Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

Messen-Berechnen-Interpretieren

Wie entsteht eine Wettervorhersage?

Die Lehre von den Himmelserscheinungen

Seit Urzeiten beobachten wir das Wetter. Das erste richtige Lehrbuch der Wetterkunde schrieb Aristoteles um 350 vor Christus. Er nannte es „Meteorologica“, also „Lehre von den Himmelserscheinungen“. Fast 2000 Jahre lang blieb es das fundamentale Werk der Meteorologie. Es prägte viele Fachwörter, die heute noch verwendet werden, zum Beispiel „Trombe“ für „Tornado“ oder „Taifun“ für „Wirbelsturm“.

© Klaus Adler/DWD

Die Geschichte der modernen Meteorologie begann 1592 mit der Erfindung des Thermometers durch Galileo Galilei. Dessen Schüler Evangelista Torricelli baute 1643 das erste Barometer. Diese beiden Instrumente konnten erstmals Temperatur und Luftdruck messen. Damit konnte die Forschung die Vorgänge in der Atmosphäre genauer erkunden.

Langsam zeigte sich, dass das Wetter von großräumigen atmosphärischen Prozessen beeinflusst wird. Um sie zu erfassen, sind ausgedehnte Beobachtungsnetze nötig. Das Vorbild moderner Netze schuf die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft ab 1780. An jeder Station wurden mit gleichen Instrumenten standardisierte Messungen durchgeführt, zu festen Zeitpunkten. Bis 1795 war das Netz in Betrieb. Es umfasste schließlich 39 Stationen rund um den Globus, von Nordamerika über Grönland, Nord- und Mitteleuropa bis nach Russland, zu denen auch das heutige Meteorologische Observatorium des Deutschen Wetterdienstes auf dem Hohenpeißenberg in Oberbayern zählte. Mit einer inzwischen 240-jährigen Geschichte ist es die älteste Bergwetterstation der Welt.

Weltumspannendes Beobachtungsnetz

Solch ein weltumspannendes Beobachtungsnetz war der erste Schritt. 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. Das wurde erst mit der Erfindung des Morsetelegrafen im Jahr 1832 möglich. Nun erlaubten tagesaktuelle Wetterkarten eine Zusammenschau des aktuellen Wettergeschehens in einem großen Gebiet. Diese „Synopsis“ bahnte den Weg zu einer echten Wettervorhersage.

Ab 1876 gab die Deutsche Seewarte täglich kommentierte Wetterberichte heraus. Ihre Karten visualisierten erstmals den bodennahen Zustand der Atmosphäre auf moderne Weise mit Linien gleichen Luftdrucks (Isobaren), gleicher Temperaturen (Isothermen) und ausgewählten Wetterelementen mit leicht verständlichen Symbolen.

▲ *Die erste Wetterkarte der Deutschen Seewarte von 1876.*

Es zeigte sich jedoch, dass die Daten von der Erdoberfläche allein nicht ausreichen, um das Wettergeschehen zu erfassen. Die Meteorologie musste in die dritte Dimension hinauf. 1901 erreichten Fritz Berson und Reinhard Süring mit ihren Messgeräten in einem Ballon 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 bescherte der Meteorologie zwei weitere, mächtige Werkzeuge: Satelliten ermöglichen eine fast lückenlose Beobachtung des Wetters rund um den gesamten Globus, und Computer können atmosphärische Vorgänge immer detaillierter berechnen.

Was ist Wetter?

Wetter entsteht durch komplexe physikalische und chemische Prozesse in der Atmosphäre. Die trockene Atmosphäre besteht aus rund 78 Prozent Stickstoff, knapp 21 Prozent Sauerstoff, rund einem Prozent Edelgase inklusive einem steigenden Anteil an Treibhausgasen. Hinzu kommen noch sogenannte Aerosole, wie Meersalz, Staub, Ruß und Abgase, die von Meeren, Vulkanen und Menschen freigesetzt werden. Feuchte Luft beinhaltet außerdem bis zu vier Prozent Wasserdampf.

Die Atmosphäre hat verschiedene Stockwerke. Nach oben geht sie fließend in den Weltraum über. Wir leben im untersten Stockwerk, der Troposphäre. Sie reicht über den kalten Polargebieten 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 uns vor der gefährlichen ultravioletten Strahlung der Sonne schützt.

Das Wettergeschehen spielt sich praktisch komplett in der Troposphäre ab. Nur riesige Gewitterwolken können bis in die Stratosphäre vorstoßen. Die Energiequelle dieser Wetterküche ist die Sonne, vor allem ihre Wärmestrahlung. Diese Infrarotstrahlung dringt fast ungefiltert bis zur Erdoberfläche durch. Sie erwärmt den Boden und die obere Wasserschicht von Meeren und Seen. Was dann geschieht, kann man schön im Sommer über Asphalt beobachten: Wie über einer Herdplatte heizt sich die bodennahe Luft auf, steigt in flimmernden Schlieren hoch und transportiert so die Wärme in die Atmosphäre hinein.

Sonnenenergie ist der Motor

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 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, die 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 und den atmosphärischen Wasserkreislauf an durch Verdunstung, Wolkenbildung und Niederschlag – sei es Regen, Hagel oder Schnee.

Die Welt im Visier

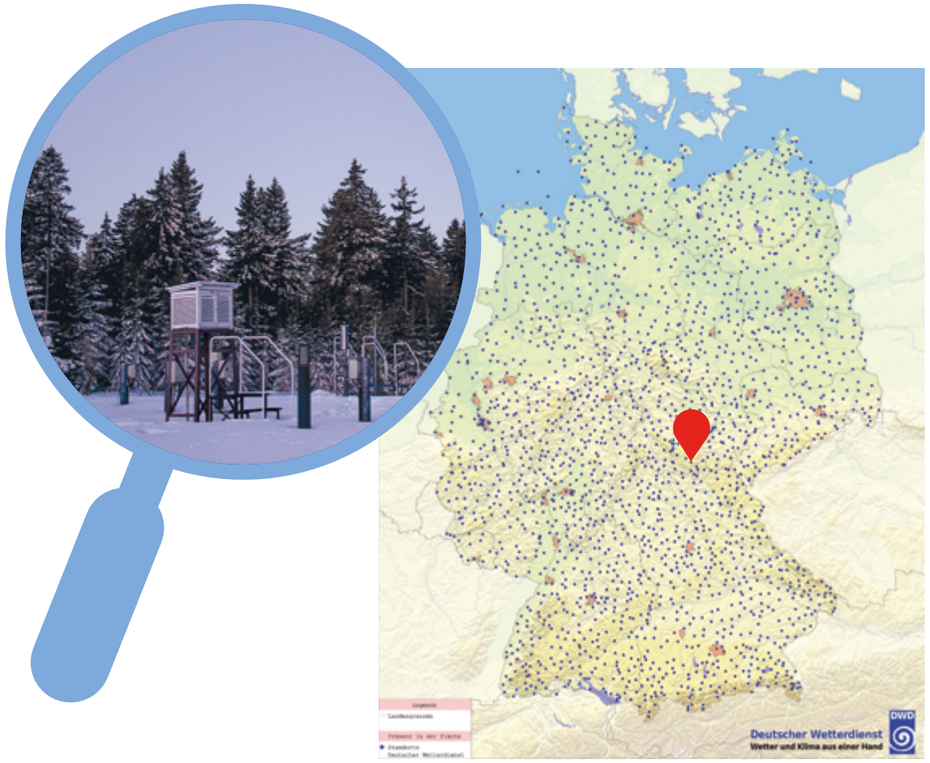
Für eine fundierte Wettervorhersage muss die Meteorologie die Vorgänge in der Atmosphäre rund um den Globus genau beobachten und in berechenbare Zahlen umwandeln. Dazu dienen physikalische Messgrößen. Die wichtigsten sind der Luftdruck, die Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit sowie der Gehalt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

Diese Daten erhält die Meteorologie 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 gut 180 solcher vollautomatisierten Wetterstationen. Hinzu kommen knapp 1 750 ehrenamtlich betreute „nebenamtliche“ Stationen, von denen einige auch den Wind messen. Um ein Höhenprofil der Temperatur, der Feuchte, des Winds und von dreißig weiteren meteorologischen Parametern zu erhalten, werden weltweit an über 1 300 Stationen mindestens zweimal täglich Wetterballone gestartet. Diese sogenannten Radiosonden steigen bis 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 Südostamerika gerade noch ausreichend. Große Gebiete der Erde sind dagegen echte Datenwüsten. Dazu zählen Afrika, die Kontinente der Südhalbkugel, alle Ozeane – und auch die Polargebiete. 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. So hat zum Beispiel die Arktis einen mächtigen Einfluss auf das Wetter in Mitteleuropa. Um diese Beobachtungslücken wenigstens auf den wichtigen Ozeanen teilweise zu schließen, sind auf den Weltmeeren etwa 2 500 Schiffe mit Wetterstationen an Bord unterwegs.

Hinzu kommen rund 1 500 automatische Driftbojen. Mittlerweile liefern auch etwa 5 000 Verkehrsflugzeuge meteorologische Daten an die Wetterdienste, so zum Beispiel fast alle Maschinen der Lufthansa. Sie übermitteln vornehmlich in der Start- und Landephase, aber auch beim Flug in zehn bis zwölf Kilometern Höhe ihre Messwerte.



▲ *Der DWD betreibt in Deutschland ein flächendeckendes Messnetz. Das Foto zeigt eine hauptamtliche Wetterstation im Thüringer Wald. (Foto: Rüdiger Manig/DWD)*

Überwachung aus dem All

Seit über fünfzig Jahren verarbeitet der DWD Daten von Wettersatelliten. Sie sind besonders wichtig, denn sie ermöglichen eine flächendeckende Beobachtung des Wettergeschehens rund um die Erde – insbesondere auch dort, wo es kaum Bodenstationen gibt. Die Satelliten messen die reflektierte Sonnenstrahlung sowie die Strahlung der Erde und Atmosphäre in mehreren „Frequenzfenstern“.

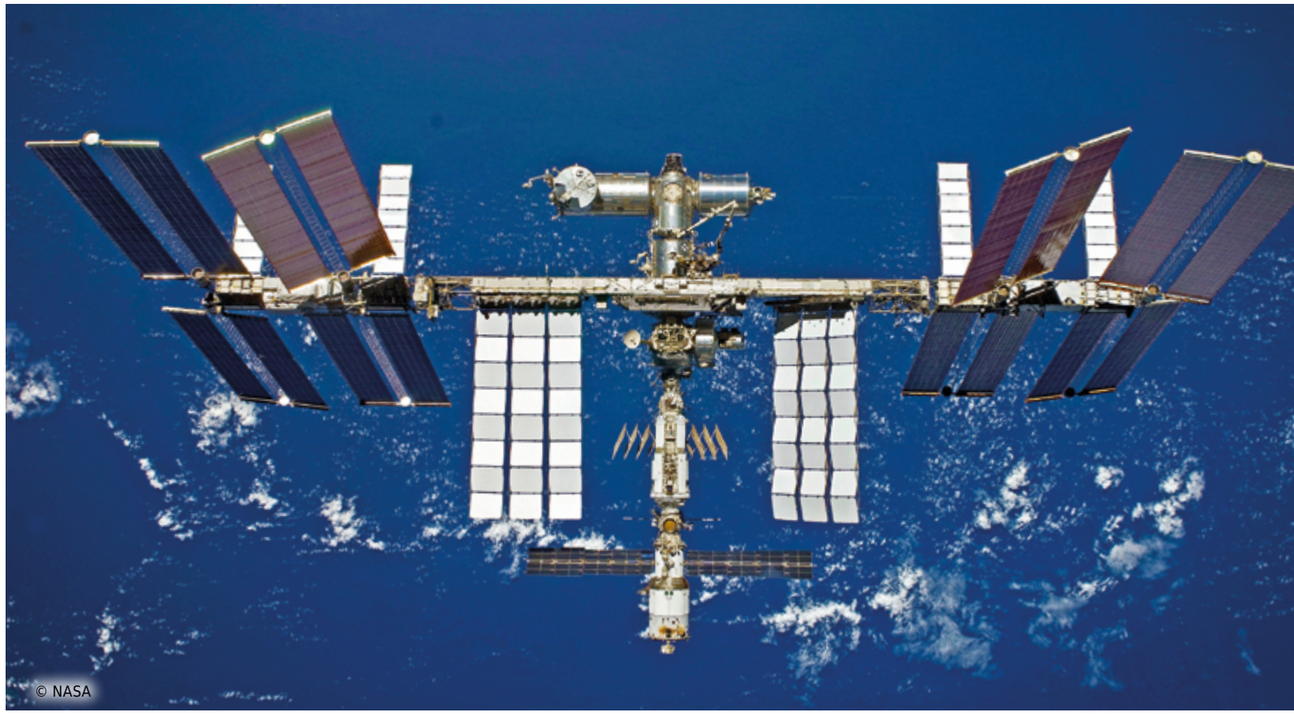
Einige Fenster liegen im Spektrum des sichtbaren Lichts, die meisten jedoch im Infraroten, manche im Mikrowellenbereich. Aus der gemessenen Strahlung lassen sich wichtige Informationen über den Zustand der Atmosphäre sowie der Land- und Meeresoberflächen ableiten. Dazu zählen die Temperatur des Erdbodens und der Wasseroberflächen oder Temperatur und Feuchte in der Atmosphäre als Ergänzung zu Radiosonden. 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. Radarsysteme geben Informationen über die Wellenhöhe, Windstärke und -richtung an der Meeresoberfläche.

Für den Vorhersagedienst liefern die Satellitenbeobachtungen vor allem Informationen über die Art, räumliche Verteilung und Bewegung der Wolken. Daraus können die Meteorologinnen und 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 Wetter- und Klimaforschenden die Wolkenformen genau analysieren, um solche „Versteckspieler“ sicher zu identifizieren.

Messungen zahlreicher Wettersatelliten sind ein wichtiger Bestandteil der Numerischen Wettervorhersagemodelle zur Beschreibung des Ist-Zustandes der Atmosphäre (Temperatur, Feuchte, Wind), zur Gewinnung von Meeresoberflächentemperaturen, der Meereisverteilung sowie von Bodentemperaturen und -feuchte. Diese Satellitendaten liefern einen entscheidenden Beitrag zur Qualität der Vorhersagemodelle des DWD.

Die Satellitenflotte

Besonders wichtig sind die geostationären Wettersatelliten, zu denen die europäischen METEOSAT-Satelliten gehören. Sie sind rund um die Erde oberhalb des Äquators verteilt. In knapp 36 000 Kilometern Höhe fliegen sie gerade so schnell, dass sie immer dasselbe Gebiet im Blick haben.



Ab 2023 geht die METEOSAT Third Generation (MTG) mit Satellitenpaaren in Betrieb. Der MTG-Imager-Satellit sendet alle zehn Minuten, für Europa sogar alle zweieinhalb Minuten, Bilder im sichtbaren und infraroten Spektrum. Je nach Kanal und Instrument beträgt die Auflösung 0,5 bis zwei Kilometer. Der Partnersatellit MTG-Sounder macht vor allem genaue Messungen im Infraroten mit einer Auflösung von etwa acht Kilometern. Er liefert den Wettermodellen vor allem Höhenprofile von Temperatur und Feuchte, auch Winddaten über wolkenfreien Gebieten. Die MTG ermöglichen zudem eine weitaus genauere Erkennung von Konvektion, also zum Beispiel Gewittern. Sie können zudem Blitze erfassen und so die Bodenbeobachtung unterstützen. Vor allem sind diese Informationen für Wetterwarnungen und die Kurzfrist-Wettervorhersage (Nowcasting) wichtig.

Allerdings können geostationäre Wettersatelliten die Polarregionen im hohen Norden und Süden nicht beobachten. Dies übernehmen Wettersatelliten, deren Bahnen über die Pole hinweg führen. Wegen der Erddrehung erfassen sie die Erdoberfläche dabei Streifen für Streifen. Bei nur 800 bis 900 Kilometern Flughöhe erreichen ihre Bilder im Sichtbaren und Infraroten eine hohe Auflösung. Die zweite Generation (SG) der europäischen polarumlaufenden Zwillingssatelliten wird ab 2023 mit einer Auflösung von 250 bis 1000 Meter die Welt erfassen. Mit ihren Mikrowellensendern durchdringen sie auch Wolken, und zusammen mit ihren Infrarotmessungen liefern sie so genauere Höhenprofile der Temperatur- und Feuchteverteilung. Der DWD nutzt auch Daten der polaren Wettersatelliten von den USA und zunehmend China.

Gewitterzellen im Visier

Für die Meteorologen und Meteorologinnen des Deutschen Wetterdienstes ist noch ein weiteres Beobachtungssystem unverzichtbar: das Wetterradar. Es misst das „Echo“ seiner Radarstrahlen an Wassertropfen und an Schnee- und Eiskristallen. So kann es flächendeckend und dreidimensional Niederschlagsgebiete erfassen – neben Regen auch Hagel und Schnee. Mit den Daten des Wetterradars können die Meteorologinnen und Meteorologen zum Beispiel kleine, hochreichende Gewitterzellen aufspüren und verfolgen. Diese entstehen besonders häufig im Sommer, mit starkem Regen oder Hagel. 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.

Der Meteorologie steht heute also eine ausgefeilte Technik zur Verfügung, mit der sie den gesamten Globus nach Wettererscheinungen absuchen kann. Um die so entstehende Datenflut schnell zu verarbeiten, benötigt sie extrem leistungsstarke Computer. Diese Supercomputer können, mit den aktuellen Daten gefüttert, sogar das Wetter der Zukunft berechnen.

◀ *Blick ins Großrechenzentrum des DWD. (Foto: NEC / TWL-KOM)*

Wetter aus dem Supercomputer

Die Klimaforscher und Meteorologinnen träumen schon lange davon, die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre mathematisch beschreiben zu können, denn dann ließe sich das Wetter der Zukunft berechnen. Tatsächlich lassen sich die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre recht genau mit mathematischen Gleichungen beschreiben. 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.

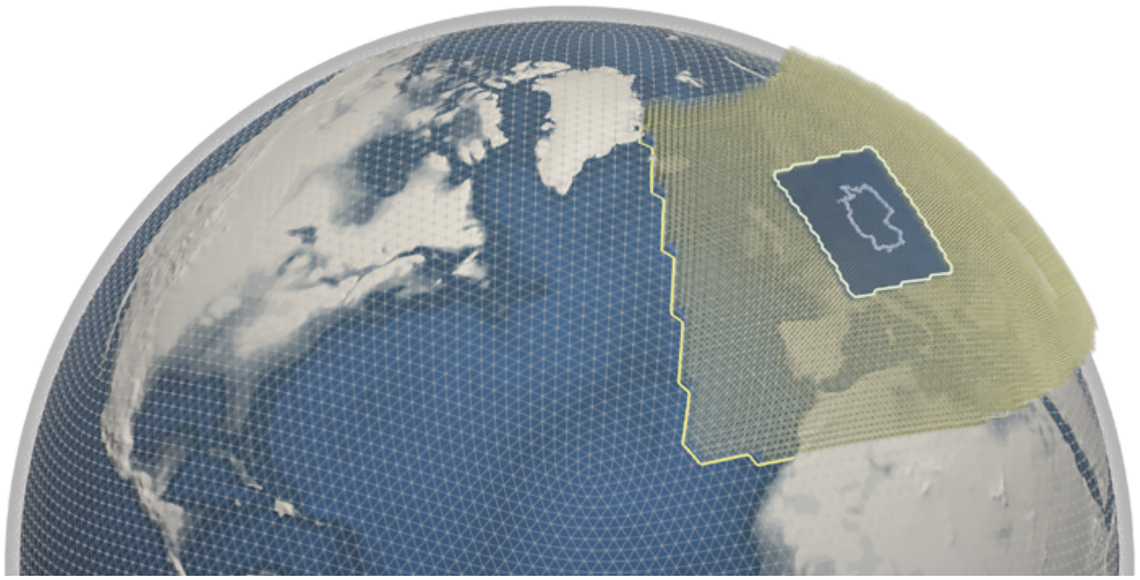
Mathematisches Heranpirschen

Daraus folgt ein ziemlich kompliziertes System mathematischer Gleichungen – und ein neues Problem: Die Gleichungen sind nicht mehr exakt lösbar! Zum Glück aber kennt die moderne Meteorologie mit der „numerischen Mathematik“ ein mächtiges Hilfsmittel. Diese erlaubt es, sich durch den Zahlendschungel geschickt an die 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 Meteorologinnen und 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. Mit diesem Anfangszustand legt der Computer los. Er berechnet daraus, wie sich die Atmosphäre – und damit das Wetter – Zeitschritt für Zeitschritt in die Zukunft hinein verändern wird. Als Ergebnis liefert er für jeden Gitterpunkt eine Vorhersage: Sie besagt, welchen Wert die Temperatur, der Druck, der Wind, die Feuchte und andere physikalische Größen jeweils in wenigen Stunden bis zu einigen Tagen haben werden. Daraus können die Meteorologinnen und Meteorologen dann eine Wettervorhersage ableiten.

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 Leistungsfähigkeit der „Numerischen Wettervorhersage“ (NWV) stetig mit der Rechenleistung der Supercomputer.

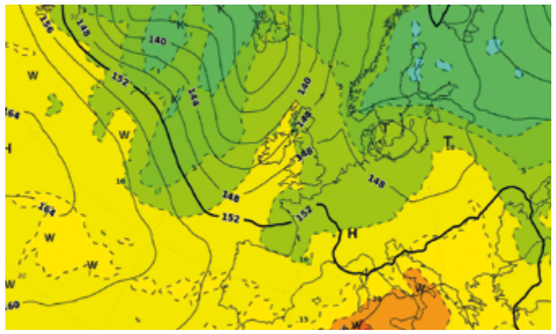


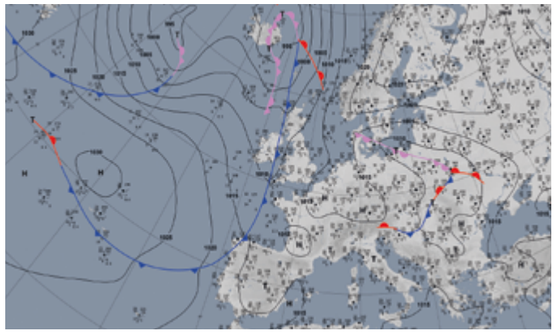
Die Geschichte der Computer beginnt in den 1960er Jahren. Wegen der damals geringen Rechnerkapazität waren die ersten numerischen Wettermodelle noch sehr primitiv. Aber mit jeder neuen Computergeneration wurden sie immer detaillierter und besser. Der Deutsche Wetterdienst betreibt heute eine Modellkette, die aus zwei Modellen mit unterschiedlich feinen Gitterrastern besteht. Für das Wetter auf der gesamten Erde ist beim DWD das „Globalmodell“ namens ICON zuständig, für Deutschland das hochauflösende „Lokale Modell“ ICON-D2.

Gitterraster für den Globus

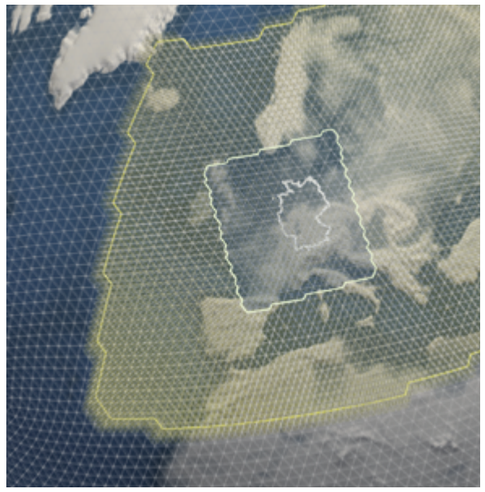
Das ICON-Modell überzieht den Globus mit einem Gitter aus fast gleich großen Dreiecken. Der durchschnittliche Abstand der den Dreiecken zugeordneten Gitterpunkte beträgt derzeit etwa 13 Kilometer. Damit legt dieses Modell ein Netz aus 2.949.120 Gitterpunkten um die Erde. In der dritten Dimension unterteilt es die Atmosphäre in 90 Schichten bis in 75 km Höhe, sodass 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. In einem Nestgebiet über Europa ist das Gitternetz in ICON sogar noch weiter verfeinert. Dort wurde der durchschnittliche Abstand der Gitterpunkte auf etwa 6,5 Kilometer halbiert.

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.





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



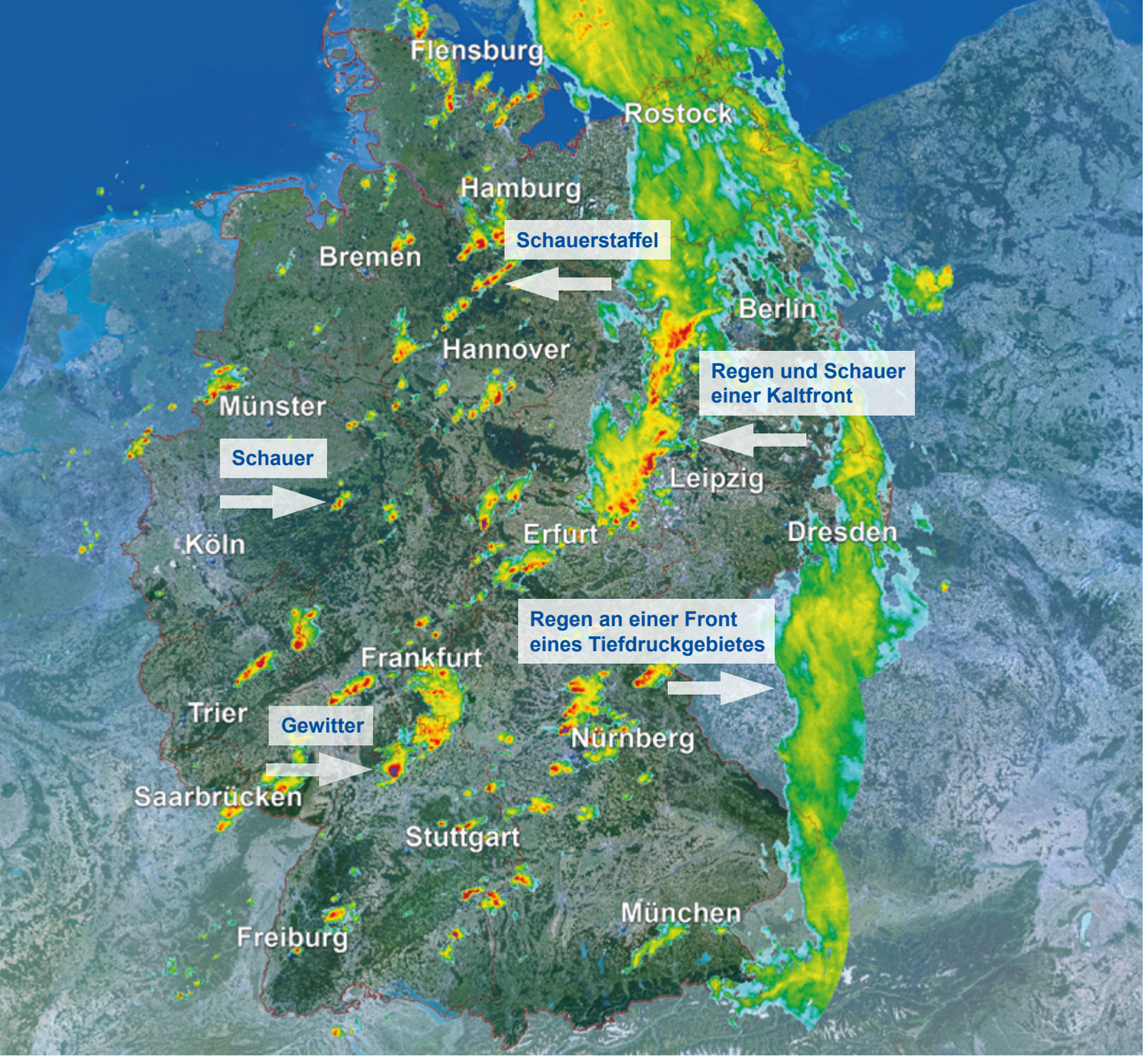
▲ *Das globale Vorhersagemodell ICON des DWD mit dem eingebetteten lokalen Modell ICON-D2.*

Deutschland in Rechenkästchen

Für Deutschland und seine Anrainerstaaten setzt der DWD das noch höher auflösende Modell ICON-D2 ein. Es ist wiederum in das globale ICON-Modell „eingenestet“. Mit einer Maschenweite von nur 2,1 Kilometern kann es die unterschiedlichen Landschaften und das lokale Wettergeschehen im Vorhersagegebiet viel genauer erfassen. ICON-D2 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.

Zusätzlich zu den zwei Wettervorhersagemodellen ICON und ICON-D2 werden auch sogenannte Anschlussmodelle für spezielle Prognosen gerechnet. Diese liefern beispielsweise Prognosen des Seegangs in der Nord- und Ostsee und auf den Weltmeeren, zum Beispiel für den Schiffsverkehr.

Weitere Modellpakete werden nur im Notfall eingesetzt. Ein Beispiel sind radioaktive Schadstoffe in der Luft. Registriert das Messnetz des DWD solche, dann berechnet ein Modell, 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 anderes Modell den Transport und die Verteilung der Aschepartikel in der Atmosphäre.



Zuverlässig – aber mit Grenzen

Numerische Wettermodelle arbeiten heute schon sehr zuverlässig. Sie werden auch regelmäßig mit aktuellen Wetterdaten aus dem Beobachtungsnetz „nachjustiert“, während sie eine Vorhersage berechnen, was die Prognose noch genauer macht. Besonders großräumige Wetterentwicklungen können sie bis zu etwa zehn Tage vorhersagen – wobei der Prognosefehler allerdings auch mit jedem Tag wächst.

Die numerischen Modelle stoßen jedoch nach wie vor an Grenzen. Das Wettergeschehen spielt sich auf sehr unterschiedlichen Größenskalen ab. Dabei sind nicht nur die großen Skalen der erdumspannenden Hoch- und Tiefdruckzonen wichtig, die die Modelle recht gut im Griff haben. Kritisch wird es bei Vorgängen auf kleinen Skalen, etwa lokale thermische Auf- und Abwinde oder Nebelfelder.

Vor allem im Sommer können wir die Grenzen der heutigen Wetterprognosen erleben: Plötzlich zieht ein heftiger Gewitterschauer auf und sprengt die Grillparty – natürlich hatte das der gestrige Wetterbericht so nicht vorhergesagt. Das liegt daran, dass solche Gewitterzellen oft nur einen geringen Durchmesser haben und deshalb selbst vom 2,1-Kilometer-Raster ICON-D2 nicht ausreichend genau dargestellt werden. Doch die Vorhersagen werden sich verbessern, wenn dieses Raster wie geplant in Zukunft auf einen Kilometer verfeinert wird. Trotzdem besteht noch intensiver Forschungsbedarf, denn die Simulation von Wolkenbildung und Niederschlag in den Wettermodellen hat bis heute Schwächen.

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. Dieses 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.

© Rüdiger Manig/DWD

Um das chaotische Verhalten der Atmosphäre bei der Vorhersage berücksichtigen zu können, setzt der DWD sogenannte Ensemble-Vorhersagen ein. Das aktuelle ICON-EPS-System rechnet parallel vierzig Vorhersagen des Modells ICON mit einer Maschenweite von 40 km. Diese Vorhersagen unterscheiden sich etwas in den Anfangs- und Randbedingungen und Modelleigenschaften. Die leicht variierenden Ergebnisse erlauben es, Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Wetterereignisse, beispielsweise für das Auftreten von Regen oder Schnee, zu berechnen und die Verlässlichkeit der Vorhersage einzuschätzen. ICON-EPS kann die die Vorhersageunsicherheit weltweit bis zu sieben Tage im Voraus bestimmen.

▲ *Wetterüberwachung in der Vorhersage- und Beratungszentrale.*

Am Ende entscheidet der Mensch

Am Ende der Kette aus Wetterbeobachtung und Wettersimulation steht die „operationelle Wettervorhersage“. Sie umfasst die Wetterberichte, die der Deutsche Wetterdienst jeden Tag offiziell herausgibt. Zuständig dafür sind die Meteorologinnen und Meterorologen der Vorhersage- und Beratungszentrale des DWD in Offenbach sowie in den Regionalen Wetterberatungen und der Regional- und Seewetterzentrale in Hamburg. 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 Meteorologinnen und 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 die Meteorologin oder der Berater „vom Dienst“ mit Erfahrung die Wetterlage neu beurteilen und sich für die optimale Vorhersage entscheiden.

Der gesetzliche Auftrag

Die Wetterprognosen sind auf die unterschiedlichen Bedürfnisse der jeweiligen Nutzenden 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 den Katastrophenschutz und die Öffentlichkeit in Deutschland.

Heute informiert das vollautomatische System KatWIS Feuerwehr, Polizei und Katastrophenschutz über die Wetterlage und aufziehende Unwetter mit für ihre Zwecke extra zugeschnittenen Daten. Zu der Kundschaft des DWD zählen auch Wirtschaftsunternehmen: Wenn zum Beispiel ein Ölkonzern eine neue Bohrinsel an ihren zukünftigen Standort schleppen lassen will, muss er sich auf einige ruhige Tage auf See verlassen können. Auch für die Sicherung der Luftfahrt ist eine zuverlässige und genaue Wettervorhersage notwendig, um hohe Schäden bei Unfällen oder Verspätungen abzuwenden.

Bei den Auswirkungen von gefährlichen Wettererscheinungen geht es oft um hohe Sachwerte, die es – wenn möglich – zu schützen gilt. Schnell entstehen Milliardenschäden durch Stürme, Überschwemmungen oder Hagel. Aber auch die Menschen selbst müssen sich vor den Auswirkungen schwerer Unwettern schützen können. Sie werden daher im Vorfeld gemeindegenau vom DWD gewarnt, zum Beispiel per DWD-Warnwetter-App, Internet, Social-Media oder Newsletter. Deshalb tragen die Meteorologinnen und Meteorologen „vom Dienst“ tagtäglich eine hohe Verantwortung.

Den Gewittern auf der Spur

Besonders im Sommer ist für die Beschäftigten 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 aufspüren. Regentropfen, Hagelkörner und Schneeflocken reflektieren Radarfrequenzen auf jeweils eigene Art und Weise. Der Radarverbund des DWD kann sie anhand ihrer Radarechos unterscheiden und so die Art des Niederschlags erkennen.

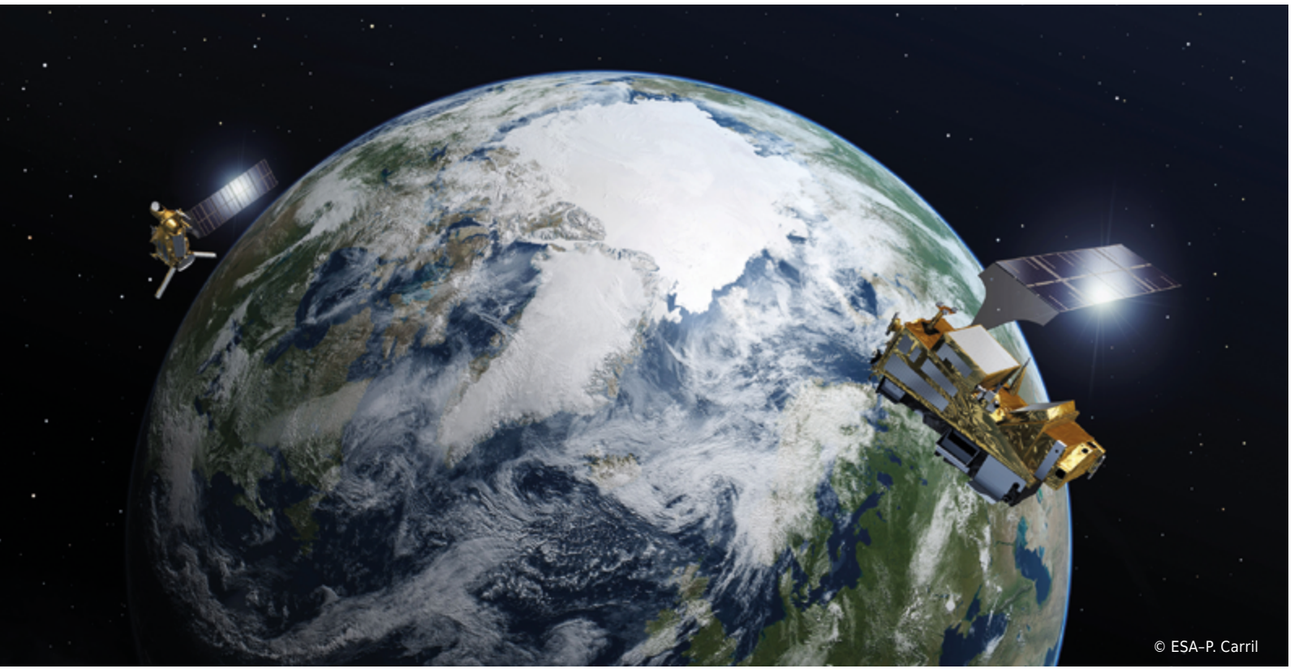
Ob ein starker Niederschlag tatsächlich zu einer Gewitterzelle gehört, kann durch die gleichzeitige Ortung von Blitzen erkannt werden. Der DWD greift auf die Daten eines europaweiten Blitzortungssystems zurück, das aus rund 190 Sensoren besteht. Diese Sensoren empfangen die elektromagnetischen Entladungspulse der Blitze – gewissermaßen das „Funkecho“ des Gewitters – und werten sie automatisch aus. Aus den unterschiedlichen Zeitpunkten, an denen der Puls an den verschiedenen Stationen eintrifft, kann der Entstehungsort des Blitzes auf etwa 100 Meter genau berechnet werden. Nur wenige Sekunden später erscheinen diese Daten auf den Bildschirmen der Meteorologinnen und Meteorologen. Ab 2023 wird auch die neue Generation der MTG-Satelliten Blitzdaten liefern.

© Hans Richard Henkes/DWD

© Michael Weirauch - stock.adobe.com

Von Sofort bis Übermorgen

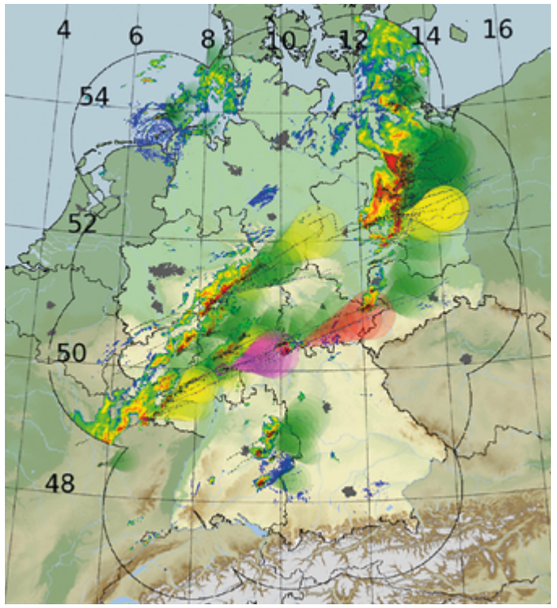
Alle diese Systeme zusammen machen recht treffsichere Unwetterwarnungen möglich. Als kürzestfristige Wettervorhersagen für die nächsten zwei Stunden sind sie vor allem im Sommer ein wichtiger Teil des Tagesgeschäfts der Meteorologie.


© ESA–P. Carril

Die Ergebnisse der numerischen Wettervorhersagen gehen derzeit bis sieben Tage in die Zukunft. Je weiter es in die Zukunft geht, desto mehr gewinnt das großräumige Wettergeschehen an Gewicht. Wie schon beschrieben ist das lokale Modell ICON-D2 in den EU-Teil von ICON „eingenestet“, und dieser wiederum in das Globalmodell ICON. Die ersten Stunden bis Tage erfasst ICON-D2 mit seiner hohen Auflösung von derzeit 2,1 Kilometern, bis fünf Tage in die Zukunft kommen die Vorhersagen aus ICON-EU, das mit einem Raster von 6,5 Kilometern die doppelte Auflösung des Globalmodells ICON hat. Letzteres übernimmt derzeit die letzten zwei Tage der Wetterprognose.

Um ihre Vorhersagen noch sicherer zu machen, vergleichen die Wetter- und Klimaforschenden ihre Daten auch mit den numerischen Wettermodellen der nationalen Wetterdienste in den Nachbarländern und in Übersee. Dieser intensive, weltweite Datenaustausch ist entscheidend für eine hohe Qualität der Wettervorhersagen.

Diese Deutschlandkarte aus KONRAD3D zeigt aktuelle Niederschlagsgebiete und ihre vorhergesagten Zugbahnen für die kommenden Stunden (gepunktete Linien). Die Kreise umzirkeln die mit fortschreitender Zeit wachsende Unsicherheit der Vorhersage, die aus einem Verfahren namens KONRAD3D kommt.



Wie genau sind Wettervorhersagen?

Wettervorhersagen werden niemals hundertprozentig zutreffend 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 Chaostheorie gehört. Der Chaosanteil im Wetter wird deshalb trotz immer besserer Technik weiterhin die Gefahr einer dramatischen „Andersentwicklung“ des Wetters in sich bergen. Dann liegen die Wetterprognosen zwangsläufig daneben.

Zum Glück passiert dies immer seltener, die Wettervorhersagen sind in den vergangenen Jahrzehnten immer verlässlicher geworden. Eine siebentägige Prognose hat heute die gleiche Zuverlässigkeit wie eine 24-stündige im Jahr 1968.

Blick in die Zukunft

In den kommenden Jahren wird die Meteorologie die Qualität ihrer Wetter- und Unwettervorhersagen dank immer besserer Technik 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. 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.

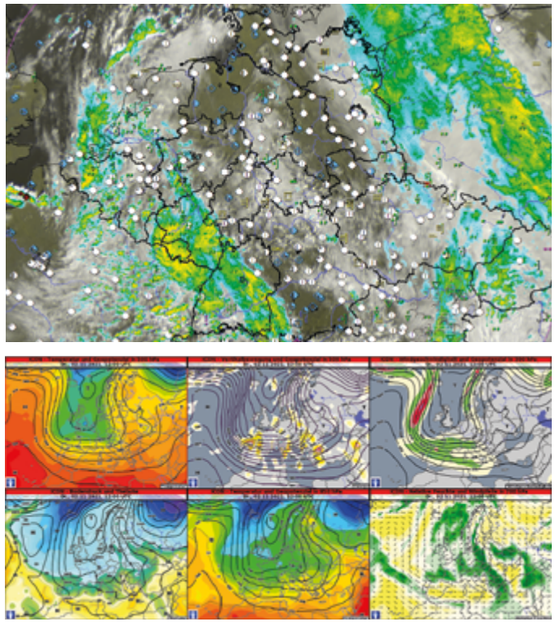
Das "Arbeitspferd" der Vorhersage-Meteorologie beim DWD ist das Computersystem „NinJo“, das fortwährend weiterentwickelt wird. Es ermöglicht eine auf jeden Bedarf zugeschnittene übersichtliche Darstellung aller wichtigen Wetterdaten weltweit auf einen Blick. Als Anwender stehen die Meteorologinnen und Meteorologen auch in einem engen Austausch mit den Entwickelnden der numerischen Wettervorhersagemodelle. So sind sie nicht nur Wetterexpertinnen und -experten, sondern oft auch Forschende, Software-Entwickelnde – und vor allem Consultants oder Beratende für die Nutzenden spezieller Wettervorhersagen oder Unwetter- Warnsystemen.

Bessere Kurzfrist-Wettervorhersagen

Vor allem in der Kurzfrist-Wettervorhersage, dem Nowcasting, werden die kommenden Jahre wichtige Fortschritte bringen. Das ist Ziel des DWD-Projekts SINFONY (Seamless INtegrated FOrecastiNg sYstem, Nahtlos integriertes Vorhersagesystem). Bislang gibt es eine Lücke von etwa zwei Stunden zwischen dem gemessenen Ist-Zustand des Wettergeschehens und der frühesten Modellvorhersage. Das Problem: Die numerischen Wettermodelle brauchen eine gewisse „Einschwingzeit“; außerdem bilden sie etwa ein lokales Niederschlagsgebiet nicht realitätsgetreu dort ab, wo sich gerade eines befindet.

Deshalb wird bislang beim Nowcasting der gerade erfasste Trend im Wettergeschehen für die ersten Stunden einfach als Schätzung fortgeschrieben. Das funktioniert, weil Wetter ein gewisses Beharrungsvermögen hat: Ein vom Wind in eine bestimmte Richtung getriebenes Niederschlagsgebiet wird diese eine Weile beibehalten und sich dabei anfangs nicht wesentlich verändern.

SINFONY soll nun dieses simple Fortschreiben von Trends mit einer echten Modellierung des Wettergeschehens in der Atmosphäre verknüpfen. Dazu startet ein Ensemble von vierzig Wettermodellen direkt aus dem Nowcasting heraus. Das soll etwa die weitere Entwicklung einer kleinen Gewitterzelle realitätsnäher für die kommenden Stunden vorhersagen. Diese Daten sollen dann auch in KONRAD3D einfließen: Das neue Radarprodukt für das Nowcasting zeigt die vorhergesagten Zugbahnen von Niederschlagsgebieten an, sowie die mit fortschreitender Zeit wachsende Unsicherheit dieser Vorhersage. SINFONY soll das Nowcasting nahtlos mit den ersten Vorhersagen aus ICON-D2 verbinden.



▲ *Das Computersystem NinJo ist genau auf die Bedürfnisse der Beschäftigten in der Wettervorhersagezentrale zugeschnitten.*

Noch feinere Maschen

Im Fokus der Weiterentwicklung numerischer Wettermodelle stand und steht eine optimierte Vorhersage von Niederschlägen. Inzwischen ist sie vor allem für kleinräumige, aber schwere Gewitterschauer mit extremen Niederschlägen und Hagel besser geworden. Eine weitere Verdichtung des Modellgitters von ICON-D2 auf einen Kilometer Maschenweite wird hier noch Fortschritte bringen. Für die notwendige höhere Rechenleistung steigert der DWD regelmäßig die Leistungsfähigkeit seines Supercomputers. Trotz der Fortschritte weist die numerische Wettervorhersage noch einige Schwächen auf. Ein Beispiel ist die noch zu ungenaue Modellierung der physikalischen Prozesse in den Wolken. Dazu ist weitere Grundlagenforschung nötig.

An diesem Punkt stellt sich die Frage: Werden vollautomatische Beobachtungssysteme, Vorhersagen aus dem Supercomputer und der zunehmende Einsatz Künstlicher Intelligenz Meteorologinnen und Meteorologen aus Fleisch und Blut ersetzen? Das ist unwahrscheinlich. Die Erfahrung zeigt, dass die Technik zwar zunehmend Aufgaben übernehmen und dem Menschen in Manchem überlegen sein kann. Doch sie erfordert Spezialistinnen und Spezialisten, die sie verstehen, bedienen und weiterentwickeln können. Das Berufsbild der Meteorologie wird daher nicht verschwinden, sondern sich – wie in den vergangenen Jahrhunderten – mit dem technischen Fortschritt wandeln.

Neue Informationsquellen erschließen

Die zunehmende Vernetzung bietet der Meteorologie ganz neue Möglichkeiten. Ein Stichwort ist Crowdsourcing. Dabei können sich Bürgerinnen und Bürger beteiligen. Über die WarnWetter-App des DWD können sie zum Beispiel selbst lokale Ereignisse wie schwere Gewitter, Hagel oder Tornados melden – kleinräumige Wetterphänomene, die durch das Raster fallen können.

Ein Forschungsprojekt, an dem der DWD beteiligt ist, will kommerzielle Mobilfunkstrecken für Niederschlagsmessungen nutzen. Diese Funkmasten tauschen über ihre Richtfunkantennen Daten auf Mikrowellenfrequenzen aus. Diese elektromagnetischen Wellen werden durch Tröpfchen in der Luft abgedämpft. Eine zuverlässige Auswertung ist allerdings aufwändig, weil viele andere Einflüsse auf die Funksignale herausgerechnet werden müssen. Hier hilft der Einsatz von Künstlicher Intelligenz. In Deutschland kann diese Technik die Messungen der Bodenstationen und der Wetterradarstationen unterstützen. Besonders interessant ist sie für Entwicklungsländer, in denen das Mobilfunknetz als einzige Quelle für lokale Niederschlagsmessungen zur Verfügung steht.

▲ *Ihre täglichen Begleiterinnen auf dem Smartphone: die WarnWetter- und GesundheitsWetter-Apps des DWD.*

▲ *Die Wettervorhersagezentrale in Offenbach.*

Wo und wie der DWD für Sie da ist

Für Bürgerinnen und Bürger ist der DWD vielfältig präsent in den Sozialen Netzwerken. Nutzende der WarnWetter-App tragen ihn sogar auf dem Smartphone immer bei sich. In der kostenpflichtigen Version, die einmalig 1,99 Euro kostet, bietet sie ein umfassendes Paket an Funktionen: Deutschlandkarten mit Wetterwarnungen, Niederschlag, einen Warnmonitor für Warngebiete und Meldungen der Nutzerinnen und Nutzer zum Beispiel zu Glätte, Schneefall, Nebel oder Starkregen.

Ein weiteres nützliches Tool ist die Gesundheits-Wetter-App des DWD. Sie bereitet die Wettersituation mit Blick auf die Gesundheit auf und warnt vor gefährlichen Wetterlagen, zum Beispiel Hitzewellen. Als Versorgung für das Gesundheitswesen und Risikogruppen entwickelt, ist sie allen Interessierten frei zugänglich.

Auf seiner Website, auf Twitter, Facebook und Instagram, berichtet der DWD regelmäßig über aktuelle Themen und Entwicklungen. Empfehlenswert ist zudem der Youtube-Kanal des DWD mit Unwetterwarnungen, Satellitenfilme der Wetterentwicklung und Erklärungen zu vielen Themen rund um das Wetter.

Impressum

Text: Roland Wengenmayr, www.roland-wengenmayr.de
Redaktion: Uwe Kirsche, DWD
Gestaltung: Maria Carvalho, DWD
Abbildungen: DWD (wenn nicht anders gekennzeichnet)
Papier: Dieses Produkt stammt aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern und kontrollierten Quellen.

Melden Sie uns
Ihr Unwetter!

Deutscher Wetterdienst (DWD)
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach
Tel: +49 (0) 69 / 8062 - 0
E-Mail: info@dwd.de

Über www.dwd.de gelangen Sie
auch zu unseren Auftritten in:

DWD 7. Auflage 5.000 / 11.21