

Mathematik in Wetter- und Klimavorhersage

Wie das Wetter wird, interessiert fast jeden. Scheint die Sonne? Regnet es? Wie hoch steigt das Quecksilber? Die Wettervorhersage beeinflusst, was wir am nächsten Tag anziehen oder unternehmen. Doch die Prognose beeinflusst weitaus mehr. So hängen Flugpläne und Schifffahrtsrouten, aber auch die Planungen in der Landwirtschaft bis zu denen im Katastrophenschutz von Wetter- und Klimavorhersagen ab. Und auch in viele andere Entscheidungen der Wirtschaft und auch Politik reichen sie hinein. Eines ist diesen Prognosen gemein: Sie sind alle auch das Ergebnis umfangreicher mathematischer Modellrechnungen.

Wettervorhersage

Um das zukünftige Wetter vorhersagen zu können, muss man erst das aktuelle kennen. Deshalb werden Daten über Niederschlagsart und -menge, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Temperaturen sowie Windrichtungen und -geschwindigkeiten gesammelt. Ohne Mathematik könnten die Wetterdaten aus aller Welt kaum erfasst und verarbeitet werden. In Deutschland registriert der Deutsche Wetterdienst (DWD) Daten über ein Messnetz mit rund 180 hauptamtlichen und über 2.500 nebenamtlichen Klima- und Niederschlagsstationen. An den hauptamtlichen Stationen werden jede Stunde Messwerte abgelesen, bei den nebenamtlichen nur um 7, 14 und 21 Uhr. Dazu kommen rund 1.500 weitere Beobachtungsstellen nach dem internationalen Standard der Weltorganisation für Meteorologie (WMO). Hier wird zwischen Bodenbeobachtungsstationen zur Datengewinnung an der Erdoberfläche und so genannten aerologischen Stationen unterschieden, welche meteorologische Daten aus der Atmosphäre bis in eine Höhe von rund 30 Kilometern liefern. Diese Informationen sind für die Betrachtung der dreidimensionalen Struktur des Wetters unerlässlich. Mobile Messstationen – Schiffe, driftende Bojen, Flugzeuge – ergänzen die stationären Messungen.

Der DWD sammelt alle Daten zentral im hessischen Offenbach, prüft sie mehrfach, bereitet sie auf und tauscht sie mit den nationalen Wetterdiensten aller Mitgliedsstaaten der WMO aus. Dann gehen die Daten in die Wettervorhersagemodele ein.

Eine Wettervorhersage entsteht nach konkret aufeinanderfolgenden Schritten: Zunächst legen die Meteorologen im Computer ein Dreiecksgitter über die Erdkugel. Dieses reicht in Schichten in die Atmosphäre hinein. Aus dem vorhandenen Datenmaterial werden dann für die Punkte auf dem Gitter unter anderem (Anfangs-)Werte für Temperatur, Feuchte, Druck, Windrichtung und Windgeschwindigkeit ermittelt. Aus diesen Anfangswerten wird (Zeit-)Schritt für (Zeit-)Schritt berechnet, wie sich das Wetter zeitlich in die Zukunft hinein entwickelt. Diese Berechnungen erfolgen mit Hilfe mathematischer Gleichungssysteme, die den Kern des Wettermodells bilden und auf den physikalischen Grundprinzipien der Erhaltung von Masse, Energie und Impuls beruhen.

Das Ergebnis dieser aufwändigen Modellierungs- und Rechenvorgänge nimmt später in den Abendnachrichten gerade mal eine Minute ein. Tatsächlich greifen die Medien nur einen sehr kleinen Teil der durch die modernen Verfahren der Wettervorhersage bereitgestellten Informationen auf. Ein weitaus größerer Teil wird unter anderem vom Luftver-



kehr, von der Seeschifffahrt, der Katastrophenvorsorge sowie der Land- und Forstwirtschaft genutzt.

Vom Wetter zum Klima

Besonders schwierig ist die Vorhersage langfristiger Trends. Wie entwickeln sich Temperaturen, Meereströmungen, Eisbedeckung und Regenfälle in den kommenden Jahrzehnten? Am 12. September 2008 zum Beispiel bestimmten Wissenschaftler des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI) die Eisbedeckung in der Arktis. Sie betrug 4,5 Millionen Quadratkilometer. Dies ist etwas mehr als die niedrigste jemals beobachtete Bedeckung von 4,1 Millionen Quadratkilometern aus dem Jahr 2007. Dennoch sorgen sich Wissenschaftler um die Meereisentwicklung, denn das langjährige Mittel liegt 2,2 Millionen Quadratkilometer höher. Völlig unerwartet kam die Entwicklung jedoch nicht. Eine Modellrechnung im Frühsommer aus dem Alfred-Wegener-Institut hatte gezeigt, dass das Eisminimum 2008 mit fast hundertprozentiger Sicherheit unter dem von 2005 liegen würde.

Ein anderes Beispiel: Klimaforscher des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) warnten kürzlich erneut vor der Gefahr eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs. Selbst eine Halbierung der globalen Treibhausgas-Emissionen bis 2050 berge ein hohes Risiko, dass die globale Mitteltemperatur um mehr als zwei Grad Celsius über vorindustrielles Niveau steige. Und eine Umfrage des PIK unter führenden Klimawissenschaftlern aus dem Forschungsbereich „Atlantische Ozeandynamik“ ergab im vergangenen Jahr, dass sie eine spürbare Veränderung der Wasserzirkulation im Nordatlantik noch in diesem Jahrhundert befürchteten – mit zahlreichen Auswirkungen: Der Meeresspiegel im Nordatlantik würde um bis zu einen Meter steigen, das marine Ökosystem würde gestört und die weltweite Niederschlagsverteilung verändert, so das PIK.

Klimaprognosen werfen – anders als kurzfristige Wettervorhersagen – auch politische Fragen auf, wie zum Beispiel: Wenn sich die Erde erwärmt, ist das dann vom Menschen verursacht oder eine natürliche Erscheinung? Auf welches Klima müssen wir uns in Zukunft einstellen? Wie kann man dem Trend entgegenwirken?

Die Beantwortung dieser Fragen ist so komplex, dass sich Wissenschaftler mehrerer Disziplinen an der Klimaforschung beteiligen. Neben Mathematikern und Meteorologen (den „Physikern der Erdatmosphäre“) gehören auch Biologen, Agrarwissenschaftler, Wirtschaftswissenschaftler, Meeres- und Polarforscher sowie Soziologen dazu. Denn zahlreiche Faktoren und nicht zuletzt das Verhalten des Menschen haben Einfluss auf das Klima und werden gleichzeitig vom Klima beeinflusst.

Zur Prognose des Klimas haben die Forscher Modelle erstellt und entwickeln sie ständig weiter. Heutige Klimamodelle bestehen meist aus mehreren Einzelmodellen, die miteinander gekoppelt sind. Sie bilden die Subsysteme des Klimasystems ab, zum Beispiel die Atmosphäre und den Ozean. Diese beiden gelten zugleich als die wichtigsten Subsysteme, denn in ihnen laufen hochdynamische Zirkulationsprozesse ab, die in komplexer Weise aufeinander einwirken: Ein Atmosphärenmodell muss zahlreiche Parameter abbilden, zum Beispiel Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Windsysteme und Wolken sowie deren Dynamik und deren Wechselwirkungen rund um den Globus. Ein Ozeanmodell er-



fasst unter anderem die Wassertemperatur des Oberflächenwassers und der tieferen Wasserschichten, den Eisen- und Salzgehalt und die Meeresströmungen.

Mathematik als gemeinsame Sprache

Die gemeinsame Grundlage aller Wetter- und Klimamodelle ist die Mathematik. „Für die interdisziplinäre Arbeit brauchen wir einfach eine gemeinsame Sprache, und die präziseste, die wir haben, ist die Mathematik“, sagt Ruprecht Klein, Mathematikprofessor an der Freien Universität Berlin und einer der bedeutendsten Klimaforscher in Deutschland. 2003 erhielt er für seine bahnbrechenden Arbeiten den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die höchstdotierte wissenschaftliche Auszeichnung der Republik. Für Rupert Klein ist die mathematische Grundlagenforschung ein Weg, um die Ideen der einzelnen Wissenschaften zu einer gemeinsamen Theorie zusammenzuführen und so präzisere Wetter- und Klimamodelle zu entwickeln. Denn nur wenn alle relevanten Einflüsse berücksichtigt werden, lassen sich die Simulationen verbessern und noch bessere Vorhersagen machen.

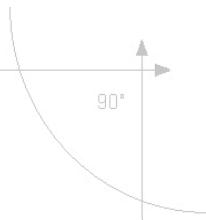
Die Datenmengen und mathematischen Probleme der Meteorologen lassen sich nur mit Hilfe von Computern verarbeiten. „Man kann sicher sagen, dass der Wunsch nach genaueren Wetter- und Klimamodellen die Entwicklung der Großrechner und der Rechenverfahren beschleunigt hat“, sagt Ulrich Trottenberg, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen (SCAI) und Mathematikprofessor an der Universität zu Köln. Deutschlands modernster Klimarechner befindet sich am Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg. Er wird gerade zu einem der leistungsfähigsten Supercomputer für wissenschaftliche Zwecke ausgebaut. Die Wissenschaftler des Klimarechenzentrums erstellen hochkomplexe Modelle, um den Klimawandel und seine Auswirkungen noch genauer vorhersagen zu können.

Jede Innovation in der Computertechnik verlangt die Entwicklung neuer oder die Anpassung bekannter Rechenverfahren. Und jede neue Rechnergeneration eröffnet die Chance, die Wetter- und Klimamodelle weiter zu verfeinern – und so noch genauere Vorhersagen zu treffen.

Mit dem Einsatz von Supercomputern wurde die Mathematik in der Meteorologie immer wichtiger: Die einstige „praktische Wetterkunde“ hat sich im Laufe der Jahre zu einer mathematischen Wissenschaft entwickelt. Viele Mathematiker gehen davon aus, dass Meteorologie und Klimaforschung für die Mathematik eine ähnlich große Rolle spielen wird wie die Physik im 20. Jahrhundert. Deren Erkenntnisse wie die Relativitätstheorie, die Quantenmechanik und die Stringtheorie haben immer neue mathematische Theorien und Erkenntnisse stimuliert.

Mehrgitter- und Mehrskalenverfahren

Eine der wichtigsten mathematischen Methoden in der Wetterforschung ist das so genannte Mehrgitterverfahren. Mit ihm lassen sich komplexe Gleichungssysteme näherungsweise lösen. Das Mehrgitterverfahren setzt bei der Gitterstruktur an, die zur Berechnung von Wettervorhersagen verwendet wird. Das ursprünglich feinmaschige Gitter



wird schrittweise vergröbert. Auf dem weitmaschigsten Netz lassen sich die Gleichungen schnell lösen. Mit ausgeklügelten mathematischen Techniken lassen sich diese Lösungen nun auf die feineren Gitter übertragen – solange, bis auf dem feinsten Gitter eine Näherungslösung für das Ursprungsproblem erreicht ist. Dieses Verfahren scheint kompliziert, ist aber schneller und besser als der direkte Versuch, eine Lösung für das feinmaschige Netz zu finden.

Mit einem ähnlichen System arbeiten die so genannten Mehrskalenverfahren, die seit Mitte der 1990er-Jahre an Bedeutung gewinnen. Sie berechnen die unterschiedlichen Wetterphänomene mit spezialisierten Methoden und kombinieren die Einzelergebnisse dann zu einer übergreifenden Lösung. Gerade in der Meteorologie werden die Mehrgitter- und Mehrskalenverfahren große Fortschritte möglich machen – auch unabhängig von der Leistungssteigerung bei Computern.

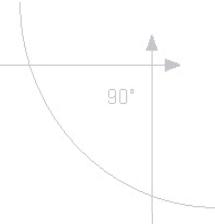
Der Schmetterlingseffekt

Zu den Pionieren der computergestützten Meteorologie zählte der amerikanische Mathematiker und Meteorologe Edward Lorenz, der im April 2008 im Alter von 90 Jahren verstorben ist. Lorenz entdeckte den so genannten Schmetterlingseffekt: Der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien kann theoretisch einen Tornado in Texas auslösen. Anfang der 1960er-Jahre experimentierte Lorenz mit Computersimulationen einfacher Wettermodelle und fand dabei heraus, dass kleinste Änderungen in den Anfangsbedingungen zu großen Verschiebungen beim Wetterverlauf führen können. Lorenz legte damit eine wichtige Grundlage in der Chaos-Theorie. Die Modelle der Chaos-Forschung liefern noch heute wertvolle Ansätze, um Wetterdaten zu interpretieren und die langfristige Vorhersagbarkeit von Wetter und Klima zu erforschen.

Herausforderungen der Zukunft

Der Wunsch, das Wetter zu verstehen, ist alt. Bereits vor etwa 250 Jahren versuchten Wissenschaftler, eine „Wetterformel“ zu finden. 1750 stellte der Göttinger Klimaforscher Tobias Mayer eine erste Gleichung vor. Er ging jedoch von falschen Annahmen aus und hatte Schwierigkeiten, die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre mathematisch zu beschreiben. Dieses Problem ist heute gelöst. Der große Fortschritt – und die große Errungenschaft – der Mathematik während der vergangenen Jahrzehnte besteht eben darin, die Vorgänge in der Erdatmosphäre sehr präzise in mathematische Gleichungen umsetzen zu können.

Um Wetter und Klima zu beschreiben, sind komplexe und vielschichtige Systeme mit partiellen Differentialgleichungen nötig. Die Klimaforscher haben die Vorgänge in der Erdatmosphäre zwar im Prinzip verstanden, aber das dazugehörige mathematische Modell ist viel zu komplex und die Rechnungen sind noch zu aufwändig. Deshalb sind die Mathematiker noch immer auf der Suche nach einem vereinfachten Wetter- und Klimamodell. Gebraucht werden „abgespeckte“ Gleichungen, die noch immer die wesentlichen Eigenschaften der Erdatmosphäre beschreiben, aber leichter zu analysieren und zu berechnen sind.



Problematisch bei der Wettervorhersage ist, dass die relevanten Phänomene so unterschiedlich groß sind – und zwar in Hinblick auf Ort und Zeit. Wolkenformationen bilden sich im Laufe mehrerer Stunden und können sich über tausende Kilometer erstrecken. Ein Gewitter braut sich dagegen innerhalb weniger Minuten zusammen und ist meist auf einen Umkreis von wenigen Kilometern beschränkt. Blitz und Donner sind sogar so „klein“, dass sie selbst durch das engmaschige Netz der Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes „hindurchrutschen“. Beim so genannten lokalen Modell beträgt die Mashesche Weite 2,8 Kilometer (Modell COSMO-DE), was aber immer noch größer ist als der Umfang eines Gewitters.

Möchte man derart unterschiedliche Wetterphänomene in einem mathematischen Modell kombinieren, braucht man für einige der Erscheinungen einfache „Ersatzmodelle“. Sonst wird das Gesamtmodell zu komplex. Dabei schleichen sich aber Ungenauigkeiten ein. Der Mathematiker Rupert Klein forscht unter anderem daran, möglichst gute Ersatzmodelle zu finden und den Fehler, den solche Modelle erzeugen, möglichst präzise abzuschätzen. Für eine schnelle und zuverlässige Wettervorhersage für mehrere Tage bleibt also noch viel zu tun – und für die Klimaprognose der kommenden Jahrzehnte ohnehin.

Ansprechpartner für die Medien

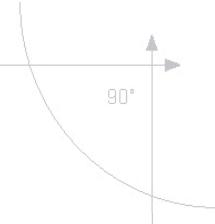
Prof. Geerd-Rüdiger Hoffmann
Leiter des Geschäftsbereichs Technische Infrastruktur und Betrieb
Deutscher Wetterdienst
Tel. 069/8062-2824
E-Mail: geerd-ruediger.hoffmann@dwd.de

Prof. Dr. Rupert Klein
Freie Universität Berlin und Konrad-Zuse-Zentrum Berlin
Tel. 030/838-75414
Fax 030/838-54977
E-Mail: Rupert.Klein@zib.de

Prof. Dr. Sebastian Reich
Universität Potsdam, Institut für Mathematik
Tel. 0331/977-1859
E-Mail: sreich@math.uni-potsdam.de

Prof. Bjorn Stevens
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
Tel. 040/41173-421
E-Mail: bjorn.stevens@zmaw.de

Prof. Dr. Ulrich Trottenberg
Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI
Tel 02241/14-2760
E-Mail: ulrich.trottenberg@scai.fraunhofer.de



Deutsche Institutionen der Wetter- und Klimaforschung (Auswahl)

Deutscher Wetterdienst, Offenbach
Erstellung und Weiterentwicklung von Wettervorhersagen
www.dwd.de

Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg
Klimaprozesse, Wechselwirkungen auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen
www.mpimet.mpg.de/home.html

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Klimafolgenforschung: ökologische, geophysikalische und sozioökonomische Aspekte
globaler Umweltveränderungen
www.pik-potsdam.de/

Alfred-Wegener-Institut (AWI) Bremerhaven
Polarforschung und Nordseeforschung; Schwerpunkte der Forschung: Ozean-
Atmosphäre-Koppelung, marines Ökosystem, Klimawandel
www.awi.de/de/

Mehr erfahren Sie auch unter www.jahr-der-mathematik.de

Der Abdruck ist honorarfrei. Ein Belegexemplar wird erbeten.
Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an:

Redaktionsbüro Jahr der Mathematik

Steffi Würzig
Friedrichstr. 78
10117 Berlin
T. 030/70 01 86-797
F. 030/70 01 86-909
wuerzig@jahr-der-mathematik.de
www.jahr-der-mathematik.de

Julia Kranz
Friedrichstr. 78
10117 Berlin
T. 030/70 01 86-741
F. 030/70 01 86-909
kranz@jahr-der-mathematik.de
www.jahr-der-mathematik.de