VON LINKS NACH RECHTS: 1. AP PHOTO, JOHN MC CONNICO; 2. ISTOCKPHOTO, JAAP HART; 3. ISTOCKPHOTO; 4. ISTOCKPHOTO, MALCOLM ROMAIN; 5. ISTOCKPHOTO, TONY TREMBLAY; 6. ISTOCKPHOTO, ROB HILL

Die Wissenschaft hinter dem KLIMAWANDEL

Warum sind sich Klimatologen so sicher, dass die Erde sich durch menschliche Aktivitäten bedrohlich aufheizt? Hier fassen Autoren des jüngsten UN-Klimaberichts die Argumente zusammen und diskutieren verbleibende Unsicherheiten.

Von William Collins, Robert Colman, James Haywood, Martin R. Manning und Philip Mote

Für Wissenschaftler, die den Klimawandel erforschen, sind »Heureka«-Erlebnisse selten. Im Allgemeinen wachsen ihre Erkenntnisse langsam und stetig. Akribisch fügen sie die Mosaiksteinchen jeder neuen Temperaturmessung, jeder Satellitenerkundung und jeder Simulation zusammen. Die Daten werden geprüft und gegengecheckt, Ideen immer wieder in Frage gestellt. Passen die Beobachtungen zu den vorhergesagten Veränderungen? Könnte es nicht eine alternative Erklärung geben? Gute Klimaforscher wollen – wie alle guten Forscher – sicherstellen, dass ihre Ergebnisse den höchsten Gütestandards genügen.

Auf diese unspektakuläre Weise haben sich mit den länger werdenden Messreihen, unserem zunehmenden Verständnis des Klimasystems und der Verfeinerung der Computermodelle die Indizien für die globale Erwärmung Stück für Stück vermehrt. Zugleich sind im Lauf der vergangenen zwanzig Jahre die Belege für die Schuld des Menschen an der Entwicklung unerbittlich gewachsen. In der wissenschaftlichen Gemeinschaft hat sich die Überzeugung, dass tatsächlich ein Klimawandel stattfindet und er noch viel größere Ausmaße annehmen kann, inzwischen bis fast zur Gewissheit verdichtet. Das spiegelt sich unmissverständlich im neuesten »Assessment Report« des Zwischenstaatlichen Rats für Klimafragen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) wider, dem vierten einer Reihe von Sachstandsberichten zum Thema, die Hunderte von Wissenschaftlern weltweit geschrieben und begutachtet haben.

Im Februar veröffentlichte das Gremium eine kondensierte Version des ersten Teils über die wissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. Diese »Zusammenfassung für Entscheidungsträger« enthielt für Politiker wie Normalbürger eine klare Botschaft. Demnach beträgt die Wahrscheinlichkeit inzwischen mehr als neunzig Prozent, dass die Menschheit in das Klima eingegriffen hat und dass weitere vom Menschen verursachte Änderungen bevorstehen. Manche davon sind laut Bericht nicht mehr vermeidbar; dennoch liegt die Zukunft, vor allem auf lange Sicht, noch weit gehend in unserer Hand: Wie stark der Klimawandel am Ende ausfällt, hängt davon ab, was die Menschen gegen die Treibhausgasemissionen unternehmen.

Der erste Teil des IPCC-Reports konzentriert sich auf vier Themen: die Triebfedern des Klimawandels, die beobachtbaren Veränderungen im Klimasystem, das Verständnis von Ursache-Wirkungs-Beziehungen und Projektionen künftiger Veränderungen. Seit dem vorletzten IPCC-Bericht von 2001 gab es in all diesen Bereichen wichtige Fortschritte. Auf den folgenden Seiten präsentieren wir die Schlüsselbefunde, die das Ausmaß des Wandels dokumentieren und zu dem unvermeidlichen Schluss führen, dass menschliche Aktivitäten die Ursache sind.

Die Triebfedern des Klimawandels

Bestimmte Spurengase in der Atmosphäre – vor allem Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) – fangen mittels des wohlbekannten Treibhauseffekts thermische Energie, also Wärme in der Atmosphäre ein. Die Konzentrationen von Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid in der Lufthülle waren ungefähr 10 000 Jahre lang stabil geblieben, bevor sie in den vergangenen 200 Jahren plötzlich immer schneller anstiegen (siehe Kasten auf S. 75). In den letzten zehn Jahren hat der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre stärker zugenommen als in jeder Zehnjahresperiode davor, seit die kontinuierliche Überwachung des Gases in den 1950er Jahren begann. Heute liegt seine Konzentration etwa 35 Prozent über dem vorindustriellen Niveau, das aus Luftblasen bestimmt werden kann, die in Eisproben aus Grönland oder der Antarktis eingeschlossen sind. Der Methangehalt der Luft ist zweieinhalbmal so hoch wie in vorindustriellen Zeiten, und der Anteil an Distickstoffmonoxid liegt zwanzig Prozent höher.

Wie können wir sicher sein, dass die Menschheit diese Zuwächse verursacht hat? Einige Treibhausgase wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe haben gar keine natürlichen Quellen. Bei den anderen beweisen zwei entscheidende Beobachtungen den menschlichen Einfluss. Zum einen zeigen geografische Unterschiede in den Konzentrationen, dass sich die Quellen vorwiegend auf Landgebieten der dichter besiedelten Nordhalbkugel befinden. Zum anderen belegt die Isotopenanalyse, mit der man die Emissionsquellen unterscheiden

In Kürze

- Die **Experten** sind überzeugt davon, dass ein Klimawandel stattfindet und dass er sich noch verstärken wird.
- Gemäß dem jüngsten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht die beobachtbare **globale Erwärmung** mit mehr als neunzigprozentiger Wahrscheinlichkeit auf den Menschen zurück.
- Hauptursache ist der **Ausstoß von Treibhausgasen** auf Grund menschlicher Aktivitäten, vor allem der Verfeuerung fossiler Brennstoffe.
- Weitere Veränderungen des Weltklimas sind nicht mehr zu vermeiden. Dennoch bleiben vor allem auf längere Sicht **Gestaltungsspielräume**: Das Ausmaß der globalen Erwärmung hängt davon ab, inwieweit die Menschheit die Treibhausgasemissionen einschränkt.

Wichtige Begriffe

- Der **Strahlungsantrieb** eines klimawirksamen Faktors bezeichnet seine Fähigkeit, die Energiebilanz der Erde zu ändern.
- Bedeutende **Treibhausgase** sind etwa Kohlendioxid, Methan und Fluorchlorkohlenwasserstoffe.
- **Ozon** ist in Bodennähe ein Schadstoff, doch schützt die Ozonschicht in der Stratosphäre das irdische Leben vor UV-Strahlung.
- Unter **Albedo** versteht man die Reflektivität einer Oberflächenregion. Sie nimmt mit der Helligkeit zu.
- **Aerosole** sind Schwebeteilchen in der Luft. Sie entstehen etwa bei Waldbränden oder auch beim Verfeuern fossiler Brennstoffe.
- **Kondensstreifen** sind künstliche Wolken, die aus den Abgasen von Flugzeugen entstehen. Auch sie können das Klima beeinflussen.
- Die **Troposphäre** ist die unterste, rund zwölf Kilometer dicke Schicht der Atmosphäre.
- Die **Stratosphäre** schließt sich an die Troposphäre an und reicht bis in eine Höhe von fünfzig Kilometern.

kann, dass der Hauptteil der Kohlendioxidzunahme von der Verfeuerung fossiler Brennstoffe herrührt. Methan und Distickstoffmonoxid reichern sich sowohl durch landwirtschaftliche Praktiken als auch durch die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas in der Atmosphäre an.

Um die Wirkung der erhöhten Treibhausgaskonzentrationen zu quantifizieren, verwenden Klimaforscher das Konzept des Strahlungsantriebs *(radiative forcing)*. Darunter verstehen sie den Beitrag eines klimawirksamen Faktors zur globalen Strahlungsbilanz, normalerweise ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter und bezogen auf vorindustrielle Zeiten. Ein positiver Wert führt zu einer Erwärmung; ein negativer zu einer Abkühlung. Welcher Strahlungsantrieb von den langlebigen Treibhausgasen ausgeht, lässt sich ziemlich genau bestimmen, weil die atmosphärischen Konzentrationen und die räumliche Verteilung dieser Gase sowie die physikalischen Grundlagen ihrer Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung bekannt sind.

Der Klimawandel wird allerdings nicht allein durch erhöhte Konzentrationen an Treibhausgasen verursacht; auch andere Vorgänge – sowohl natürliche wie vom Menschen veranlasste – spielen eine Rolle. Zu den natürlichen Antrieben gehören Veränderungen in der Sonnenaktivität und starke Vulkanausbrüche. Auf das Konto des Menschen gehen dagegen die Emission mikroskopischer Schwebeteilchen, die Aerosole genannt werden (oder ihrer Vorläufermoleküle), und die Kondensstreifen von Flugzeugen – ferner Änderungen im Ozongehalt der Stratosphäre und Troposphäre sowie in der Oberflächenalbedo (Reflektivität). Doch der Einfluss all dieser Faktoren ist sehr viel weniger exakt bekannt als derjenige der Treibhausgase (Kasten rechts).

Am unsichersten sind sich die Forscher darüber, welche Rolle der so genannte Aerosol-Wolken-Albedo-Effekt spielt. Dabei wechselwirken Aerosole menschlichen Ursprungs auf komplizierte Weise mit Wolken, sodass diese heller werden und mehr Sonnenlicht ins All zurückwerfen. Unklarheiten bestehen auch bei der direkten Auswirkung der anthropogenen Aerosole: Wie viel Sonnenlicht reflektieren oder verschlucken die festen oder tröpfchenartigen Partikel?

Zusammengenommen könnten die Aerosoleffekte eine Abkühlung verursachen, welche die Erwärmung durch die langlebigen Treibhausgase bis zu einem gewissen Grad ausgleicht. Aber um wie viel? Würde die Erwärmung vielleicht sogar mehr als wettgemacht? Es gehört zu den Fortschritten seit dem IPCC-Report von 2001, dass sich die Unsicherheiten bei den einzelnen Antriebsmechanismen durch eine Kombination zahlreicher Modellstudien und Beobachtungen quantifizieren und eingrenzen ließen. Dadurch können wir den Beitrag der Menschheit heute sehr zuverlässig abschätzen. Er ist demnach zehnmal so groß wie der natürliche Strahlungsantrieb durch Veränderungen der Sonnenaktivität.

Dieses Ergebnis passt gut zu den beobachteten Anzeichen einer Erderwärmung, die wir im Folgenden diskutieren. Das Zusammenspiel der verschiedenen Antriebe kann man sich als ein Tauziehen vorstellen. Positive und negative Komponenten versuchen die Erde in einen wärmeren beziehungsweise kühleren Zustand zu zerren. Die Stärke der widerstreitenden Beiträge kennen wir heute besser als je zuvor. Demnach wird unser Planet zu einem wärmeren Klima hingezogen – und das in wachsendem Maß; denn der Strahlungsantrieb durch den Treibhauseffekt nimmt stetig zu.

Beobachtete Klimaänderungen

Anhand der vielen neuen oder verbesserten Sätze von Beobachtungsdaten, die bei der Erstellung des IPCC-Reports von 2007 vorlagen, ließen sich die Veränderungen umfassender einschätzen als bei den früheren Berichten. Den Messreihen zufolge waren elf der zwölf vergangenen Jahre die wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen um die Mitte des 19. Jahrhunderts. Die Wahrscheinlichkeit, dass so viele Rekordjahre rein zufällig aufeinander folgen, ist extrem gering.

Veränderungen in drei wichtigen Messgrößen – der globalen Mitteltemperatur, der Höhe des Meeresspiegels und der Schneebedeckung auf der Nordhalbkugel (siehe Kasten S. 76) – deuten übereinstimmend auf eine Erwärmung hin, wenngleich es Unterschiede im Detail gibt. Im vorhergehenden IPCC-Bericht war von einer Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur um 0,6 ± 0,2 Grad Celsius in der Periode zwischen 1901 und 2000 die Rede. Auf Grund der starken Erwärmung in jüngster Zeit lautet der aktualisierte Wert von 1906 bis 2005 nun 0,74 ± 0,18 Grad Celsius.

Beachten Sie, dass davon allein 0,65 ± 0,15 Grad auf die zweite Hälfte, also die Zeit zwischen 1956 und 2005 entfallen. Der Großteil

der Erwärmung im 20. Jahrhundert hat also in den vergangenen fünfzig Jahren stattgefunden.

Das Klima schwankt selbstverständlich weiterhin um die erhöhten Mittelwerte. Entsprechend haben sich die Extreme verändert: Kalte oder frostige Tage und Nächte sind seltener geworden, Hitzewellen dagegen häufiger.

Das Klima wird aber nicht nur durch vertraute Größen wie die Durchschnittswerte von Temperatur, Niederschlag und so weiter bestimmt. Eine wichtige Rolle spielt auch der Zustand des Ozeans und der Kryosphäre, zu der das Eis auf dem Meer sowie auf Seen und Flüssen, die großen Eisschilde auf Grönland und der Antarktis, Gletscher, Schnee und gefrorener Boden gehören. Die komplizierten Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teilen des Klimasystems haben einen wesentlichen Einfluss auf den Klimawandel. So strahlt eine geschrumpfte Meereisdecke weniger Sonnenlicht direkt ins All zurück. Außerdem erhöht sich der Wärmefluss zwischen Ozean und Atmosphäre, was wiederum die Bewölkung und den Niederschlag beeinflussen kann.

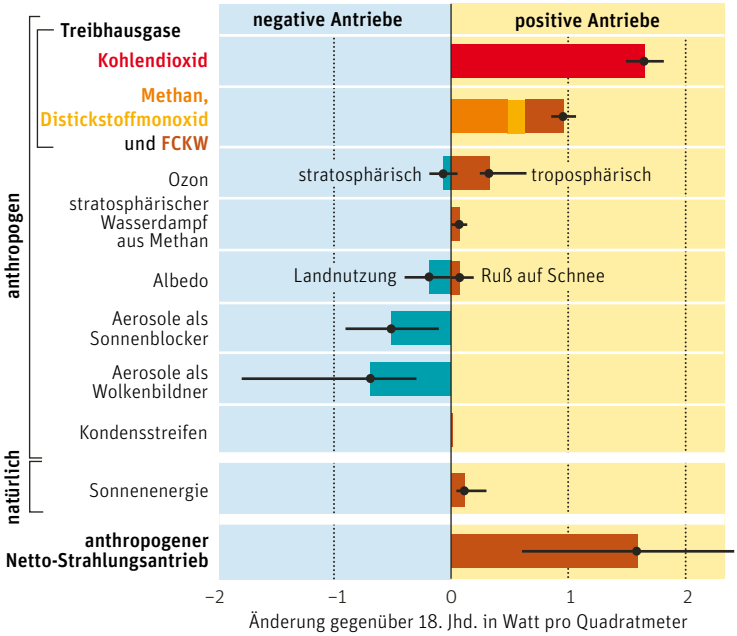
Viele weitere Beobachtungen stehen mit der beobachteten Erwärmung in Einklang und spiegeln einen Wärmefluss von der Atmosphäre in andere Komponenten des Klimasystems wider. Die Schneebedeckung im Früh-

Der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre ist gegenüber dem vorindustriellen Niveau um 35 Prozent gestiegen

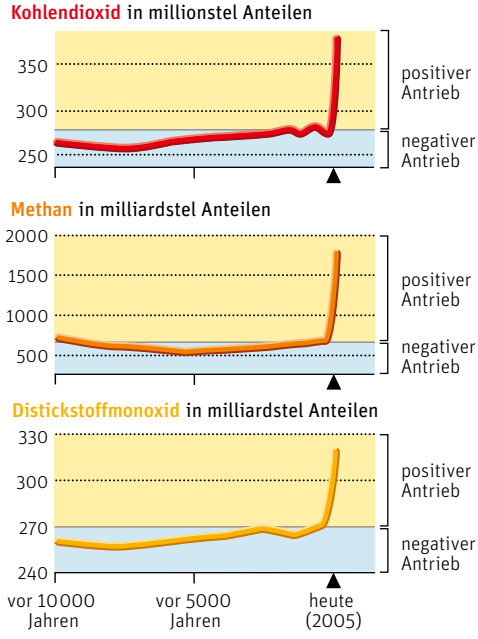
Strahlung und Treibhausgase in der Erdatmosphäre

Beim Tauziehen zwischen positiven und negativen Strahlungsantrieben – Erstere erwärmen die Erde, Letztere kühlen sie ab – sind die primär vom Menschen verursachten Faktoren, die zu höheren Temperaturen führen, klar in der Übermacht (Grafik links). Den wichtigsten anthropogenen Antrieb bilden bestimmte, relativ langlebige Treibhausgase in der Atmosphäre. Ihre Konzentrationen sind in den vergangenen 200 Jahren rapide gestiegen (Grafik rechts).

Strahlungsantriebe im Überblick



Treibhausgase im Steigflug



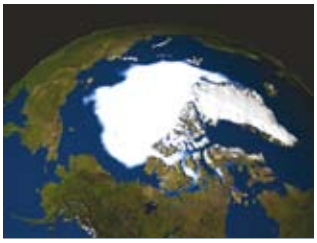
Die Tabelle enthält die geschätzten mittleren globalen Strahlungsantriebe der wichtigsten klimawirksamen Faktoren im Jahr 2005 relativ zur vorindustriellen Zeit. Die schwarzen Fehlerbalken zeigen den Grad der Unsicherheit bei einzelnen Antriebsmechanismen an: Die Wahrscheinlichkeit, dass die Werte innerhalb dieser Balken liegen, beträgt neunzig Prozent. Zum Beispiel ist der Strahlungsantrieb durch die Treibhausgase ziemlich genau bekannt. Anders verhält es sich bei den Aerosoleffekten. Vulkanische Aerosole wurden weggelassen, weil sie nur gelegentlich auftreten.

Die Gehalte der Atmosphäre an Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid in der Vergangenheit wurden aus Gasbläschen in Eisbohrkernen bestimmt. Der direkt gemessene Anstieg in den letzten Jahrzehnten lässt sich auf menschliche Aktivitäten zurückführen. Die Antriebe beziehen sich wieder auf die Zeit unmittelbar vor Beginn des Industriezeitalters.

GRAFIKEN: DANIELA NAOMI MOLNAR; FOTOS VON LINKS NACH RECHTS: 1. ISTOCKPHOTO; 2. ISTOCKPHOTO, MIGUEL ANGELO SILVA; 3. CORBIS, DLILLC; 4. EMILY HARRISON; 5. ISTOCKPHOTO, DAVID WOODS; 6. ISTOCKPHOTO, BEN CONLAN; 7. CORBIS-BETTMANN; 8. ISTOCKPHOTO, ANNA PUSTOVAYA; 9. NOAA; 10. ISTOCKPHOTO; 11. ISTOCKPHOTO, HEIKO BENNEWITZ

Die arktische Meereisdecke ist beträchtlich geschrumpft

arktisches Meereis 1979



arktisches Meereis 2005

BEIDE: NASA, GSFC VISUALIZATION STUDIO

jahr, die bei steigenden Frühlingstemperaturen in den nördlichen mittleren Breiten abnimmt, hat sich um das Jahr 1988 abrupt verringert und ist seitdem auf dem niedrigen Niveau von damals geblieben. Dieser Rückgang gibt Anlass zur Sorge; denn die Schneedecke hat in vielen Regionen große Bedeutung für die Bodenfeuchte und die Wasservorräte.

Im Meer zeigen sich deutliche Erwärmungstrends, die sich erwartungsgemäß mit der Tiefe abschwächen. Sie weisen darauf hin, dass der Ozean mehr als achtzig Prozent der zusätzlich ins Klimasystem gepumpten Energie aufgenommen hat. Diese Erwärmung ist der Hauptgrund für den beobachtbaren Anstieg des Meeresspiegels; denn Wasser dehnt sich mit zunehmender Temperatur aus. Hinzu kommt das Schmelzwasser von zurückweichenden Gletschern und sich ausdünnenden Eisschilden.

Dank Satellitenmessungen seit 1993 lässt sich der globale Anstieg des Meeresspiegels inzwischen sehr genau angeben. Demnach betrug er im Zeitraum von 1993 bis 2003 jährlich 3,1 ± 0,7 Millimeter. Die Werte für einige frühere Dekaden liegen allerdings ähnlich hoch. Deshalb sind längere Satellitenbeobachtungen nötig, ehe eindeutig feststeht, ob sich der Anstieg des Meeresspiegels beschleunigt.

Seit 1978 ist auch die Ausdehnung des arktischen Meereises drastisch zurückgegangen: im Jahresmittel um 2,7 ± 0,6 und im Sommer sogar um 7,4 ± 2,4 Prozent pro Jahrzehnt. Desgleichen wurde weltweit ein Rückzug der Gletscher sowie ein Schrumpfen der Eisschilde in Grönland und der Antarktis beobachtet. Parallel dazu haben sich die Permafrostböden erwärmt. Leider sind viele dieser Größen erst neuerdings gut dokumentiert, weshalb die Länge der verschiedenen Messreihen schwankt.

Die hydrologischen Veränderungen stehen ebenfalls im Großen und Ganzen mit der Erwärmung in Einklang. Das stärkste Treibhausgas ist Wasserdampf; anders als bei Kohlendioxid, Methan oder Distickstoffmonoxid hängt seine Konzentration in der Luft im Wesentlichen von der Temperatur ab. Diese Konzentration, also die Luftfeuchte, hat im globalen zeitlichen Mittel spätestens seit den 1980er Jahren zugenommen.

Temperaturhoch im Mittelalter

Auch die Niederschläge sind ungeachtet starker lokaler Schwankungen in mehreren großen Weltregionen ergiebiger geworden – unter anderem im östlichen Nord- und Südamerika, in Nordeuropa sowie in Nord- und Zentralasien. Im Sahelgebiet, im Mittelmeerraum, im südlichen Afrika und in Teilen Südasiens zeigt sich dagegen ein Trend zu mehr Trockenheit.

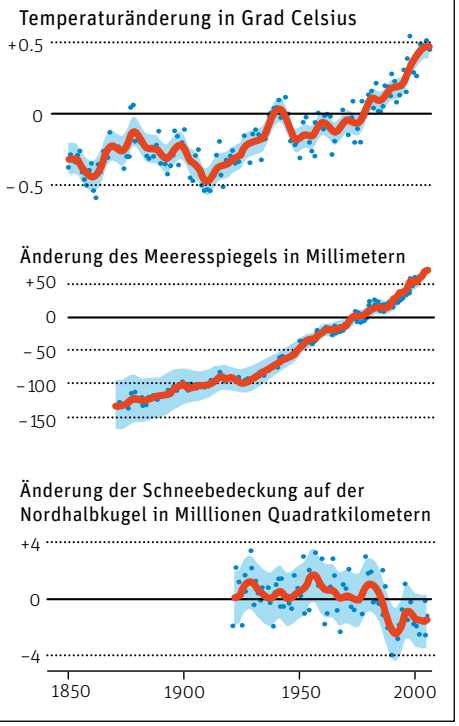
Der Salzgehalt des Oberflächenwassers im Meer kann als riesiges Messgerät für die Regenmenge dienen. Er hat sich in den mittleren und hohen Breiten generell verringert, in niedrigen Breiten dagegen erhöht. Das stimmt mit den Veränderungen der großräumigen Niederschlagsmuster überein.

Rekonstruktionen des früheren Klimas anhand von Baumringen und anderen Indikatoren (»Proxies«) zeigen, welche Schwankungen natürlicherweise auftreten. Demnach bewegt sich die globale Mitteltemperatur der vergangenen fünfzig Jahre auf einem Niveau, das die Höchstwerte seit mindestens 1300 Jahren übersteigt. Die wärmste Periode zwischen 700 und 1950 war vermutlich der Zeitraum von 950 bis 1100. Damals lag die globale Mitteltemperatur mehrere Zehntelgrade unter der seit 1980 gemessenen.

Nach dem bisher Gesagten gibt es also überwältigende Indizien dafür, dass menschliche Aktivitäten einen positiven Strahlungsantrieb verursacht haben und dass ein Klimawandel stattfindet. Aber hängt beides zusammen? Beruhen die beobachteten Änderungen

Zeichen des Klimawandels

Messungen der globalen Mitteltemperatur am Boden sowie der durchschnittlichen Meeresspiegelhöhe und der Schneebedeckung auf der Nordhalbkugel im März und April dokumentieren die zunehmende Erwärmung der Erde. Die Jahresmittelwerte sind durch blaue Punkte wiedergegeben. Die roten Linien zeigen den Temperaturverlauf in geglätteter Form, während die blaue Schattierung die Unsicherheitsspanne angibt.



GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: LUCY READING-IKKANDA; FOTOS VON LINKS NACH RECHTS: 1. ISTOCKPHOTO, STEPHEN STRATHDEE; 2. ISTOCKPHOTO; 3. PHOTO RESEARCHERS INC, MARTIN BOND; 4. CORBIS-BETTMANN; 5. ISTOCKPHOTO, NICK TZOLOV; 6. ISTOCKPHOTO, JEREMY EDWARDS; 7. ISTOCKPHOTO; 8. ISTOCKPHOTO, HASAN KURSAD ERGAN; 9. AURORA PHOTOS, IPN, JIM REED; 10. CORBIS-BETTMANN; 11. ISTOCKPHOTO, RICK RHAY

des Klimas hauptsächlich auf anthropogenen Emissionen oder sind sie möglicherweise das Resultat anderer Faktoren – etwa eines natürlichen Antriebs oder einfach spontaner Variabilität im Klimasystem?

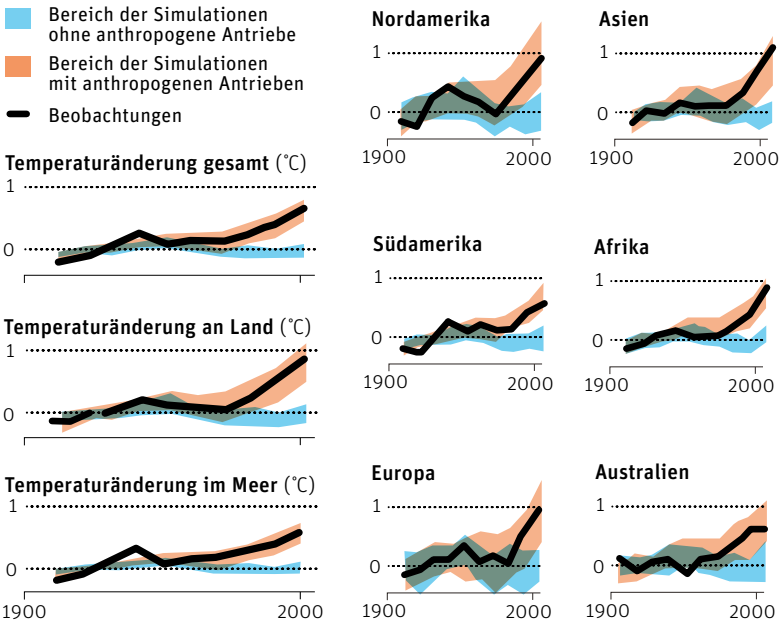
Der IPCC-Report von 2001 nannte es »wahrscheinlich« (mit einer Gewissheit von mindestens 66 Prozent), dass die Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts größtenteils dem Menschen zuzuschreiben ist. Der Report von 2007 hat diese Aussage noch deutlich verschärft. Demnach trägt der Mensch nun »sehr wahrscheinlich« (mit mehr als 90-prozentiger Sicherheit) die Schuld am Klimawandel.

Die zusätzliche Gewissheit speist sich aus mehreren unabhängigen Quellen. Zunächst einmal sind die Messreihen jetzt ungefähr fünf Jahre länger, und die globale Erwärmung in dieser Periode deckt sich weit gehend mit den IPCC-Projektionen eines von Treibhausgasen angetriebenen Temperaturanstiegs, wie sie in früheren Reports seit 1990 standen. Außerdem wurden diesmal Veränderungen in weiteren

Elf der letzten zwölf Jahre waren die wärmsten seit dem Beginn verlässlicher Temperaturmessungen um 1850

Anthropogene Temperaturänderung

Klimasimulationen, die nur natürliche Strahlungsantriebe (blau) einbeziehen, geben den tatsächlichen Temperaturverlauf nicht wieder. Werden jedoch auch vom Menschen verursachte Faktoren (orange) berücksichtigt, reproduzieren die Computermodelle den Anstieg der Temperatur in der realen Welt sowohl im globalen Maßstab als auch auf der Ebene einzelner Kontinente recht genau. Nullpunkt der Temperaturskala ist der Mittelwert zwischen 1901 und 1950.



BR alpha

Neue 16-teilige Reihe:

Die 4 Elemente

Aus was besteht eigentlich die Welt? Wird Bayern in 20 Millionen Jahren noch existieren? Woher bekommt die Sonne ihre Energie? Was ist Wasser? Auf diese Fragen gibt der Astrophysiker und Naturphilosoph *Harald Lesch* den Zuschauern Antworten, indem er einen kultur- und naturwissenschaftlichen Bogen von den alten griechischen Philosophen bis zur modernen Lehre der Elementarteilchen und fundamentalen physikalischen Wechselwirkungen schlägt.
Die 16-teilige Sendereihe wurde in bayerischer Bilderbuchlandschaft gedreht.

Ab 10. August 2007, wöchentlich freitags, 22.45 Uhr, in BR-alpha

(Wiederholung: montags, 9.30 Uhr)

www.br-alpha.de

Teilaspekten des Klimas wie der atmosphärischen Zirkulation und der Meerestemperaturen berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein konsistentes und erweitertes Bild der menschlichen Einflussnahme. Die Klimamodelle, die den Zusammenhang zwischen Treibhausgasen und Erwärmung untersuchen, sind zudem verbessert worden und können das gegenwärtige Klima und das der jüngsten Vergangenheit inzwischen ziemlich genau reproduzieren. Und schließlich ist es seit dem letzten IPCC-Bericht gelungen, einige bedeutsame Inkonsistenzen in den Messreihen weit gehend aufzulösen.

Die wichtigste Unstimmigkeit bestand in einer scheinbaren Diskrepanz zwischen den Temperaturaufzeichnungen mit Thermometern am Boden, die eine deutliche Erwärmung in den letzten Jahrzehnten belegten, und den atmosphärischen Messdaten von Ballonen und Satelliten, die fast keine Temperaturerhöhung zeigten. Mehrere neue Analysen der Satelliten- und Ballondaten, die systematische Fehler nachwiesen, haben diese Diskrepanz jetzt beseitigt: Sowohl an der Erdoberfläche als auch in der Atmosphäre fand eine Erwärmung statt.

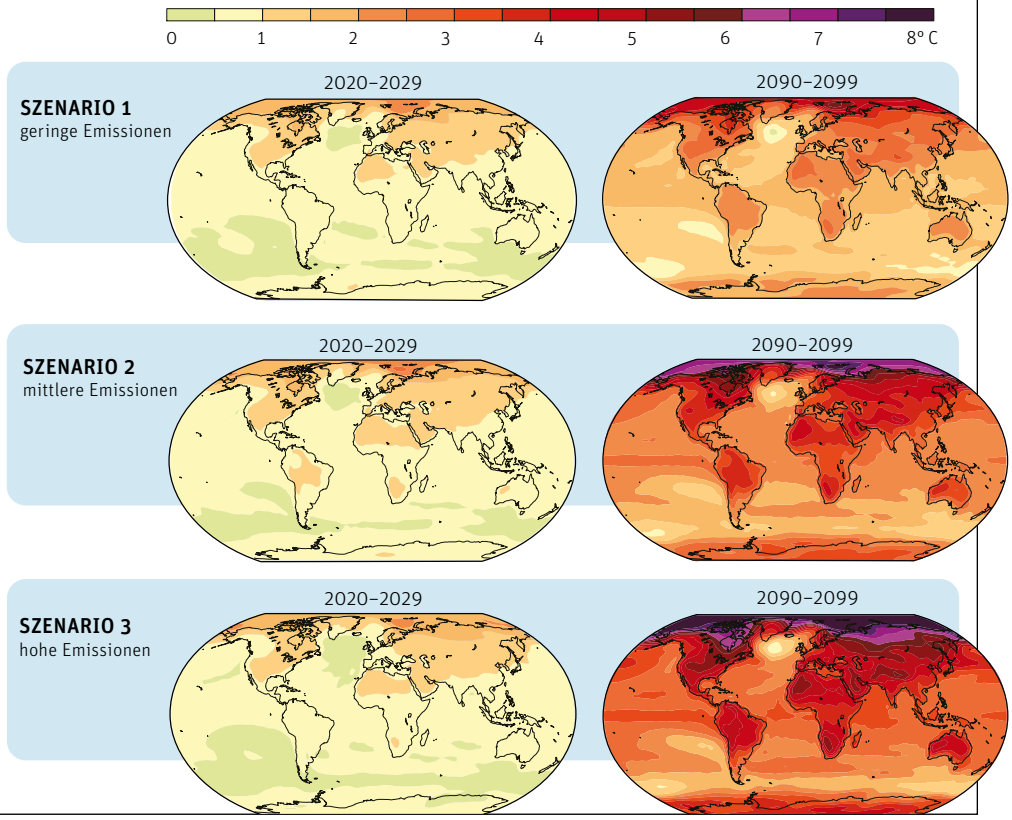
Der ideale Test auf die Ursache des Temperaturanstiegs wäre ein Experiment, das prüft, wie sich das Erdklima im 20. Jahrhundert bei konstanten (statt zunehmenden) Treibhausgaskonzentrationen entwickelt hätte. Solch ein Experiment ist natürlich nicht machbar. Deshalb simulieren Wissenschaftler die Vergangenheit mit Klimamodellen.

Seit dem IPCC-Bericht von 2001 haben zwei bedeutsame Fortschritte das Vertrauen in die Computermodelle erhöht. Der erste ist die Erstellung eines umfassenden Ensembles von Simulationen für die historische und künftige Entwicklung des Klimas durch weltweit 18 unabhängige Forschergruppen. Der Einsatz so vieler verschiedener Modelle hilft besser abzuschätzen, wie stark sich Unsicherheiten bei diversen klimarelevanten Faktoren auf die Ergebnisse der Simulationen auswirken.

Einige Prozesse wie atmosphärische und ozeanische Strömungen oder die Ausbreitung von Sonnenlicht und Wärme sind zwar gut verstanden und durch die physikalischen Gleichungen angemessen repräsentiert. Doch etliche besonders kritische Komponenten des

Modellierte Temperaturänderungen im 21. Jahrhundert

Für drei sozioökonomische Szenarien sind die voraussichtlichen Änderungen der Oberflächentemperatur relativ zum Mittelwert der Jahre 1980 bis 1999 dargestellt. Die Projektionen beruhen auf Berechnungen mit 22 Klimamodellen von 17 unterschiedlichen Computerprogrammen. Alle drei Szenarien stützen sich auf Studien, die vor dem Jahr 2000 gemacht wurden, und beinhalten keine zusätzlichen klimapolitischen Maßnahmen; mit anderen Worten, es sind keine Schadensbegrenzungsszenarien.



KARTEN: DANIELA NAOMI MOLNAR, NACH: IPCC, CLIMATE CHANGE 2007. THE SCIENTIFIC BASIS, SUMMARY FOR POLICYMAKERS;
FOTOS VON LINKS NACH RECHTS: 1. ISTOCKPHOTO; 2. AURORA PHOTOS, TY MILFORD; 3. CORBIS, LINDSAY HEBBERD; 4. CORBIS, BILDERBUCH DESIGN PICS;
5. ISTOCKPHOTO, DANIEL STEIN; 6. ISTOCKPHOTO, OLEG FEDORENKO; 7. AURORA PHOTOS, PETER ESSICK; 8. ISTOCKPHOTO, SHAUN LOWE; 9. ISTOCKPHOTO, BURCU ARAT SUP

Klimasystems wie die Wolken, die Meereswirbel und die Verdunstung durch Pflanzen kennt man sehr viel weniger genau. Sie werden deshalb nur näherungsweise und in vereinfachter Form mittels so genannter Parametrisierungen berücksichtigt. Mit der Entwicklung von Multimodell-Ensembles wollten die Wissenschaftler vor allem herausfinden, wie der Mangel an Genauigkeit auf die Vorhersage des Klimawandels und die möglichen Ursachen durchschlägt. So viele Modellen wie im jüngsten IPCC-Bericht gab es noch nie.

Der zweite Fortschritt ist, dass bestimmte Klimaprozesse in den Modellen detaillierter und realistischer dargestellt wurden. Das gilt vor allem für das Verhalten atmosphärischer Aerosole, die Dynamik (Bewegung) des Meereises sowie den Austausch von Wasser und Energie zwischen Land und Atmosphäre. Heute enthalten mehr Modelle als früher die wichtigsten Aerosoltypen und die Wechselwirkungen zwischen Schwebeteilchen und Wolken.

Wenn Wissenschaftler mit Klimamodellen die Ursache der globalen Erwärmung erforschen, lassen sie zunächst Simulationen laufen, bei denen nur »natürliche« Einflüsse wie Veränderungen der Sonnenaktivität und größere Vulkanausbrüche in den vergangenen hundert Jahren berücksichtigt werden. Im nächsten Durchlauf geht dann auch der vom Menschen verursachte Zuwachs an Treibhausgasen und Aerosolen in die Rechnungen ein.

Die Resultate solcher Doppelsimulationen lassen an Klarheit nichts zu wünschen übrig (siehe Kasten auf S. 77). Modelle, die ausschließlich natürliche Antriebe berücksichtigen, können die beobachtete globale Erwärmung seit der Mitte des 20. Jahrhunderts nicht erklären. Das gelingt nur, wenn zusätzlich anthropogene Faktoren berücksichtigt werden. Auch beim Muster der großräumigen Temperaturänderungen stimmen die Ergebnisse der Simulationen mit den Beobachtungen am besten überein, wenn alle Antriebe im Modell enthalten sind.

Zwei Tatsachen überführen den Menschen als Übeltäter. Die erste ist, dass die Temperaturen über dem Land stärker zugenommen haben als über dem Meer und an der Meeresoberfläche stärker als in tieferen Wasserschichten. Beides passt zum Bild einer von Treibhausgasen aufgeheizten Atmosphäre als Verursacher. Das Meer erwärmt sich wegen seiner großen thermischen Trägheit langsamer. Dabei nimmt es eine riesige Menge Wärme auf – was beweist, dass die Energiebilanz des Planeten nicht mehr ausgeglichen ist. Das zweite stark belastende Indiz besteht darin, dass sich die Troposphäre erwärmt, die Stratosphäre darüber jedoch abkühlt hat. Wären Änderungen der Sonnenintensität der Hauptgrund für die Erwärmung, sollte sie in beiden Atmosphärenschichten gleichermaßen auftreten. Der beobachtete Kontrast entspricht aber genau dem, was zu erwarten ist, wenn durch den gestiegenen Treibhauseffekt mehr Wärme in den unteren Luftschichten verbleibt.

All diese Beobachtungen und Simulationen zusammen liefern nach sorgfältiger Analyse die Basis für die gestiegene Gewissheit, dass der Mensch hinter der globalen Erwärmung steckt. Es gab Theorien, wonach die kosmische Strahlung die Wolkenbildung und damit das Klima beeinflusst. Sie basierten jedoch auf Korrelationen mit begrenzten Messreihen und haben Tests mit zusätzlichen Daten nicht standgehalten. Auch bleiben die physikalischen Mechanismen spekulativ.

Wie sieht es mit kleinskaligeren Mustern aus? Die Ursache des Klimawandels zu bestimmen wird umso schwieriger, je kleiner die betrachteten Regionen und je kürzer die Zeiträume sind. Das liegt daran, dass sich die natürlichen kleinskaligen Temperaturschwankungen weniger »herausmitteln« und das Klimasignal leichter verwischen können. Trotzdem bedeutet die anhaltende Erwärmung, dass das Signal auch bei kleineren Skalen auftaucht. Laut IPCC-Bericht haben die menschlichen Aktivitäten die Temperatur bis hinab zur Größenordnung einzelner Kontinente deutlich beeinflusst – mit Ausnahme der Antarktis.

Häufigere Extremereignisse

Der menschliche Einfluss zeigt sich auch in Extremereignissen wie Dürreperioden, Überschwemmungen oder Hitzewellen. Das bedeutet natürlich nicht, dass sich einzelne solche Vorkommnisse wie die Rekordhitze im Sommer 2003 in Europa direkt dem menschengemachten Klimawandel zuschreiben ließen; denn extreme Wetterlagen haben in der Regel vielerlei Ursachen. Es bedeutet aber sehr wohl, dass durch menschliche Aktivitäten die Wahrscheinlichkeit solcher Ausreißer gestiegen ist.

Wie wird sich das Klima im Verlauf des 21. Jahrhunderts verändern? Antwort auf diese Frage suchen Forscher mit Simulationen, denen sie Schätzungen der künftigen Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen zu Grunde legen. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Klimaänderungen bei gleich bleibendem

Fakten zum IPCC

- Das IPCC wurde 1988 vom **Umweltprogramm der Vereinten Nationen** ins Leben gerufen. Es soll die vorliegenden wissenschaftlich-technischen Informationen über den Klimawandel bewerten. Das geschieht in einem Prozess, der darauf angelegt ist, eine hohe **Glaubwürdigkeit der Ergebnisse** auf wissenschaftlicher und politischer Ebene zu gewährleisten.
- **Umfassende Bewertungen** wurden 1990, 1995, 2001 und 2007 vorgelegt.
- **Drei getrennte Arbeitsgruppen** prüfen die physikalischen Hintergründe des Klimawandels, die Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft und Methoden zur Schadensbegrenzung.
- **Chefautoren** für die Berichte der Arbeitsgruppen werden von den Vereinten Nationen berufen. Es sind namhafte Wissenschaftler, die sich selbst aktiv an relevanter Forschung beteiligen.
- In einem **Begutachtungsprozess** lieferten über 600 Sachverständige über 30 000 Kommentare zum Bericht der Arbeitsgruppe 1, auf dem dieser Artikel beruht.
- Jede Arbeitsgruppe bringt auch eine **Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger** heraus.

oder steigendem Ausstoß von Treibhausgasen sehr wahrscheinlich größer ausfallen werden als im 20. Jahrhundert. Selbst wenn wir die Emissionen unverzüglich so stark drosseln würden, dass die Treibhausgaskonzentrationen auf dem momentanen Niveau verharren, ginge die Erwärmung jahrhundertelang weiter.

Diese Trägheit des Klimasystems resultiert aus dem Zusammenwirken mehrerer Faktoren. Dazu gehören die Wärmekapazität der Weltmeere und die Jahrhunderte, die es dauert, bis durch die ozeanische Zirkulation die Wärme und das Kohlendioxid in die Tiefsee gelangt ist und sich ein neues Gleichgewicht unter den veränderten Bedingungen eingestellt hat.

Präziser gesagt: Den Modellprojektionen zufolge steigt die globale Mitteltemperatur für eine Spanne plausibler Emissionen in den kommenden zwanzig Jahren um durchschnittlich etwa 0,2 Grad Celsius pro Jahrzehnt. Das entspricht annähernd der Erwärmungsrate in den vergangenen dreißig Jahren. Ungefähr die Hälfte dieses Temperaturanstiegs in der nahen Zukunft haben wir bereits fest »gebucht«, weil das Klimasystem mit Verzögerung auf die aktuellen Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre reagiert.

Erwärmung um bis zu vier Grad

Die Erwärmung bis zum Ende dieses Jahrhunderts hängt dagegen stark von der künftigen Kohlendioxid-Emissionsrate ab. Die Projektionen umfassen eine große Spanne von Szenarien. Sie reicht von sehr raschem bis zu moderatem Wirtschaftswachstum und von höherer zu geringerer Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Die überzeugendsten Schätzungen des langfristigen globalen Temperaturanstiegs für die verschiedenen Szenarien bewegen sich zwischen 1,8 und 4,0 Grad Celsius. Die regionalen Auswirkungen werden, wie die Projektionen mit größerer Sicherheit als je zuvor zeigen, denen in den vergangenen fünfzig Jahren gleichen, aber deutlich krasser ausfallen.

Außerdem geht aus den Simulationen hervor, dass die natürlichen Prozesse auf dem Land und in den Ozeanen, durch die Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernt wird, infolge der Erwärmung des Planeten an Wirksamkeit verlieren. Dadurch verbleibt mehr von dem emittierten Treibhausgas in der Luft, was wiederum den Temperaturanstieg beschleunigt. Diese fatale positive Rückkopplung zeigt sich in allen Klimamodellen. Große Unsicherheit herrscht allerdings noch über ihre Stärke. Sie hängt unter anderem davon ab, wie die Erderwärmung die Kohlenstoffaufnahme der Vegetation und des Bodens verändert.

Den Computermodellen zufolge beeinflusst der Klimawandel auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Ozeane. Der Meeresspiegel dürfte bis Ende des Jahrhunderts um etwa dreißig bis vierzig Zentimeter steigen, wobei der genaue Wert erneut von den Emissionen abhängt. Über sechzig Prozent des Anstiegs beruhen auf der thermischen Ausdehnung des Meerwassers. Doch möglicherweise beschleunigt sich das Abschmelzen der Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis – wofür es neuerdings Anzeichen gibt. Der Meeresspiegel könnte sich dadurch um weitere zehn bis zwanzig Zentimeter erhöhen. Selbst ein wesentlich größerer Anstieg wäre möglich. Der erhöhte Gehalt der Atmosphäre an Kohlendioxid beeinflusst schließlich auch die Chemie der Ozeane. Bei vermehrter Aufnahme des Gases versauert das Meerwasser.

Die Polargebiete werden besonders betroffen sein. Dort steigt die Temperatur gemäß den Projektionen mit am stärksten an. Die Folgen zeigen sich vor allem im Sommer: Der Boden in den Permafrostregionen taut bis in größere Tiefen auf und das Meereises im Arktischen Ozean schrumpft dramatisch. In niedrigeren Breiten dürften mehr Hitzewellen, intensivere Niederschläge und stärkere Wirbelstürme sowie Taifune auftreten, die dafür aber vielleicht seltener sind.

Einige wesentliche Unsicherheitsfaktoren bleiben. Der wohl bedeutendste betrifft die Wolken. Wie sie auf einen Temperaturanstieg reagieren, hat großen Einfluss auf das Ausmaß der Erwärmung in den Projektionen. Die Komplexität der Wolken bedeutet allerdings, dass ihre Reaktion schwer einzuschätzen ist. Auch hier gibt es noch viel zu forschen.

Wir leben in einer Zeit, in der die Menschheit die Entwicklung der Erde und ihrer Bewohner entscheidend mitbestimmt. Die Kristallkugel, die uns die Klimamodelle für den Blick in die Zukunft bereitstellen, wird für Vorhersagen jenseits des Zeithorizonts von einem Jahrhundert leider immer trüber. Hinzu kommt unsere begrenzte Einsicht in die Reaktion der natürlichen Systeme und der menschlichen Gesellschaft auf die zunehmenden Folgen des Klimawandels. Eines steht jedoch fest: Pflanzen, Tiere und Menschen werden mit den Auswirkungen des Klimawandels mindestens bis zum Ende dieses Jahrtausends leben müssen. ◁

William Collins ist Professor in Residence in der Abteilung Erd- und Planetenwissenschaften an der Universität von Kalifornien in Berkeley sowie leitender Wissenschaftler am Lawrence Berkeley National Laboratory und am National Center for Atmospheric Research in Boulder (Colorado).

Robert Colman forscht in der Klimadynamikgruppe des Australian Bureau of Meteorology Research Center in Melbourne.

James Haywood leitet die Aerosolforschung beim britischen Wetterdienst in Exeter.

Martin R. Manning ist Direktor der Support Unit der IPCC-Arbeitsgruppe I im Earth System Research Laboratory der National Oceanic & Atmospheric Administration in Boulder (Colorado).

Philip Mote ist Professor für Klimatologie in der Abteilung Atmosphärenwissenschaften der Universität von Washington in Seattle.

Alle Autoren haben in der Arbeitsgruppe I am IPCC-Bericht von 2007 mitgearbeitet.

Weblinks zu diesem Thema: www.spektrum.de/artikel/903043
Weitere relevante Informationen aus dem Spektrum-Verlag: www.spektrum.com/klimawandel

FOTOS VON LINKS NACH RECHTS: 1. ISTOCKPHOTO; 2. ISTOCKPHOTO, HASAN KURSAD ERGAN; 3. AURORA PHOTOS, JPN, JIM REED; 4. CORBIS-BETTMANN; 5. ISTOCKPHOTO, RICK RHAY; GRAFIK RECHTS: DANIELA NAOMI MOLNAR, NACH: IPCC UND UCAR

Bedrohte Zukunft: das regionale Bild

Hier sind einige der gravierenden Folgen des Klimawandels aufgeführt, die laut jüngstem Bericht des IPCC in verschiedenen Teilen der Welt bis Ende dieses Jahrhunderts drohen. Das Gremium bezeichnet die meisten der genannten Entwicklungen als wahrscheinlich oder sehr wahrscheinlich. Genauere Aussagen stehen im Internet unter www.ucar.edu/news/features/climatechange/regionalimpacts.jsp und auf der IPCC-Website (www.ipcc.ch).

Europa

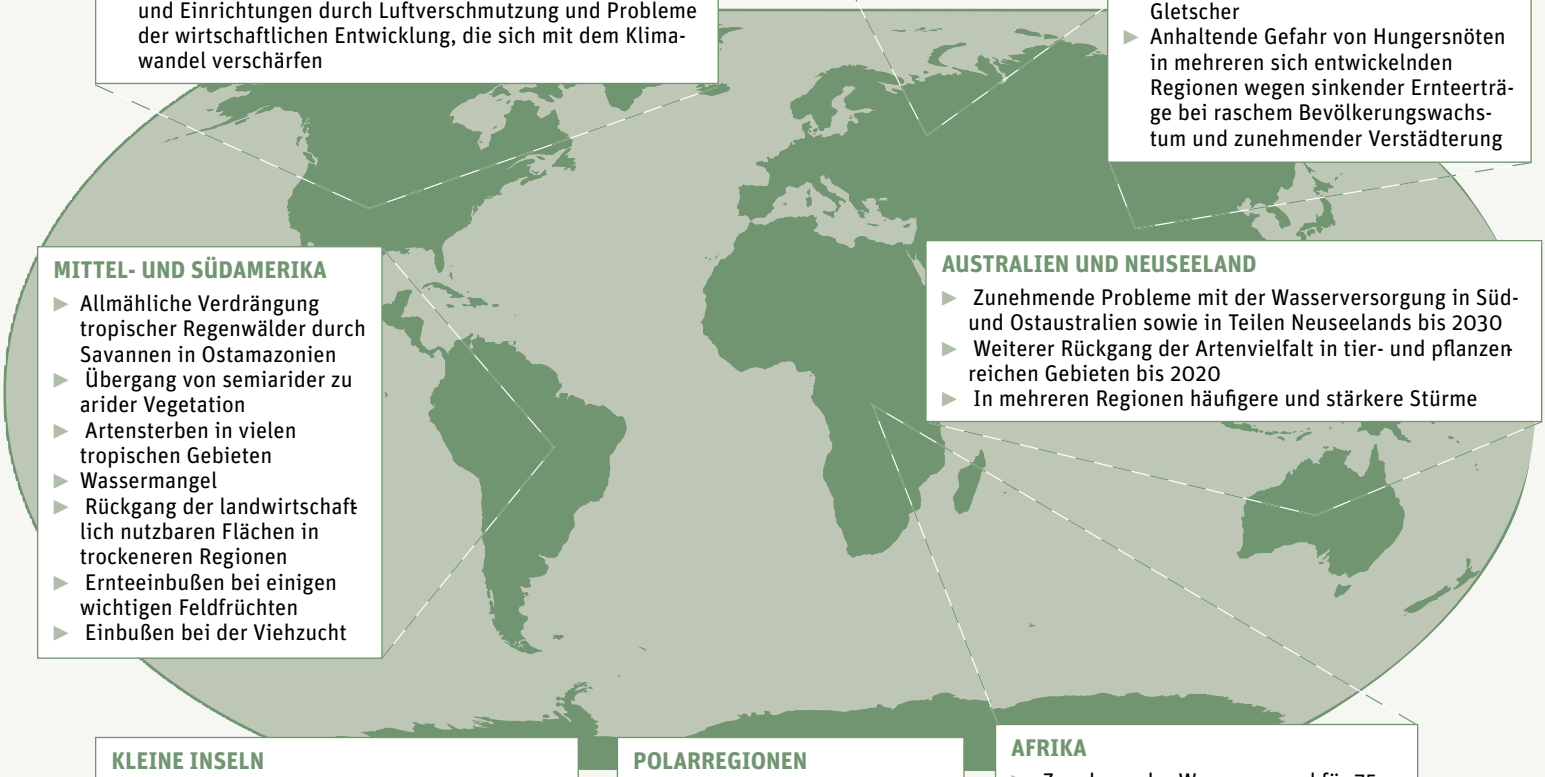
- Erhöhtes Hochwasserrisiko im Inland
- Im Süden vermehrt gesundheitsgefährdende Hitzewellen, Waldbrände, Wassermangel, Leistungseinbußen bei Wasserkraftwerken, Ernteausfälle und Rückgang des Sommertourismus
- In Mittel- und Osteuropa vermehrt gesundheitsgefährdende Hitzewellen sowie Torfbrände, weniger Niederschläge im Sommer und Einbußen bei der Waldwirtschaft
- In Nordeuropa anfangs positive Auswirkungen wie geringerer Heizbedarf, steigende Ernteerträge und wachsende Wälder; schließlich überwiegen jedoch auch hier die schädlichen Folgen

Nordamerika

- In den Gebirgen im Westen abnehmende Schneedecke, vermehrt Überflutungen im Winter und geringere Wasserführung der Flüsse im Sommer
- Eine verlängerte Risikoperiode für Waldbrände und erhebliche Ausweitung der jährlich niedergebrannten Gebiete
- Häufigere, stärkere und längere Hitzewellen in Städten, die schon in der Vergangenheit unter hohen Temperaturen im Sommer zu leiden hatten
- In Küstenregionen zunehmende Belastung der Bewohner und Einrichtungen durch Luftverschmutzung und Probleme der wirtschaftlichen Entwicklung, die sich mit dem Klimawandel verschärfen

Asien

- Vermehrt Hochwasser, Bergrutsche und Störungen der Wasserversorgung durch das Abschmelzen der Himalaya-Gletscher
- Anhaltende Gefahr von Hungersnöten in mehreren sich entwickelnden Regionen wegen sinkender Ernteerträge bei raschem Bevölkerungswachstum und zunehmender Verstädterung



Mittel- und Südamerika

- Allmähliche Verdrängung tropischer Regenwälder durch Savannen in Ostamazonien
- Übergang von semiarider zu arider Vegetation
- Artensterben in vielen tropischen Gebieten
- Wassermangel
- Rückgang der landwirtschaftlich nutzbaren Flächen in trockeneren Regionen
- Ernteeinbußen bei einigen wichtigen Feldfrüchten
- Einbußen bei der Viehzucht

Australien und Neuseeland

- Zunehmende Probleme mit der Wasserversorgung in Süd- und Ostaustralien sowie in Teilen Neuseelands bis 2030
- Weiterer Rückgang der Artenvielfalt in tier- und pflanzenreichen Gebieten bis 2020
- In mehreren Regionen häufigere und stärkere Stürme

Kleine Inseln

- Bedrohung von Infrastruktur, Siedlungen und Anlagen durch den steigenden Meeresspiegel
- Wassermangel an vielen Orten bis Mitte des Jahrhunderts
- Stranderosion, Ausbleichen von Korallen und andere Verschlechterungen der Verhältnisse an den Küsten, dadurch Beeinträchtigung der Fischerei und des Tourismus
- Invasion fremder Arten, insbesondere auf Inseln in mittleren und höheren Breiten

Polarregionen

- Ausdünnung und Schrumpfen von Gletschern und Eisdecken
- Rückgang der Meereisdecke und Permafrostgebiete in der Arktis
- Tieferes saisonales Auftauen der Permafrostgebiete

Afrika

- Zunehmender Wassermangel für 75 bis 250 Millionen Menschen bis 2020
- Verlust landwirtschaftlich nutzbarer Flächen, verkürzte Anbauzeiten und Ertragseinbußen in einigen Gegenden
- Sinkende Fischbestände in großen Seen

Eine ausführlichere Version dieses Kastens finden Sie online unter www.spektrum.de/artikel/904130