

Der Einfluss von Wolken auf die langfristige Bewohnbarkeit erdähnlicher Planeten

Kürzlich haben Dr. Max Popp, Dr. Hauke Schmidt und Prof. Jochem Marotzke, Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), zwei grundlegende Studien über die Fragen, wie Wolken sich in heißem Klima verhalten und wie Wolken die langfristige Bewohnbarkeit der Erde und ähnlicher Planeten beeinflussen, veröffentlicht.

Änderungen im Klimaantrieb und Bewohnbarkeit von Planeten

Planeten sind über ihre gesamte Lebenszeit stark veränderlichen Einflüssen unterworfen durch Änderungen in der Leuchtkraft der Sonne, Änderungen der Umlaufbahn und durch Änderungen der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen. Diese Veränderungen geschehen auf Zeitskalen von Tausenden bis zu Milliarden von Jahren und können das Klima von Planeten fundamental verändern. Für erdähnliche Planeten, die zu großen Teilen von Ozeanen mit Flüssigwasser bedeckt sind, bedeutet das, dass ein gemäßigtes erdähnliches Klima kaum unendlich erhalten bleiben kann. In Zeiten mit stark negativem Strahlungsantrieb kühlte sich die Erde bis zu einer vollständigen Eisbedeckung ab (3). In Perioden mit stark positivem Strahlungsantrieb könnten die Ozeane komplett verdunsten – ein Prozess, der als “Runaway Greenhouse” bekannt ist.

Die Sternentheorie sagt voraus, dass die Leuchtkraft eines Sterns mit der Zeit zunimmt und daher die Wahrscheinlichkeit ansteigt, dass ein erdähnlicher Planet in einem “Runaway Greenhouse” endet. Dies führt zu zwei Fragen für unser Sonnensystem. Erstens: wird die Erde in der fernen Zukunft in einem “Runaway Greenhouse” enden? Und zweitens: hatte die Venus ein ähnliches Klima wie die Erde vor Milliarden von Jahren als die Leuchtkraft unserer Sonne geringer war? Die Venus könnte ein “Runaway Greenhouse” durchlebt haben und anschließend all ihr Wasser verloren haben. Daher ist es wichtig zu verstehen, wie eine Zunahme der Leuchtkraft der Sonne zu einem “Runaway Greenhouse” führt, um die langfristige Bewohnbarkeit erdähnlicher Planeten abschätzen zu können. Wir nehmen hier an, dass ein Planet bewohnbar ist, wenn der Ozean von Flüssigwasser an der Oberfläche stabil ist, was eine allgemein gebräuchliche Definition ist.

“Runaway Greenhouse”

Das klassische “Runaway Greenhouse” ist das Ergebnis eines Wettbewerbs zwischen zwei gegenläufigen Konsequenzen steigender Oberflächentemperaturen. Einerseits emittiert der Planet durch höhere Temperaturen mehr Wärmestrahlung, wodurch das Klima stabilisiert wird. Andererseits steigt der Wasserdampf durch höhere Temperaturen an, wodurch sich der Treibhauseffekt verstärkt, der Planet also mehr Strahlung zurückhält und damit das Klima destabilisiert. Wenn der zweite Effekt gewinnt, steigt die Gesamtstrahlung in den Weltraum trotz steigender Oberflächentemperaturen nicht weiter an und ein “Runaway Greenhouse” stellt sich ein. Simulationen mit atmosphärischen Säulenmodellen ergaben, dass die Emission eines erdähnlichen Planeten sich bei einem Grenzwert der Oberflächentemperaturen im Bereich von 80 bis 130°C einpendelt. Ein “Runaway Greenhouse” würde daher dann auftreten, wenn die Sonneneinstrahlung auf ein Niveau ansteigt, ab dem der Planet mehr Sonnenstrahlung absorbiert als dieser Emissionsgrenzwert. Der Planet würde sich weiter erwärmen bis alle Ozeane vollständig verdunstet sind. Es ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Sonnenstrahlung die Treibhausgase eher ineffektiv für das Entstehen eines “Runaway Greenhouse” sind, da sie den Emissionsgrenzwert nicht ändern.

Der Einfluss von Wolken auf das Einsetzen eines "Runaway Greenhouse"

Ältere Untersuchungen haben starke Vereinfachungen von Wolken benutzt oder Wolken sogar ganz vernachlässigt. Die Studie von Popp und seinen Kollegen (1) ist die erste, die sich auf den Einfluss von Wolken bei der Entstehung eines "Runaway Greenhouse" konzentriert. Die Ergebnisse in (1) lassen vermuten, dass Wolken das Potential haben, den Grenzwert für die Einstrahlung, der notwendig ist um ein "Runaway Greenhouse" auszulösen, anzuheben. Wolken beeinflussen das Klima, indem sie die Sonnenstrahlung reflektieren, was das Klima kühlt, und indem sie emittierte Strahlung zurückhalten, was das Klima erwärmt. Popp und seine Kollegen zeigen in (1), dass der Effekt der Wolken auf die Sonnenstrahlung einen sehr starken Einfluss auf das Auslösen eines "Runaway Greenhouse" hat, der sogar wesentlich größer sein kann als der Einfluss durch die Wasserdampfückkopplung (Abb. 1).

Dieser Einfluss der Wolken ermöglicht interessante Phänomene, wie z.B. dass das Klima bei Temperaturen zwischen 25 und 65°C instabil wird, dass stabile heiße Klimata bei Oberflächentemperaturen oberhalb von 60°C existieren, und dass es eine Bandbreite von Werten der Sonneneinstrahlung gibt, in der zwei verschiedene Klimata möglich sind. Die Studie (1) gibt auch eine Erklärung, warum Wolken einen starken stabilisierenden Effekt in warmen Klimata haben sollten: Es gibt wie für den Wasserdampf einen Emissionsgrenzwert für Wolken. Wenn dieser Emissionsgrenzwert erreicht ist, wird eine weitere Verdickung der Wolken nicht länger zu einem verstärkten Treibhauseffekt führen, sondern Wolken werden ausschließlich mehr Sonnenstrahlung reflektieren und damit das Klima kühlen. Da die Wolken in warmem und feuchtem Klima mit zunehmenden Oberflächentemperaturen dicker werden, stabilisieren sie dann das Klima.

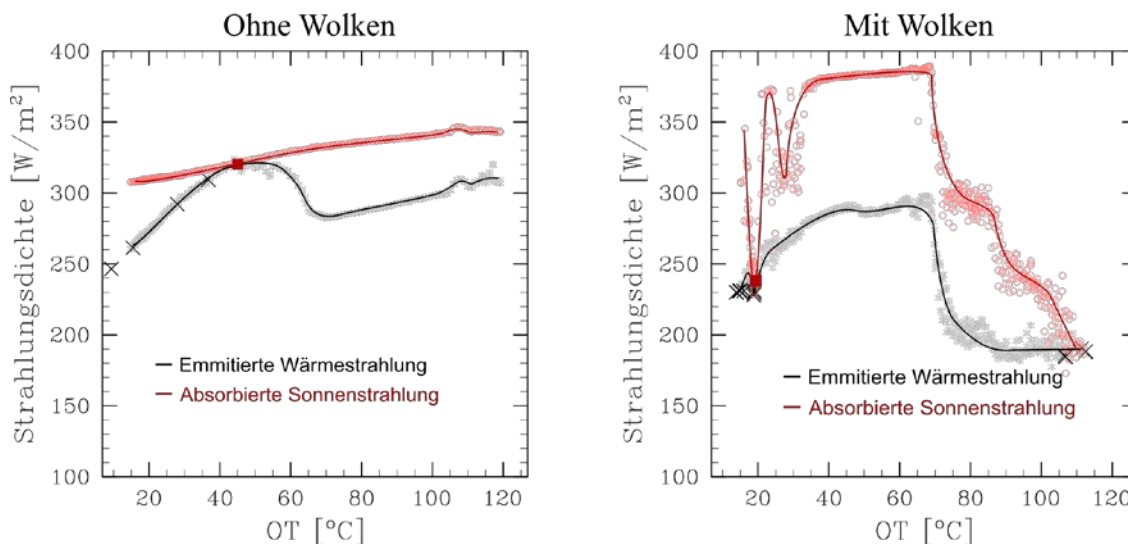


Abb. 1: Synthese der emittierten Wärmestrahlung und der absorbierten Sonnenstrahlung als Funktion der Oberflächentemperatur des Planeten (OT). Links das Ergebnis, wenn Wolken für die Strahlung als transparent angenommen werden, und rechts die Ergebnisse, wenn sich Wolken und Strahlung gegenseitig beeinflussen. Graue Sterne stehen für Modellergebnisse von emittierter Wärmestrahlung und rote Kreise für Modellergebnisse von absorbierte Sonnenstrahlung aus transienten Simulationen. Die schwarzen und roten Linien sind handgezeichnete Verbindungen der Ergebnisse. Das Klima wird instabil für OT höher als die roten Quadrate, da die Differenz zwischen der absorbierten und der emittierten Strahlung mit steigender Oberflächentemperatur zunimmt. Wenn Wolken die Strahlung beeinflussen, nimmt die Differenz wegen der absorbierten Sonnenstrahlung zu (rechts).

Im Gegensatz dazu nimmt die Differenz durch die emittierte Wärmestrahlung zu, wenn die Wolken als transparent angenommen werden (links). In den Simulationen mit Wolken werden Gleichgewichtszustände bei ca. 380 K erreicht, wo sich die rote und schwarze Linie wieder schneiden.

Grenzen der Anwendbarkeit eindimensionaler Modelle

Das Säulenmodell der Atmosphäre, welches in (1) benutzt wurde, hat offensichtliche Schwächen. Ein atmosphärisches Säulenmodell ist eine Näherung des Klimas eines Planeten durch die Mittelung der Atmosphäre in einer einzelnen eindimensionalen Säule. Solche Modelle können sehr nützlich sein, insbesondere für das Verständnis von bestimmten Prozessen, aber sie können die atmosphärische Zirkulation nicht darstellen. Im speziellen Fall des Anstiegs der Sonnenstrahlung gibt es einen potentiell wichtigen Mechanismus, den das Säulenmodell nicht erfassen kann: Die großskaligen Bewegungen in der tropischen Troposphäre sind hauptverantwortlich dafür, dass Wasserdampf in höhere Schichten der Atmosphäre transportiert wird.

“Moist Greenhouse“-Zustände

Eine angemessene Darstellung des Wasserdampfs in den oberen Schichten der Atmosphäre ist wichtig, da Planeten Wasser in den Weltraum verlieren können. Wassermoleküle werden durch die ultraviolette Strahlung der Sonne in den oberen Schichten der Atmosphäre in Wasserstoff und Sauerstoff aufgebrochen. Wasserstoff, der viel leichter ist als Sauerstoff, kann in den Weltraum entfliehen. Dieser Effekt tritt auch auf der heutigen Erde auf, aber der Anteil von Wasserstoff, der verloren geht, ist zu gering, um einen substantiellen Verlust von Wasser herbeizuführen. Aber wenn die Wasserdampfkonzentration in der oberen Atmosphäre ungefähr 100 mal höher wäre, könnte die Erde innerhalb ihrer Existenzzeit alle Ozeane an den Weltraum verlieren, sogar schneller bei noch höheren Konzentrationen. Schließlich bliebe auf der Erde kaum noch Wasser übrig und die Erde würde unbewohnbar werden. Daher ist der Verlust von Wasser in den Weltraum durch eine feuchte obere Atmosphäre eine zweite Möglichkeit neben dem “Runaway Greenhouse”, durch die erdähnliche Planeten unbewohnbar werden können. Ein Klima, in dem ein Planet Wasser schnell in den Weltraum verliert, wird “Moist Greenhouse” genannt. Das Säulenmodell in (1) konnte nicht ausreichend Wasser in die oberen Schichten der Atmosphäre mischen, um “Moist Greenhouse“-Zustände angemessen zu simulieren.

Daher führten Popp und Kollegen eine zweite Studie (2) mit einem dreidimensionalen Atmosphärenmodell durch, in dem sie das Potential der Sonnenstrahlung, einen Klimaübergang in ein “Moist Greenhouse” auszulösen, untersuchten. Darüberhinaus untersucht die Studie (2) auch erhöhte CO₂-Konzentrationen, um zu vergleichen, ob CO₂ einen ähnlichen Effekt wie der solare Strahlungsantrieb hat. Bislang wurde vermutet, dass CO₂ ineffektiv sei für die Überführung in unbewohnbare Zustände, aber Wolken könnten diese Auffassung ändern wie die Ergebnisse in (1) nahe legen.

Übergang zu einem “Moist Greenhouse” mit CO₂ und solarem Strahlungsantrieb

Die Folgestudie (2) zeigt nun tatsächlich, dass ein CO₂-Strahlungsantrieb einen ähnlichen Einfluss auf die Bewohnbarkeit erdähnlicher Planeten hat wie der solare Strahlungsantrieb. Der Zustand, in dem sich die Erde derzeit befindet, könnte in ferner Zukunft durch beide Strahlungsantriebstypen einen Klimaübergang in ein neues stabiles Klima mit global gemittelter Oberflächentemperatur über 60°C bewirken (“Moist Greenhouse”; Abb. 2).

Dieser Übergang wird durch Änderungen der Wolkendynamik bewirkt, die zuerst das Klima destabilisieren, aber dann das Klima bei global gemittelter Oberflächentemperatur über 55°C wieder stabilisieren. Diese Änderungen der Wolkendynamik werden hauptsächlich durch die Abschwächung der großskaligen atmosphärischen Zirkulation verursacht. Das "Moist Greenhouse"-Klima ist dann wegen einer negativen Wolkenrückkoppelung gegenüber weiteren Strahlungsantrieben sehr stabil. Deshalb könnte ein Planet dieses Klima wohl für eine sehr lange Zeit beibehalten. Darüberhinaus weisen die Ergebnisse sogar darauf hin, dass ein Planet selbst dann im "Moist Greenhouse" verbleiben könnte, wenn der das "Moist Greenhouse"-auslösende Strahlungsantrieb wegfällt. Wie vorher ausgeführt würde ein Planet im "Moist Greenhouse" sein Wasser "schnell" verlieren, was zur Unbewohnbarkeit des Planeten über einen Zeitraum von Hunderten von Millionen bis zu einigen Milliarden Jahren führen würde. Daher könnte ein CO₂-induzierter Strahlungsantrieb zu einem Ende der Bewohnbarkeit des Planeten führen.

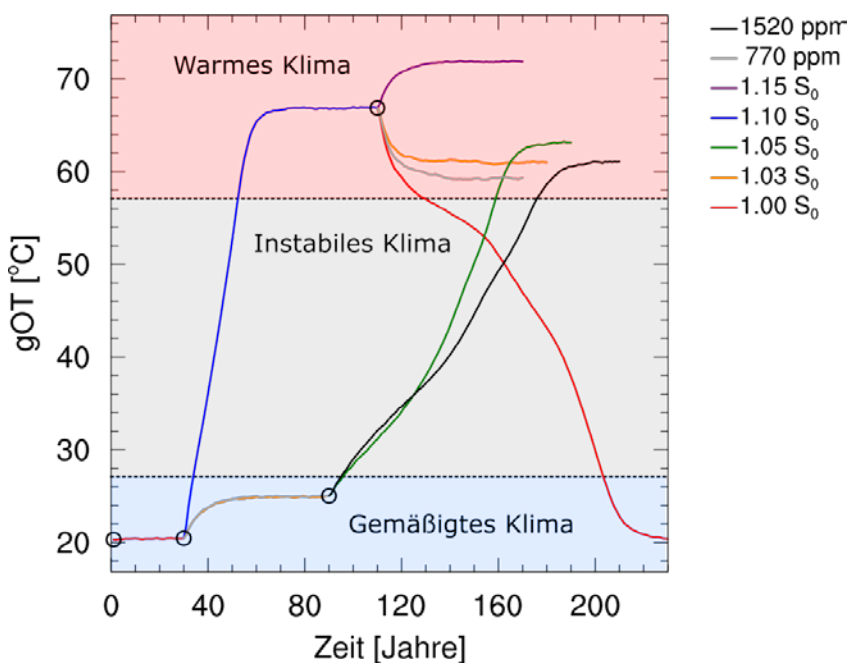


Abb. 2: Global gemittelte Oberflächentemperatur (gOT) als Funktion der Zeit. Kreise zeigen den Anfangszustand der Simulationen an. Die verschiedenen Farben bezeichnen die verschiedenen benutzten Strahlungsantriebe. Die bunten Farben zeigen den solaren Strahlungsantrieb, der als Vielfaches der heutigen solaren Strahlungsdichte auf der Erde (S_0) angegeben wird. Für alle diese Simulationen wird der derzeitige Wert der CO₂-Konzentration auf der Erde angenommen. Daher entsprechen die roten Linien den aktuellen solaren und CO₂-Strahlungsantrieben der Erde. Die grauen/schwarzen Linien zeigen die Simulationen mit CO₂-Strahlungsantrieb als Volumenmischungsverhältnis. Zu beachten ist, dass CO₂-Konzentrationen von 770 ppmv dem Strahlungsantrieb von 1,03 S_0 und CO₂-Konzentrationen von 1520 ppmv dem Strahlungsantrieb von 1,05 S_0 entsprechen. Die Abbildung zeigt, dass sowohl für eine CO₂-Konzentration von 1520 ppmv als auch für einen solaren Strahlungsantrieb von 1,05 S_0 ein Klimaübergang von gemäßigtem zu warmem Klima erfolgt. Wenn man hingegen im warmen Klima startet, führt eine Reduzierung des Strahlungsantriebs auf 770 ppmv oder 1,03 S_0 nicht zu einem Übergang zurück zum gemäßigten Klima. Das bedeutet, dass zwei verschiedene Gleichgewichtszustände bei dieser Größenordnung des Strahlungsantriebs möglich sind.

Folgen und Anwendungen

Die Sonneneinstrahlung auf der Venus war in ihrer Frühzeit derart viel größer als die Sonneneinstrahlung, die notwendig ist, um einen Planeten in unserer Studie ins "Moist Greenhouse" zu überführen, dass es höchst unwahrscheinlich ist, dass die Venus jemals ein erdähnliches Klima hatte. Aber ob die Venus, angenommen ihre Atmosphäre hatte eine erdähnliche Zusammensetzung, in der Lage gewesen wäre, einen flüssigen Ozean in einem "Moist Greenhouse" eine Zeit lang beizubehalten, kann anhand der Studien nicht beurteilt werden.

Die Ergebnisse haben wichtige Auswirkungen auf die Einschätzung der potentiellen Bewohnbarkeit von Planeten, die in anderen Sonnensystemen entdeckt werden. Es gibt mehrere Teleskope, die nach Planeten in anderen Sonnensystemen suchen und Hunderte von Planeten wurden bereits entdeckt. Wahrscheinlich wird man in den nächsten Jahren sogar potentiell bewohnbare Planeten entdecken. Das "Moist Greenhouse" gibt den Minimalabstand zu einem Stern vor, ab dem ein Planet Flüssigwasser auf lange Zeit beibehalten kann und damit über seine Lebenszeit hin bewohnbar ist. Darüber hinaus zeigen die Autoren, dass die Bewohnbarkeit nicht nur vom Abstand eines Planeten von einem Stern abhängt, sondern auch von den Treibhausgaskonzentrationen. Sie zeigen nämlich, dass der Strahlungsantrieb durch Treibhausgase ebenso einen Übergang zum "Moist Greenhouse" bewirken kann, wie die Zunahme von Sonnenstrahlung. Daraus folgt, dass detaillierte Kenntnisse über die Zusammensetzung der Atmosphäre notwendig sind, um seine Bewohnbarkeit abzuschätzen. Die Kenntnis von Position und Größe so eines Planeten reicht nicht aus.

Schlussfolgerungen

Wolken spielen eine Hauptrolle für die langfristige Klimaentwicklung von erdähnlichen Planeten. Änderungen der Wolkendynamik mit zunehmender Oberflächentemperatur beherrschen die Antwort des Klimas auf starke Strahlungsantriebe – unabhängig vom Typ des Strahlungsantriebs. Darum ist es wichtig, das Verständnis des Verhaltens von Wolken in heißen Klimata zu vertiefen, um die obere Temperaturgrenze für die Bewohnbarkeit eines erdähnlichen Planeten besser zu verstehen.

Originalveröffentlichungen:

(1) Popp, M., H. Schmidt and J. Marotzke: Initiation of a Runaway Greenhouse in a cloudy column. *Journal of the Atmospheric Sciences* 72, 452–471 (2015).

(2) Popp, M., H. Schmidt and J. Marotzke: Transition to a Moist Greenhouse with CO₂ and solar forcing. *Nat. Commun.* 7:10627 doi: 10.1038/ncomms10627 (2016).

(3) Marotzke J., and M. Botzet: Present-day and ice-covered equilibrium states in a comprehensive climate model, *Geophysical Research Letters*, **34**, L16704, doi:10.1029/2006GL028880 (2007)

Kontakt:

Dr. Max Popp

Jetzt: Atmospheric and Oceanic Sciences Program, Princeton University, Princeton, NJ located at: NOAA's Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, NJ

Tel.: +1 609-452-5301

E-Mail: max.popp@mpimet.mpg.de



Dr. Hauke Schmidt
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 405
E-Mail: hauke.schmidt@mpimet.mpg.de

Prof. Dr. Jochem Marotzke
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 311 (Assistentin Kornelia Müller)
E-Mail: jochem.marotzke@mpimet.mpg.de