

Martin Claußen

Die grüne Sahara

Die Sahara, die größte Wüste der Welt, war während wärmerer und feuchterer Phasen der letzten Jahrhunderttausende deutlich grüner als heute. Diese Afrikanischen Feuchtphasen wurden durch Änderungen der Sonneneinstrahlung, die mit periodischen Schwankungen der Erdumlaufbahn einhergehen, angeregt und durch Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre, Land und Ozean verstärkt. Der gegenwärtig steigende CO₂-Gehalt der Atmosphäre könnte den Sahel und den Südrand der Sahara wieder grüner werden lassen. Jedoch wäre diese grüne Phase vermutlich nur von kurzer Dauer.

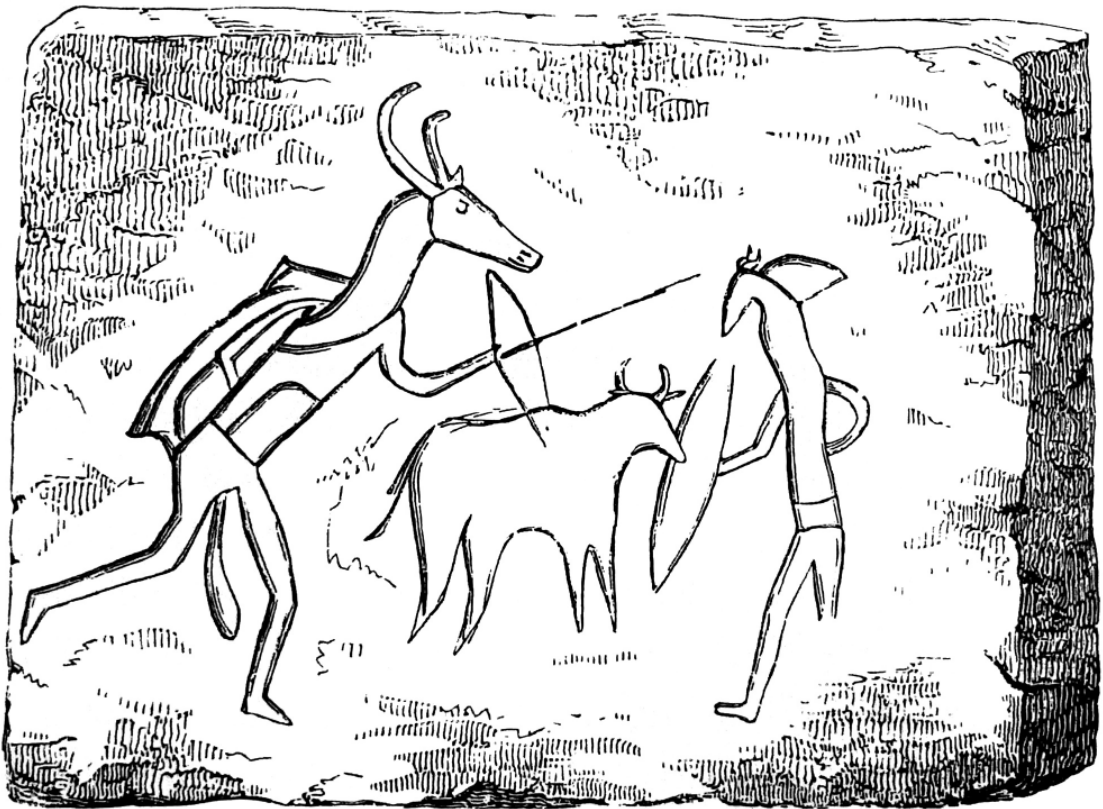


Abb. 1: Petroglyph, den Heinrich Barth auf seiner Reise durch Nord- und Zentralafrika (1849 bis 1855) im Wadi Telissarhe im Erg Murzuq gefunden hat

Quelle: Barth (1857)

Die Sahara ist heute eine eher lebensfeindliche Umgebung für Mensch, Flora und Fauna. Doch muss sie in der Vergangenheit bewohnbar gewesen sein. Zu dieser Schlussfolgerung kam der deutsche Geograph Heinrich Barth, als er auf seiner Reise durch Nord- und Zentralafrika in den Jahren 1849 bis 1855 Petroglyphen (vgl. Abb. 1) im Erg Murzuq (heutiges Südwest-Libyen) entdeckte. Der ungarische Abenteurer und Wüstenforscher László E. Almásy fand in den 1930er-Jahren Felsmalereien im Gilf Kebir, ein Hochplateau aus Sandstein im Südwesten Ägyptens, u. a. die berühmten „Schwimmer in der Wüste“ (vgl. Foto 1 und 2). Almásy war vermutlich der Erste, der den Begriff „grüne Sahara“ prägte. Damals wurde die Existenz

einer feuchten und mit Vegetation bedeckten Sahara allgemein in Frage gestellt. Paläobotanische und paläoklimatologische Funde der letzten Jahrzehnte zeigen jedoch deutlich, dass in der Sahara des frühen und mittleren Holozän, also vor etwa 5000 bis 11 000 Jahren, üppige Galeriewälder in der Nähe von Seen und Flüssen gediehen und in weiten Teilen sahelische Pflanzentypen verbreitet waren.

Paläohydrologische Rekonstruktionen deuten sogar auf die regelmäßige Wiederkehr eines feuchteren Klimas in der Sahara während wärmerer Phasen mindestens der letzten 500 000 Jahre hin. Diese verblüffenden Befunde werfen folgende Fragen auf: Warum war die Sahara einst grüner als heute? Könnte sie als Folge des vom

Menschen angestoßenen globalen Klimawandels wieder grüner werden? Doch zunächst zur Sahara im gegenwärtigen Klima.

Was begrenzt die Sahara?

Die Ausdehnung der Sahara hängt im Wesentlichen von der Lage des tropischen Regenbands ab. Dieses Regenband kann heutzutage nur bis etwa 20° N vordringen (vgl. Abb. 2), da die Sahara in einem Bereich großräumig absinkender Luftmassen liegt. Absinkende Luftmassen unterdrücken hochreichende Konvektion und Regenbildung. Die Lage des Regenbandes wird zudem durch die Ausdehnung und Stärke des westafrikanischen Sommermonsunsystems bestimmt. In den unteren Schichten der Atmosphäre bildet sich im Sommer ein Hitzetief in der Westsahara aus. Südlich dieses Tiefs wird in der südwestlichen Monsunströmung feuchte Atlantikluft herangeführt, die über dem Kontinent im Bereich der Tropen durch verschiedene dynamische Prozesse, wie z. B. Wellenbewegung in der Atmosphäre, den sogenannten African Easterly Waves, angehoben werden kann. Dabei bilden sich hochreichende Konvektionszellen mit kräftigen Regenschauern. Nördlich des Regenbandes trifft die Monsunströmung auf den Harmattan, den trockenen Nordostpassat über der Sahara. Die an dieser Konvergenzlinie aufsteigende Luft ist bereits zu trocken, um noch nennenswerte Niederschläge hervorzurufen.

Der Niederschlag im Sahel, der Übergangszone zwischen dem tropischen Afrika und der Sahara, zeigt starke dekadische Schwankungen (vgl. Abb. 3). Den regenreichen Jahrzehnten in der Mitte des letzten Jahrhunderts folgte in den 1970er- und 1980er-Jahren eine lang anhaltende, zunehmende Dürre. Diese Dürre und die Landde-

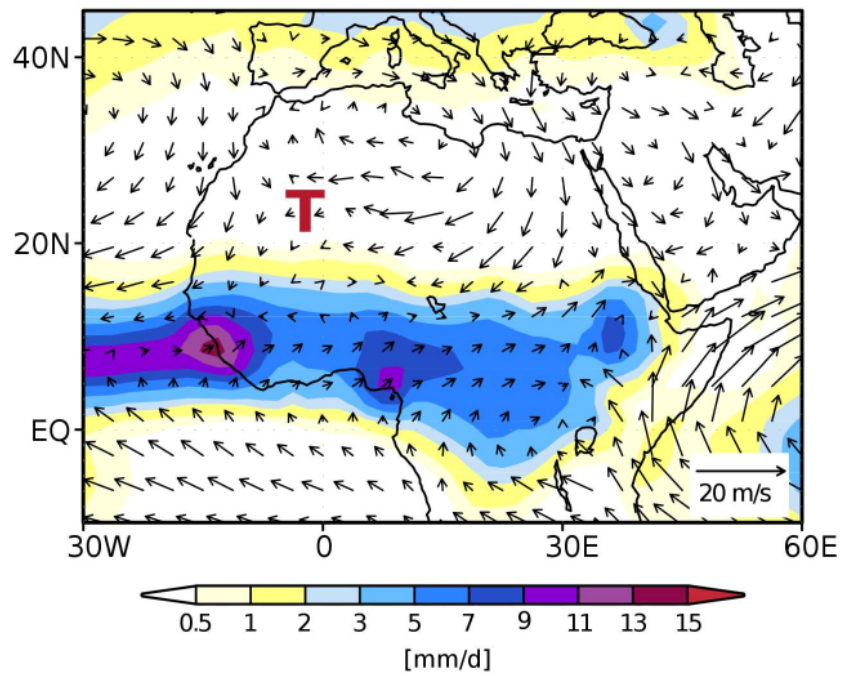


Abb. 2: Der Westafrikanische Sommermonsun im heutigen Klima – Niederschlag (farbig) und Windströmung in etwa 500 m Höhe (als Vektorpfeile) im Mittel der Monate Juni bis September (T = Kern des Hitzetiefs)

Quelle: Claussen et al. (2017) mit Änderungen

gradation im Sahel haben das Bild einer sich ausdehnenden Wüste geprägt. Doch seit den 1990er-Jahren nimmt der Niederschlag im Mittel über den Sahel wieder zu und der Sahel erscheint auf Satellitenbildern in weiten Bereichen wieder grüner. Das hohe Niederschlagsniveau der 1950er-Jahre wurde aber noch nicht erreicht. Diese Niederschlagsschwankungen lassen sich auf den Einfluss von Änderungen der Ozeanoberflächentemperaturen auf die atmosphärische Strömung der Tropen zurückführen. Weitere Analysen zeigen ferner, dass die Vegetation in dieser Region sehr stark auf Änderungen des Klimas reagiert.



Fotos 1 und 2: Außenansicht der „Höhle der Schwimmer“ (links) im Gilf Kebir mit den bemerkenswerten prähistorischen Felsmalereien im Inneren (rechts)

Fotos: Mike P. Shepherd/Alamy Stock Foto

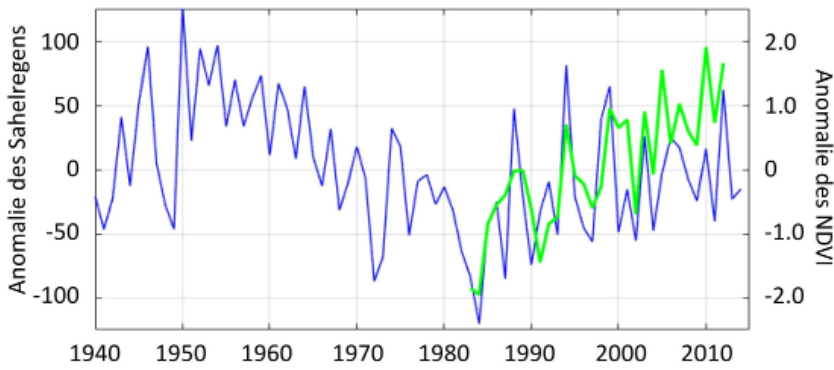


Abb. 3: Anomalien des Niederschlags (in mm Regen pro m²) gemittelt über die Monate Juli, August, September und die Sahelregion (10° W – 30° E, 10° N – 20° N) (blaue Kurve) und Anomalien des NDVI (Normalisierter Differentieller Vegetation-Index) (grüne Kurve). Der NDVI misst die von den Pflanzen durch die Photosynthese absorbierte Sonnenstrahlung und wird als Maß für die Biomassenbildung und Vegetationsbedeckung genutzt

Quelle: Claussen et al. (2017) mit Änderungen

Dabei spielt auch eine Rolle, dass diese Klimaänderungen durch Wechselwirkungen zwischen der Landoberfläche, dem Ozean und der Atmosphäre verstärkt werden. Noch viel stärkere und räumlich ausgedehntere Niederschlagsänderungen als im heutigen Klima, die auch die Sahara erfassten, lassen sich auf Zeitskalen von Jahrtausenden in den Klimaarchiven nachweisen.

Warum war die Sahara einst grüner?

Der österreichische Meteorologe Rudolf Spitaler war vermutlich der Erste, der die Hypo-

these formulierte, dass die Stärke des Monsuns mit den Änderungen der Erdbahn um die Sonne zusammenhängt (Spitaler 1921). Der dabei entscheidende Faktor ist die Präzession, das „Schlingern“ der Erdachse, die mit einer Periode von etwa 20 000 Jahren variiert. Dadurch verschiebt sich der Zeitpunkt des Perihels, des sonnennächsten Punkts der Erdbahn, im Jahresverlauf und damit auch die meridionale Verteilung und Stärke der Sonneneinstrahlung. Diese Änderungen führen dazu, dass sich die Temperaturunterschiede zwischen Ozean und Kontinenten erheblich verstärken können. In Zeiten großer Temperaturunterschiede, wie vor einigen Tausend Jahren, nehmen folglich auch die Luftdruckgegensätze zwischen Ozean und Kontinent zu, was die Monsunwinde verstärkt.

Leider waren Spitalers Berechnungen der Änderungen der Erdbahnparameter fehlerhaft, sodass seine Arbeit zunächst in Vergessenheit geriet. Erst in den 1980er-Jahren wurde die „orbitale Monsunhypothese“ wieder aufgegriffen, als Änderungen in den Sedimenten des Mittelmeers nachgewiesen wurden, die mit einer Periode von etwa 20 000 Jahren auftraten, also der Periode der Präzession der Erdachse.

Klimasimulationen können zwar Spitalers „orbitale Monsunhypothese“ bestätigen. Sie zeigen aber auch, dass der orbitale Antrieb viel zu schwach ist. Denn die von den Klimamodellen berechneten Niederschlagsänderungen in der Sahara und im Sahel sind viel zu gering, um ir-

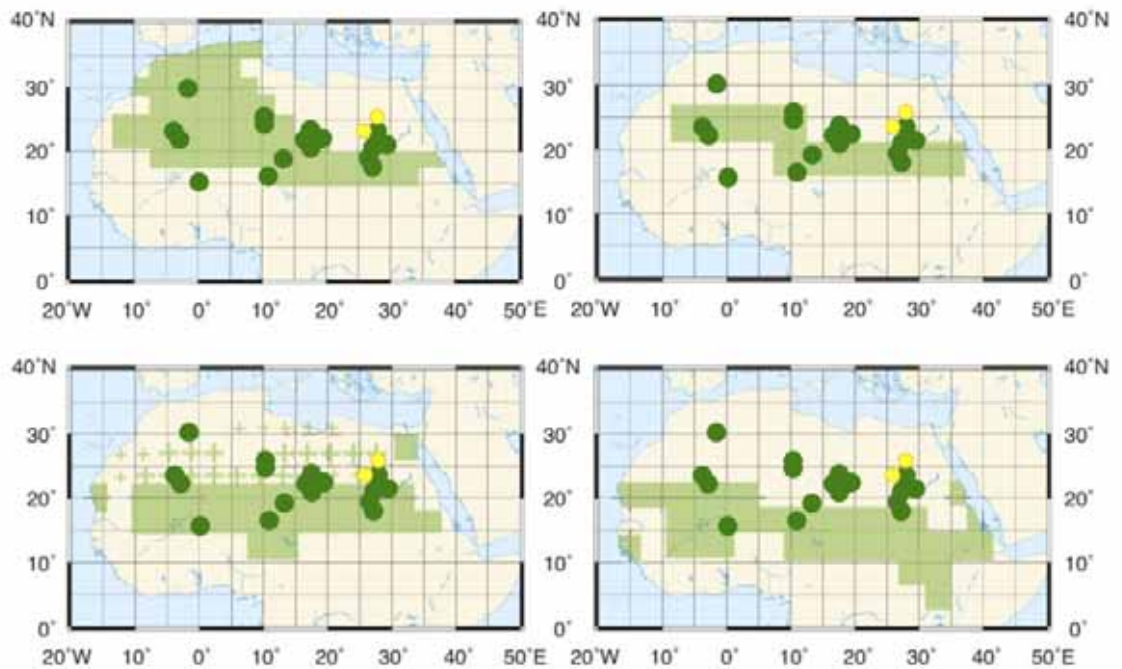


Abb. 4: Rekonstruierte und von vier verschiedenen Klimasystemmodellen berechnete Unterschiede in der Vegetationsbedeckung der Sahara im Klima des mittleren Holozäns vor gut 6000 Jahren gegenüber dem heutigen Klima. Grün markierte Flächen geben an, wo in den vier verschiedenen Simulationen die holozäne Sahara kleiner war als heute. Die grünen Punkte zeigen an, wo Reste der holozänen Vegetation gefunden wurden. Die gelben Punkte markieren Wüstenpunkte im Holozän. Die grünen Kreuze in der linken unteren Abbildung kennzeichnen Flächen, in denen Vegetation in der Klimasimulation zumindest zeitweise im Holozän aufgetreten ist

Quelle: Claussen et al. (2017) mit Änderungen

gendein nennenswertes Pflanzenwachstum in der holozänen Sahara zu erklären. Nur mithilfe von Klimasystemmodellen, in denen neben der Dynamik der Atmosphäre auch die Ozeanströmungen und das Wandern der Vegetation sowie die Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre, dem Ozean und der Vegetation berechnet werden, kann eine deutliche Zunahme des Westafrikanischen Sommermonsuns im mittleren Holozän und eine Nordverschiebung der Savanne in die Sahara nachgebildet werden (vgl. Abb. 4).

Die Klimasystemmodelle zeigen, dass vor allem die Wechselwirkung zwischen der Landoberfläche und der Monsunströmung die Klimaänderungen im nördlichen Afrika verstärkt haben muss. Bei dieser Wechselwirkung spielt zum einen der Wasserkreislauf eine wichtige Rolle: Savannen- und Waldböden speichern Regenwasser viel besser als sandige Böden. Ein großer Teil des gespeicherten Regenwassers kann durch die Pflanzen wieder transpiriert und durch den Monsun weiter nach Norden getragen werden. Dies wiederum begünstigt die Ausbreitung und das Wachstum der Pflanzen. Zum anderen ist auch der Strahlungshaushalt der Atmosphäre und des Bodens Teil der Wechselwirkung: Savannen, Wälder und Seen reflektieren Sonnenstrahlung in wesentlich geringerem Maße als helle Wüsten. Dies ist besonders eindrucksvoll in Regionen mit lakustrinen Sedimenten der heute ausgetrockneten Seen, wie z. B. in der Bodélé-Niederung, zu sehen. Schwächere Reflexion führt dazu, dass sich die Luft über Savannen und Wäldern eher erwärmt als über einer hellen Wüste. Dies wiederum setzt Prozesse in Gang, die dem Absinken der Luftmassen über der grüneren Sahara entgegenwirken, sodass der konvektive Monsunregen weiter nach Norden vordringen kann.

Wie hat sich die Sahara wieder ausgedehnt?

Da sich die Präzession und damit die Einstrahlungsverhältnisse nur sehr allmählich ändern, wäre zu erwarten, dass auch die Änderung der Niederschlagsverhältnisse und der Rückgang der Wüste allmählich vonstattengehen. Das Gegenteil scheint der Fall zu sein.

Ende der 1990er-Jahre sagten Brovkin et al. (1998) und Claussen et al. (1999) voraus, dass sich wegen der stark nichtlinearen Wechselwirkung zwischen Klima und Vegetation, die Sahara gegen Ende des mittleren Holozäns vor etwa 5500 Jahren abrupt oder zumindest im Vergleich zur Antriebsänderung sehr rasch ausgebreitet haben müsste. Rekonstruktionen des Staubeintrags aus der Sahara in den Atlantik nahe der afrikanischen Küste zeigen tatsächlich eine geologisch gesehen abrupte Zunahme des Staubeintrages innerhalb weniger Jahrhunderte (deMenocal et al. 2000). Dies deutet auf ein abruptes Ende der

Afrikanischen Feuchtphase in der Westsahara vor 5500 Jahren (vgl. Abb. 5) hin. Von einem Kollaps der grünen Sahara, wie bis heute in der Literatur zu lesen ist, kann allerdings kaum die Rede sein. Andere Paläodaten, wie z. B. die von Kröpelin et al. (2008) aus dem Sediment des im Ounianga-Kebir im Nordosten des Tschads gelegenen Yoa-Sees geborgene Pollendaten, lassen eine eher graduelle Ausdehnung der Sahara erkennen.

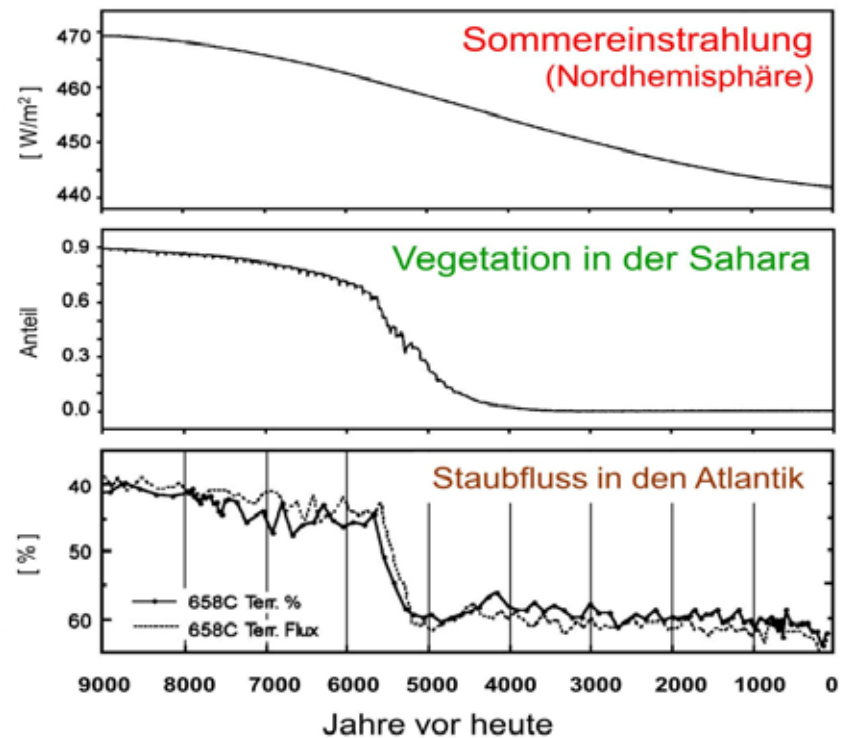


Abb. 5: Vergleich zwischen Klimaantrieb, hier dargestellt als Änderung der Sonneneinstrahlung auf der Nordhemisphäre während der Monate Juli bis August (obere Abb.), berechneter Vegetationsfläche der Sahara (mittlere Abb.) und rekonstruiertem Staubfluss aus der Sahara in den Nordatlantik. Bitte beachten, dass die vertikale Skala der unteren Abbildung umgedreht wurde

Quelle: deMenocal et al. (2000) mit Änderungen

Anhand neuerer Klimasystems Simulationen und Analysen von Paläoklimadaten ergibt sich ein sehr komplexes Bild des Endes dieser Feuchtphase (Dallmeyer et al. 2020). Das Ende der letzten Afrikanischen Feuchtphase begann im Norden der heutigen Sahara und zwar eher im Osten als im Westen. Zudem vollzogen sich die Änderungen im Westen rascher als im Osten. Die Verzögerung des Endes der letzten Feuchtphase im Westen wurde den Simulationen nach zu urteilen durch die Wechselwirkung tropischer Luftmassen mit außertropischen Tiefdruckgebieten bedingt. Wenn außertropische Tiefdruckgebiete auf ihrem Westkurs über das Mittelmeer weit nach Süden reichen, können sie tropische Luftmassen anzapfen, sodass ein Schwall feuchter Luftmassen über die westliche Sahara nach Norden geführt wird, der in wenigen Tagen ergiebige Regenmengen mit sich bringt. Dieser Prozess tritt auch heute noch auf, aber erheblich seltener als im mittleren Holozän.

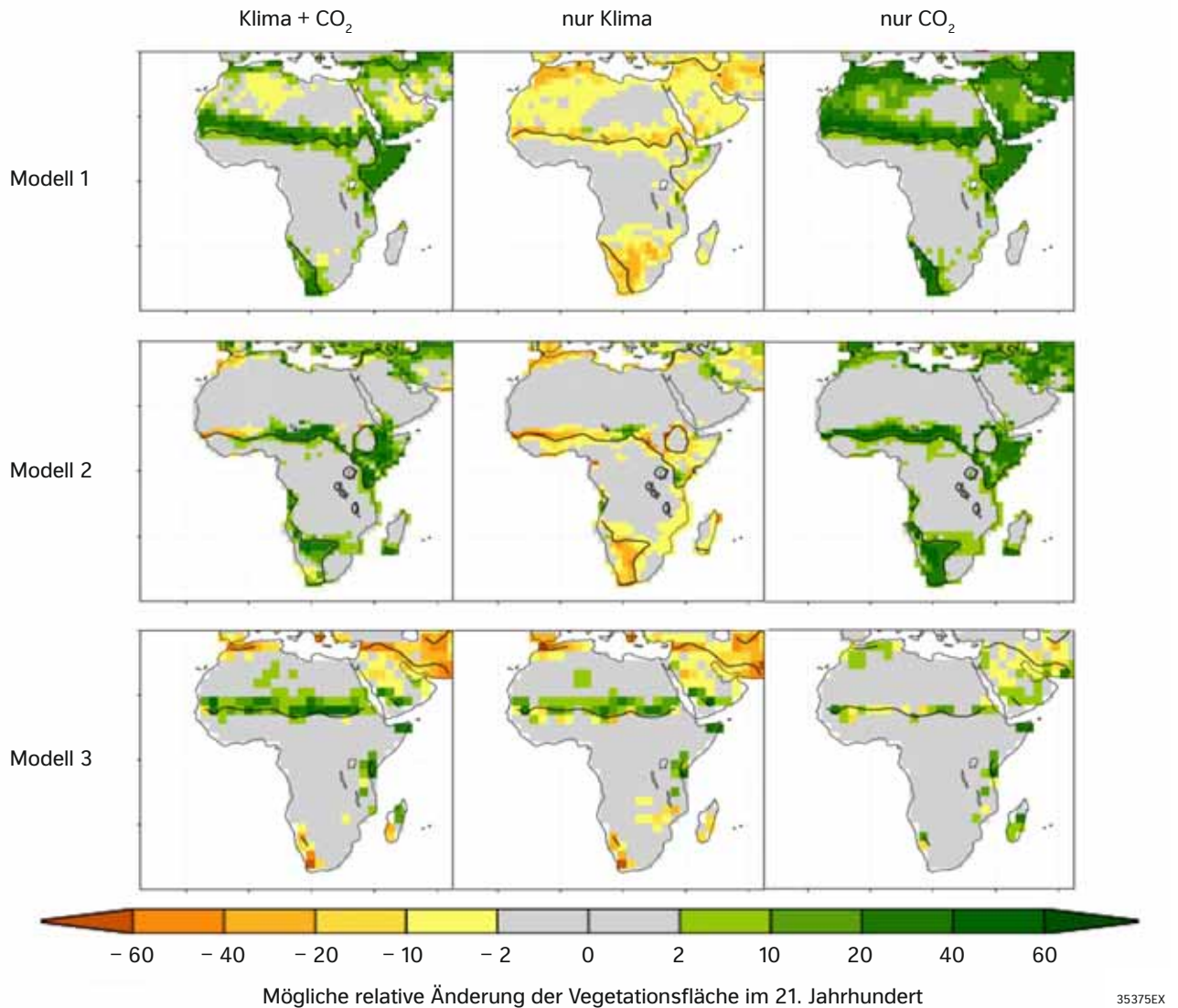


Abb. 6: Vorhersage möglicher Änderungen der Vegetation in der Sahara unter der Annahme ungebremster CO₂-Emissionen. Dargestellt sind die Ergebnisse verschiedener Klimasystemmodelle. Die rechte Spalte zeigt das Ergebnis der Simulationen, in denen nur die Vegetation die kräftige Erhöhung der CO₂-Konzentration der Luft auf etwa 940 ppm spürt. Die mittlere Spalte spiegelt die Simulationen wider, bei denen die Erhöhung der CO₂-Konzentration nur das Klima ändert, die Vegetation aber noch die heutige Konzentration erfährt. Die linke Spalte zeigt die Simulation, in denen beide Prozesse zusammenwirken

Quelle: Bathiany et al. (2014) mit Änderungen

Will Greenhouse green the Sahara?

Die Frage, ob der Treibhauseffekt die Sahara ergrünen lassen wird, stellte Nicole Petit-Maire in ihrem 1990 erschienen Aufsatz. Die französische Geologin ging davon aus, dass die Sahara wegen des im mittleren Holozän wärmeren Klimas grüner als heute gewesen sei. Daher müsse in einem durch die Menschen verursachten wärmeren Klima auch die Sahara wieder ergrünen. Umgekehrt würde sich das Klima ohne den Einfluss des Menschen in den nächsten Jahrtausenden wieder in Richtung einer Eiszeit entwickeln und die Sahara sich daher ausdehnen, wie zur Zeit des letzten Hochglazials vor etwa 21 000 Jahren.

Paläoanaloge können täuschen. Die physikalischen Prozesse, die zur Klimaänderung im Holozän geführt haben, waren andere als jene, wel-

che die heutige globale Erwärmung dominieren. Damals war die allmähliche Änderung in der meridionalen Verteilung in der Sonneneinstrahlung der entscheidende Antriebsfaktor, heute ist es die geologisch gesehen extrem schnelle globale Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre.

Die rasche Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ändert nicht nur das Klima weltweit, sondern führt auch zur Düngung der Vegetation. Pflanzen atmen das CO₂ ein und bauen es mithilfe der Photosynthese zu Hydrokarbonaten, den Hauptbestandteil des Holzes, um. Die Photosynthese läuft bei höherer CO₂-Konzentration effizienter ab. Dieser CO₂-Düngeeffekt ist schon heute in Teilen des Sahels zu erkennen. Wenn die globale CO₂-Emission weiter anhält, dann sollten der Sahel und der Südrand der Sahara wieder grüner werden. Dies

zeigen übereinstimmend drei Klimasystemsmodelle (vgl. Abb. 6).

Offenbar lag Nicole Petit-Maire mit ihrer Vermutung richtig – allerdings aus falschen Gründen. In zwei Klimasystemmodellen wird der Südrand der Sahara wegen der steigenden CO₂-Konzentration grüner. Nur aufgrund der Klimaänderung würde sich in diesen Simulationen die Sahara eher ausbreiten. In dem dritten Modell dringt die Savanne nach Norden, weil das Klima in diesem Modell feuchter wird. In dem Modell 3 gibt es aber offenbar kaum eine CO₂-Düngung. In allen Simulationen fällt die Begrünung der Sahara im Vergleich zur holozänen grünen Sahara eher mager aus. Zudem zeigen weitere Simulationen wieder eine Ausbreitung der Sahara, wenn die CO₂-Emissionen wieder zurückgehen, aber das heißere Klima weiterhin vorherrscht.

Fazit

Die Sahara war vor etwa 5000 bis 11000 Jahren und wahrscheinlich generell während wärmerer Phasen mindestens der letzten 500000 Jahre über mehrere Jahrtausende deutlich grüner und feuchter als heute. Diese sogenannten Afrikanischen Feuchtphasen wurden durch Änderungen in der geographischen Verteilung der Sonneneinstrahlung, die mit langsamen periodischen Schwankungen der Erdumlaufbahn einhergehen, angeregt und durch Wechselwirkungsprozesse zwischen der Atmosphäre, dem Ozean und insbesondere der Vegetation verstärkt. Die nichtlineare Wechselwirkung zwischen Klima und Vegetation erklärt die in manchen Klimaarchiven der Sahara gefundene, im Vergleich zu der allmählichen Änderung der Einstrahlung sehr rasche Ausdehnung der Sahara vor einigen Jahrtausenden. Rasch bedeutet hier im Verlauf von nur wenigen Jahrhunderten – das erscheint für eine Menschengeneration relativ langsam, könnte aber für die Entwicklung der Zivilisation im nordafrikanischen Raum wichtig gewesen sein. Von einem Kollaps der grünen Sahara zu sprechen, wäre verfehlt, da die Änderungen räumlich sehr heterogen abliefen – im Westen rascher und im Osten eher gradueller.

Die künftige Entwicklung der Sahara wird wesentlich durch den Menschen bestimmt. Sollten die CO₂-Emissionen weiterhin ansteigen, könnte sich die Sahelzone noch in diesem Jahrhundert deutlich nach Norden verlagern und zumindest der Südrand der Sahara wieder grüner werden. Allerdings sind die Prozesse, die zu dieser Verschiebung der Sahara führen, andere als in der Vergangenheit. Eine mögliche künftige Afrikanische Feuchtphase und grünere Sahara wären nur von relativ kurzer Dauer und hingen ohnehin davon ab, wie der Mensch das neue Grün nutzen würde. ■

LITERATUR

- Barth, H. (1857): Reisen und Entdeckungen in Nord- und Central-Afrika in den Jahren 1849 bis 1855. Erster Band. Unveränderter Faksimilereprint, 2013. Saarbrücken
- Bathiany, S., Claussen, M. und V. Brovkin (2014): CO₂-induced Sahel greening in three CMIP5 Earth system models. *Journal of Climate* 27, S. 7163–7184
- Brovkin, V., Claussen, M., Petoukhov, V. und A. Ganopolski (1998): On the stability of the atmosphere-vegetation system in the Sahara/Sahel region. *Journal of Geophysical Research*, 103 (D24), S. 31613–31624
- Claussen, M., Kubatzki, C., Brovkin, V., Ganopolski, A., Hoelzmann, P. und H. J. Pachur (1999): Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation at the end of the mid-Holocene. *Geophysical Research Letters* 24 (14), S. 2037–2040
- Claussen, M., Dallmeyer, A. und J. Bader (2017): Theory and modeling of the African Humid Period and the Green Sahara. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Open access online publication (DOI: 10.1093/acrefore/9780190228620.013.532)
- Dallmeyer, A., Claussen, M., Lorenz, S. J. und T. Shanahan (2020): The end of the African humid period as seen by a transient comprehensive Earth system model simulation of the last 8000 years. *Climate of the Past* 16, S. 117–140
- deMenocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L. und M. Yarusinsky (2000): Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Reviews* 19, S. 347–361
- Kröpelin, S., Verschuren, D., Lézine, A.-M., Eggermont, H., Cocquyt, C., Francus, P., Cazet, J.-P., Fagot, M., Russell, J. M., Darius, F., Conley, D.J., Schuster, M., von Suchodoletz, H. und D. R. Engstrom (2008): Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years. *Science* 30, S. 765–768
- Petit-Maire, N. (1990): Will greenhouse green the Sahara? *Episodes* 13 (2), S. 103–107
- Spitaler, R. (1921): *Das Klima des Eiszeitalters*, Selbstverlag

AUTOR

Prof. Dr. Martin Claußen, geb. 1955
Professor für Allgemeine Meteorologie, Universität Hamburg
Direktor, Abt. Land im Erdsystem, Max-Planck-Institut für Meteorologie
martin.claussen@mpimet.mpg.de
Schwerpunkte: Klimaphysik, Wechselwirkung Vegetation-Klima, Paläoklimamodellierung

Summary

The green Sahara

Martin Claußen

The largest desert in the world, the Sahara, was much greener and wetter than today during the warm periods of the last several hundred millennia. These African Humid Periods were triggered by changes in solar radiation, which are related to periodic variations in the Earth's orbit. The orbital forcing was intensified by feedback processes, mainly between the atmosphere and the land. Rising CO₂ levels in the atmosphere could make the Sahel and the southern rim of the Sahara greener again within this century. However, this green phase would probably be short-lived.