

Romseminar 2004

Die Wirklichkeit der Mathematik

Die Wettervorhersage - Marc-Oliver Pahl Februar 2004

Der Text entstand zum Romseminar des Arbeitsbereiches Funktionalanalysis der Universität Tübingen, das vom 23.2.2004 bis zum 27.2.2004 in Rom stattfand.

Inhaltsverzeichnis

Die Entstehung eines Planeten	4
Der Mensch	5
Erklärung von Wetterphänomenen	6
Messinstrumente	7
Bauernregeln	8
Wetterbeobachtung	9
Die ersten Wettervorhersagen	10
Wie entstehen Prognosen?	11
Die Theorie hinter dem Wetter	13
Ein Wettermodell	14

Abstract

Inhalt des Textes ist es, wie die Menschen sich die sie täglich umgebenden Wetterphänomene im Laufe der Geschichte erklären.

Nach einer Begriffsdefinition wird die Rolle der Atmosphäre bei der Entstehung unseres Planeten und dessen Lebensformen beleuchtet. Danach wird darauf eingegangen, wie die ersten Hochkulturen, insbesondere die Griechen sich Wetterphänomene erklärten. Anschließend folgt die Erfindung der wichtigsten Wettermessinstrumente Thermometer, Barometer, Hygrometer und Anemometer. Da diese dem gemeinen Volk nicht zur Verfügung standen, wird daraufhin exemplarisch zwei Bauernregeln auf den Grund gegangen. Dann werden die ersten Atmosphärenmessungen beschrieben, die in den ersten Prognosen und veröffentlichten Wetterberichten münden. Nach einem sehr kleinen Ausflug in die Thermo- und Hydrodynamik wird abschließend das numerische Modell des Deutschen Wetterdienstes von 1998 knapp vorgestellt. Zu allerletzt wird auf die Güte von numerischen Wettervorhersagen eingegangen.

*„If you don't like the weather...
just wait a few minutes“
Mark Twain*

Die Wettervorhersage

Ich möchte zunächst ein paar Begriffe einordnen:

Als **Atmosphäre** (griechisch *atmos* = Luft) bezeichnet man die gasförmige Hülle eines Himmelskörpers. Die unterste Schicht der Atmosphäre der Erde ist die Troposphäre. Sie ist an den Polen bis 8km, am Äquator bis 17km mächtig. In ihr „findet das Wetter statt“. Darüber kommt die Stratosphäre (bis 50km), die mit der Stratopause, der Ozonschicht, aufhört. Danach folgen Mesosphäre (bis 80km), Thermosphäre (bis 500km) und schließlich die Exosphäre, die dann in den interplanetaren Raum übergeht.

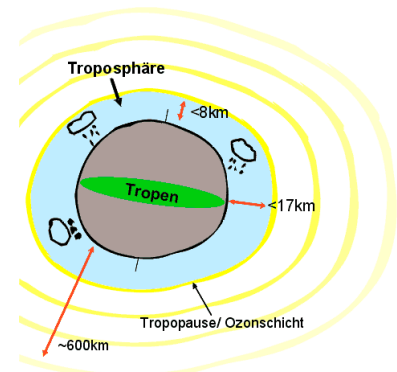
Das **Klima** beschreibt den charakteristischen durchschnittlichen Zustand der Erdatmosphäre an einer Stelle der Erdoberfläche in Bezug auf die Auswirkungen auf biologisches Leben, insbesondere den Menschen. Es wird vor allem durch die Wetterkenngrößen Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung, Niederschlagsmenge und Niederschlagshäufigkeit bestimmt. Als Klima wird das Wetter über eine längere Zeit in einer bestimmten Region der Erde bezeichnet. Das Klima wird vor allem durch die Entfernung zum Äquator und damit die Sonneneinstrahlung beeinflusst. An Orten gleichen Breitengrades ist hauptsächlich die Höhe über dem Meeresspiegel für unterschiedliches Klima entscheidend, weil sie zusammen mit der Feuchtigkeit auch die Vegetation bestimmt.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts beschäftigt die Klimaforschung (Klimatologie) eine Vielzahl von Wissenschaftsgebieten. Genannt seien Physik, Chemie, Mathematik, Statistik, Ozeanographie, Geologie, Archäologie und Radiologie.

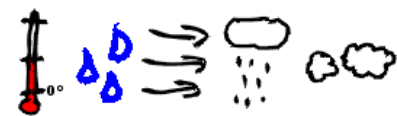
Unter **Wetter** versteht man lokal und zeitlich begrenzte Vorgänge in der Atmosphäre. Es wird beschrieben durch Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Regen und Bewölkung. Da diese Kenngrößen so nur auf der Erde existieren, spricht man auch nur hier von Wetter.

Die **Meteorologie** schließlich ist ein Teilgebiet der Geophysik und befasst sich mit den physikalischen Erscheinungen in der Atmosphäre. Meteorologie kann auf jeden Planeten angewandt werden. Sie behandelt dynamische Phänomene, die in der Atmosphäre auftreten, die chemischen und physischen Veränderungen, die durch tägliche und saisonale Unterschiede, die Sonneneinstrahlung und die Land- und Wassermassen sowie die Organismen auf unserem Planeten entstehen. Beide wirken aufeinander ein: Alles auf der Oberfläche der Erde verändert die Atmosphäre und damit das Klima, das wiederum die Erde verändert (Erwärmung, Vegetationszonen etc.). Klassisch gibt es zwei Teilrichtungen der Meteorologie: Die synoptische Meteorologie, die ihre Erkenntnisse aus den Beobachtungen von Atmosphärischen Erscheinungen gewinnt und die dynamische Meteorologie, die sich mit den theoretischen physikalischen und chemischen Modellen befasst. Anfang des 20. Jahrhunderts kamen die anfänglich konkurrierenden Gebiete in Einklang.

[Duden91, Williams98, Malberg99]

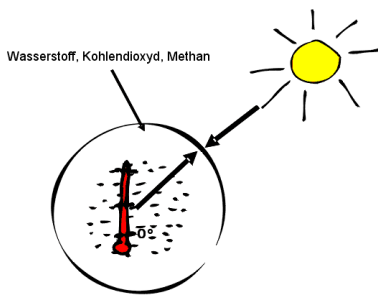


Die Atmosphäre der Erde

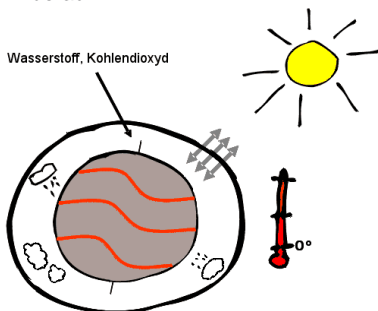


Die Kenngrößen des Wetters: Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Regen und Bewölkung.

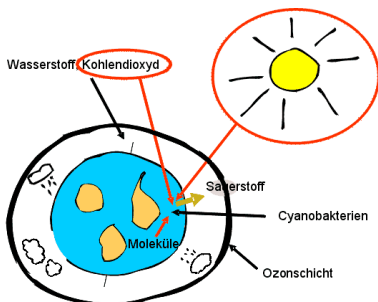
Die Entstehung eines Planeten



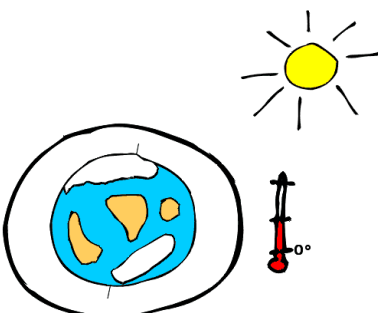
In der dichten Atmosphäre heizt sich die Erde auf...



...der Kern wird flüssig und eine neue Atmosphäre entsteht...



...Landmassen bilden sich und erste Lebewesen entstehen. Diese wandeln Kohlendioxyd in Sauerstoff.



Die polwärts driftenden Platten kühlen ab.

Bei der Entstehung unseres Planeten vor fünf Milliarden Jahren bestand die erste Atmosphäre um das noch gasförmige Innere vor allem aus den leichten Gasen Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan. Sie war so dicht, dass kein Sonnenlicht in das Innere und keine Wärme nach außen treten konnten. Durch Reaktionen der Gase miteinander erreichte die Erde eine sehr hohe Temperatur. Einige Gase verflüssigten sich. Dieser Prozess setzte so viel Energie frei, dass die gesamte Uratmosphäre in den Weltraum geschleudert wurde.

Es bildete sich eine neue Atmosphäre um den jetzt flüssigen Erdkern, die diesmal hauptsächlich aus Wasserstoff und Kohlendioxid bestand und daher durchlässiger für Energie war. So konnte die Erde in den folgenden hundert Millionen von Jahren stark abkühlen. Auf dem äußeren Rand des flüssigen Balles bildeten sich feste Erdplatten. Mit der Zeit verdampfte der dauerhaft fallende Regen nicht mehr lange bevor er den Boden berührte. Es bildeten sich gewaltige Flüsse und Ozeane. In diesen sammelten sich Ausschwemmungen von den Landmassen und lösten sich Ausstöße von zahlreichen Unterwasservulkanen. Durch die katalysierende Wirkung der Sonne entstand die Ursuppe, der das erste Leben entspringen sollte – Cyanobakterien.

Diese wandelten zur eigenen Energieversorgung im Wasser vorhandene Moleküle und in der Luft vorhandenes Kohlendioxid mithilfe der Sonnenstrahlen in Sauerstoff um. Da sie keinerlei Feinde hatten verbreiteten sie sich stark und produzierten so viel Sauerstoff, dass sie schließlich nicht mehr genügend Kohlendioxid hatten und sich damit ihre Lebensgrundlage entzogen. Der neu in der Atmosphäre vorhandene Sauerstoff bildete eine Schutzschicht um die Erde: die Ozonschicht. Sie fängt die lebensfeindliche Strahlung der Sonne zu einem großen Teil ab. Ohne ihre Existenz hätten Lebensformen wie der Mensch niemals entstehen können.

In den folgenden Milliarden von Jahren koexistierten Sauerstoff produzierende Pflanzen und diesen verbrauchende organische Lebewesen. Je komplexer (und angepasster) die Lebensformen wurden, desto abhängiger waren sie von einem stabilen, das heißt nicht extrem schwankenden, Klima. Dies ist der Grund dafür, warum bis heute fast alle Urtiere ausgestorben sind, die Urbakterien aber zum Teil die drastischen Klimawechsel überstehen konnten.

Die Oberfläche unserer Erde besteht aus riesigen Platten. Diese schwimmen auf dem flüssigen Erdinneren, wie Eisschollen auf dem Meer. Da das Erdinnere viel zäher als Wasser ist, bewegen sie sich aber deutlich langsamer, nämlich nur einige Zentimeter pro Jahr. So die heute allgemein anerkannte Theorie der Plattentektonik, wie sie 1912 von Alfred Wegener begründet wurde. Ursprünglich gab es auf dem blauen Planeten nur einen riesigen Kontinent, Pangea, der sein Zentrum am Äquator hatte. Vor 65 Millionen Jahren trennten sich die Antarktis, Sibirien und Nordamerika ab und begannen zu den Polen zu driften. Da die Intensität der Sonneneinstrahlung mit zunehmender Entfernung vom Äquator (senkrecht) immer geringer wird, kühlten die neuen Kontinente ab und Gletscher konnten sich bilden.

Diese wiederum reflektieren fast die gesamte Sonneneinstrahlung und damit auch die Wärme wieder zurück ins Weltall, was dazu geführt hat, dass das Gesamtklima der Erde kälter wurde. Das Polareis ist im Laufe der Jahrtausende immer wieder in Richtung Äquator vorgedrungen und hat sich dann wieder zurückgezogen: Die so genannten Eiszeiten. Sechs größere Eiszeiten wurden benannt (Biber, Donau, Günz, Mindel, Riss, Würm), Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass es wohl viel mehr gab. Die großen Eiszeiten vernichteten jedes Mal fast das gesamte Leben. Sie erzwangen damit aber auch die Evolution, denn jedes Mal entstanden neue, besser angepasste, Lebensformen. Eine davon waren die Vorfahren des Menschen.

[Williams98, Duden91]

Der Mensch

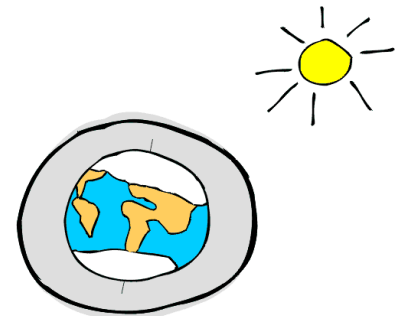
Zu Beginn lebten die Urahnen des Menschen in einer Region Pangeas, die heute Afrika entspricht. Die eurasische Platte begann, in Richtung ihrer heutigen Position zu driften. Auch Afrika verschob sich und kam dadurch in den Einfluss eines Hochdruckgebietes, dem so genannten Azorenhoch, einem Warmluftwirbel, der die Bildung von Wolken in höheren Luftschichten verhindert. Ohne Wolken wurde kein Wasser mehr ins Landesinnere transportiert und so entstand die größte Wüstenregion unseres Planeten, die Sahara.

Mit der, durch die Gletscher hervorgerufenen, Abkühlung der Erde wurde das Klima insgesamt trockener und die Jungelregionen, in denen die ersten Menschen lebten, schrumpften und begannen mit dem Monsun im Sommer (auf der Nordhalbkugel) nach Norden und dann wieder Richtung Süden zu wandern. Der Lebensraum des Menschen wurde vom, über das Jahr wechselnden, Klima diktiert.

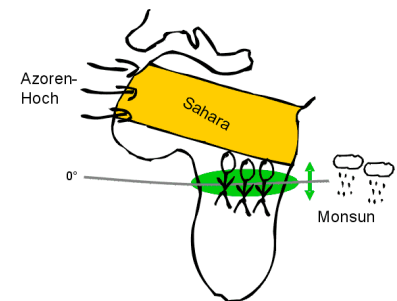
Mit der Günz-Eiszeit vor einer Million Jahren wurden die Sahara und weiter nördlich und südlich liegende Gebiete fruchtbar und die Urmenschen konnten durch einen entstandenen grünen Korridor in der Wüste in neue Gebiete, zum Beispiel nach Europa, vordringen. Je weiter wir uns jedoch vom Äquator entfernen, desto mehr schwankt das Wetter. Am nullten Breitengrad gibt es keine Jahreszeiten sondern vielmehr Tageswetter, das das ganze Jahr über mehr oder weniger gleich ist. In den neuen Lebensräumen gab es nun Sommer und Winter und damit ganz neue Anforderungen an den Menschen, der ohne Weiteres nicht in der Lage ist, einen kalten Winter zu überleben. Mit zunehmender Entfernung zum Äquator wurde es unmöglich, sich in der kalten Jahreszeit dorthin zurückzuziehen. Vor allem die Entdeckung von Feuer, die Fähigkeit, Kleider herzustellen, Vorräte anzulegen und Schutz zu suchen oder zu bauen ermöglichten ein Überleben fernab von der ehemaligen Heimat. Die Beobachtung des Wetters wurde überlebensnotwendig, denn eine Behausung zu bauen und Vorräte anzulegen dauern eine ganze Weile. Auch der viel später entstehende Ackerbau war ohne Kenntnis des Wetters unmöglich.

Wir haben also gesehen, dass Klima und Wetter von der Entstehung unseres Planeten an eine zentrale Rolle für die Entwicklung auf der Erde spielen.

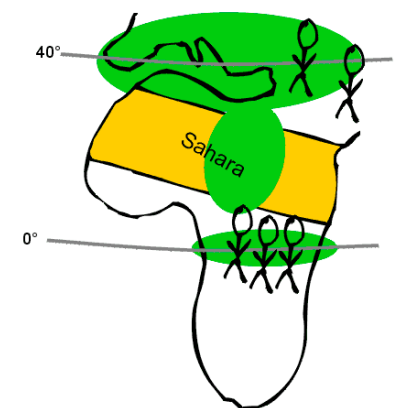
[Williams98]



Zu Eiszeiten breitet sich das Polareis in Richtung des Äquators aus.



Auf der Erde hat sich durch den Einfluss des Azorenhochdruckwirbels die Sahara gebildet. Die ersten Menschen leben am Äquator und ziehen mit dem Monsun.

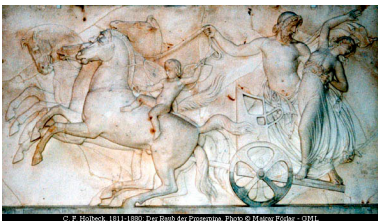


Durch den fruchtbaren Korridor, der sich zur Günz-Eiszeit gebildet hat, können die Menschen Richtung Mittelmeer wandern, wo sie dann einem Jahreszeitenwetter ausgesetzt sind.

Erklärung von Wetterphänomenen

Schon die ersten Hochkulturen, die Sumerer und später die Ägypter, beobachteten das Wetter und die Jahreszeiten genau und errichteten beispielsweise Bauwerke, mit denen sie bestimmte Tage im Jahr am entsprechenden Sonnenstand erkennen konnten. Sie schufen Kalender, die es ermöglichten, sich nach wiederkehrenden Ereignissen, beispielsweise den Jahreszeiten, zu richten. Wie genau das Wetter allerdings funktioniert, wussten sie wohl nicht. Vielmehr galt das Wetter als etwas mystisches, das die Götter bestimmten.

So war es später auch bei den Griechen. Göttervater Zeus war unter anderem Herrscher über Donner und Blitz. Jedes Mal, wenn er jemanden zurechtweisen musste, donnerte und blitzte es auf der Erde. Weitere Sagen erläutern andere Wetterphänomene. Die Jahreszeit Winter erklärt die Sage der Persephone: Demeter, „Mutter der Erde“, die Göttin des Ackerbaus und aller Fruchtbarkeit hatte zusammen mit Zeus eine einzige Tochter, Persephone. Eines Tages wurde Persephone von Hades, dem Gott der Unterwelt in dessen Reich entführt. Demeter war darüber so traurig, dass sie es auf der Erde nicht mehr fruchtbar werden lies. Als die Menschen an Hunger zu sterben drohten, schickte Zeus den Götterboten Hermes zu Hades, um diesen davon zu überzeugen, Persephone frei zu lassen. Bevor er sie gehen lies, brachte Hades Persephone aber noch dazu, Granatäpfel zu essen, was garantierte, dass sie zu ihm zurückkehren musste. So kam es, dass die Erde mit dem Aufstieg der Persephone aus der Unterwelt wieder Frucht trug. In der Zeit, in der Persephone aber unter der Erde verweilt, ist es Winter auf unserem Planeten und kein Getreide gedeiht.



Der Raub der Persephone durch Hades.

Es gab aber auch Griechen, die nicht daran glaubten, dass alles, was geschieht, rein göttlicher Willkür entspringt. Solch einer war Thales von Milet, der Begründer der griechischen Naturphilosophie. Er kam im siebten Jahrhundert vor Christus zu dem Schluss, dass alle Materie in der Welt aus einem Grundbaustein bestehen musste. Die Grundbausteine waren Erde, Luft, Wasser und Feuer. Thales glaubte, dass Wasser dieses Grundelement sein müsse. Für andere, waren es Erde, Luft oder Feuer. Zu ihren jeweiligen Schlüssen kamen die Philosophen, indem sie die Natur beobachteten. Anaximenes, der eine Generation später lebte, beobachtete, dass Wolken sich aus Luft bildeten und Regen aus den Wolken fiel. Er schloss daraus, dass alle Dinge durch sich ausdehnende und zusammenziehende Luft entstünden. Xenophanes, der zur gleichen Zeit wie Anaximenes lebte, fand Muscheln im Gebirge und schloss korrekt daraus, dass die Erdoberfläche sich im Laufe der Zeit verändert haben musste und die Berge irgendwann im Ozean gelegen haben mussten. Für ihn war das Grundelement daher die Erde. Heraklit beobachtete einige Zeit später, wie sich aus dem Vulkanfeuer Gestein entwickelte, für ihn war Feuer das zentrale Element. Auch Aristoteles glaubte an die vier Grundelemente und verfasste dazu seine Abhandlung „Meteorologica“ (daher unser Begriff Meteorologie), die sehr viele Naturphänomene zu erklären versuchte. So zum Beispiel Sternschnuppen, Kometen, Morgenröte, Regenbögen, Wolken, Nebel, Erdbeben und vieles Weitere.

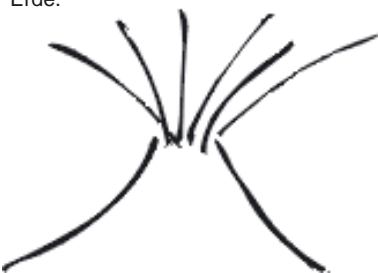
Wasser.



Luft.



Erde.



Feuer.

Ein Zeitgenosse Thales', Anaximander, fand, dass alles, was ist, nicht aus einem bestimmten Material bestünde, sondern vielmehr aus einer veränderlichen, unzerstörbaren und ewigen Substanz, die er apeiron nannte. Solch eine Theorie entwickelte auch Demokrit viele Jahre später. Er kam zu dem Schluss, dass alle Materie der Erde aus winzigen Grundbausteinen, die er Atome (griechisch: unteilbar) nannte, bestehen musste, die durch eine Kraft zu Form würden.

Der Begründer der modernen Atomtheorie, der englische Chemiker John Dalton, nannte seine kleinsten Teile daher Ende des 18. Jahrhunderts in Erinnerung an Demokrit ebenfalls Atome.

Die Griechen waren die Ersten, die versuchten, das Wetter wissenschaftlich zu erklären. Ihnen fehlten aber sowohl die dahinter stehende Physik, als auch die geeigneten Messinstrumente, um einige der entscheidenden Kenngrößen für die Wetterentwicklung zu messen. Erst viel später, nach dem, wissenschaftlich sehr dunklen, Mittelalter, gab es wieder entscheidende Fortschritte in der Wissenschaft. Die Forscher der Renaissance entwickelten im 16. Jahrhundert das Thermometer (Temperatur), das Barometer (Luftdruck) und das Hygrometer (Feuchtigkeit) und schufen damit Möglichkeiten, die Atmosphäre zu erforschen.

[Williams98, Duden91]

Messinstrumente

Erste Apparate, um die Temperatur zu messen wurden von Galileo Galilei Ende des 15. Jahrhunderts entwickelt. Nach Versuchen mit unterschiedlichsten Materialien durch Newton und Boyle, wurde 1714 das **Thermometer** auf Quecksilberbasis von Gabriel Daniel Fahrenheit vorgestellt.



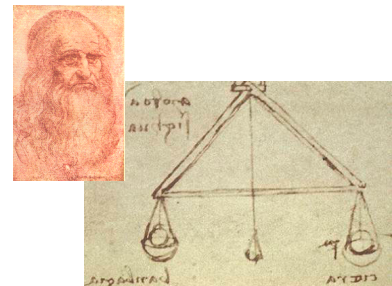
Galilei; Thermometer.

Der Italiener Evangelista Torricelli fand 1634 heraus, dass Quecksilber in einer evakuierten Säule proportional zum äußeren Luftdruck fällt. René Descartes versah den Torricelli-Zylinder mit einer Skala und Robert Boyle gab ihm seinen Namen: **Barometer** (griechisch báros = Gewicht, métron = messen). Blaise Pascal zeigt 1645, dass der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt. Erst 1843 wurde von Lucien Vidie ein geschlossenes und damit viel flexibler einsetzbares Barometer entwickelt.



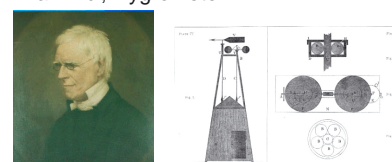
Torricelli; Barometer.

Schon Leonardo Da Vinci erdachte im 14. Jahrhundert eine Apparatur, um Feuchtigkeit zu messen. Sie bestand aus einer Waage, auf deren einen Seite Wachs und auf deren anderer Seite Wolle des gleichen Gewichts hingen. Bei Feuchtigkeit sollte sich die Wolle voll saugen und damit schwerer als das Wachs werden und zu einem Ausschlag des Messinstruments führen. Die ersten **Hygrometer** basierten tatsächlich auf der Wasserabsorptionseigenschaft von Wolle, Papier, Holz und menschlichen Haaren.



Da Vinci; Hygrometer.

Als weiteres wichtiges Messinstrument wurde im 18. Jahrhundert von John Robinson das **Anemometer** (griechisch anemos = Wind), zur Messung der Windgeschwindigkeit, entwickelt.



Robinson; Anemometer.

[Williams98, Duden91]

Bauernregeln

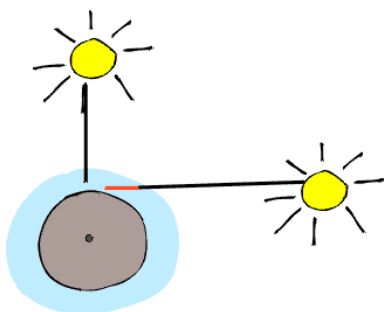


Im Mittelalter hielt sich die Bevölkerung vor allem an die Bauernregeln.

Der Großteil der Bevölkerung, der vor allem aus Bauern bestand, hatte keinen Zugang zu den Messinstrumenten und –ergebnissen und orientierte sich daher weiterhin vor allem an den, so genannten, Bauernregeln, die seit dem Mittelalter entstanden. Meteorologisch interessant ist es vor allem, die kalendergebundenen Klimaregeln, die Wetter- und Witterungsregeln, die Regeln, die Aussagen anhand von Tier und Pflanzenverhalten machen und die Ernteregeln zu betrachten. Horst Malberg hat in seinem Buch [Malberg99] sehr viele dieser Regeln auf ihren wissenschaftlichen Hintergrund hin untersucht.

Es gibt beispielsweise die Regel:

„Morgenrot – Schlechtwetter droht;
Abendrot – Gutwetterbrot.“



Morgenrot - Schlechtwetter droht.

Dahinter steht folgender Sachverhalt: Das (aus dem gesamten Farbspektrum bestehende) Sonnenlicht wird durch die Luftmoleküle gestreut. Daher rührt auch die bläuliche Färbung des Himmels. Abends und morgens steht die Sonne sehr tief am Horizont, das heißt, die Strahlen müssen einen weiten Weg durch Atmosphäre zurücklegen. Befindet sich nun Wasserdampf in der Atmosphäre, so gelangen vornehmlich die hochenergetischen roten Lichtteile bis zu uns und der Himmel erscheint rötlich. (Luftverschmutzung führt auch zu diesem Effekt). Bei Morgenrot erwärmt die Sonne in der Folge die Luft, der Wasserdampf steigt auf, kondensiert zu Wolken und regnet sich schließlich ab („Schlechtwetter droht“). Abendrot deutet nur darauf hin, dass es Tau geben wird. Kombiniert mit Westwind zeigt es aber im Winter an, dass die kalte trockene Luft durch wärmere feuchte ersetzt wird und es daher wärmer werden wird.



If it rains before seven, it will stop before eleven.

An der Küste gilt die aus England stammende Regel

„If it rains before seven, it will stop before eleven.“

Das liegt daran, dass an der Küste beständig Wind weht und diese Regenwolken innerhalb von vier Stunden normalerweise wegbläst.

Die meisten Bauernregeln machen Aussagen über sehr kurze Zeiträume, wie die Letzte, über Monate in der Zukunft liegende Ereignisse („Nasser April – trockener Juni“) oder sind kalendergebunden („Der April, der macht, was er will“). Sie beruhen, ähnlich wie die Göttersagen, auf Erfahrungswerten und können durchaus mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreffen.

[Malberg99]

Wetterbeobachtung

Diejenigen, die Zugang zu den neuen Messinstrumenten hatten, begannen mit ersten Messungen der Atmosphäre. 1749 machte Alexander Wilson an der Universität von Glasgow Temperaturmessungen mithilfe von **Drachen**, an deren Schnüren er Thermometer befestigte. Drachen waren damals die einzige Möglichkeit, Messinstrumente in die Höhe zu bekommen.

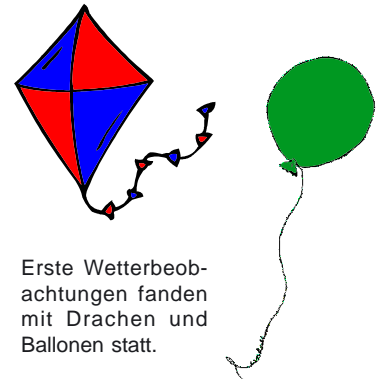
1783 startete der Franzose Jean Francois Pilatre de Rozier den ersten **Ballon**. Nur ein Jahr später fand die erste bemannte Ballonfahrt statt, bei der der Meteorologe Dr. John Jeffries Temperatur, Feuchtigkeit und Luftdruck bis in 3000m Höhe maß. 1804 brachte der Chemiker Gay-Lussac eine Luftprobe aus 7000m Höhe zur Untersuchung mit und zwischen 1862 und 1866 machte der Engländer James Glaisher 29 Flüge zur Messung der Atmosphäre, bei denen er bis in 9000m aufstieg und dabei fast an Sauerstoffmangel starb.

Die Messungen mit den Ballons brachten zwar deutlich mehr Daten, doch sie fanden zu unregelmäßig statt, um dabei Gesetzmäßigkeiten bei der Entstehung des Wetters auszumachen. Das amerikanische Weather Bureau verließ sich daher zwischen 1895 und 1933 vor allem auf die Drachenmessungen, die immer häufiger und an immer mehr Stellen stattfanden. Gemessen wurden die Windstärke und -richtung in höheren Luftschichten, die Temperatur, die Feuchtigkeit und der Luftdruck. Je nach Windstärke wurden unterschiedlich große Drachen eingesetzt, um die Messinstrumente in den Himmel zu befördern. Zuerst wurden regelmäßig Drachenflüge vom Mount Weather in Virginia und dem Blue Hill Observatorium in Bosten veranstaltet. Da die Drachen wieder zur Erde geholt werden mussten, um die Messinstrumente abzulesen und manchmal die Schnüre rissen, wurde eine größere Flächenmessung im Flachland von Ellendale, North Dakota durchgeführt. Ab 1919 gab es Flugzeuge, um Messungen durchzuführen. Für die flächendeckende Routine-messung waren sie aber zu teuer und es war auch zu gefährlich.

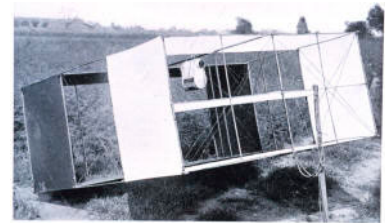
Der stark steigende Luftverkehr während des zweiten Weltkrieges erforderte präzisere Wetterdaten und so wurde das Netz von Drachenstationen ausgeweitet.

In Deutschland gab es ab 1849 den Preußisch Meteorologischen Dienst, der eine Unterabteilung des statistischen Büros war. Erster Vorsitzender des Instituts war Heinrich Wilhelm Dove. Zur Jahrhundertwende wurde der Messbetrieb auf dem Zugspitzobservatorium aufgenommen.

Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Elektrizität entdeckt und nutzbar gemacht. Joseph Henry entwickelte das Relais und Samuel Morse baute es in seinen Morsetelegraphen ein. Mit Strom wurde es erstmals möglich, Daten in kürzester Zeit über große Strecken zu transportieren. Die Technik wurde sofort zur Vernetzung der Beobachtungsstationen eingesetzt. Jetzt war man erstmals in der Lage, den Verlauf von Stürmen über den mittleren Westen zu verfolgen. Kurze Zeit später wurden Radiowellen entdeckt. Das war auf zweierlei Weisen wichtig. Zum Einen, zur Verbreitung der Wetterberichte und zum Anderen, um Wetterdaten zu erhalten: Es mussten keine Kabel mehr zwischen den Wetterstationen gezogen und gewartet



Erste Wetterbeobachtungen fanden mit Drachen und Ballonen statt.



Ein Beobachtungsdrachen...



Ein Wetterballon.



Um die Wende ins 20. Jahrhundert wurden Elektrizität, Telegraphie und Radiowellen entdeckt.



Eine Radiosonde an einem Wetterballon.

werden und entscheidend: Die Wetterdrachen und –ballone konnten ihre Daten jetzt live zur Station senden – eine völlig neue Dimension der Beobachtung wurde eröffnet.

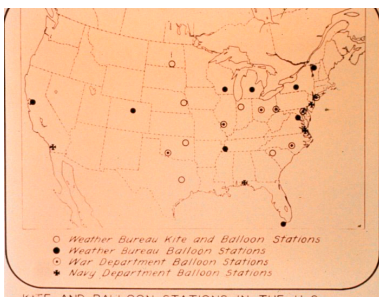
Das Messgerät, das von da an Temperatur, Feuchtigkeit und Druck maß, war die **Radiosonde**. Mit einer Batterie und einem Radiosender ausgestattet, funkte sie aus festgelegten Höhen ihre Daten zum Boden. Dadurch war es auch nicht mehr nötig, die Messinstrumente an einer Leine in den Himmel zu schicken, um sie später zurückholen zu können. Jetzt konnten die Wetterballone zum Einsatz kommen. Mithilfe von Peilsendern konnte man die gelandeten Radiosonden wieder auffinden.

Meteorologie und technische Neuerungen bedingten sich gegenseitig. Vor allem der riesige technische Fortschritt ermöglichte es erst, eine breite Datenbasis aufzubauen, aus der man dann Gesetzmäßigkeiten ableiten konnte und in der Meteorologie wurde neue Technik meist sofort eingesetzt. Nach dem zweiten Weltkrieg kamen als entscheidende Neuerungen der Radar, der Dopplerradar (Luftfeuchtigkeit), Satelliten (Feuchtigkeit, Temperatur) und der Einsatz des Computers (Datenauswertung, numerische Wettermodellberechnungen) hinzu.

[Williams98, DWD98, Duden91]

Die ersten Wettervorhersagen

Der britische Vizeadmiral Robert Fitzroy war einer der Ersten, die sich daran wagten, Prognosen für das Wetter abzugeben. Als Seemann wusste er, dass aktuelle Wettersituationen Hinweise auf zukünftiges Wetter geben konnten und installierte 1861 daher 22 Wetterbeobachtungsstationen auf den britischen Inseln und entlang der französischen Küste. Die Stationen telegraphierten ihre Daten zu Fitzroy, der daraus Vorhersagen über Wind und Regen für die folgenden 48 Stunden anfertigte. Diese wurden zwar in der London Times veröffentlicht, nach gehörigen Misserfolgen sahen sich die Herausgeber jedoch gezwungen, in einer Fußnote jegliche Verantwortung an falschen Vorhersagen abzulehnen. Fitzroy wurde so sehr kritisiert, dass er es 1865 nicht mehr aushielt und Selbstmord beging. Ähnliche Netzwerke wurden mit ähnlichem Erfolg von Ballot in den Niederlanden und LaVernier in Frankreich aufgezogen. In Amerika baute der Erfinder des Relais, Henry, solch ein Netz auf. Er machte zwar Vorhersagen für Privatleute, weigerte sich aber, dies für die Öffentlichkeit zu tun, weil das seiner Meinung nach Sache der Regierung sei. 1870 wurde das National Weather Bureau unter Ägide des Verteidigungsministeriums gegründet. 1891 wurde es dann eine Unterabteilung des Agrarministeriums, da vor allem für die Farmer der Wetterbericht wichtig war. Interessant ist, dass die Wettervorhersage scheinbar nie nationale und politische Grenzen hatte. Daten wurden mit Asien, Russland und Europa ausgetauscht.



KITE AND BALLOON STATIONS IN THE U.S.
U.S. Wetterbeobachtungsstationen im Jahr 1925.

Im Zuge des ersten Weltkrieges stellten die Amerikaner es ein, Wetterdaten nach Europa zu senden. Diese Daten waren für den Krieg

nämlich sehr wichtig, weil die Deutschen für den Einsatz ihrer Luftschiffe und Bomben die Windverhältnisse kennen mussten. Damit hatten aber auch die Norweger auf einen Schlag keine Daten mehr, um Prognosen für ihre riesige Fischereiflotte anzufertigen. Die Wissenschaftler unter Vilhelm Bjerknes (Gründer des geophysikalischen Instituts der Universität Leipzig 1912/ 13) installierten daraufhin ein dichtes Netz von Beobachtungspunkten auf Leuchttürmen, Bauernhöfen und Schiffen. Die lokal nahe beieinander liegenden Daten zeigten Wetterphänomene auf, die bisher unerkannt waren. So stellte sich heraus, dass Zyklone (Windwirbel mit niedrigem Luftdruck, der sich auf der Nordhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn dreht) nicht in Richtung des niedrigeren Luftdrucks, sondern viel mehr entlang einer Linie, bei der die kalte Luft aus dem Norden auf die warme aus dem Süden trifft, wandern und entstehen. Die Wissenschaftler in Bergen entwickelten das **Bjerknes-Bergen Modell** mit seinen blauen Linien mit Dreiecken, die eine Kaltluftfront anzeigen und roten Linien mit Halbkreisen, die eine Warmluftfront charakterisieren. Dieses Modell vereinheitlichte die weltweiten Vorhersagezeichnungen und findet sich auch heute noch in den Wettervorhersagen. Die Norweger entwickelten noch weitere effiziente Symbole und Codes, mit deren Hilfe es möglich ist, komplexe Wetterinformation kompakt zu übertragen.

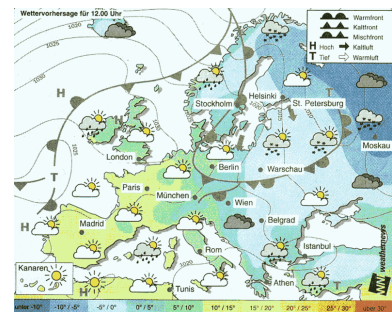
Vielleicht die größte Errungenschaft des Modells war, dass die Lücke zwischen den synoptischen, also den Beobachtenden, und den dynamischen, auf die Modelle vertrauenden, Meteorologen geschlossen wurde. Modell und Beobachtung stimmten zum ersten Mal überein.

[Williams98, DWD98, Duden91]

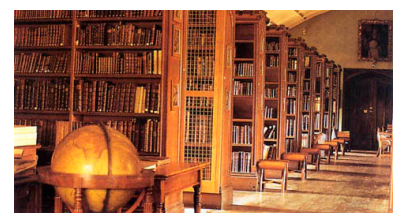
Wie entstehen Prognosen?

Die ersten Wetterprognosen entstanden durch Extrapolation der aktuellen Daten mithilfe von Erfahrungswerten (Fitzroy, Ballot, LaVernier). Als es mit den neuen Messinstrumenten und -stationen eine solide Datengrundlage gab, begann man in den Archiven nach ähnlichen Wetterlagen zu suchen und auch anhand der Entwicklungen von damals Rückschlüsse zu ziehen. Es stellte sich jedoch heraus, dass selbst sehr ähnliche Wetterlagen sich völlig verschieden fortsetzen konnten. 1969 veröffentlichte Lorenz, der Begründer der meteorologischen Chaostheorie, eine Analyse, in der er mathematisch zeigte, dass echte Analogie fast nie auftreten. Von ihm stammt der plakative Ausspruch, dass der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien ganze Sturmfronten auf der Erde verschieben könnte. Eine minimale Änderung der aktuellen Situation kann also globale Auswirkungen haben. Diese Analyse und der fortschreitende Erfolg von numerischen Wettervorhersagemethoden beendeten die Ära der Wettervorhersage anhand analoger Situationen aus der Vergangenheit.

Die numerische Wettervorhersage wurde erst durch den Einsatz des Computers möglich. Sehr anschaulich wird dies am Beispiel von



Wetterkarte der süddeutschen Zeitung vom 16.2.2004 mit den Symbolen des Bjerknes-Bergen Modells.



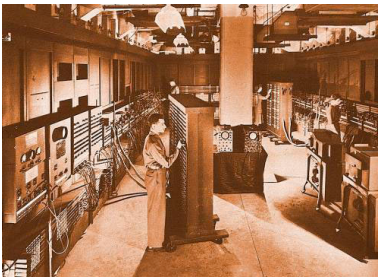
Erste Wettervorhersagen extrapolieren mithilfe des Archivs.



Der Schmetterlingseffekt.



Wetterberechnung im Krankenwagen.



ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer).

Lewis Fry Richardson. Er war Krankenwagenfahrer an der Westfront und berechnete in seinen Wartepausen anhand eines mathematischen Modells den Verlauf des Wetters für einen bestimmten Tag. Nach Monaten hatte er eine sechs Stunden Vorhersage für Europa, die völlig an der Realität vorbei ging. Es zeigen sich zwei eklatante Nachteile von menschlichen Rechnern: Sie verrechnen sich und sie sind extrem langsam. Um den zweiten Punkt auszugleichen, gab es Erwägungen 64 000 Frauen (rechnen genauer) in einem Raum rechnen zu lassen, aber selbst das wäre wohl zu langsam gewesen. ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer; der erste voll-elektronische Rechner), brauchte 1950 bei einem Test 24 Stunden, um eine 24 Stunden-Vorhersage zu machen. Der Test wurde vom Forschungsbereich Wettervorhersage, einem Teilbereich des Electronic Computer Project an der Princeton Universität in New Jersey durchgeführt. Leiter der Wettervorhersagegruppe war Charney, dem Electronic Computer Project stand seit 1946 John von Neumann vor (-> Vortrag von Bernd Kloess). ENIAC war nicht für die numerischen Berechnungen, wie sie im Zusammenhang mit der Wettervorhersage auftreten, optimiert. 1955 gab es deutlich schnellere Prozessoren, die erste Wetterprognosen in akzeptabler Zeit berechnen konnten. Ende 1960 waren Computervorhersagen genauer als von Menschen erstellte. Aufgrund der begrenzten Möglichkeiten war es zu Anfang entscheidend, welche Teile des Wettermodells man in die numerische Wettervorhersage einfließen lässt und welche man nur stark vereinfacht annähert oder weglässt.

[Williams98, DWD98, Duden91]

Die Theorie hinter dem Wetter

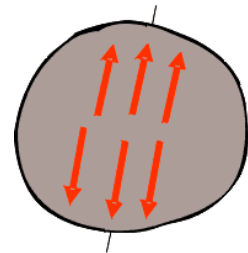
Unsere Atmosphäre verhält sich fast wie ein perfektes Gas und deshalb sind die zugehörigen Gesetzmäßigkeiten für die Wettervorhersage essentiell. Entdeckt wurden sie vornehmlich im 17. und 18. Jahrhundert durch Boyle, Mariotte, Amontons, Charles, Gay-Lussac, Dalton, Avagadro, Kelvin, Carnot, Coriolis, Leibniz, Mayer, Helmholtz und Joule.

Boyle fand im 17. Jahrhundert heraus, dass Volumen und Druck von perfekten Gasen direkt antiproportional sind. Mariotte fand heraus, dass dies nur bei konstanter Temperatur gilt und sich Gas bei Wärme ausdehnt und bei Kälte zusammenzieht. Gay-Lussac und Dalton fanden unabhängig voneinander heraus, dass Gas sich beim Ausdehnen abkühlt und bei Druckerhöhung erwärmt. Dalton nahm viele Wettermessungen vor und fand dabei heraus, dass warme Luft mehr Wasser aufnehmen kann, als kalte.

Die Luftmassen in unserer Atmosphäre gehorchen den Gesetzen der Thermo- und der Hydrodynamik.

In gleicher Höhe ist der Luftdruck an den Polen geringer, als am Äquator. Luftmassen wandern also vom Äquator in Richtung der Pole. Das meiste Wasser verdampft am Äquator. Im Dampf ist Energie gespeichert, die beim Abregnen in Form von Wärme wieder freigesetzt wird. Regentropfen heizen die Luft, durch die sie fallen auf. Deshalb enthalten feuchte Luftmassen auch viel mehr Hitze, als solche, die zwar die gleiche Temperatur haben, aber trocken sind. Die feuchten Luftmassen vom Äquator transportieren also Hitze und damit Energie in Richtung der Pole. Bei ihrem Weg dorthin kühlen sie ab und können daher nicht mehr so viel Wasser speichern – Wolken bilden sich, es regnet. Auf ihrem Weg kommen die Luftmassen in den Einfluss sehr vieler Faktoren: Je nach Untergrundbeschaffenheit (Höhe, Vegetation, Wärmeabgabe, ...) sind die Druckverhältnisse anders – Strömungen entstehen, in verschiedenen Höhen wehen verschiedene Winde, die Erdrotation lenkt die Luftmassen ab (Corioliskraft), Strömungen vermischen sich, Hoch- und Tiefdruckwirbel, so genannte Zyklone, bilden sich. Obwohl diese Faktoren alleine schon sehr komplex erscheinen, gibt es noch viel mehr Dinge, die Einfluss auf die Wetterentwicklung haben.

[Williams98, DWD98, Duden91]

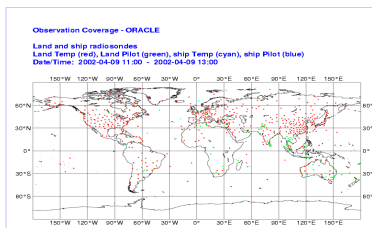


Luftmassen fließen vom höheren Druck am Äquator zum niedrigeren an den Polen.

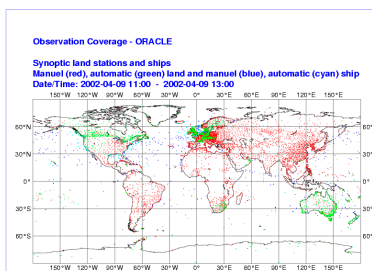
Ein Wettermodell

Mit der Leistungsfähigkeit der Rechner wurde es auch möglich, der Vorhersage immer genauere Modelle zugrunde zu legen.

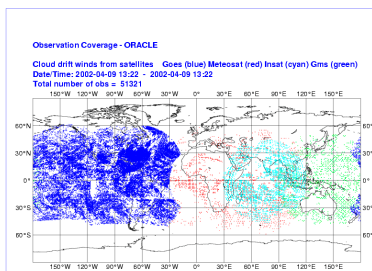
Entscheidende Verbesserungen beim Model des deutschen Wetterdienstes waren 1973/74 die Hinzunahme der Orographie (Geländeformen/ Erdoberfläche), 1978/ 79 die Berücksichtigung des Feuchteprozesses und 1990/91 der Übergang vom hemisphären Achteck, auf dem berechnet wurde hin zu einem globalen Modell.



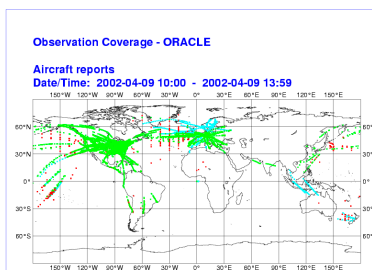
Wetterdaten von Radiosonden.



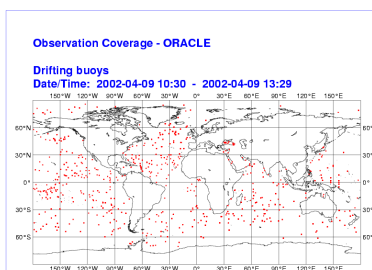
Wetterdaten von Beobachtungsstationen.



Wetterdaten von Satelliten.



Wetterdaten von Flugzeugen.



Wetterdaten von Driftbojen.

Das 1998 vom DWD eingesetzte Modell beinhaltet:

Bewegungsgleichungen

Drei hydrodynamische Gleichungen, die Newtons zweites Bewegungsgesetz ($F = m \cdot a$) auf die Atmosphäre abbilden.

Kontinuitätsgleichungen

Die Masse in der Atmosphäre insgesamt bleibt gleich.

Zustandsgleichung

Temperatur, Druck und Volumen des Systems werden in ein thermodynamisches Gleichgewicht gesetzt.

Hydrostatische Annäherung

Die Annahme, dass die Atmosphäre in hydrostatischem Gleichgewicht ist.

Geostrophischen Wind

Eine Vereinfachung der echten Windverhältnisse, die davon ausgeht, dass die Corioliskraft (Ablenkung der Luftmassen durch die Erdrotation) den Druck ausgleicht.

Geostrophische Annäherung

Die Annahme, dass der geostrophische Wind den echten horizontalen Wind ohne bedeutenden Fehler ersetzen kann.

Hydrostatische Gleichung

Eine vereinfachte Version der Bewegungsgleichung, die die Druckänderung mit der Höhe zu ihrer Dichte und der Schwerkraft in Beziehung setzt.

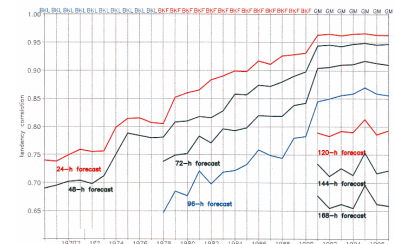
Mathematisch besteht die Wettervorhersage darin, numerisch ein System aus partiellen Differentialgleichungen zu lösen. Wie die im vorigen Abschnitt beschriebenen Phänomene, so sind auch die Gleichungen voneinander abhängig. Eine kleine Änderung an einer Stelle kann also große Wirkung an vielen anderen Stellen haben.

Die Anfangsdaten, mit denen die Berechnung startet müssen gemessen werden. Dazu wird ein Gittermodell über die Erde gelegt, an dessen Eckpunkten Messwerte ermittelt werden müssen. Der DWD benutzte für das oben skizzierte Berechnungsmodell ein Gitter mit

24 000 Messpunkten über ganz Europa. Für jeden Messpunkt wurden 5 Messwerte für jeweils 20 Flächen eingespeist. Das alleine ergibt schon $2,3 \cdot 10^6$ Messwerte. Nochmehr, nämlich $2,5 \cdot 10^6$ Messwerte werden zusätzlich für das Bodenmodell (Schneebedeckung/ Temperatur/ Feuchte) benötigt. Eine einzige Vorhersage startet also mit fünf Millionen Anfangswerten. Vor allem über den Ozeanen gibt es aber keine Messstationen an den passenden Stellen und auch an Land liegen diese zumeist nicht genau in einem Gitterpunkt. An dieser Stelle tritt die erste Ungenauigkeit auf. Die Daten müssen zu den Gitterpunkten interpoliert werden. Doch auch selbst wenn es möglich wäre, beliebig genau zu messen, könnte das Wetter nicht sicher vorhergesagt werden, denn alles, was auf der Oberfläche geschieht, hat Auswirkungen auf das Wetter – Der Flügelschlag des Schmetterling ist nicht vorhersagbar.

Dennoch ist die Vorhersagegenauigkeit heute sehr gut. Um die Zutreffswahrscheinlichkeit einer Prognose zu bestimmen, werden verschiedene Durchläufe einer Simulation mit leicht veränderten Eingabeparametern gestartet (Ensemble-Analyse). Durch die Abhängigkeit der Gleichungen untereinander laufen die Vorhersagen mehr oder weniger schnell auseinander. Der Grad der Divergenz gibt an, wie gut die Wettervorhersage ist. Bleiben die Ergebnisse beieinander, so heißt dies, dass auch mit einkalkulierten Messfehlern noch die gleiche Prognose gestellt werden kann und sie damit ziemlich sicher ist.

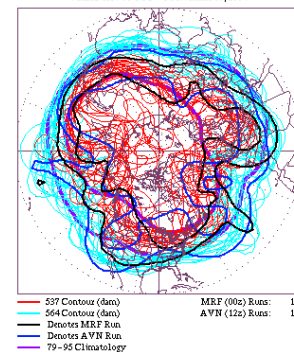
[Majewski98, Wergen98, DWD98]



Die Vorhersagegenauigkeit der Druckvorhersage hat seit 1960 deutlich zugenommen.

NCEP ENSEMBLE 500mb Z

360H FCST FROM: 00 UTC - SAT, FEB 21, 2004
VALID AT: 00 UTC - SUN, MAR 07, 2004



Bei der Ensemble-Vorhersage werden die Einabeparameter leicht verändert. Die nach 360h-Vorhersagezeitraum entstandenen Spaghetti zeigen an, dass die Vorhersage für diesen Zeitraum sehr unge ist.

Nach dem Vortrag traten zwei Fragen auf, die ich in das Forum auf www.wetterzentrale.de gepostet habe. Dort diskutieren Leute, die sich sehr intensiv mit dem Wetter beschäftigen.

Im Radio heißt es oft „Die Regenwahrscheinlichkeit beträgt 30%“.

Wie wird dieser Wert ermittelt?

Ist es so, dass beispielsweise zehn Läufe mit einem Modell gefahren werden und 3 sagen Regen und 7 kein Regen?

Oder ergibt sich der Wert direkt aus den aktuellen Troposphärendaten, wenn ja, wie ungefähr?

Das ist eine interessante Frage,

es kommt auf den „Wetterdienst“ an. Ich denke, renommierte Wetteranbieter (z. B. Kachelmann, MC-Wetter, DWD)leiten diese Zahlen aus bestimmten Vorhersageverfahren ab - z. B. MOS (Model-Output-Statistics). Diese Verfahren, die durch Routingedaten von Globalmodellen (z. B. EZMW, GME, GFS) gespeist werden, liefern u. a. auch Wahrscheinlichkeiten von beispielsweise Regenwahrscheinlichkeit, Schneewahrscheinlichkeit, Gewitterwahrscheinlichkeit, Wahrscheinlichkeit von einer Niederschlagsmenge größer 10mm usw.

30% würde dann bedeuten, das bei 100 Fällen bzw. Tagen, 30 Fälle bzw. Tage auftreten, an denen wirklich Regen fällt (an der Station/in der Region)

In der Flugmeteorologie wird das ab und zu auch so verstanden, das bei einer Gewitter-Wahrscheinlichkeit von 30% Gewitter nicht an der Station selber auftreten, aber in der näheren Umgebung.

Für die Wettervorhersage hat anscheinend jeder Wetterdienst (Frankreich, England, USA, ...) sein eigenes Modell. Wie sieht das bei der Klimaforschung aus? Werden dieselben Modelle verwandt oder gibt es andere? Sind die dann global gleich oder hat auch jedes Land seine eigenen Klimaforscher und -modelle? Betreiben die Wetterdienste Klimaforschung oder gibt es dafür eigene Institutionen?

Schau im kapitel 8 des IPCC-Berichts (www.ipcc.ch), da werden die Klimamodelle vorgestellt.

IPCC ist das International Panel on Climate Change. Es wurde 1980 von der World Meteorological Organisation (WMO) und dem United Nations Environment Programme (UNEP) gegründet. Die Klimaforschung wird also global betrieben und daher wird es wohl auch globale Modelle geben, die zur Klimaberechnung herangezogen werden. Die Daten werden wohl von den weltweit verteilten Messstationen stammen, die auch zur Tageswettervorhersage benutzt werden. Auf der Webseite finden sich reichhaltige Informationen.

Quellen

- [Duden91] Ingrid Adam, Das Neue Duden-Lexikon, 2. aktualisierte Ausgabe, Dudenverlag Mannheim/ Wien/ Zürich 1991.
- [DWD98] Annalen der Meteorologie 36, Vorhersage: Wetter, Klima, Umwelt Symposium zur Einhundertfünfzigjahrfeier des Preußisch Meteorologischen Instituts 16. und 17. Oktober 1997 in Berlin, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes Offenbach 1998.
- [Majewski98] D. Majewski, numerical weather prediction at the Deutscher Wetterdienst – from the third to the fourth generation -, erschienen in [DWD98].
- [Malberg99] Horst Malberg, Bauernregeln aus Meteorologischer Sicht, Dritte erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999.
- [Wergen98] Werner Wergen, Von der Punktmessung zum Anfangszustand für die numerische Wettervorhersage, erschienen in [DWD98].
- [Williams98] James Thaxter Williams, The history of weather, Nova Science Publishers New York 1999.