



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Schon Ende des 19. Jahrhunderts war der schwedische Physiker und Chemiker Svante Arrhenius auf der richtigen Spur. Aufmerksam hatte er verfolgt, dass im Zeitalter der industriellen Revolution immer mehr Kohle verbrannt wurde. Für ihn war klar: Das dabei in die Atmosphäre entweichende Kohlendioxid (CO₂) würde im Laufe der Zeit zu einer deutlichen Erwärmung der Erde führen. Arrhenius sah damals darin allerdings keinen Grund zur Sorge. Ganz im Gegenteil: „Der Anstieg des CO₂ wird zukünftigen Menschen erlauben, unter einem wärmeren Himmel zu leben“, so der Naturforscher.

Da der **Klimawandel** nicht an Ländergrenzen halt macht, kommen auch auf Deutschland „heiße Zeiten“ zu. Wie diese aussehen könnten und welche Regionen hierzulande dann besonders betroffen wären, haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg so präzise wie nie zuvor ermittelt. Im Auftrag des Umweltbundesamtes entwarfen die Forscher um Daniela Jacob mithilfe des Supercomputers am Deutschen Klimarechenzentrum drei Szenarien für mögliche Klimaänderungen in Deutschland bis zum Jahr 2100. Sie gingen dabei sowohl von eher niedrigen (B1-Szena-

Der Klimawandel heizt uns ein – was Forscher für Deutschland voraussagen

Heute, mehr als 100 Jahre später, haben moderne Klimaforscher endgültig erkannt, dass Arrhenius mit seiner Theorie richtig lag – zumindest was die globale Erwärmung und die Rolle des CO₂ im Klimasystem anbelangt. „Die Zeit für Zweifel ist vorbei“, mit diesen Worten eröffnete Rajendra Pachauri, Vorsitzender des *International Panel on Climate Change* (IPCC) im November 2007 seine Präsentation zum vierten Weltklimabericht. „Das IPCC hat unzweifelhaft die Erwärmung für unser Klimasystem bestätigt und sie direkt mit der menschlichen Aktivität verknüpft.“ Tatsächlich steigt die „Fieberkurve“ unseres Planeten: Um 0,74°C hat sich die Erde in den vergangenen 100 Jahren erwärmt. Verantwortlich dafür ist laut IPCC vor allem der Anstieg des Kohlendioxid-Gehalts in der Atmosphäre von 280 ppm (*parts per Million*) im Jahr 1750 auf zurzeit 385 ppm.

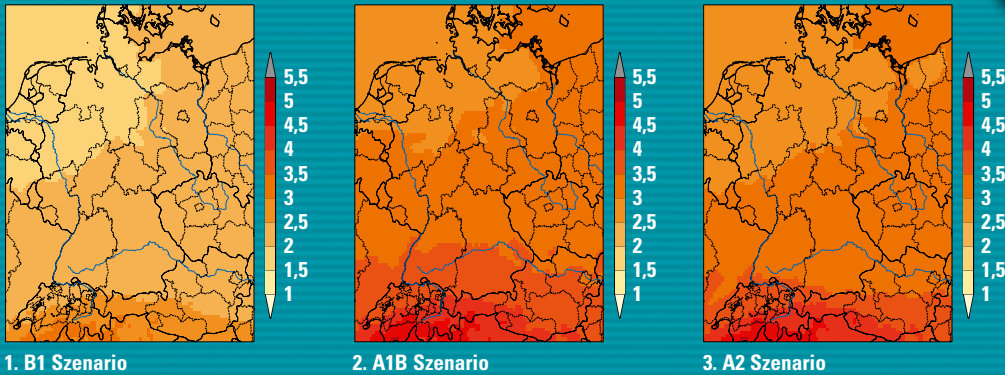
Für die Zukunft halten die Wissenschaftler düstere Prognosen bereit: Im günstigsten Fall steigen die Temperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter um 1,0 bis 2,7°C. Im Extremfall – bei ungebremsst steigenden Treibhausgas-Emissionen – könnte die globale Erwärmung in diesem Zeitraum aber sogar Werte von 2,4 bis 6,4°C erreichen. Eisfreie Pole, ein gefährlicher Meeresspiegelanstieg und Jahrhundertssommer in Serie wären die Folge.

rio), mittleren (A1B-Szenario) als auch hohen Emissionsraten (A2-Szenario) von Treibhausgasen in der Zukunft aus. Die Ergebnisse sind eindeutig: Der Klimawandel nimmt auch Deutschland in den „Schwitzkasten“. Die Simulationen zeigen, dass es bis Ende dieses Jahrhunderts vermutlich zu einer mittleren Erwärmung kommt, die zwischen 2,5 und 3,5°C liegen wird. Und noch eines offenbaren die Prognosen: Die Aufheizung des Landes wird saisonal und regional sehr unterschiedlich ausfallen. Am stärksten dürften sich im Winter der Süden und der Südosten Deutschlands erwärmen. Hier könnten die Temperaturen im Jahr 2100 sogar um mehr als 4°C über den Vergleichswerten von 1961 bis 1990 liegen (**Abb. B**). Doch das ist noch längst nicht alles. So könnten beispielsweise die sommerlichen Niederschläge in Deutschland bis zum Jahr 2100 großflächig um bis zu 30 Prozent abnehmen. Besonders betroffen sind wahrscheinlich der →



A

► Der Klimawandel treibt die Temperaturen auf der Erde in die Höhe.



▲ Die Fieberkurve steigt: Änderung des Jahresmittels der Temperatur (in °C) für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der Kontrollperiode von 1961-1990. Das B1-Szenario geht von niedrigen Treibhausgas-Emissionen in Zukunft aus, das A1B-Szenario von mittleren und das A2-Szenario von hohen. Gemessen an den unterschiedlichen Annahmen zur CO₂-Konzentration bei den Szenarien A2 und A1B, sind die Erwärmungsraten unerwartet ähnlich. Das liegt daran, dass sich die abkühlende Wirkung der Schwefelaerosole in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts in A1B deutlich schneller verringert als in A2. Damit ist die durch Abnahme der Schwefelemissionen bedingte Erwärmung in A1B größer als in A2 und kompensiert zum Teil den schwächeren CO₂-Anstieg in A1B (aus: UBA-Studie).

© MPI für Meteorologie

→ Süden und Südwesten sowie der Nordosten des Landes. Die Winter zwischen Flensburg und Passau dagegen werden nach den Resultaten der Computersimulationen in Zukunft überall viel feuchter (**Abb. C**).

In den Alpen ist damit zu rechnen, dass aufgrund der Erwärmung der Niederschlag im Winter häufiger als Regen denn als Schnee fällt. Auch jene schneebedeckten Flächen würden dann verschwinden, die heute noch als schneesicher gelten (**Abb. E**). In tiefer liegenden Regionen, wie zum Beispiel Garmisch-Partenkirchen oder Mittenwald, soll sich die Zahl der Tage pro Jahr mit geschlossener Schneedecke besonders stark reduzieren. Dort ist eine Abnahme um mehr als die Hälfte möglich – eine Entwicklung, auf die sich beispielsweise die Tourismusbranche einstellen muss, um nicht zu einem der Verlierer des Klimawandels zu werden. Spätestens in knapp 100 Jahren sind in den Alpen wohl „grüne“ Alternativen zum Ski- oder Snowboardfahren gefragt. Zu den Gewinnern der Erwärmung könnten dagegen Nord- und Ostseeküste zählen. Denn dort soll es bis 2100 nicht nur um bis zu 2,8°C wärmer werden, es fällt gerade in der Hauptreisezeit im Sommer auch bis zu einem Viertel weniger Regen.

„Die schnellen und tief greifenden Veränderungen des Klimas in Deutschland könnten vermutlich gravierende Folgen für Mensch und Umwelt haben“, fasst Daniela Jacob die Ergebnisse der **Klimasimulationen** zusammen.

Sorgen machen ihr vor allem die Wetterextreme: „Denn die Schadenspotenziale extremer Ereignisse wie Hitzewellen, starke Niederschläge und Stürme sind oftmals noch wesentlich größer als jene der schleichenden Klimaänderungen“. Mit ihren Kollegen analysiert sie deshalb zurzeit in mühsamer Detektivarbeit die errechneten Klimaszenarien und sucht nach Hinweisen, ob solche **Wetterextreme** in Zukunft häufiger und stärker ausfallen könnten.

KOMPLEXE KLIMAMODELLE

Einige Resultate liegen bereits vor. So haben die Hamburger Forscher die Veränderungen bei der Anzahl der Sommertageperioden – das sind zusammenhängende Tage mit einer Maximaltemperatur von mehr als 25°C – bis zum Jahr 2100 näher untersucht. Ergebnis: Im Rhein-Einzugsgebiet wird es durchschnittlich alle zwei Jahre Hitzeperioden geben, die 40 Tage oder noch länger dauern. Jahrhundertssommer wie im Jahr 2003 mit Rekordtemperaturen, tausenden Toten und Ernteschäden in Milliardenhöhe könnten in Zukunft somit zur Regel werden.

Doch wie kommen die Klimaforscher zu so detaillierten Prognosen für die kommenden 100 Jahre, wo es doch schon den Meteorologen schwer fällt, überhaupt das Wetter der nächsten Tage sicher vorherzusagen? Und: Sind die Ergebnisse überhaupt realistisch? Eine Antwort auf diese Fragen liefert ein Blick hinter die Kulissen der modernen Klimaforschung. Das wichtigste Handwerkszeug

der Wissenschaftler sind so genannte **Klimamodelle**. Dabei handelt es sich in erster Linie um komplexe Gleichungssysteme mit zahlreichen Variablen wie Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit oder Wasserdampfkonzentration in der Atmosphäre, die das Klimageschehen beschreiben. Einer der entscheidenden „Mitspieler“ in den Modellen sind die zukünftigen **Treibhausgas-Emissionen**. Auf der Basis von variierenden Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung sowie zum wirtschaftlichen und technologischen Wandel in den kommenden 100 Jahren werden zunächst unterschiedliche Emissions-Szenarien erstellt. Diese Werte fließen anschließend in die Modellrechnungen ein, und für jedes Szenario ergibt sich so eine eigene Klimaprognose.

Ob ein Klimamodell gut oder schlecht ist, hängt entscheidend von den Wissenschaftlern ab: Nur wenn es ihnen gelingt, die nichtlinearen Differentialgleichungen in eine numerische Form umzuwandeln, mit der die eingesetzten Supercomputer arbeiten können, sind aussagekräftige Ergebnisse zu erwarten. Wichtig für die Qualität eines Klimamodells ist aber auch, dass mögliche Wechselwirkungen und Rückkopplungen berücksichtigt werden, die zwischen den einzelnen Komponenten des Systems Erde – Atmosphäre, Ozean, Biosphäre, Eiswelt – existieren. Während man früher nur isolierte Atmosphärenmodelle zur Klimaberechnung verwendete und den Einfluss der Meere allenfalls abschätzte, kommen heute gekoppelte Systeme zum Einsatz. Eines davon ist ECHAM5/MPI-OM. Es besteht aus zwei Hauptelementen, dem Atmosphären- und Landoberflächenmodell ECHAM5 und dem Ozeanmodell MPI-OM. In diese Modellkette kann bei Bedarf auch noch ein Aerosolmodell oder eines zum Kohlenstoffkreislauf integriert werden.

Bevor solche komplexen Modelle für Simulationen des zukünftigen Klimas eingesetzt werden, müssen sie erst einmal einen Härtestest bestehen und „geeicht“ werden. Dies geschieht in Probeläufen, bei denen es beispielsweise um die Berechnung des Klimas der vergangenen 100 Jahre geht. Da dieses

durch die systematische Wetterbeobachtung bestens bekannt ist, können die Forscher leicht überprüfen, ob das Modell korrekt arbeitet und die Entwicklungen genau nachbildet. Erst wenn dies der Fall ist – der Optimierungsprozess dauert Jahre –, kann man davon ausgehen, dass das Modell auch realitätsnahe Prognosen zum Klima der Zukunft liefert.

Diese Hürde hat REMO längst genommen. Das **Regionale Klimamodell** ist am Hamburger Max-Planck-Institut extra für die Simulation des Klimas in Deutschland entwickelt worden. Es arbeitet mit dem globalen Modell ECHAM5/MPI-OM zusammen. „Um die Auswirkungen globaler Klimaänderungen auf Regionen in Europa zu untersuchen, werden regionale Klimamodelle in globale Klimamodelle eingebettet“, erklärt Daniela Jacob die Vorgehensweise, die als *nesting* oder *dynamic downscaling* bezeichnet wird. „So ist es möglich, wie mit einer Lupe, eine spezielle Region viel detaillierter zu untersuchen und eine Brücke zu schlagen zwischen globalen Klimaänderungen und möglichen lokalen Konsequenzen.“

Das Herzstück von REMO sind 10x10 Kilometer große „Würfel“, die jeweils eine Höhe von 100 Metern haben. In solche Puzzlesteine wird die Troposphäre über Deutschland (die unterste Schicht der Atmosphäre einschließlich des Erdbodens) für die Klimasimulationen virtuell zerlegt. Für jeden dieser Würfel berechnet ein Supercomputer am Deutschen Klimarechenzentrum dann ein ganz spezielles lokales Klima mit Informationen zur Temperatur oder zum Niederschlag. Sind alle Puzzleteile zu einem feinmaschigen Gitter zusammengefügt, entsteht ein um-

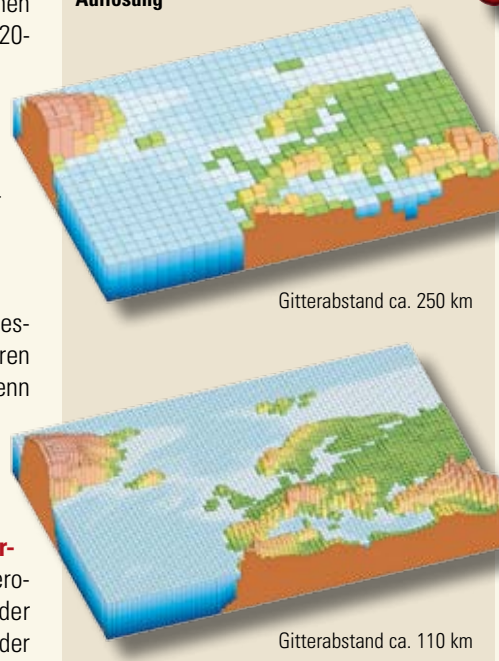
fassendes Gesamtbild der zukünftigen Klimatrends in Deutschland. Mit seiner räumlichen Auflösung von zehn Kilometern ist REMO 20-mal genauer als alle globalen Klimamodelle, die meist nur eine Auflösung von 200 Kilometern besitzen (**Abb. D**). REMO liefert daher lokale Prognosen, die es in dieser Detailliertheit und Genauigkeit bisher noch nie gab.

SUPERCOMPUTER AM WERK

Trotz aller Qualitätstests und vieler Verbesserungen sind die Klimaforscher mit ihren Modellen aber längst nicht zufrieden. Denn noch immer gibt es in den Berechnungen einige Unsicherheitsfaktoren. Einer davon ist die Rolle der Aerosole im Klimasystem (**siehe auch GEOMAX 10 „Staub im Klimarechner – warum Forscher kleinste Teilchen zählen“**). Aerosole sind winzige Schwebeteilchen oder Tröpfchen, die aus natürlichen Quellen oder durch Aktivitäten des Menschen, wie die Verbrennung fossiler Energieträger, freigesetzt werden. Sie wirken bei der Wolkenbildung mit und beeinflussen so den Energiefluss in der Atmosphäre. In den vergangenen rund 100 Jahren haben sie die Durchschnittstemperaturen auf der Erde vermutlich um mindestens 0,4°C gesenkt und damit der globalen Erwärmung entgegengewirkt. Doch ob dieser Kühleffekt für alle Aerosole und unter allen Bedingungen gilt, konnten die Forscher bisher nur teilweise klären.

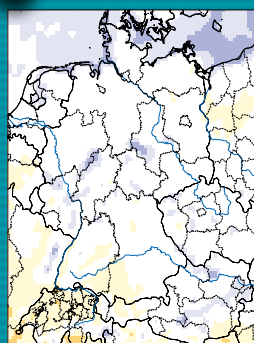
Ziel der Klimaforscher ist es, ihre Modelle in den nächsten Jahren Stück für Stück zu optimieren. Am Ende soll ein komplexes Supermodell stehen, das alle Vorgänge in der Atmosphäre, der Biosphäre, in den Ozeanen und den Eisflächen berücksichtigt, und auch

Globale Klimamodelle unterschiedlicher Auflösung

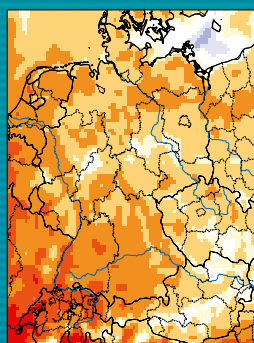


den Einfluss des Menschen auf das Klimageschehen offenlegt. Doch je umfassender die Modelle werden, desto mehr Rechnerkapazitäten sind nötig, um die Klimasimulationen durchführen zu können. Da kommt es den Forschern gerade recht, dass am Klimarechenzentrum ein neuer Supercomputer (HLRE2) installiert worden ist, dessen Leistungsfähigkeit die des alten Systems um das rund 60-fache übertrifft: Mit einer Spitzenleistung von 144 Teraflop pro Sekunde – das sind 144 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde – gehört er zu den weltweit größten Supercomputern, die für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt werden. Daniela Jacob und ihre Kollegen setzen darauf, dass HLRE2 ihnen hilft, die Prognosen zum Klimawandel und seinen Folgen noch wesentlich genauer und realistischer zu machen. Denn je präziser die Modellrechnungen sind, desto konkreter werden die Empfehlungen der Wissenschaftler für eine wirksame Klimaschutzstrategie.

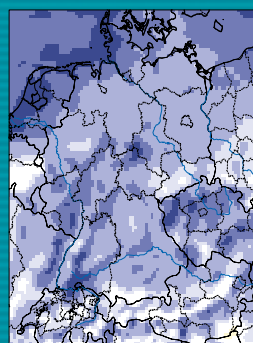
Wie wichtig eine solche ist, hat im Jahr 2008 eine Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung angedeutet: Danach könnten durch die globale Erwärmung in den kommenden 50 Jahren volkswirtschaftliche Kosten in Höhe von 800 Milliarden Euro allein auf Deutschland zukommen. Allerdings wären diese zumindest teilweise noch vermeidbar – schnelles



1. Jahresniederschläge



2. Sommerniederschläge



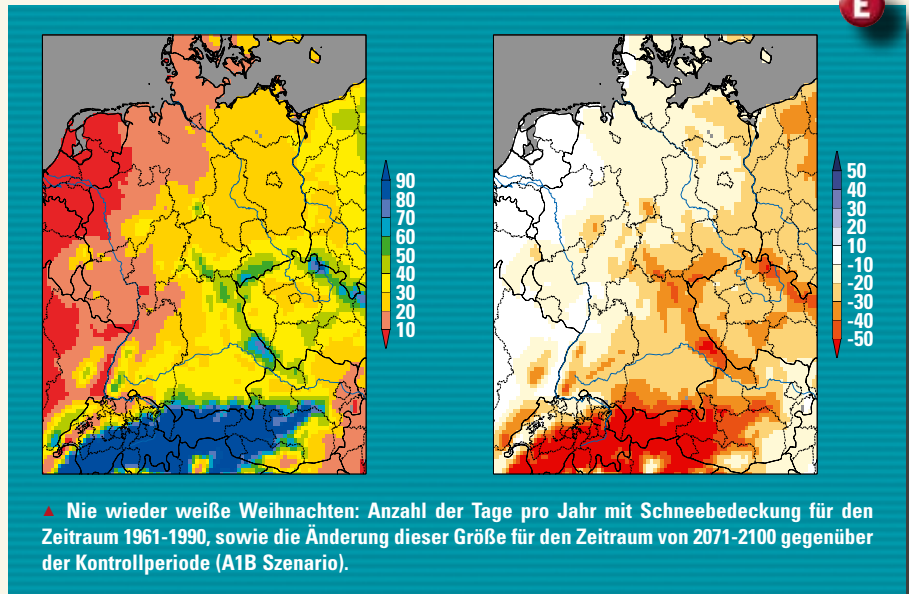
3. Winterniederschläge

▲ **Trockene Sommer, feuchte Winter: Änderung der mittleren relativen Jahres- sowie Sommer- und Winterniederschläge (in Prozent) für die Zukunftsperiode 2071-2100 im Vergleich zur Kontrollperiode 1961-1990 für das A1B Szenario.**

→ Handeln im Klimaschutz vorausgesetzt. Nun bedarf es dazu aber der Mitwirkung jedes Einzelnen. Und genau hier offenbart sich ein Dilemma, denn die individuelle Investition in den Klimaschutz birgt ein persönliches Risiko: Wenn die anderen gar nicht oder zu wenig investieren, dann war der individuelle Einsatz umsonst; die Folgen des Klimawandels müsste derjenige aber trotzdem tragen. Wie lassen sich Menschen angesichts einer solchen Situation zum gemeinsamen Klimaschutz bewegen?

Max-Planck-Forscher haben dieses Dilemma in einem Experiment untersucht: Sie setzten 30 Teams mit jeweils sechs Studenten an ein interaktives Computerspiel, **Public Goods Game** genannt (Abb. F). Es ging darum, Geld von einem persönlichen Konto (40 Euro) für den Klimaschutz zu spenden. Das gemeinsame Klimaschutzziel war erreicht, wenn eine Gruppe in zehn Spielrunden anonym insgesamt 120 Euro gesammelt hatte. Der Anreiz: Bekam ein Team die notwendige Summe zusammen, erhielt jeder Mitspieler das Restgeld von seinem persönlichen Konto ausbezahlt. Wurde das Spendenziel jedoch nicht erreicht, waren das Spiel und damit auch das persönliche Guthaben verloren. Jeder einzelne

▼ **Drohender Geldverlust macht Druck: Die Spielgruppen erreichen das kollektive Spendenziel nur, wenn ein Misserfolg einen zu 90 Prozent wahrscheinlichen Verlust ihres Geldes erwarten lässt (blaue Linie). Selbst dann haben sie dabei noch Probleme: Die Summe an Investitionen erreicht den notwendigen Grenzwert (schwarze Linie) erst in der letzten Runde des Spiels. Beträgt die Verlustwahrscheinlichkeit nur 50% (grüne Linie) oder 10% (rote Linie), dann entfernen sich die kollektiven Investitionen der Studenten sogar immer mehr vom Grenzwert.**



© MPI für Meteorologie

konnte nun darauf spekulieren, dass die anderen in seiner Gruppe genug investierten – er hätte dann am Ende mehr Geld auf seinem Konto. Das Risiko dabei: das kollektive Ziel wird nicht erreicht und das Geld ist verloren.

Die Forscher variierten nun dieses Verlustrisiko. Betrug die Wahrscheinlichkeit, das Restgeld nicht ausgezahlt zu bekommen, 90 Prozent – „also genau die Verhältnisse, die wir haben, um den gefährlichen Klimawandel abzuwenden“, sagt Manfred Milinski – so schaffte die Hälfte der Gruppen die 120 Euro (bei 50 Prozent oder gar nur 10 Prozent blieben alle Gruppen dagegen weit unter dem Spendenziel). Das Resultat stimmt nachdenklich: „Es wird deutlich, dass man die Menschen von den noch zu erwartenden dramatischen Auswirkungen des Klimawandels überzeugen muss“, so Milinskis Kollege

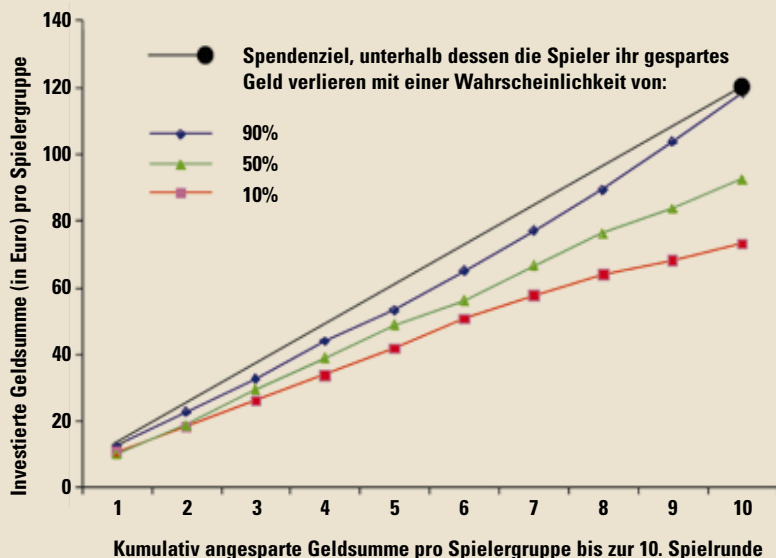
Jochem Marotzke. Außerdem sei es wichtig, beim Klimaschutz an die persönlichen Interessen der Beteiligten zu appellieren. Ist das auch eine mögliche Strategie für das „globale Klimaspiel“, an dem hunderte von Regierungen und Milliarden von Menschen teilnehmen? Und speziell für die internationalen Verhandlungen über das wichtige Kyoto-Folgeabkommen? Vielleicht. „Aber, dass unsere Spielgruppen auch bei dem höchsten Verlustrisiko es in der Hälfte der Fälle nicht geschafft haben, die 120 Euro aufzubringen“, sagt Marotzke, „ist wohl eher eine schlechte Botschaft.“ Denn größere Gruppen hätten sicher noch mehr Probleme.

Schlagwörter: Klimawandel, Klimasimulationen, Klimamodelle, Wetterextreme, Treibhausgas-Emissionen, Public Goods Game

Lesetipps: Lozán, José L., Hartmut Graßl, Gerd Jendritzky, Ludwig Karbe, Karsten Reise & Walter A. Maier, Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken – Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen, Verlag Wiss. Auswertungen, 2008; Nadja Podbregar, Harald Frater und Karsten Schwanke, Wetter, Klima und Klimawandel – Wissen für eine Welt im Umbruch, Springer Verlag, 2008; Dieter Walch, Dem Klimawandel trotzen – Gewohnheiten ändern, Verlag: B & S Siebenhaar, Juni 2008

Internettipps: www.anpassung.net; www.climatech-angesspatialplanning.nl

F



WWW.MAXWISSEN.DE

– der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen unter: www.maxwissen.de/heftbestellung