

Wie hart trifft es Deutschland?

Den Ergebnissen regionaler Klimamodelle zufolge werden unsere Sommer heißer und die Winter feuchter – und die Gefahr extremer Niederschläge nimmt zu.

Von Paul Becker, Thomas Deutschländer und Florian Imbery

Laut UNO-Klimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) bestehen kaum noch Zweifel: Menschliches Handeln beeinflusst unser Klima nachhaltig. Die untere Erdatmosphäre hat sich zwischen 1906 und 2005 global um 0,74 Grad Celsius erwärmt – mit deutlich steigender Tendenz seit den 1980er Jahren. Wenn sich die Aufheizung in den kommenden Dekaden weiter beschleunigt, wird das unser aller Leben maßgeblich beeinflussen. Was uns erwartet, können Wissenschaftler mit Computersimulationen abschätzen, die möglichst viele

Komponenten des irdischen Klimasystems nachbilden. Zunächst wurden hierfür ausschließlich globale Modelle verwendet, welche die durchschnittliche Erwärmung der Erde insgesamt erfassten. Für spezielle Aussagen zur Klimaentwicklung in eng begrenzten Gebieten haben sie in aller Regel jedoch nicht die nötige räumliche Auflösung. Um auch solche detaillierteren Informationen zu erhalten, arbeiten Klimaforscher seit rund 20 Jahren an der Entwicklung regionaler Modelle.

Doch auch sie geben meist noch keinen Aufschluss darüber, wie sich die Klimaänderung auf die verschiedenen Lebensbereiche auswirken wird. Dafür bedarf es zusätzlich so genannter Wirkmodelle, die beispielsweise den Einfluss auf die Land- und Forstwirtschaft oder auf den Wasserhaushalt erfassen. Erst sie erlauben es, die Folgen des Klimawandels auf den verschiedensten Gebieten zu simulieren, so dass sich optimale Anpassungsstrategien entwerfen lassen.

AUF EINEN BLICK

HEISSE SOMMER, NASSE WINTER

1 Globale Klimamodelle haben räumliche Auflösungen von 200 bis 500 Kilometern und erlauben deshalb keine Aussagen für einzelne Regionen. Das leisten **regionale Modelle**, die auf der Grundlage der globalen Daten und unter Berücksichtigung **topografischer Besonderheiten** Trends für kleinere Gebiete errechnen.

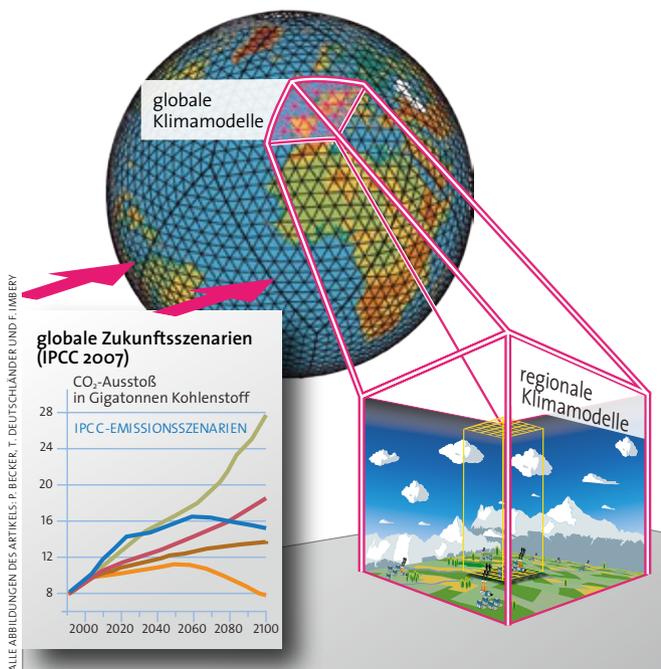
2 Um **zuverlässige Aussagen** zu erhalten, bündeln Klimaforscher die Ergebnisse möglichst vieler Klimamodelle und werten sie kollektiv aus – eine Vorgehensweise, die als **Ensembleansatz** bezeichnet wird.

3 Auf der Basis von 19 regionalen Klimaprojektionen präsentiert der **Deutsche Klimaatlas** wahrscheinliche **Szenarien** für das zukünftige Klima in Deutschland im Vergleich zu den heutigen Verhältnissen.

4 Demnach steigt bis Ende dieses Jahrhunderts die Durchschnittstemperatur in der Bundesrepublik um bis zu vier Grad Celsius. Die Sommer werden trockener und die Winter feuchter. Die Zahl der **heißen Tage** mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius verdreifacht sich. Vor allem im Winter nehmen **Starkniederschläge** zu – und damit die **Überschwemmungsgefahren**.

Szenarien für die Wirtschaftsentwicklung

Was die Klimamodelle liefern, sind nach offiziellem Sprachgebrauch keine Vorhersagen, sondern Projektionen. Die Wortwahl bringt die vielen Unwägbarkeiten zum Ausdruck, die in die Berechnungen eingehen. Dazu zählen insbesondere die zukünftigen gesellschaftlichen, ökonomischen und technologischen Entwicklungen. Diese entscheiden über den weltweiten Ausstoß an Treibhausgasen wie Kohlendioxid, die für die momentane Erderwärmung wesentlich mitverantwortlich sind. Im letzten IPCC-Bericht waren es vier Familien aus so genannten SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios), welche die möglichen Emissionen solcher Gase bis Ende dieses Jahrhundert erfassten. Sie trugen die Bezeichnungen A1, A2, B1 und B2 und unterschieden sich im Wesentlichen in der angenommenen wirtschaftlichen



Regionale Klimamodelle basieren zwar auf globalen Emissions-szenarien des IPCC, können aber kleinräumige geografische Gegebenheiten berücksichtigen und Entwicklungen in einzelnen Regionen simulieren.

und demografischen Entwicklung sowie im Grad der Globalisierung.

So geht A1 von einem sehr schnellen Wirtschaftswachstum und der raschen Einführung neuer, effizienterer Technologien aus, wobei die Weltbevölkerung noch bis Mitte des 21. Jahrhunderts zu- und danach abnehmen soll. Zu dieser Familie gehört insbesondere das als moderat angesehene und am häufigsten verwendete A1B-Szenario, das sich durch eine ausgewogene Nutzung aller Energiequellen auszeichnet.

Die SRES-Szenarien sind durch die Konzentration an Kohlendioxidäquivalenten in parts per million (ppm, millionstel Anteile) im Simulationszeitraum charakterisiert. Im fünften IPCC-Sachstandsbericht, dessen Publikation 2014 geplant ist, stehen sie jedoch nicht mehr im Vordergrund. An ihre Stelle treten Representative Concentration Pathways (RCP, repräsentative Konzentrationsverläufe). Sie geben die Änderung des so genannten Strahlungsantriebs in Watt pro Quadratmeter wieder und beinhalten folglich nicht nur die Treibhausgasemissionen, sondern – neben den natürlichen Einflüssen – alle sozioökonomischen Faktoren, welche den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussen. Rückkopplungen zwischen Prozessen, die in den Modellen der einzelnen Forschungsdisziplinen gesondert betrachtet werden, lassen sich dadurch besser erfassen. Rechnungen mit RCP-Szenarien sind auch insofern flexibler, als sie beispielsweise mögliche Anpassungsstrategien bereits berücksichtigen können. Erste Klimaprojektionen auf ihrer Basis werden noch im Lauf dieses Jahres veröffentlicht.

Globale Klimamodelle simulieren die wesentlichen physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre, in den Ozeanen und auf der Erdoberfläche sowie die komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Teilsystemen auf Rechengittern mit einer Auflösung von bislang etwa 200 bis 500 Kilometern. Dabei berechnen sie die Reaktion des Klimasystems auf Veränderungen externer Randbedingungen wie der Strahlungsintensität der Sonne und der erwarteten Emission klimarelevanter Treibhausgase. Trotz zahlreicher Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sind ihre wesentlichen Aussagen vergleichbar. Alle Simulationen, die im IPCC-Bericht von 2007 diskutiert werden, ergeben auf Basis der SRES-Szenarien beispielsweise einen mittleren globalen Temperaturanstieg von zwei bis vier Grad Celsius zum Ende des 21. Jahrhunderts sowie die Ausbreitung von Wüsten und eine Umverteilung des Niederschlags.

Globale Klimamodelle sind so aufwändig, dass sie trotz der enormen heute verfügbaren Rechenleistung kaum kleinräumige Veränderungen mit hoher zeitlicher Auflösung simulieren können. Um Aussagen darüber zu erhalten, muss man ihre Ergebnisse auf die regionale Ebene »herunterrechnen«. Das leisten regionale Klimamodelle, die nur einen Ausschnitt der Erdoberfläche betrachten, dafür aber detaillierter sind. Ihre Auflösung liegt derzeit in der Regel im Bereich zwischen 10 und 50 Kilometern. Sie berücksichtigen unter anderem Faktoren wie den Einfluss von Gebirgen oder Feinheiten der Landnutzung. Dadurch zeichnen sie ein differenzierteres Bild und liefern beispielsweise auch genauere Angaben über die räumliche Verteilung und zeitliche Variabilität des Niederschlags.

Wo liegen die Unsicherheiten?

Für alle globalen wie regionalen Klimamodelle gilt, dass sich nicht sagen lässt, welches davon das beste ist. Jedes hat seine besonderen Stärken und Schwächen und liefert unter den jeweiligen Anfangs- und Randbedingungen leicht unterschiedliche Klimatrends. Die daraus resultierende Bandbreite an Ergebnissen spiegelt ein gewisses Maß an Unsicherheit wider, die es bei der Interpretation von Klimaprojektionen zu beachten gilt.

Die Ungewissheit speist sich aus drei grundsätzlichen Quellen:

- der hypothetischen Natur der zu Grunde liegenden Emissionsszenarien, weil sich die sozioökonomische Entwicklung der Welt nur schwer abschätzen lässt;
- den Vereinfachungen in den Modellen selbst, die unmöglich alle relevanten physikalischen Prozesse in der Natur erfassen können;
- und den natürlichen Klimaschwankungen auf Grund der chaotischen Dynamik des Klimas.

Zudem sind bestimmte Abläufe und Kopplungen im Klimasystem bis heute nicht vollständig verstanden oder können nicht in den Modellen abgebildet werden. Die extrem komplexen physikalischen Prozesse in der Atmosphäre und ihre gegenseitigen Kopplungen immer genauer wiederzugeben,

ist daher eine stetige Herausforderung für die Klimamodellierer.

Auf Grund der geschilderten Unsicherheiten bieten einzelne Modellläufe keine ausreichende Basis für die Interpretation und Anwendung der Ergebnisse oder für die Planung von Anpassungsmaßnahmen. Um ein besser abgesichertes Fundament zu schaffen, betrachten Klimaforscher deshalb möglichst viele Projektionen und werten sie kollektiv aus – eine Vorgehensweise, die als Ensembleansatz bezeichnet wird.

Das 2004 ins Leben gerufene EU-Projekt ENSEMBLES zweckte, die Voraussetzungen für die Anwendung dieser Methode in Europa zu verbessern. Dazu wurden die globalen und regionalen Klimamodelle mehrerer Forschungseinrichtungen miteinander kombiniert, um ein möglichst verlässliches Resultat zu gewährleisten.

Für Deutschland stehen aktuell mehr als 50 Ergebnisse regionaler Klimasimulationen zur Verfügung. Das im Folgenden vorgestellte Ensemble umfasst 19 regionale Klimaprojektionen, die auf dem schon erwähnten SRES-Szenario A1B beruhen und bis zum Ende des 21. Jahrhunderts reichen.

Die Trends bei Temperatur und Niederschlag

Zur Darstellung der Ergebnisse dienen so genannte Perzentile. Hierbei handelt es sich um Schwellenwerte, die nur von einer bestimmten Anzahl aller ausgewerteten Simulationen überschritten werden. Gewöhnlich betrachten Klimatologen eine konservative untere Grenze, die so gut wie sicher überschritten wird, und eine obere Schranke für unwahrscheinlich drastische Änderungen. Die tatsächliche Klimaänderung sollte innerhalb dieser Spanne liegen.

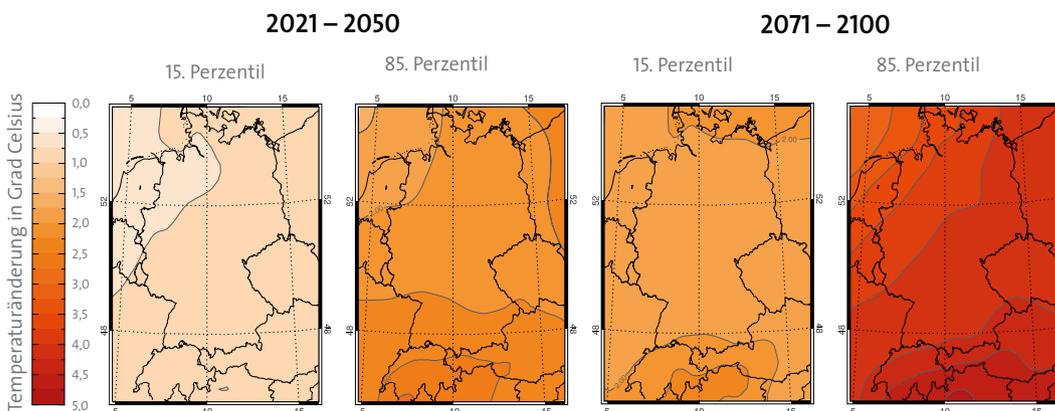
Das 15. Perzentil als untere Schwelle beschreibt Effekte, welche nicht größer als diejenigen sind, die sich aus mindestens 15 Prozent der Projektionen ergeben. Bei 85 Prozent der Simulationen fallen die Änderungen dagegen stärker aus.

An der oberen Grenze, dem 85. Perzentil, verhält es sich genau umgekehrt: Es umfasst alle Änderungen, die höchstens gleich dem sind, was 85 Prozent der Projektionen vorhersagen; nur 15 Prozent der Modelle ergeben noch stärkere Effekte. Der Bereich zwischen den beiden Schwellenwerten deckt somit 70 Prozent der Ergebnisse des betrachteten Ensembles ab.

Für die Endpunkte dieser Spanne stellt der Deutsche Klimaatlas (www.dwd.de/klimaatlas) auf der Basis des erwähnten Ensembles von 19 regionalen Klimaprojektionen dar, wie sich das Klima in der Bundesrepublik gegenüber dem Zeitraum zwischen 1961 und 1990 voraussichtlich ändern wird. Demnach wird die Lufttemperatur im Jahresmittel bis 2050 gemäß dem 15. Perzentil um mindestens ein halbes Grad steigen (Bild unten). Laut 85. Perzentil beträgt die Zunahme dagegen zwei Grad – in Süddeutschland etwas mehr und in Norddeutschland etwas weniger. Für den Zeitraum zwischen 2071 und 2100 ist für die gesamte Bundesrepublik mindestens eine Erhöhung um 1,5 Grad zu erwarten (15. Perzentil). Der Anstieg kann aber sogar 3,5 Grad in Norddeutschland und 4 in Süddeutschland betragen (85. Perzentil). Hier zu Lande wird es also erheblich wärmer.

Beim Niederschlag ist zwischen den Jahreszeiten zu differenzieren. Die Winter dürften bis zum Ende des Jahrhunderts in ganz Deutschland im Mittel feuchter, die Sommer dagegen trockener ausfallen. Gemäß den ausgewerteten Klimaprojektionen werden die mittleren Regenfälle in der heißen Jahreszeit bis 2050 erst einmal noch relativ wenig, im letzten Quartal dann aber leicht bis mäßig zurückgehen – um bis zu 20 Prozent (Bild rechts oben). In der ersten Jahrhunderthälfte könnten die Niederschlagsmengen während der Monate Juni, Juli und August in einigen Regionen auch fast unverändert bleiben. Im Winter ist dagegen mit einer Zunahme um bis zu 10 Prozent in naher und bis zu 15 Prozent in ferner Zukunft zu rechnen.

Bis Ende des Jahrhunderts werden die Obstbäume 15 Tage früher blühen! Damit vergrößert sich die Gefahr durch Spätfröste



Regionale Klimamodelle sagen für Deutschland einen Anstieg der Lufttemperatur im Jahresmittel voraus. Das 15. Perzentil und das 85. Perzentil grenzen den Bereich der wahrscheinlichsten Werte ein.

Eine besonders wichtige Frage lautet, ob durch den Klimawandel ungewöhnliche Witterungsbedingungen zunehmen. Viele Bereiche unserer Gesellschaft sind ausgesprochen anfällig gegenüber Wetterextremen und ihren unmittelbaren Folgen. Das gilt etwa für den Bevölkerungsschutz oder die Versicherungswirtschaft. Deshalb ist es von großer Bedeutung, möglichst frühzeitig zu erfahren, ob es durch den globalen Temperaturanstieg öfter zu Hitzewellen, Starkniederschlägen und schweren Stürmen kommt.

Erste Auswertungen eines Teilensembles der insgesamt zur Verfügung stehenden regionalen Klimaprojektionen für Deutschland bestätigen das. Ziemlich eindeutig ist das Bild bei der Temperatur. Hitzephasen dürften sehr viel öfter auftreten und länger andauern. Den vorliegenden Simulationen zufolge wird die jährliche Anzahl der Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius in den kommenden vier Jahrzehnten in Norddeutschland um bis zu 10 und in Süddeutschland um bis zu 15 steigen. Das entspricht annähernd einer Verdopplung gegenüber der aktuell gültigen Klimanormalperiode von 1961–1990. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte sich die Zahl der heißen Tage in Norddeutschland sogar um bis zu 15 und in Süddeutschland um bis zu 35 Tage erhöhen – mehr als eine Verdreifachung des bisherigen Wertes.

Auch Starkniederschläge – hier definiert als Niederschlagsereignisse oberhalb eines vorab festgelegten, jedoch regional unterschiedlichen Schwellenwertes – werden voraussichtlich öfter auftreten. Das gilt vor allem für die kalte

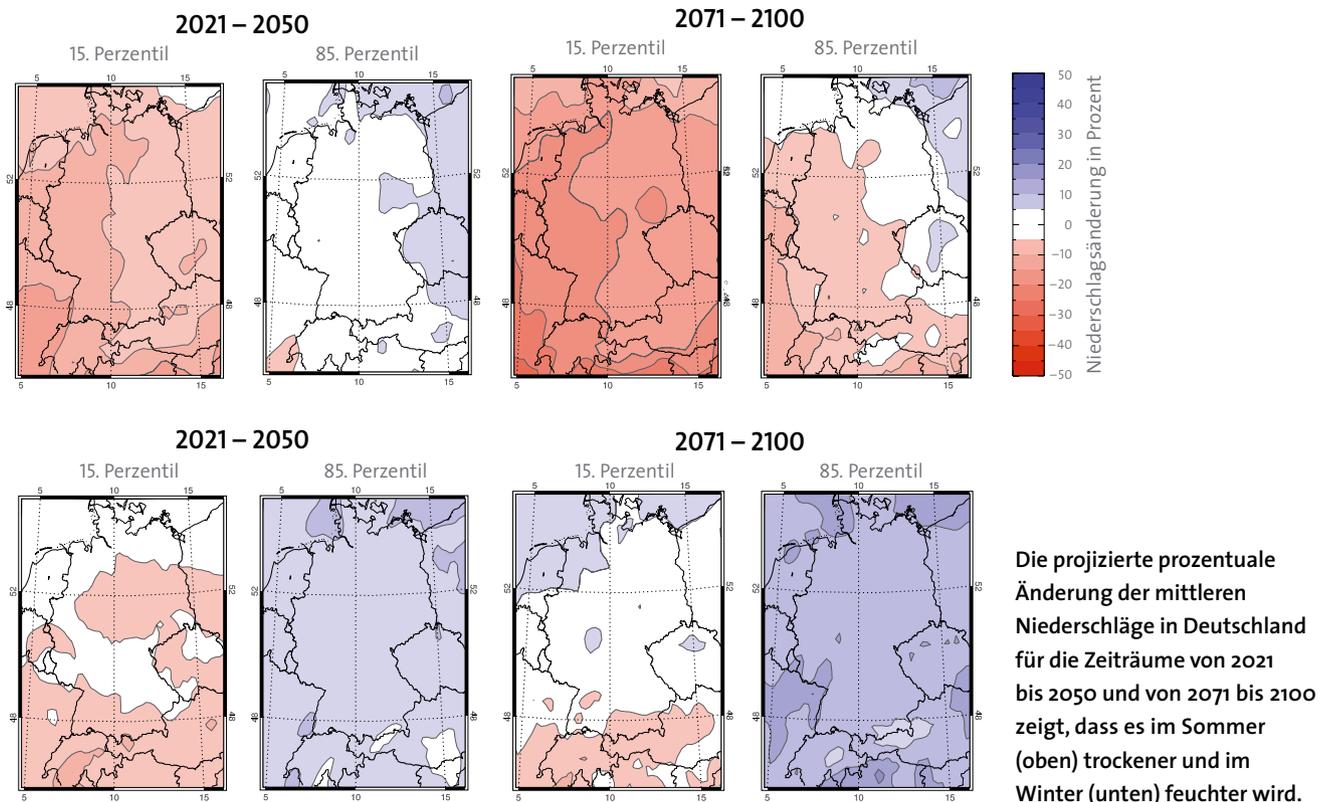
Jahreszeit, wo sich ihre Zahl in den küstennahen Regionen bis 2100 gegenüber dem Zeitraum von 1961 bis 1990 annähernd verdoppeln dürfte. In den übrigen Regionen bleibt es vermutlich bei einem moderaten Anstieg um bis zu 50 Prozent. Nur im Alpenbereich scheint sich an der Häufigkeit der Starkniederschläge wenig zu ändern.

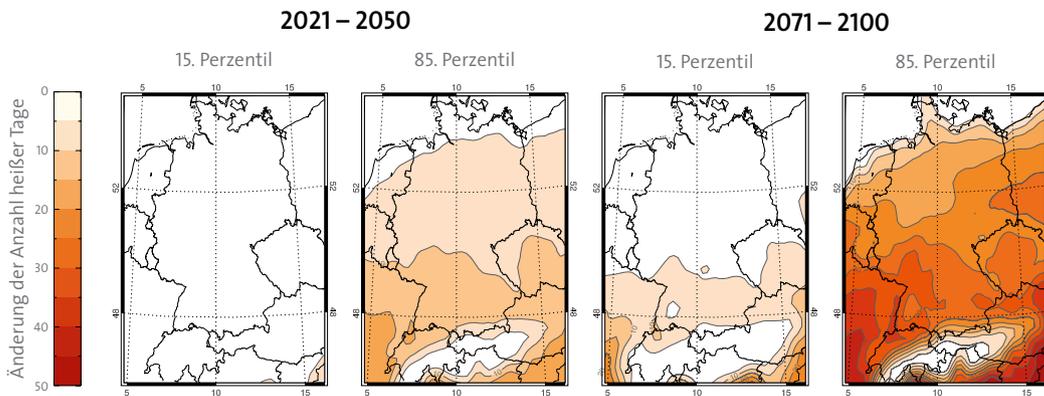
Unliebsame Folgen für die Landwirtschaft

Für die Sommermonate sagt die Mehrzahl der ausgewerteten Klimaprojektionen entgegen dem allgemeinen Trend zu größerer Trockenheit ebenfalls mehr heftige Regenfälle voraus. Das würde zum Beispiel die Landwirtschaft treffen. Schließlich gehört sie zu den am stärksten vom Wetter abhängigen Wirtschaftszweigen: Knapp 80 Prozent der Schwankungen bei den Ernteerträgen in Deutschland lassen sich auf den Witterungsverlauf zurückführen.

Durch die höhere Lufttemperatur wird sich auch der Vegetationsbeginn verschieben. Auswertungen von 21 regionalen Klimaprojektionen lassen erwarten, dass er bis zum Ende des Jahrhunderts im Mittel etwa 15 Tage früher stattfindet. Damit vergrößert sich die von Spätfrösten ausgehende Gefahr zum Beispiel für die Obstblüte.

Der Klimawandel betrifft nicht nur die Landwirtschaft. Er wird sich auch auf viele andere Bereiche auswirken, namentlich das Bauwesen. Dabei geht es vor allem um die Witterungsbeanspruchung von Gebäuden. Da diese meist über viele Jahrzehnte Bestand haben, ist bei ihrer Konzeption und





Den Projektionen regionaler Klimamodelle zufolge wird sich in Deutschland die Anzahl heißer Tage, an denen die Temperatur mindestens 30 Grad erreicht, bis zur Mitte des Jahrhunderts verdoppeln und bis 2100 sogar verdreifachen.

Ausführung die zukünftige Entwicklung des Klimas zu berücksichtigen. Beispielsweise erfordern steigende Lufttemperaturen eine bessere Isolierung bei Dächern, Wänden und Fenstern sowie effizientere Methoden zur Klimatisierung des Gebäudeinneren.

Beeinflusst wird auch die Möglichkeit des Bauens selbst – hier allerdings zum Positiven. So dürfte sich die Zahl der Tage mit »erschwerter Bautätigkeit« wegen schlechter Witterung verringern – einer Auswertung der Klimaprojektionen zufolge bis Ende des Jahrhunderts um bis zu zehn Tage pro Jahr. Am stärksten profitieren werden wohl der Osten und Süden Deutschlands.

Langfristige Vorhersagen der Witterung

Neben den langfristigen Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert gewinnen kurzfristigere Prognosen für die Politik- und Wirtschaftsplanung immer größere Bedeutung. Jenseits der Wettervorhersage für die nächsten Tage klafft bisher im Zeitbereich zwischen etwa zehn Tagen und wenigen Jahrzehnten eine große Lücke. Sie zu schließen ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt der Meteorologen. Zwar gelingt es nicht, für diesen Vorhersagehorizont das genaue Wetter im Einzelnen zu berechnen. Immerhin aber sind Aussagen zur Häufigkeit verschiedener Wetterlagen möglich. Daraus lässt sich wiederum der grundsätzliche Witterungscharakter für eine bestimmte Region ableiten. Solche Abschätzungen sind sehr wichtig für Anpassungsstrategien, Risikomanagement und die Planung von Infrastrukturmaßnahmen.

Die erreichbare Genauigkeit nimmt natürlich ab, je weiter man in die Zukunft blickt. Bei der Monats- und Jahreszeitemvorhersage gelingt es noch bis zu einem gewissen Grad, den tatsächlichen Witterungsverlauf zu erfassen. So lassen sich für einige meteorologische Messgrößen wie die Temperatur oder den Niederschlag die mutmaßlichen Abweichungen von den normalen Werten für eine Jahreszeit inzwischen im Voraus bestimmen. Bei der Monatsvorhersage geschieht das typischerweise für einzelne Kalenderwochen, im Falle saisonaler Prognosen zumeist auf Basis von Kalendermonaten.

Klimasimulationen erlauben dagegen nur, die über längere Zeiträume hinweg vorherrschenden großräumigen atmosphärischen Strömungsverhältnisse zu berechnen. Doch auch daraus lassen sich zumindest qualitative Aussagen über die Witterungsverhältnisse für Regionen unterhalb der Größenordnung ganzer Kontinente ableiten. Es ist also prinzipiell möglich vorherzusagen, ob etwa in Deutschland in einzelnen Jahren besonders kalte Winter oder besonders heiße Sommer auftreten. Ebenso besteht die Hoffnung, Dürreperioden oder großräumige Flutereignisse frühzeitig zu erkennen. Doch gleichgültig, ob die Vorhersage das nächste Vierteljahr oder Jahrzehnt betrifft – immer handelt es sich um eine reine Wahrscheinlichkeitsaussage. ~

DIE AUTOREN



Paul Becker (links) ist Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Offenbach und leitet dort

den Geschäftsbereich Klima und Umwelt. **Thomas Deutschländer** (Mitte) und **Florian Imbery** sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung Klima- und Umweltberatung des DWD und Experten für statistische beziehungsweise hydrologische Fragestellungen.

QUELLEN

Mitchell, J.F.B., van der Linden, P. (Hg.): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project. Met Office Hadley Centre, Exeter 2009
Moss, R.H. et al.: The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. In: Nature 463, S. 747–756, 2010
Nakicenovic, N., Swart, R. (Hg.): Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2000

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142726