irdischen Wärmeflusses von 44 TW.

Nach *Johnson & Richards (2003)* drücken sich Plumes auf der Erde durch langwellige Geoid-Hochs und seismisch geringe Geschwindigkeiten im tiefen Mantel aus. Diese Korrelationen führen zu der Annahme, dass Mantel-Plumes mit großräumigen Konvektionen im tiefen Mantel verbunden sind und die Quellregionen nahe der Kern-Mantelgrenze liegen. Auf der Venus ist eine solche (Geoid-) Korrelation nach *Johnson & Richards (2003)* nicht gegeben und daher kann man schlussfolgern, dass Coroneae hauptsächlich Resultate von kleinen Plumes sind. Diese kleinen Plumes sind nicht an die großräumige Konvektion gebunden. Dass diese Schlussfolgerung zu einfach ist und man verschiedenste andere Faktoren betrachten muss, die eine solche Korrelation stören/unterdrücken könnten, wird ebenfalls in *Johnson & Richards (2003)* aufgezeigt. Man geht z.Z. von einer gemischten thermischen Konvektion, d.h. der Koexistenz von nicht-stetigen und stetigen Plume aus.

Derzeit gibt es nach *Johnson & Richards (2003)* keine direkten Beweise aus der eine Schichtung des Mantels abgeleitet werden kann.

Eine weitere wichtige Thematik behandelt die Tiefliegenden-Magmatischen Ozeane (BMOs). Im Zuge der Auskristallisierung des Mantels, ausgehend von der Mitte, entstehen sowohl oberhalb des Kernes als auch unterhalb der Kruste BMOs. Die Auskristallisierung wird durch die Wärme des Kernes sowie durch radioaktive und latente Wärme im BMO verzögert. Die Erde besitzt keinen BMO mehr, dies geht aus seismologischen Auswertungen hervor. Da die Abkühlungsrate der Venus deutlich reduziert ist, kann auch der Fortschritt der Auskristallisierung deutlich verschieden sein. Eine Studie zeigt, dass mit der Halbierung der Abkühlungsrate sich der Zeitraum der Auskristallisierung verdoppelt, der obere heiße und zugleich feste Teil des Mantels wirkt dabei wie ein isolierender Deckel. Auf Basis dieser Annahme müssten die unteren ca. 200 bis 400 km des Mantels (unterer BMO) vollständig aufgeschmolzen sein, was wiederum eine Entkopplung des Mantels vom Kern als Folge hätte. Dabei wäre ein lateraler Wärmetransport durch den BMO und den Kern sowie eine vertikale Wärmeleitung durch den BMO möglich. (*O'Rourke, 2020*).

4. Kern

Die Venus besitzt nur ein sehr schwaches Magnetfeld. Eine Erklärung wäre eine erhalten gebliebene Schichtung des Kernes. Eine solche Schichtung würde die Konvektion stören und einen Dynamo unterbinden. Der Kern der Erde ist homogenisiert, d.h. ein sehr starkes Ereignis wie die Erde-Mond-Kollision muss zur mechanischen Vermischung geführt haben. Insbesondere die langsame und retrograde Rotation könnten ein Indiz für ein ähnliches Ereignis auf der Venus sein (*Smrekar et al., 2018*). Sollte dadurch ein Geodynamo möglich sein, so kann dieser nach *O'Rourke (2020)* durch die BMO unterdrückt werden. Dabei kühlen Kern und BMO gleichmäßig aus und erst wenn der BMO vollständig erstarrt ist, wäre ein Geodynamo des (nicht geschichteten) Kernes möglich. Es kann ebenfalls durch den BMO ein globales Magnetfeld erzeugt werden. Erste Anhaltspunkte könnte die Auswertung von Magnetisierungen an der Oberfläche bringen, ein Problem besteht jedoch in der hohen Oberflächen-Temperatur, die ca. der Curie-Temperatur der wichtigsten magnetischen Minerale (ausgenommen Hämatit und Mag-

netit) entspricht. Magnetische Charakteristika der Kruste könnten so schwer auszuwerten sein. (*Smrekar et al., 2018*).

5. Fazit

Eine junge Oberfläche, aktiver Vulkanismus und Coroneae deuten auf einen dynamisch aktiven Planeten hin. Es besteht derzeit eine Unsicherheit bzgl. der Mantel-Plume-Arten sowie deren Quellregionen. Für *Johnson & Richards (2003)* steht jedoch fest, dass Mantel-Plume eine große Bedeutung in der Dynamik und Tektonik der Venus haben. Die Existenz eines BMO unterhalb der Kruste kann ausgeschlossen werden, an der Kern-Mantel-Grenze ist dieser jedoch wahrscheinlich. Nur ein schwaches globales Magnetfeld deutet auf einen geschichteten Kern oder einen homogenen Kern mit sich darüber befindenden BMO hin.

Literatur

O'Rourke, J. G. (2020). Venus: A Thick Basal Magma Ocean May Exist Today. *Geophysical Research Letters*, 47(4), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2019gl086126>

Smrekar, S. E., Davaille, A. & Sotin, C. (2018). Venus Interior Structure and Dynamics. *Space Science Reviews*, 214(88), keine Seitenangabe. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0518-1>

Johnson, C. L. & Richards, M. A. (2003). A conceptual model for the relationship between coroneae and large-scale mantle dynamics on Venus. *Journal of Geophysical Research*, 108(E6). <https://doi.org/10.1029/2002je001962>