



**Messen-Berechnen-Interpretieren**  
*Wie entsteht  
eine Wettervorhersage?*





## *Die Lehre von den Himmelserscheinungen*

Seit Urzeiten beobachten wir Menschen das Wetter. Vor allem Klimakatastrophen haben sich in unser kulturelles Gedächtnis eingegraben: So spielen zum Beispiel große Fluten in den Schöpfungsmythen vieler Völker eine zentrale Rolle. Ein solches Naturdrama muss sich auch in Vorderasien abgespielt haben - es ging als Sintflut in die Bibel ein. Auch das über dreitausend Jahre alte Gilgamesch-Epos der Sumerer berichtet: „Sechs Tage und sieben Nächte lang gehen Wind und Wetter, Sturm und Sintflut.“

Das erste richtige Lehrbuch der Wetterkunde schrieb der Grieche Aristoteles (384–322 v. Chr.) um 350 vor Christus. Er nannte es „Meteorologica“, also die „Lehre von den Himmelserscheinungen“. Aristoteles beschrieb darin nicht nur das Wetter, sondern auch

Kometen und andere Ereignisse am Himmel. Fast 2000 Jahre lang blieb es das fundamentale Werk der Meteorologie und prägte viele Fachwörter, die heute noch verwendet werden, zum Beispiel „Trombe“ für „Windhose“ oder „Taifun“ für „Wirbelsturm“.

Bis über das Mittelalter hinaus bestand die Wetterkunde aus Beschreibungen und Bauernregeln. Den Grundstein der modernen Meteorologie legten die großen Entdecker, als sie auf ihren Seereisen in Klimazonen vorstießen, die ihnen unbekannt waren. Den Pionieren fehlten jedoch noch die Messinstrumente, um ihre Beobachtungen in präzise, vergleichbare Daten zu fassen. Seit der Antike gab es nur die Wetterfahne zur Bestimmung der Windrichtung und den Regenmesser.



# Messinstrumente für die Wetterküche

Das Jahr 1592 brachte mit der Erfindung des Thermometers durch den berühmten Physiker Galileo Galilei einen wichtigen Fortschritt. Dessen Schüler Evangelista Torricelli baute dann 1643 das erste Barometer. Diese beiden Instrumente konnten erstmals die Temperatur und den Luftdruck messen – und damit zwei wichtige physikalische Größen der Wetterküche. Mit ihnen gewannen die Forscher ein viel tieferes Wissen über die Vorgänge in der Atmosphäre. So wies der französische Physiker Blaise Pascal 1648 nach, dass der Luftdruck mit der Höhe abnimmt: Sein Schwager hatte den 1465 Meter hohen Puy de Dôme mit einem Barometer bestiegen.

Allmählich erkannten die Wissenschaftler, dass das Wetter von großräumigen atmosphärischen Prozessen beeinflusst wird. Um sie genauer untersuchen zu können, mussten sie also ausgedehnte Beobachtungsnetze aufbauen. 1654 richtete der toskanische Adlige Großherzog Ferdinand II ein erstes solches Netz von Wetterstationen ein, das bis 1670 in Betrieb war.

Auch in Deutschland gab es mehrere Anläufe. 1780 begann die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft schließlich mit dem Aufbau eines Beobachtungsnetzes, das zum Vorbild aller modernen Netze wurde.

An jeder Station wurden mit gleichen Instrumenten standardisierte Messungen durchgeführt. Dabei war der Zeitpunkt der Messungen für alle fest vorge-schrieben. Diese „Mannheimer Stunden“ (7, 14 und 21 Uhr mittlerer Ortszeit) kennen die Meteorologen noch heute. Benannt sind sie nach dem Ort, an dem

die „Societas Meteorologica Palatina“, wie sich die Gesellschaft zeitgemäß in lateinischer Sprache nannte, ihren Sitz hatte. Das Netz war bis 1795 in Betrieb und umfasste schließlich 39 Stationen. Sie verteilten sich rund um den Globus von Nordamerika über Grönland, Nord- und Mitteleuropa bis nach Russland.

Solch ein die Welt umspannendes Beobachtungsnetz war der erste Schritt zur modernen Meteorologie. Um ein möglichst aktuelles Bild der großräumigen Wetterlage zu erhalten, müssen die Daten der Wetterstationen jedoch zuverlässig und schnell in eine zentrale Auswertestelle übermittelt werden. Die Wetterbeobachter des Palatina-Netzes vertrauten ihre Depeschen mit den Messwerten noch Schiffen und kurfürstlichen Postreitern an. Je nach Entfernung trafen ihre Daten also erst nach Wochen oder Monaten in Mannheim ein. So erlaubten sie zwar den Aufbau des ersten globalen Klimaarchivs, von einer aktuellen Wetterkarte oder gar einer zuverlässigen Wettervorhersage konnten die Meteorologen damals jedoch nur träumen.

Die Entwicklung der modernen Meteorologie hing also von den Fortschritten der Kommunikationstechnik ab. Den Durchbruch brachte dann die Erfindung des Morsetelegraphen im Jahr 1832, denn damit konnten erstmals Daten sehr schnell über große Strecken gesendet werden. Das ermöglichte den Meteorologen, tagesaktuelle Wetterkarten zu erstellen: Eine solche Zusammenschau (Synopsis) des Wettergeschehens in einem großen Gebiet machte den Weg zu einer echten Wettervorhersage frei.





## Wagnis Wettervorhersage

Das Wetter vorherzusagen, wagten die Meteorologen erst sehr spät. Das Preußische Meteorologische Institut in Berlin gab sogar bis in die 1920er-Jahre keine Wetterprognosen heraus. Bis dahin hielt es sich an ein Votum des preußischen Reichskanzlers Otto von Bismarck, der sich 1883 gegen amtliche „Wetterprophezeiungen“ ausgesprochen hatte, um nicht „das Feld für böswillige Kritik und für feindliche Bearbeitung der Bevölkerung gegen die Regierung zu vergrößern“.

Die ersten regelmäßigen Wettervorhersagen in Deutschland gab das sächsische „Meteorologische Bureau für Prognosewesen“ ab 1878 heraus. Sie sollten vor allem den Landwirten helfen. Im gleichen Jahr begannen auch die Meteorologische Zentralstation Stuttgart und die Bayrische Meteorologische Centralstation, gemeinsam erste Wetterprognosen zu melden, ab 1881 sogar täglich. Der wichtigste Impuls zur Entwicklung einer modernen Wetterprognose kam jedoch aus der Seefahrt. Die 1872 gegründete Deutsche Seewarte sammelte Daten von Schiffen und Landstationen und gab schon ab 1876 täglich kommentierte Wetterberichte heraus. Ihre Karten visualisierten den bodennahen Zustand der Atmosphäre erstmals auf moderne Weise mit Linien gleichen Luftdrucks (Isobaren), gleicher Temperaturen (Isothermen) und ausgewählten Wetterelementen mit leicht verständlichen Symbolen.

1926 versuchte die Deutsche Seewarte sogar schon, Wetterkarten per Bildfunk zu „faxen“.

### Meteorologen müssen hoch hinaus

Im 19. Jahrhundert gewannen die Meteorologen eine wichtige Einsicht: Die Daten von der Erdoberfläche reichen allein nicht aus, um das Wettergeschehen am Himmel zu erfassen. Sie mussten also auch in die dritte Dimension hinauf. Als „Fluggerät“ boten sich damals bemannte Ballons an. 1901 erreichten die beiden Meteorologen Fritz Berson und Reinhard Süring mit ihren Messinstrumenten erstmals fast elf Kilometer Höhe. Aus solch tollkühnen Pioniertaten entwickelte sich die „Aerologie“. Heute sammeln unbemannte Radiosonden an Wetterballons und Messinstrumente in Verkehrsflugzeugen Wetterdaten aus der höheren Atmosphäre.

Die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts hat den Meteorologen schließlich zwei neue, mächtige Werkzeuge beschert: Satelliten stoßen das Fenster zu einer fast lückenlosen Beobachtung des Wetters rund um den gesamten Globus auf, und Computer ermöglichen eine immer detailliertere Berechnung der atmosphärischen Vorgänge. Aristoteles, Galilei oder Pascal hätten sich eine solche Entwicklung wohl kaum träumen lassen.





## Was ist Wetter?

Ob Sonnenschein, Gewittersturm oder Schnee – was wir als Wetter erleben, entsteht durch komplexe physikalische und chemische Prozesse in der Gashölle der Erde, die wir Atmosphäre nennen. Dieses Wort setzt sich aus den beiden altgriechischen Begriffen „atmós“ für Dunst und „sphaira“ für Kugel zusammen, bedeutet also „Dunstkugel“. Heute besteht die trockene Atmosphäre aus rund 78 Prozent Stickstoff, knapp 21 Prozent Sauerstoff, rund einem Prozent Edelgasen inklusive einem wechselnden Anteil des Treibhausgases Kohlendioxid. Hinzu kommen noch sogenannte Aerosole, wie beispielsweise Meersalz, Staub, Ruß und Abgase, die Meere, Vulkane und Menschen freisetzen. Feuchte Luft beinhaltet außerdem bis zu vier Prozent Wasserdampf. Die Atmosphäre hat verschiedene Stockwerke. In den oberen Schichten wird sie extrem dünn und geht dann fließend in den Weltraum über.

## Die Stockwerke des Himmels

Wir leben im untersten Stockwerk der Atmosphäre, der sogenannten Troposphäre. Über den kalten Polargebieten reicht die Troposphäre bis in etwa sieben Kilometer Höhe hinauf, in der heißen Äquatorregion dehnt sie sich auf bis zu 18 Kilometer Höhe

aus. Am oberen Rand ist sie -50 bis -80 Grad Celsius kalt. Über ihr liegt die fast wolkenlose Stratosphäre. Diese enthält viel natürliches Ozon, das einen großen Teil der gefährlichen ultravioletten Strahlung (UV) der Sonne ausfiltert. Dabei heizt sich die Stratosphäre in einer Höhe von etwa 50 Kilometern bis zu etwa 0 Grad Celsius auf.

Das Wettergeschehen spielt sich praktisch komplett in der Troposphäre ab. Nur riesige Gewitterwolken, die viele Kilometer hoch aufragen, können auf dem Höhepunkt ihrer Entwicklung in das nächsthöhere Stockwerk, die Stratosphäre vorstoßen. Die Energiequelle dieser Wetterküche ist die Sonne. Die Atmosphäre schluckt einen Teil der ankommenden Sonnenstrahlung, unter anderem auch die für Lebewesen besonders gefährliche Strahlung im ultravioletten Bereich des Lichtspektrums. Vor allem bei geringer Bewölkung erreicht jedoch Strahlung, vor allem aus dem sichtbaren Teil des Spektrums, weitgehend ungefiltert die Erdoberfläche. Dort erwärmt sie den Boden und die oberen Wasserschichten von Meeren und Seen. Was dann geschieht, kann man schön im Sommer auf einem asphaltierten Parkplatz beobachten: Der Boden heizt die darüber liegende Luft wie eine Herdplatte auf, sie steigt in flimmern den Schlieren hoch und transportiert dabei die Wärme in die Atmosphäre hinein.

# Sonnenenergie ist der Motor

Um dieser Solarheizung des Wetters gerecht zu werden, haben die Meteorologen die Troposphäre noch in eine bodennahe Schicht, die Peplosphäre, und in die höhere, freie Troposphäre unterteilt. Die umgewandelte Sonnenenergie steigt allerdings nicht nur direkt als warme Luft auf, sondern ist auch im Wasserdampf versteckt: Warme Luft kann mehr verdunstendes Wasser aufnehmen als kältere. Sie trägt so enorme Energiemengen in die Luft hinein und gibt diese in der Höhe wieder ab, wenn der Wasserdampf dort wieder zu feinen Wolkentröpfchen kondensiert.

Dieser atmosphärische Wasserkreislauf kann gigantische Energiemengen transportieren. Das illustrieren besonders beeindruckend die großen tropischen Wirbelstürme. In ihren Wolken verwandelt sich der Wasserdampf aus dem aufgeheizten tropischen Meer in gewaltige Regenfälle: Beim Verdunsten hat der Wasserdampf viel Energie aufgenommen, die er nun bei der Kondensation zu Tropfen wieder freisetzt. Diese Energie verwandelt sich in heftige Luftbewegung, welche zum tobenden Sturm anschwillt. Große Hurrikane (Zyklone) setzen dabei so viel Energie um wie gut tausend Atombomben vom Nagasaki-Typ.

Der Antrieb für das Wetter ist also umgewandelte Sonnenenergie. Sie treibt den Wind an und den atmosphärischen Wasserkreislauf durch Verdunstung, Wolkenbildung und Niederschlag – sei es Regen, Hagel oder Schnee.

## Die Welt im Visier

Für eine fundierte Wettervorhersage müssen die Meteorologen die Vorgänge in der Atmosphäre rund um den Globus genau beobachten und in berechenbare Zahlen umwandeln. Dazu dienen ihnen physikalische Messgrößen. Die wichtigsten sind der Luftdruck, die Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit sowie der Gehalt an Wasserdampf (Feuchte) – alle Parameter jeweils in verschiedenen Höhen der Troposphäre. Dazu kommen noch die Augenbeobachtungen von Wolken und Wetter.

Diese Daten erhalten die Meteorologen heute aus einem Beobachtungsnetz, das die gesamte Erde umspannt. Die traditionelle Basis dieses weltweiten Netzes bilden rund 11 000 Landstationen, die zu festgelegten Zeiten unter anderem Druck, Wind, Temperatur und die Feuchte in Bodennähe messen. In Deutschland betreibt der Deutsche Wetterdienst derzeit rund 180 solcher Wetterstationen, etwa 50 sind zeitweise oder ganzjährig mit Personal besetzt und werden deshalb als Wetter- oder Flugwetterwarten bezeichnet. Die anderen melden Messwerte vollautomatisch. Hinzu kommen knapp 1800 ehrenamtlich betreute „nebenamtliche“ Stationen, von denen einige auch den Wind messen. Um ein Höhenprofil der Temperatur, der Feuchte und des Winds zu erhalten werden weltweit an über 800 Stationen mindestens zweimal täglich unbemannte Wetterballone gestartet. Diese sogenannten Radiosonden steigen bis zu dreißig Kilometer hoch auf und funken unterwegs Messwerte zum Boden.





# Das Problem der Datenwüsten

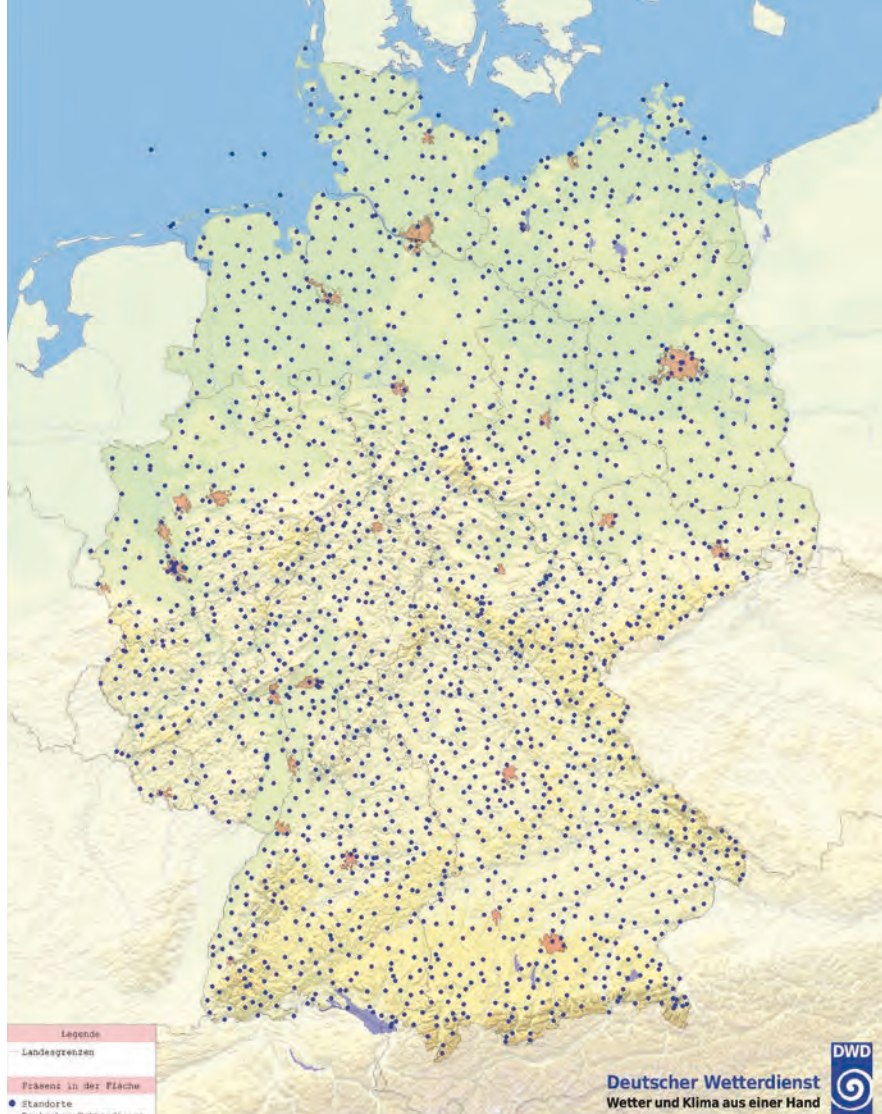
Die Landstationen decken vor allem Europa und den Osten Asiens gut ab – Nord- und Südamerika gerade noch ausreichend. Große Gebiete der Erde sind dagegen richtige Datenwüsten. Dazu zählen Afrika, die Kontinente der Südhalbkugel – und alle Ozeane. Weil das lokale Wetter von der globalen Wetterentwicklung abhängt, sind diese Datenwüsten selbst dann ein großes Problem, wenn eine Vorhersage für ein gut erfasstes Gebiet wie Europa erstellt werden soll. Um diese riesigen Beobachtungslücken wenigstens auf den für die Wetterküche so wichtigen Ozeanen teilweise zu schließen sind auf den Weltmeeren etwa 2 800 Handelsschiffe mit Wetterstationen an Bord unterwegs, hinzu kommen rund 750 automatische Driftbojen. Mittlerweile sind auch etwa 3 000 Verkehrsflugzeuge mit Instrumenten ausgerüstet, zum Beispiel fast alle Maschinen der Lufthansa mit Geräten des Deutschen Wetterdienstes. Sie übermitteln vor allem in der Start- und Landephase, aber auch beim Flug in zehn bis zwölf Kilometern Höhe ihre Messwerte an die nationalen Wetterdienste.

## Überwachung aus dem All

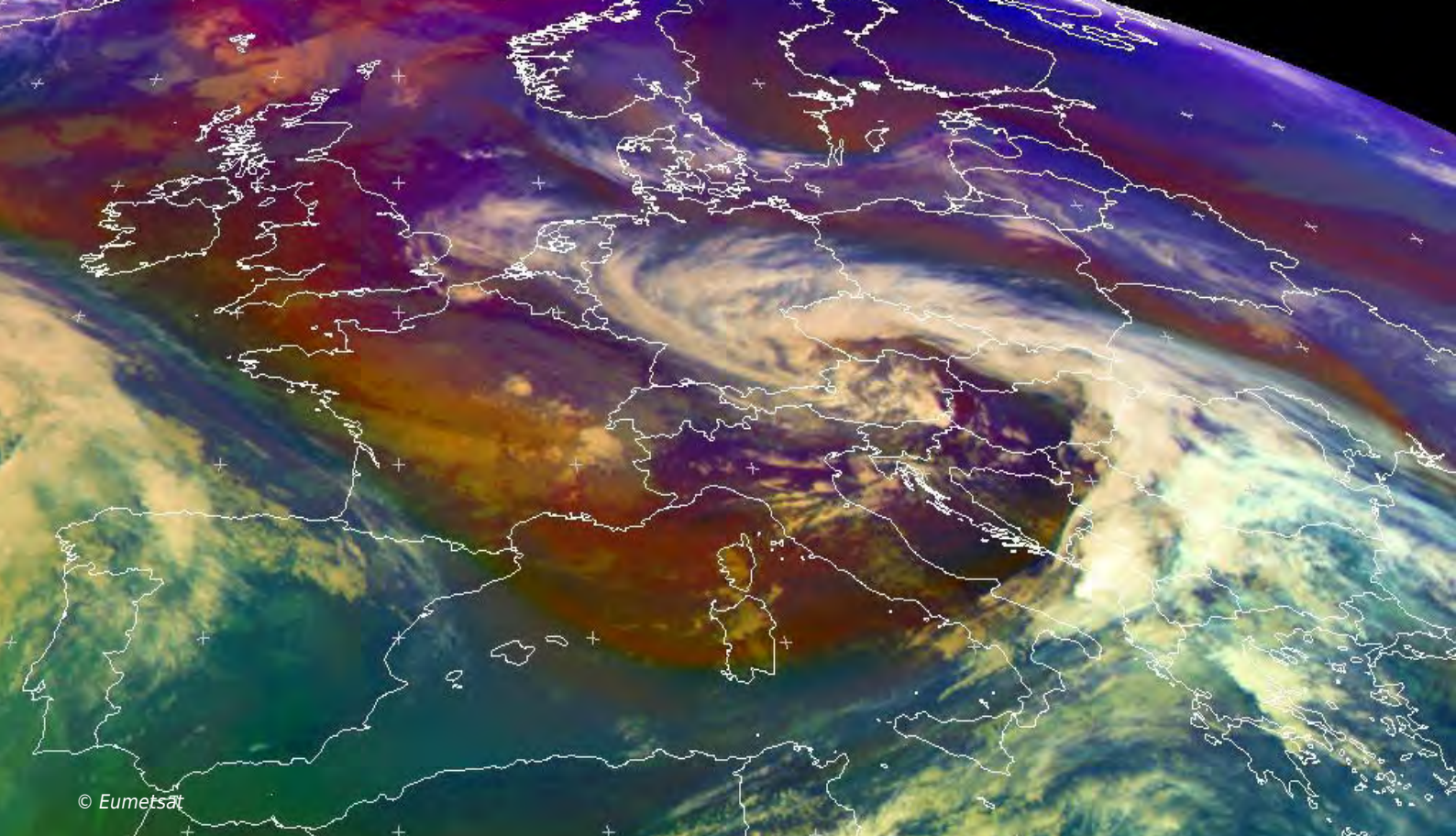
Wettersatelliten bedeuten einen enormen Fortschritt für die Wettervorhersage. Sie ermöglichen den Meteorologen eine flächendeckende Beobachtung des Wettergeschehens rund um die Erde – insbesondere auch über den ausgedehnten Datenwüsten. Die Satelliten messen die reflektierte Sonnenstrahlung sowie die Strahlung der Erde und Atmosphäre in mehreren „Frequenzfenstern“. Einige Fenster liegen im Spektrum des sichtbaren Lichts, die meisten jedoch im Infraroten. Aus der gemessenen Strahlung lassen sich wichtige Informationen über den Zustand der Atmosphäre, sowie der Land- und Meeresoberflächen ableiten, zum Beispiel die Temperatur des Erdbodens und von Wasseroberflächen. Außerdem messen einige Wettersatelliten die Verteilung des Wasserdampfs in der mittleren und oberen Troposphäre. Daraus kann man Rückschlüsse über die Strömungsverhältnisse in den entsprechenden Höhen ableiten.

Für den Vorhersagedienst liefern die Satellitenbeobachtungen vor allem Informationen über die Art, ihre räumliche Verteilung und die Bewegung der Wolken. Daraus können die Meteorologen unter anderem die Geschwindigkeit und Richtung des Windes errechnen, der in verschiedenen Höhen aus unterschiedlichen Richtungen wehen kann. Allerdings sind manche Wolken tückisch: Es gibt zum Beispiel welche, die immer an einer Stelle – etwa einem Berg – hängen bleiben, obwohl ein starker Wind weht. Deshalb müssen die Meteorologen die Wolkenformen genau analysieren, um solche „Versteckspieler“ sicher zu identifizieren.

Darüber hinaus werden die Satellitenmessungen in den Wettervorhersagemodellen zur möglichst genauen Beschreibung des Ist-Zustands genutzt und leisten auf diese Weise einen wichtigen Beitrag zur verbesserten Vorhersagequalität.







## Die Satellitenflotte

Besonders wichtig sind die geostationären Wettersatelliten, zu denen auch die europäischen METEOSAT-Satelliten gehören. Sie sind rund um die Erde oberhalb des Äquators verteilt und fliegen in knapp 36 000 Kilometer Höhe gerade so schnell, dass sie sich synchron zur Erdoberfläche mitdrehen. Von der Erde aus gesehen kleben sie also scheinbar am Firmament fest und beobachten immer dasselbe Gebiet. Der Deutsche Wetterdienst empfängt von mehreren geostationären Wettersatelliten alle dreißig beziehungsweise fünfzehn Minuten aktuelle Bilder – in einem speziellen Modus sogar alle fünf Minuten. Der überwiegende Teil der Erdoberfläche wird auf diese Weise sehr gut erfasst. Die Erdkrümmung verhindert allerdings, dass geostationäre Wettersatelliten die Polarregionen im hohen Norden und Süden beobachten können.

Neben der geostationären Flotte umkreisen sogenannte polarumlaufende Wettersatelliten in nur 800 bis 900 Kilometern Höhe die Erde auf Bahnen, die sie bei jedem Umlauf über die Pole hinweg führen. So kann jeder Satellit die gesamte Erdoberfläche Streifen für Streifen abtasten. Wegen der niedrigen Flughöhe erreichen diese Satelliten eine relativ hohe Bildauflösung: Sie können Strukturen bis hinunter zu einem Quadratkilometer Ausdehnung erkennen, wobei sie im

sichtbaren und infraroten Bereich des Strahlungsspektrums messen. Der Deutsche Wetterdienst empfängt für die tägliche Wettervorhersage Daten von europäischen, amerikanischen und chinesischen polarumlaufenden Wettersatelliten.

### Gewitterzellen im Visier

Für die Meteorologen des Deutschen Wetterdienstes ist noch ein weiteres Beobachtungssystem unverzichtbar: das Wetterradar, welches die Reflexion der Radarstrahlen an Wassertropfen und Schnee- und Eiskristallen misst. Damit können flächendeckend und dreidimensional Niederschlagsgebiete erfasst werden. So können die Meteorologen zum Beispiel kleine, hochreichende Gewitterzellen, die besonders häufig im Sommer entstehen, und mit starkem Regen oder Hagel verbunden sind, aufspüren und verfolgen. Diese manchmal heftigen, kleinräumigen Unwetter sind heute immer noch sehr schwer vorhersagbar – warum, werden wir später sehen. Deshalb ist das Wetterradar ein wichtiges Werkzeug für die Erkennung kurzfristiger Unwetterentwicklungen und zur Herausgabe von Unwetterwarnungen.

Den Meteorologen steht heute also eine ausgefeilte Technik zur Verfügung, mit der sie den gesamten Glo-



bus nach Wettererscheinungen ausspähen können. Um die so entstehende Datenflut schnell zu verarbeiten, benötigen sie extrem leistungsstarke Computer. Diese Supercomputer können, mit den aktuellen Daten gefüttert, sogar das Wetter der Zukunft berechnen.

### Wetter aus dem Supercomputer

Klimaforscher und Meteorologen träumten schon lange davon, die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre mathematisch beschreiben zu können, denn dann ließe sich das Wetter der Zukunft berechnen. Schon 1750 versuchte das der Göttinger Klimaforscher Tobias Mayer mit einer einfachen Wetterformel, nach der die Temperatur einer Gegend allein von deren Breitengrad abhängen sollte. Natürlich war dieses Modell viel zu simpel, denn danach hätte am fast 6 000 Meter hohen Gipfel des Kilimandscharo die gleiche Temperatur herrschen müssen wie an seinem Fuß in der heißen Steppe.

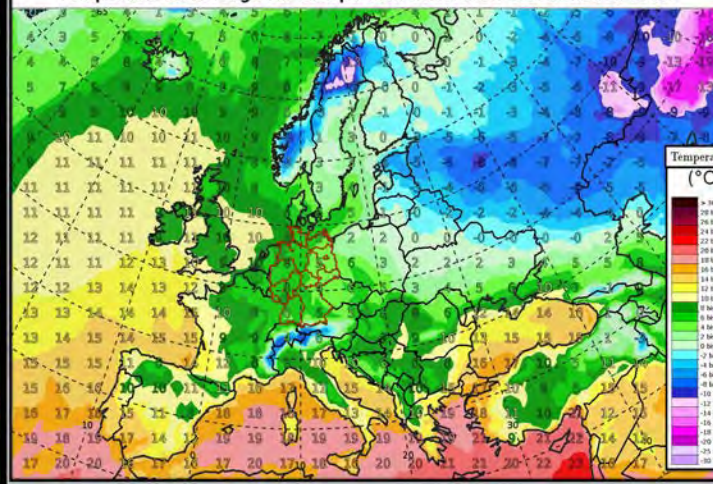
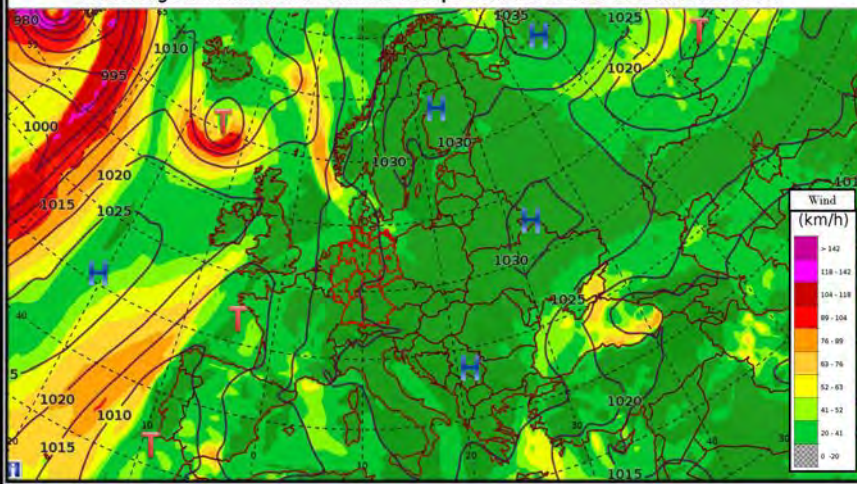
Nach diesen frühen Fehlversuchen wissen wir heute, dass sich die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre tatsächlich mit mathematischen Gleichungen recht genau beschreiben lassen. Dazu müssen die Formeln allerdings die komplexen physikalischen Beziehungen zwischen der Lufttemperatur, dem Luftdruck, der Windgeschwindigkeit und der Feuchte an jedem Punkt der Erdatmosphäre erfassen. Hinzu kommen Prozesse wie die Bildung von Wolken und Niederschlägen. Ein gutes mathematisches Wettermodell darf auch nicht vernachlässigen, dass der Boden und die bodennahe Luftschicht miteinander Wärme und Feuchte austauschen.

### Mathematisches Heranpirschen

Daraus folgt ein ziemlich kompliziertes System mathematischer Gleichungen – und ein neues Problem: Die Gleichungen sind nicht mehr exakt lösbar! Moderne Meteorologen frustriert das aber nicht, denn sie kennen mit der „numerischen Mathematik“ ein mächtiges Hilfsmittel. Es erlaubt ihnen sich durch den Zahlendschungel geschickt an die exakte Lösung der Gleichungen heranzupirschen. Solche mathematischen Näherungen sind zwar nie ganz genau, aber ein sehr wirksamer Kompromiss. Allerdings erfordern sie einen hohen Rechenaufwand, weshalb sie erst durch die Entwicklung immer leistungsfähigerer Computer zur geeigneten Methode werden konnten.

Wenn die Meteorologen ein numerisches Wettervorhersage-Modell entwickeln, dann überziehen sie zuerst das gewünschte Gebiet – oder gleich den kompletten Globus – vom Boden bis in etwa 75 Kilometer Höhe mit einem mehr oder weniger fein- oder grobmaschigen dreidimensionalen Gitternetz. Für jeden Kreuzungspunkt des Gitters stellen sie einen Satz von Näherungsformeln für die physikalischen Wettergrößen auf. In diese Gleichungen speisen sie alle in diesem Gebiet aktuell beobachteten Wetterdaten ein. Aus diesem Anfangszustand kann der Computer anschließend berechnen, wie sich die Atmosphäre – und damit natürlich auch das Wetter – Zeitschritt für Zeitschritt in die Zukunft hinein verändern wird. Als Ergebnis liefert er für jeden Gitterpunkt eine Vorhersage darüber, welchen Wert die Temperatur, der Druck, der Wind, die Feuchte und andere physikalische Größen in einigen Stunden oder Tagen haben werden. Aus diesen Ergebnissen können die Meteorologen dann eine Wettervorhersage ableiten.





▲ von links nach rechts: Vorhersage des Luftdrucks und der Windgeschwindigkeiten durch das globale Modell des Deutschen Wetterdienstes.

Temperaturvorhersage für Mitteleuropa durch das regionale Modell des Deutschen Wetterdienst

## Je feiner, desto besser

Damit das numerische Wettermodell realitätsnahe Ergebnisse liefert, muss das Gitterraster sehr feinmaschig sein. Für jeden Rasterpunkt müssen möglichst viele Näherungsformeln berechnet werden, sonst wäre das Modell zu einfach für die Komplexität der Natur. Die Folge ist: Die Zahl der notwendigen Rechenschritte und der zu verarbeitenden Daten explodiert. Deshalb wächst die Anforderung an die Leistungsfähigkeit der Computer ständig an.

Die Geschichte der Computer beginnt in den 1960er Jahren. Wegen der damals geringen Rechnerkapazität waren die ersten numerischen Wettermodelle noch sehr primitiv. Aber mit jeder neuen Computergeneration wurden sie immer detaillierter und leistungsfähiger. Der Deutsche Wetterdienst betreibt seit Januar 2015 eine Modellkette, die aus drei Modellen mit unterschiedlich feinen Gitterrastern besteht. Für das Wetter auf der gesamten Erde ist das Modell ICON (Icosahedral Nonhydrostatic Model) zuständig, für Europa das regionale Modell COSMO-EU und für Deutschland das hoch auflösende lokale Modell COSMO-DE.

### Gitterraster für den Globus

Das ICON-Modell des DWD überzieht den Globus mit einem Gitter aus fast gleich großen Dreiecken. Der durchschnittliche Abstand der den Dreiecken zugeordneten Gitterpunkte beträgt derzeit etwa 13 Kilometer. Damit legt dieses Modell ein Netz aus 2.949.120

Gitterpunkten um die Erde. In der dritten Dimension unterteilt es die Atmosphäre in 90 Schichten, so dass das Modell über mehr als 265 Millionen Gitterpunkte verfügt. Für jeden Gitterpunkt berechnet es die Lufttemperatur, die Dichte, den Wind, die Feuchte, das Wasser und das Eis in den Wolken, sowie Regen und Schnee.

Die Modelle des DWD werden auch mit Bodendaten unterhalb der Erdoberfläche gespeist. Damit berücksichtigen sie den Wärme- und Feuchteaustausch zwischen Boden und Atmosphäre. Hier spielen auch die Pflanzen eine wichtige Rolle, weil sie mit ihren Wurzeln Wasser aus dem Boden ziehen und durch die Blätter verdunsten. Folglich steckt im „Bodenmodell“ auch ein einfaches Modell der Pflanzendecke. Der Austausch von Feuchte und Wärmeenergie zwischen Boden und Luft sorgt überhaupt erst dafür, dass in den Modellen - wie in der echten Atmosphäre - Prozesse wie Wolkenbildung und -auflösung stattfinden können. Das alles erzeugt eine gewaltige Datenflut: Für jeden Zeitschritt und für jeden Gitterpunkt muss der Computer etwa 5 000 Rechenoperationen durchführen - und zwar für jede der 90 Schichten in der Atmosphäre.

### Deutschland in Rechenkästchen

Für Europa und Deutschland setzt der DWD die zwei höher auflösenden Modelle COSMO-EU und COSMO-DE ein. Im regionalen Modell COSMO-EU

Das globale Vorhersagemodell des DWD mit dem eingebetteten europäischen und lokalen Modell ►





beträgt die Maschenweite 7 Kilometer, im lokalen Modell COSMO-DE nur 2,8 Kilometer. So können die unterschiedlichen Landschaften und das lokale Wettergeschehen im Vorhersagegebiet viel genauer erfasst werden. COSMO-DE ermöglicht es, die Entwicklung von Schauer- und Gewitterwolken explizit, das heißt ohne grob pauschalierende Vereinfachungen, zu simulieren. Dazu benötigt es allerdings auch einen deutlich höheren Rechenaufwand pro Gitterpunkt, weil beispielsweise die Wolken- und Niederschlagsbildung sehr viel genauer beschrieben wird als im Globalmodell ICON und im Modell COSMO-EU.

Das Ziel des DWD ist mittelfristig alle drei Modellanwendungen (global, regional und deutschlandweit) auf Basis des neuen ICON-Modells zu vereinen.

Zusätzlich zu diesen drei Wettervorhersagemodellen werden auch so genannte Anschlussmodelle für spezielle Prognosen gerechnet. Diese liefern beispielsweise Prognosen des Seegangs in der Nord- und Ostsee und auf den Weltmeeren. Ein Nutzer ist zum Beispiel der Schiffsverkehr. Weitere Modellpakete werden nur im Notfall aktiviert.

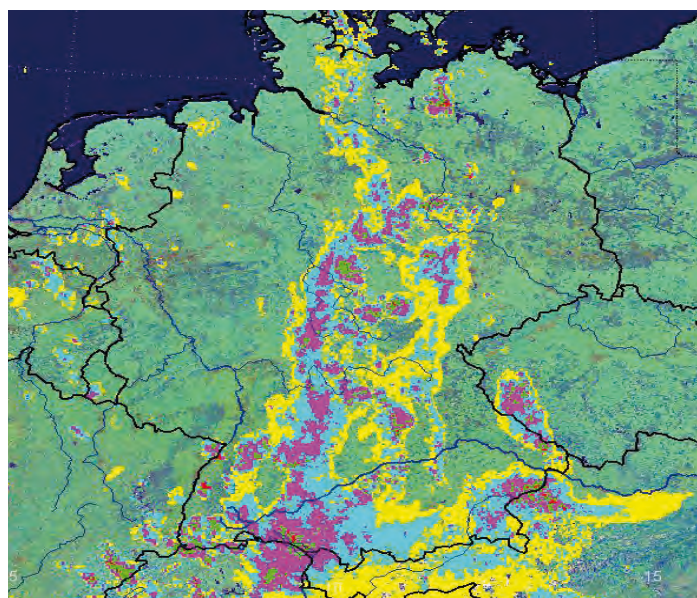
So wird falls die Messsysteme des DWD radioaktive Schadstoffe in der Luft registrieren, berechnet wohin der Wind diese Stoffe tragen wird und wo sie voraussichtlich niedergehen werden. Und falls ein Vulkan ausbricht und die Aschewolken den Luftverkehr beeinträchtigen können, berechnet ein Modell den Transport und die Verteilung der Aschepartikel in der Atmosphäre.

## Zuverlässig - aber mit Grenzen

Numerische Wettermodelle arbeiten heute schon sehr zuverlässig. Sie können zum Beispiel die Entwicklung von Hoch- und Tiefdruckgebieten viel genauer vor-ausberechnen als ein erfahrener Meteorologe mit den früheren „Handverfahren“. Besonders großräumige Wetterentwicklungen können sie bis zu etwa zehn Tagen vorhersagen – wobei der Prognosefehler allerdings auch mit jedem Tag wächst. Die numerischen Modelle stoßen jedoch nach wie vor an Grenzen. Eine davon ist die selbst beim lokalen Modell COSMO-DE noch immer zu grobe Auflösung des Gitterrasters. Das Wettergeschehen spielt sich nämlich auf sehr unterschiedlichen Größenskalen ab. Dabei sind nicht nur die großen Skalen der erdumspannenden Hoch- und Tiefdruckzonen wichtig – die die Computer recht gut im Griff haben – sondern auch Vorgänge auf immer kleineren Skalen, wie z. B. lokale thermische Auf- und Abwinde oder Nebelfelder.

Die Grenzen der heutigen Wetterprognosen können wir vor allem im Sommer erleben: Plötzlich zieht ein heftiger Gewitterschauer auf und sprengt die Grill-party – natürlich hatte das der gestrige Wetterbericht so nicht vorhergesagt. Das liegt daran, dass solche Gewitterzellen oft nur einen geringen Durchmesser haben und deshalb auch vom 2,8-Kilometer-Raster des Modells COSMO-DE nicht ausreichend genau dargestellt werden. Eine solche Zelle fällt gewissermaßen „durch das Raster“. Möglicherweise hat das Modell das Gewitter aber doch berechnet, aber wegen der notwendigen Vereinfachungen der physikalischen Gegebenheiten an einer etwas anderen Stelle.

*Beobachtung der Niederschlagsintensität durch die Wetterradarsysteme des DWD ▼*







## Wetter ist chaotisch

Auch in der Zukunft werden die numerischen Modelle das Wetter niemals hundertprozentig vorhersagen können. Eine fundamentale Eigenschaft der Atmosphäre verhindert das: Ihr chaotisches physikalisches Innenleben. Das Chaos im Wetter sorgt dafür, dass schon kleinste Schwankungen oder Unsicherheiten in den Ausgangsdaten einer Wetterberechnung je nach Wetterlage zu völlig verschiedenen Vorhersagen für die nächsten Stunden oder Tage führen können. Um das chaotische Verhalten der Atmosphäre bei der Vorhersage berücksichtigen zu können, setzt der DWD seit Mai 2012 das sogenannte Ensemble-Vorhersagesystem COSMO-DE-EPS ein. Hierbei werden parallel 20 Vorhersagen des Modells COSMO-DE gerechnet, die sich leicht in den Anfangs- und Randbedingungen und Modelleigenschaften unterscheiden. Diese 20 unterschiedlichen Vorhersageergebnisse erlauben es, Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Wetterereignisse, beispielsweise für das Auftreten von Regen oder Schnee, zu berechnen und die Verlässlichkeit der Vorhersage zu bestimmen.

### Am Ende entscheidet der Mensch

Am Ende der Kette aus Wetterbeobachtung und Wettersimulation steht die „operationelle Wettervorhersa-

ge“. Sie umfasst die Wetterberichte, die der Deutsche Wetterdienst jeden Tag offiziell herausgibt. Zuständig dafür sind die Meteorologen der Vorhersage- und Beratungszentrale des DWD in Offenbach sowie in den Regionalzentralen, wie zum Beispiel im Hamburger Seewetteramt. Auf ihren Computern fließt die aufbereitete Datenflut aus den verschiedenen Wetterbeobachtungssystemen und der Numerischen Wettervorhersage zusammen. Alle fünf Minuten laufen bei ihnen neue Satellitenbeobachtungen und Wetterradardaten ein. Die Meteorologen vergleichen diese Beobachtungen mit den Computerprognosen der Vorhersagemodelle des Deutschen Wetterdienstes. Dabei können die Numerischen Wettervorhersagen durchaus von den aktuellen Beobachtungen abweichen. Dann muss der erfahrene „Meteorologe vom Dienst“ die Wetterlage neu beurteilen und sich für die optimale Vorhersage entscheiden.

### Der gesetzliche Auftrag

Die Wetterprognosen sind auf die unterschiedlichen Bedürfnisse der jeweiligen Nutzer zugeschnitten, die der Deutsche Wetterdienst entsprechend seines gesetzlichen Auftrags bedient. Dazu gehören Vorhersagen und Warnungen für den Schiffs- und Flugverkehr,





Schneefall- und Glatteiswarnungen für den Straßenverkehr, Agrar-Wettervorhersagen für die Landwirtschaft - und vor allem Unwetterwarnungen für Katastrophenschutzbehörden und die Öffentlichkeit in Deutschland. Heute informiert ein vollautomatisches System (Fe-WIS) Feuerwehr, Polizei und Katastrophenschutz über die Wetterlage und aufziehende Unwetter mit für ihre Zwecke extra zugeschnittenen Daten. Zu den Kunden des DWD zählen auch Wirtschaftsunternehmen: Wenn zum Beispiel ein Ölkonzern eine neue Bohrinself an ihren zukünftigen Standort schleppen lassen will, muss er sich auf einige ruhige Tage auf See verlassen können. Bei den Auswirkungen von gefährlichen Wettererscheinungen geht es oft um hohe Sachwerte, die es - wenn möglich - zu schützen gilt. Schnell entstehen Milliarden Schäden durch Stürme, Überschwemmungen oder Hagel. Aber auch die Menschen selbst müssen sich vor den Auswirkungen von schweren Unwettern schützen können und werden daher im Vorfeld gewarnt. Deshalb trägt der „Meteorologe vom Dienst“ tagtäglich eine hohe Verantwortung.

#### **Den Blitzen auf der Spur**

Besonders im Sommer ist für die Meteorologen im Wettervorhersagedienst das DWD-Wetterradar sehr

wichtig. In dieser Jahreszeit kann ein von der Sonne beschienener Südhang wie eine Herdplatte die Atmosphäre „zum Kochen“ bringen und ein lokales Unwetter auslösen. Solche kleinräumigen Gewitterzellen macht ein Verbundnetz von 17 Wetter-Radarstationen in Deutschland sichtbar. Es kann mit einer Auflösung von etwa 250 Metern Niederschläge - Regen, Hagel und Schnee - aufspüren. Dabei nutzt es aus, dass Regentropfen, Hagelkörner sowie Schneeflocken bestimmte Radarfrequenzen reflektieren und so das Radarecho erzeugen.

Ob ein starker Niederschlag tatsächlich zu einer Gewitterzelle gehört, kann durch die gleichzeitige Ortung von Blitzen erkannt werden. Der DWD greift auf die Daten eines europaweiten Blitzortungssystems zurück, das aus rund 150 Sensoren besteht. Diese Sensoren empfangen die starken elektromagnetischen Entladungspulse der Blitze - gewissermaßen das „Funk-echo“ des Gewitters - und werten sie automatisch aus. Aus den unterschiedlichen Zeitpunkten, an denen der Puls an den verschiedenen Stationen eintrifft, können Computer den Entstehungsort des Blitzes auf etwa 100 Meter genau berechnen. Nur wenige Sekunden später erscheinen diese Daten auf den Bildschirmen der Meteorologen.



## *Von Sofort bis Übermorgen*

Alle diese Systeme zusammen machen also ziemlich treffsichere Unwetterwarnungen möglich. Als kürzestfristige Wettervorhersagen für die nächsten zwei Stunden sind sie vor allem im Sommer ein wichtiger Teil des Tagesgeschäftes der Meteorologen. Für den Zeitraum von zwei bis 21 Stunden liefert das Modell COSMO-DE achtmal täglich aktuelle Prognosedaten. Bei Vorhersagen bis zu drei Tagen im Voraus stützt sich der Meteorologe vor allem auf das Modell COSMO-EU. Für eine Prognose im Zeitbereich bis zu sieben Tagen nutzen die Experten das Globalmodell ICON. Um ihre Vorhersagen noch sicherer zu machen, vergleichen die Meteorologen des Deutschen Wetterdienstes diese Daten auch mit den numerischen Wettermodellen ihrer Kollegen in den Nachbarländern und in Übersee. Dieser intensive, weltweite Datenaustausch ist entscheidend für eine hohe Qualität der Wettervorhersagen.

### **Wie genau sind Wettervorhersagen?**

Wettervorhersagen werden niemals hundertprozentig sein, weil schon kleinste Schwankungen in der Atmosphäre das Wetter stark beeinflussen können. Es ist kein Zufall, dass mit Edward Lorenz ein Meteorologe zu den Pionieren der Chaos-Theorie gehört. Der Chaosanteil im Wetter wird deshalb trotz immer

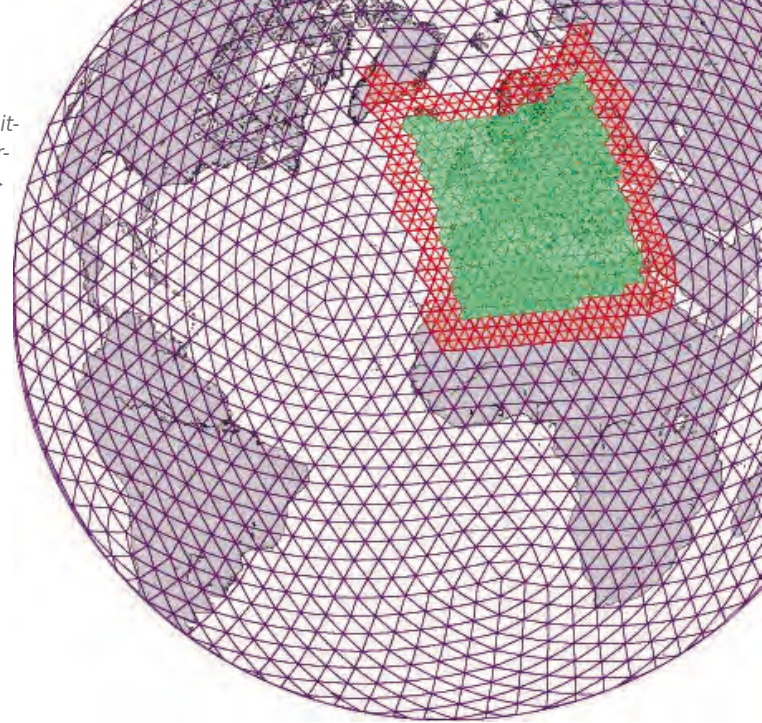
besserer Beobachtungs- und Messtechniken und feiner auflösender numerischer Modelle weiterhin die Gefahr einer dramatischen „Andersentwicklung“ des Wetters und damit leider auch falsch berechneter Wetterprognosen in sich bergen – auch wenn dies immer seltener geschieht. Trotz aller chaotischen Einflüsse: Die Wettervorhersagen sind in den letzten vier Jahrzehnten immer zuverlässiger geworden. Eine sechstägige Prognose hat heute die gleiche Zuverlässigkeit wie eine 24stündige im Jahr 1968.

### **Blick in die Zukunft**

In den kommenden Jahren werden die Meteorologen die Qualität ihrer Wetter- und Unwettervorhersagen mit immer besseren Beobachtungssystemen und verfeinerten Computermodellen noch weiter steigern können. Bei der Wetterbeobachtung werden vor allem die Weiterentwicklung der Satelliten- und Radartechnik und optimierte Auswertungsmethoden für die gewonnenen Daten zum Fortschritt beitragen. Vor allem die Menge der Satellitendaten wird sich in den nächsten Jahren mehr als verzehnfachen. Wenn diese Systeme die großen Lücken im Beobachtungsnetz auf den Kontinenten und Ozeanen zunehmend schließen können, wird das die Wettervorhersagen für Mitteleuropa noch zuverlässiger machen.



So sieht die Zukunft aus: Die Gitterpunkte des nächsten Wettervorhersagemodells des DWD. ►



Das derzeitige Arbeitspferd der Vorhersage-Meteorologen beim Deutschen Wetterdienst ist das Computersystem „NinJo“. Es ermöglicht eine auf jeden Bedarf zugeschnittene übersichtliche Darstellung aller wichtigen Wetterdaten weltweit auf einen Blick. Als Anwender stehen die Meteorologen auch in einem engen Austausch mit den Entwicklern der numerischen Wettervorhersagemodelle. So sind sie nicht nur Wetterexperten, sondern oft auch Forscher, Softwareentwickler – und vor allem auch Berater für die Nutzer spezieller Wettervorhersagen oder Unwetter-Warnsysteme.

### Noch feinere Maschen

Die Entwickler der numerischen Wettermodelle arbeiten in den letzten Jahren intensiv an der Optimierung der Vorhersage von Niederschlägen. Vor allem die Prognosemöglichkeit kleinräumiger, aber schwerer Gewitterschauer mit extremen Niederschlägen und Hagel hat sich verbessert. Trotz der enorm gestiegenen Leistungsfähigkeit der Computer hat die Numerische Wettervorhersage auf diesem Gebiet in den vergangenen 15 Jahren aber keinen entscheidenden Durchbruch geschafft. Denn dafür bräuchten die Modelle unter anderem eine noch engere Maschenweite und eine noch detailliertere Berechnung der physikalischen Prozesse, was der Computertechnik eine gewaltige Leistungssteigerung abverlangt. Aber auch die mathematische Modellierung der physikalischen Prozesse in den Wolken muss noch viel genauer werden – dazu bedarf es weiterer Grundlagenforschung.

### Viele Modelle für ein besseres Resultat

An Bedeutung werden künftig Verfahren gewinnen, die mehrere numerische Wettermodelle parallel durchrechnen und dabei den Anfangszustand leicht variieren. Diese „Ensemble-Technik“, beispielsweise das COSMO-DE-EPS, liefert verschiedene Vorhersageergebnisse, innerhalb derer das tatsächliche Wetter sich mit hoher Wahrscheinlichkeit entwickeln wird. Das gibt den Meteorologen mehr Sicherheit in der Vorhersage.

Auch für die Meteorologie gilt, dass die Grundlagenforschung entscheidende Impulse für den Fortschritt gibt. Auf diesem Gebiet ziehen die Meteorologen mit den Klimaforschern, die langfristige Änderungen der Atmosphäre aus langen Klimareihen untersuchen, an einem Strang. Vor allem die komplexen chemischen Prozesse in den verschiedenen Stockwerken der Atmosphäre sind noch wenig verstanden. Sie bergen sicher noch manche Überraschung.

Wird eines Tages ein Super-Supercomputer den Meteorologen aus Fleisch und Blut ersetzen? Das ist wohl kaum zu erwarten. Die Erfahrung zeigt, dass die Technik zwar viele Aufgaben übernehmen kann, schneller und manchmal sogar besser arbeitet als ein Mensch, doch sie erfordert Spezialisten, die sie verstehen, bedienen und weiterentwickeln können. Das Berufsbild der Meteorologen wird daher nicht verschwinden, sondern sich – wie in den vergangenen Jahrhunderten – mit dem technischen Fortschritt wandeln.



◀ Die Wettervorhersagezentrale in Offenbach.

## Impressum

Text: Roland Wengenmayr, [www.roland-wengenmayr.de](http://www.roland-wengenmayr.de)

Redaktion: Andreas Friedrich

Gestaltung: Susanne Stummvoll

Abbildungen: DWD, Fotolia, Eumetsat

Hier finden Sie ihre  
Wettervorhersage ▼



## Deutscher Wetterdienst (DWD)

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Frankfurter Straße 135,  
63067 Offenbach

Tel: +49 (0) 69 / 8062 - 0

[info@dwd.de](mailto:info@dwd.de)

Über [www.dwd.de](http://www.dwd.de) gelangen Sie  
auch zu unseren Auftritten in:

