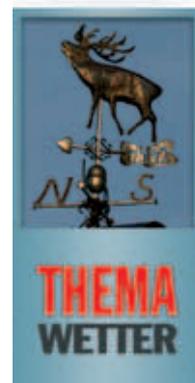


## Moderne Wettervorhersage <sup>2</sup>



*Wetter und Wettervorhersage erwecken unser aller Interesse, private und kommerzielle Interessen werden eng mit der Wetterprognose verknüpft. Mittlerweile wird die Erwartungshaltung im Wetterbericht laufend höher, auf die Stunde genau will man das Eintreffen des Regens wissen und rechtzeitig vor möglichen Unwettern gewarnt werden. Auch für den Jäger ist der Wetterbericht von größter Bedeutung. – Teil 2.*



**Dr. Herbert Gmoser**  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

**A**m Anfang jeder praktischen Wettervorhersage steht die Kenntnis des atmosphärischen Zustands in der ganzen Vielfalt seiner Elemente und in ihrer dreidimensionalen Verteilung. Diese Phase bezeichnet man als Diagnose. Gefragt ist der Istzustand des momentanen Wetters in seiner räumlichen Ausdehnung.

Das Vorhersagesystem der Simulation der Atmosphäre besteht aus zwei Teilen: einem Prognosemodell und einem System der Datenassimilation. Das Prognosemodell versucht mit seiner Modellatmosphäre, die reale Atmosphäre und seine Abläufe möglichst exakt zu beschreiben. Die Datenassimilation stellt die genaue Kenntnis des Anfangszustands bereit.

### Prognosemodell

Das Prognosemodell umfasst die physikalischen Gleichungen zur Berechnung des künftigen Wetters. Beschrieben werden der zeitabhängige Zusammenhang zwischen Luftdruck, Temperatur und Luftdichte, die Beziehungen zwischen Luftdichte und Änderung des Luftdrucks mit der Höhe, die Beziehung zwischen der Bodenreibung und dem Wind sowie

der Einfluss der Sonne und des Wasserdampfs. Die Berechnungen erfolgen entlang der rund um den Globus horizontal und vertikal definierten Gitterpunkte.

### Datenassimilation

Die Assimilation (= Zusammenführung aller Messergebnisse) legt aufgrund der beobachteten Daten den Anfangszustand der Atmosphäre möglichst fehlerfrei für das Prognosemodell fest, damit dieses in

die Zukunft rechnen kann. Erfasst werden alle meteorologisch relevanten Daten, wie sie zunächst räumlich unterschiedlich zur Verfügung stehen. Diese Datenassimilation umfasst auch eine Zuverlässigkeitsprüfung und eine Qualitätskontrolle der Meldungen untereinander. Das Problem, das sich dabei stellt, liegt in den verschiedenen Zeitpunkten der jeweiligen Messdaten, die alle eingebunden werden sollen. Das derzeitige Verfahren heißt 4D-Var (= vierdimensionale Variations-

**Ergebnis einer Modellvorhersage für Europa, 10-Tages-Vorhersage für den Bodendruck**

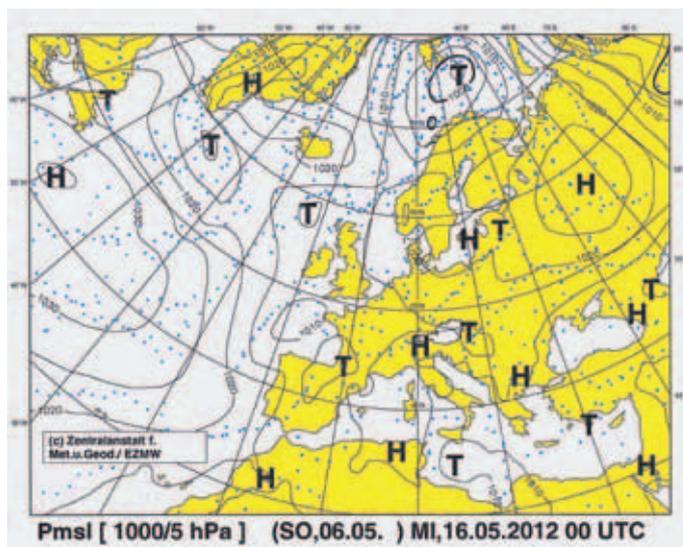


Foto: www.ecmwf.int

analyse), es vereint gleichsam in programmierter Form das Wissen und die Erfahrung der fähigsten Meteorologen auf dem Gebiet der Analyse. Interessant an diesem Verfahren ist, dass darüber hinaus die datenmäßig erfasste Ausgangssituation mit vorhergesagten Werten in Beziehung gebracht wird. Diesen Prozess bezeichnet man als prognostische Qualitätskontrolle der Anfangsbedingungen. Durch die laufende Einbindung neuer Mengen an Satellitendaten wird die 4D-Var immer weiter ausgebaut. Hier liegt ein großes Hoffungsgebiet in der Verbesserung der Wettervorhersage. Ziel der Datenassimilation ist es, eine regelmäßige, physikalisch stimmige Beschreibung des aktuellen Zustands der Atmosphäre zu bekommen, die auf unregelmäßig verteilten und mitunter auch fehlerhaften Messungen beruht.

## Vorhersagepraxis

Die durch das Simulationsmodell vorhergesagten Zustände der Atmosphäre zu interpretieren, ist die wichtigste Aufgabe des Vorhersagemeteorologen. Schrittweise werden die vorhergesagten Wetterwerte zeitlich verfolgt und zusammengefügt. Diese Vorgangsweise erfordert ein hohes Maß an Ausbildung und Training. Der Meteorologe lässt sich quasi vom Vorhersagemodell mit der physikalischen Welt der meteorologisch relevanten Atmosphäre in die Zukunft tragen. Die Interpretation der Atmosphäre soll mög-

lichst objektiv erfolgen. Auch statistische Größen fließen mit ein. Die subjektive Interpretation des Meteorologen soll mehr und mehr in den Hintergrund treten. Die Erfahrung des Meteorologen muss aber dort Platz greifen, wo das Vorhersagemodell aufgrund seiner zu geringen Auflösung in der Berechnung nicht ausreichende oder nur unzulängliche Informationen liefert. Dies ist beispielsweise derzeit noch der Fall bei kleinräumigen Wetterphänomenen, wie Glatt- eis oder Nebel. Auch die gebirgige Struktur eines Landes muss zum Teil noch mit der Erfahrung des Meteorologen überbrückt werden. So können die Modelle unter anderem noch nicht alle Föhnstriche im Alpenbereich erfassen.

## Punktgenaue Treffsicherheit

Wettervorhersagen für Regionen sind treffsicherer als Prognosen für einen einzelnen Ort. Eine Punktprognose birgt immer die Unsicherheit im zeitlichen Ablauf. Der angekündigte Sonnenschein kann beispielsweise erst einige Stunden später eintreffen. Auch eine örtliche Unsicherheit ist gegeben. Ein Gewitter muss sich nicht unmittelbar über dem Vorhersageort entladen, sondern kann in einiger Entfernung davon Unwettercharakter annehmen. Der Begriff „punktgenau“ ist eher symbolisch zu verstehen. Werbetechnisch ist die Vermarktung einer „punktgenauen“ Wetterprognose eine strategische Vorgangsweise. Den-

noch bleibt eine genaue Punktprognose das Ziel. Mit hohem Rechenaufwand wird versucht, präzise kleinräumige Prognosen zu erstellen. Die Ergebnisse dazu sind vielversprechend.

Eine Vorhersage für beliebig lange Zeit im Voraus ist unmöglich, egal mit welcher Methode, und auch dann nicht, wenn der gegenwärtige Zustand mit dem besten Diagnoseverfahren bekannt wäre. Grund dafür sind die komplexen, nichtlinearen Gleichungssysteme im Prognosemodell, die das Wetter beschreiben. Diese Nichtlinearität im System ist schuld, dass ab einem gewissen Zeitpunkt das Ergebnis eines Simulationsmodells nahezu unbrauchbar wird. In der Meteorologie spricht man von einem „vorherbestimmten“ Chaos.

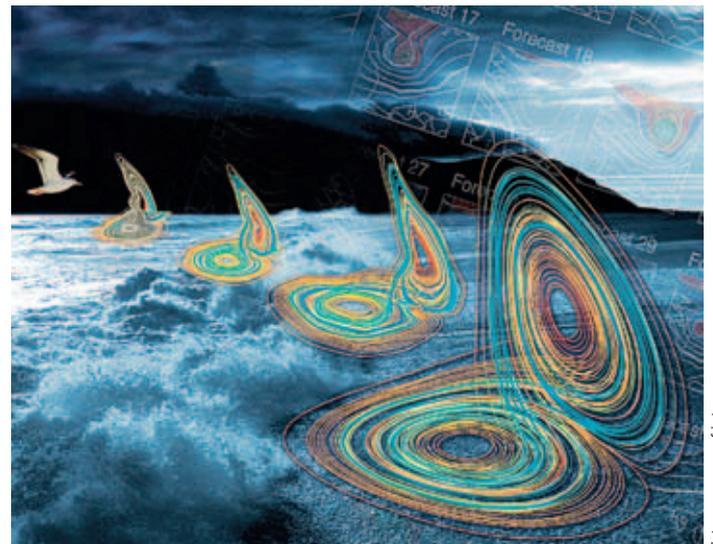
## Chaos im Wetter

Die Vorhersagemodelle werden das Wetter niemals exakt vorhersagen können. Das verhindert eine fundamentale Eigenschaft der Atmosphäre, deren physikalisches Innenleben ist nämlich chaotisch. Das Chaos im Wetter sorgt dafür, dass schon kleinste Schwankungen in den Anfangsdaten einer Wetterberechnung zu völlig verschiedenen Vorhersagen für die nächsten Stunden oder Tage führen können. Deshalb müssen die Beobachtungsdaten sehr genau geprüft werden, bevor diese in das Modell Eingang finden. Messfehler und Ungenauigkeiten können die Prognose schnell in eine völlig falsche

### Produkt einer gewichteten Interpretation



### Chaosmodell nach Edward Lorenz



Richtung laufen lassen. Der Chaosanteil im Wetter wird auch bei verbesserter Beobachtungstechnik und leistungsfähigen Vorhersagemodellen immer die Gefahr einer dramatischen Fehlprognose in sich bergen. Freundlicherweise ist dies immer seltener der Fall. Trotz aller chaotischen Einflüsse sind die Wettervorhersagen in den letzten Jahren immer zuverlässiger geworden. Eine 6-tägige Prognose hat heute die gleiche Zuverlässigkeit wie eine 24-stündige im Jahr 1968. Bei einer 3-tägigen Prognose stimmen heute 9 von 10 Vorhersagen.

Den chaotischen Zustand des Wetters beherrschen zu können, ist mithilfe der Statistik möglich. Statistische Gesetze bringen Ordnung in den Zufall. Das einzelne Ereignis ist nicht mehr genau vorhersagbar, wohl aber die schwankende Wahrscheinlichkeit seines Eintreffens. Unschwer ist zu erkennen, dass sich das vorherbestimmbare Gesetz als Spezial- oder Grenzfall des umfassenden statistischen Gesetzes erweist. Das Mögliche wird vom Unmöglichen geschieden, der Zufall, die Willkür, das Chaos also in mehr oder weniger genau anzugebende Schranken verwiesen. Die Beurteilung darüber erfordert vom Meteorologen ein hohes Maß an objektiver Interpretation. Die Entwicklung der Theorie vom Chaos im Wetter begann, als der amerikanische Meteorologe und Mathematiker Edward Lorenz 1963 bei einer Computerberechnung des Wetters entdeckte, dass schon kleinste Veränderungen in den Eingabedaten zu völlig verschiedenen Voraus-

sagen des Wetters führten. Bildlich gesprochen kommt er zur Schlussfolgerung, dass schon der Flügelschlag eines Schmetterlings am Amazonas einen Wetterumsturz in Europa auslösen kann. Diese Wetterumstellung aus einem Chaos vorauszusagen, ist die Herausforderung an die Meteorologie. Dank der Anwendung der Chaostheorie und vernetzter Computersysteme, die zusammen viele Milliarden von Rechenoperationen pro Sekunde durchführen können, sind die Meteorologen heute in der Lage, trotz chaotischer Anfangszustände Prognosen zu machen. Die Abbildung (siehe Seite 11) illustriert das Chaosmodell von Edward Lorenz und zeigt, wie die Vorhersagbarkeit von den Anfangsbedingungen abhängt.

Ein markantes Beispiel für eine solche chaotische Wetterlage war das Sturmtief „Lothar“ zu Weihnachten 1999. Der Flügelschlag eines Schmetterlings kann in mehr als 4.000 km Entfernung in Europa viele Menschenleben kosten und Sachschäden in Milliardenhöhe verursachen.

## Verschiedene Methoden

Einen praktikablen Ausweg aus dieser Chaos-Misere in der Wettervorhersage weist uns die sogenannte bedingte „Monte-Carlo-Methode“. Es handelt sich dabei nicht um unendlich viele Lösungen in der Simulation der Atmosphäre, sondern um einen eingeschränkten Lösungsumfang. Es können nur be-

stimmte Felder im Anfangszustand aufgrund der noch immer zu geringen Rechnerkapazitäten Berücksichtigung finden. In der Meteorologie bezeichnen wir dieses Verfahren als Ensemble-Vorhersage-System. Ensemble-Vorhersagen bilden einen wesentlichen Bestandteil in der Wettervorhersage zur Abschätzung der Prognoseverlässlichkeit. Ensemble-Vorhersagen sind Prognosen über die Unsicherheit des künftigen Wetterzustands. Die abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten können quantifiziert werden. Das größte Problem dabei ist die Definition der unterschiedlichen Anfangsbedingungen. Mit diesem hochinteressanten „Monte-Carlo-Ansatz“ verfügen die Meteorologen nun über ein Instrument, mit dem sich innerhalb gewisser Toleranzen eine praktische Grenze der Vorhersagbarkeit bestimmen lässt. Die Methode erlaubt eine Aussage über die Vorhersagegüte des Prognosemodells, das heißt wie sicher die Aussage des Prognosemodells ist.

Die Grundidee dieser sogenannten bedingten (= eingeeengten) „Monte-Carlo-Methode“ versucht seit Anfang der 1990er-Jahre mit einem „probabilistischen“ Ansatz (= wahrscheinlichste Lösung) die gegenwärtigen Grenzen brauchbarer Prognoseinformationen unter Angabe von Wahrscheinlichkeitsabschätzungen zu erweitern. Ziel ist es, eine Aussage über die Vorhersagbarkeit zu erhalten. Mit diesen Überlegungen wird neben dem operativen (= routinemäßigen) Vorhersagemodell der Atmosphäre ein Ensemble von 51 Vorhersagen nach der Art einer „Monte-Carlo-Methode“ mit verschiedenen Ausgangslagen bzw. Randbedingungen gerechnet (siehe Plumes-Grafik, links).

Die sogenannte „Spaghetti“-Vorhersage ist eine weitere Möglichkeit, Ensemble-Vorhersagen in ihrer Darstellung zur Abschätzung der Unsicherheit des künftigen Wetterzustands zu nutzen. Je enger die globalen Vorhersagelinien gebündelt sind, desto sicherer kann eine Aussage getroffen werden. Je weiter diese auseinanderlaufen, desto größer zeigt sich die Unsicherheit einer Wetteraussage. Das sogenannte Chaos im Wetter wird dabei deutlich.

ECMWF-Rauchwolken – (Plumes-)Grafik für Wien

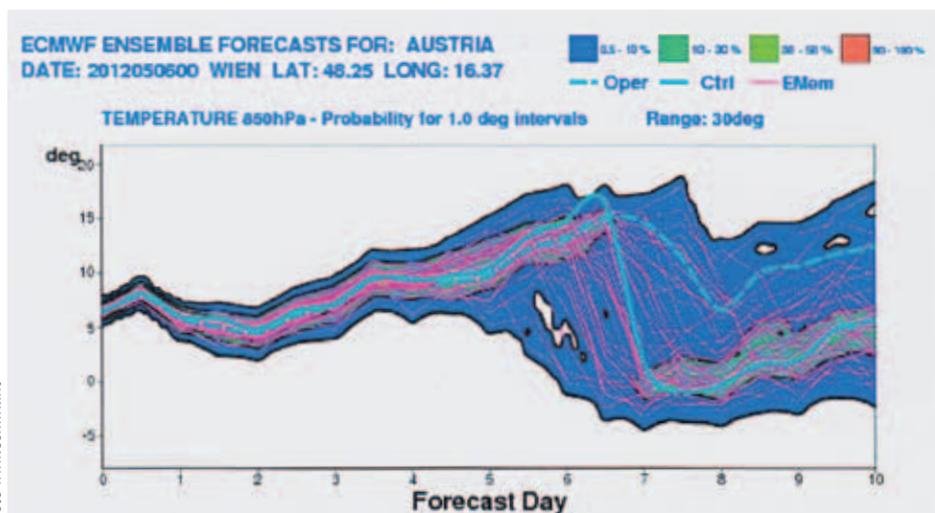
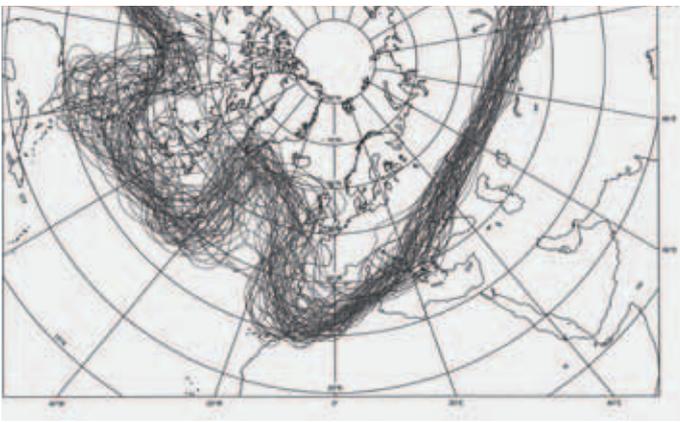


Foto: www.ecmwf.int



**ECMWF-Spaghetti-Vorhersage für 168 Stunden**

## 15-Tages-Prognose der Temperatur

Reiht man den Median (= Zentralwert) aus den Ensemblevorhersagen pro Tag im zeitlichen Ablauf zu einer Kurve, so entstehen die bekannten Temperaturtrendvorhersagen im TV und in den Medien. Derzeit besitzt das Modell zur Berechnung der Ensemblevorhersage in unseren Breiten eine Auflösung (= Gitterpunkt-Abstand) von 31 km. Künftig sollen noch höher aufgelöste Ensemble-Rechnungen nach der „bedingten“ Monte-Carlo-Methode die Möglichkeit schaffen, diese Unsicherheit eines vorhergesagten Wetterzustands besser zu quantifizieren. Dies ist insbesondere im Vorfeld von Unwetterszenarien für mögliche Schadensereignisse von großer Bedeutung. Auf dieser Basis arbeiten heute einige Wetterwarnsysteme, um das staatliche Krisenmanagement, die nationalen Warnzentralen – in Österreich die Landeswarnzentralen –, aber auch die Allgemeinheit vorbereitend über mögliche wetterbedingte Gefahren zu informieren. Es bedeuten:

grün = keine Gefahr, gelb = potenzielle Gefahr, orange = Gefahr, rot = extreme Gefahr.

## Wetterprognosen und Wettertrend

Unter diesen bereits genannten Voraussetzungen werden Wettervorhersagen im praktischen Wetterdienst für eine Woche und als Wettertrend bis zum vierzehnten Vorhersage-tag abgefasst. Eine 24-stündige Vorhersage weist im Durchschnitt 95 % Treffsicherheit auf. Die Vorhersagegenauigkeit fällt mit jedem weiteren Tag. Am achten Vorhersage-tag liegt immerhin noch eine Vorhersagegüte im Durchschnitt um 60 % und mehr vor. Darüber hinaus sind nur noch Wettertrends zu formulieren. Hier ist die Leistung der Vorhersage nur noch mit Wahrscheinlichkeitsangaben nach einem Ensemble-system zu fassen. Überschreitet man die Vorhersagezeiträume von Vorhersagemodellen, kann nur noch das Klima eine Antwort liefern. Eine derartige Antwort mit statistischen Methoden greift auf das

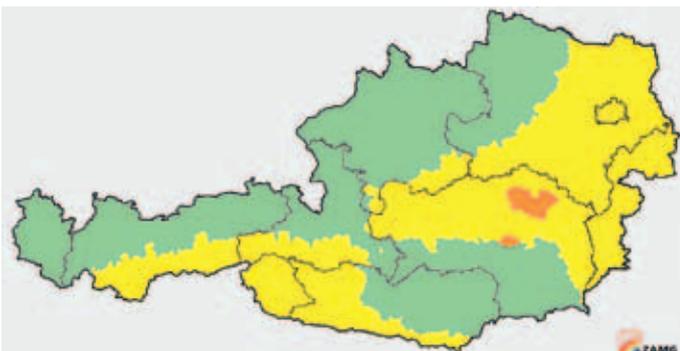
Gedächtnis der Natur zurück und ist weitestgehend eine gemittelte Aussage. Eine solche Aussage ist mit der klassischen Wettervorhersage auf der Basis physikalischer, meteorologischer Berechnungen nicht vergleichbar.

Am Ende der Kette aus Wetterbeobachtung und Wettersimulation steht die uns vertraute Wettervorhersage. Verantwortlich dafür sind die Meteorologen in der Wettervorhersage. Auf ihren Computerbildschirmen fließen die Daten aus den verschiedenen Wetterbeobachtungssystemen und der Wettervorhersagemodelle zusammen. Beispielsweise laufen alle 15 Minuten neue Satellitenbeobachtungen ein (für spezielle Anwendungen sind auch 5-minütige Satellitendaten zur Hand) sowie die Daten des Wetterradars alle 5 Minuten. Die Beobachtungsdaten weltweit stehen 3- bzw. 6-stündig zur Verfügung. Die Beobachtungsdaten aus dem österreichischen Messnetz stehen alle 10 Minuten bereit. Die Meteorologen vergleichen diese Beobachtungen mit den Computerprognosen der Vorhersagemodelle. Man spricht von Monitoring (= Überwachen) der Simulationsergebnisse der Atmosphäre. Es können diese Simulationen von den aktuellen Beobachtungen abweichen. Dann muss der langjährig geschulte Meteorologe die Lage beurteilen und sich für die möglichst „wahre“ Vorhersage entscheiden, die in der Folge eher in einer allgemein gehaltenen und weniger detaillierten Wetterprognose ihren Niederschlag findet.

*Die Teile 3 und 4 folgen in den kommenden Ausgaben.*

**Literatur:** Eine Literaturliste kann in der Redaktion angefordert werden.

**Wetterwarnung auf der Website der ZAMG (www.zamg.ac.at)**



Fotos: www.zamg.ac.at

**Das automatische Stationsnetz der ZAMG mit über 260 Stationen liefert alle 10 Minuten Wetterdaten in die Wetterzentrale**

