

Wettermodelle

Inhalt

Einleitung.....	2
Wettervorhersagemodelle	2
Datenassimilation.....	6
Hochleistungsrechner	8
Numerische Methoden	9
Parametrisierungen.....	10
Skalentrennung.....	14
Freie Parameter	15
Externe Parameter.....	15
Numerische Methoden : Fehlerquellen	16
Die Ensemble Technik	18
Wettervorhersagen: Was können sie und wo sind die Grenzen?.....	20
Orkantief Christian am 28. Oktober 2013	20
Jahrhunderthochwasser im Juni 2013.....	22
Hagelschlag am 21.05.2013 auf der Autobahn bei Salzburg.....	24
Lokale Windsysteme (für Ballonfahrer interessant).....	25
Abkürzungsverzeichnis.....	27

Einleitung

Sehr viele Produkte in unserem Portal www.flugwetter.de basieren auf sogenannten „Modellen“. Im Gegensatz zu manuell erstellten Vorhersagen (GAFOR, Flugwetterübersichten) handelt es sich dabei um reine „Maschinenprodukte“, die aus zeitlichen Gründen von einem Meteorologen weder geprüft oder korrigiert werden können. Dennoch ist es selbstverständlich statthaft und legitim, für die eigene Flugvorbereitung – insbesondere die mittelfristige Planung über den aktuellen Tag hinaus – diese Vorhersagen zu nutzen.

Dieser Artikel beschreibt das Prinzip der numerischen Wettervorhersage nebst den damit verbundenen Herausforderungen. Er soll nebenbei die Komplexität vermitteln, die mit der numerischen Wettervorhersage stets verbunden ist, um somit einen kritischen Umgang mit den Vorhersageprodukten zu fördern.

Wettervorhersagemodelle

Alle numerischen Modelle der Atmosphäre basieren auf denselben physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie der Erhaltung von Masse, Impuls und Energie. Sie unterscheiden sich aber in der konkreten mathematischen Formulierung und der numerischen Lösung des Gleichungssystems.

Die Grundidee dieses Ansatzes lautet: wenn der Ausgangszustand der Atmosphäre bekannt ist, dann kann man durch Kenntnis der physikalischen Prozesse, die in der Atmosphäre eine Rolle spielen, die Zukunft berechnen!

Abbildung 1 zeigt exemplarisch ein wenig Wetter-Physik. Ein Mathematiker würde erkennen, dass es sich bei diesen Gleichungen um sogenannte Differentialgleichungen handelt, erkennbar an der Tatsache, dass die meteorologische Größe auf der linken Seite in ihrer ersten Ableitung vorkommt. Beschrieben wird also die zeitliche Veränderung der meteorologischen Größen Luftdruck, Wind und Temperatur.

Ein Nicht-Mathematiker kann daraus höchstens erkennen, dass die Wettervorhersage offenbar kompliziert ist, und damit soll dieser Ausflug in das 3. Semester Meteorologie auch beendet werden.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u - \frac{uv}{a} \tan \varphi - fv &= -\frac{1}{\rho a \cos \varphi} \left(\frac{\partial p'}{\partial \lambda} + \frac{J_\lambda}{\sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_u \\
\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v + \frac{u^2}{a} \tan \varphi + fu &= -\frac{1}{\rho a} \left(\frac{\partial p'}{\partial \varphi} + \frac{J_\varphi}{\sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_v \\
\frac{\partial w}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla w &= \frac{1}{\rho \sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + B + M_w \\
\frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p' - g \rho_0 w &= -(c_{pd}/c_{vd}) p D \\
\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T &= -\frac{p}{\rho c_{vd}} D + Q_T \\
\frac{\partial q^v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q^v &= -(S^c + S^i + S^r + S^s) + M_{q^v} \\
\frac{\partial q^c}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q^c &= S^c + M_{q^c} \\
\frac{\partial q^i}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q^i &= S^i + M_{q^i} \\
\frac{\partial q^r}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q^r &= -\frac{1}{\rho \sqrt{G}} \frac{\partial P_r}{\partial \zeta} + S^r + M_{q^r} \\
\frac{\partial q^s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q^s &= -\frac{1}{\rho \sqrt{G}} \frac{\partial P_s}{\partial \zeta} + S^s + M_{q^s}
\end{aligned}$$

Abbildung 1 : Die Modellgleichungen

Die Lösung solcher Gleichungssysteme ist nicht trivial und beschäftigt in der Regel moderne Hochleistungscomputer, die darauf optimiert sind, sehr viele Rechenoperationen pro Zeiteinheit umzusetzen.

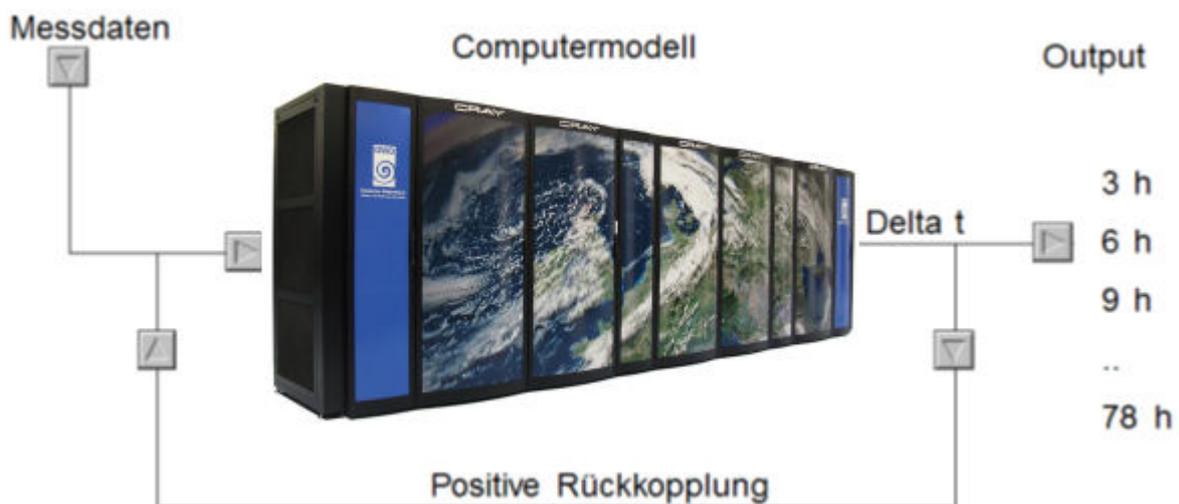


Abbildung 2: Das Prinzip der numerischen Wettervorhersage

Auf der linken Seite befinden sich als Input die Messdaten, die weltweit erfasst und durch spezielle Wetterfernmelde-Verbindungen (GTS, Global Telecommunication System) international ausgetauscht werden. Zu den Messdaten gehören Bodenwetterdaten (z.B. METAR, synoptische Wettermeldungen), Radiosondendaten, Flugzeugdaten (AMDAR-System), Satelliten- und RADAR-Daten.

In der Mitte sieht man den aktuellen neuen Hochleistungsrechner des DWD, der als „ausführbares Programm“ das Wettermodell geladen hat und darauf wartet, endlich loslegen zu können. In der Regel viermal am Tag – auf der Basis der Eingangsdaten von 00, 06, 12 und 18 UTC – beginnt der Rechner, die komplizierten Differentialgleichungen für einen kleinen Zeitschritt Δt näherungsweise aufzulösen. Dieser Zeitschritt bewegt sich in der Größenordnung von wenigen Minuten, d.h. es wird das Wetter im ersten „Durchlauf“ nur für wenige Minuten in die Zukunft berechnet. Nun wird es spannend: das Ergebnis wird an den Eingang zurückgegeben mit dem Auftrag: „mach’s noch einmal, Sam!“ Auf diese Weise hat man nach ca. 2 Stunden Rechenzeit das Ergebnis für 78 Stunden „im Kasten“.

Auf der rechten Seite befindet sich also der sogenannte Modelloutput, den man sich als gigantischen 4-dimensionalen Datenkubus vorstellen kann. Dort warten dann weitere Rechner darauf, dass sie ihre Arbeit aufnehmen können, um aus dem binären Datenkubus diejenigen graphischen Produkte zu erzeugen, die Sie in pc_met als Vorhersagekarten schließlich ansehen können. Dieser Teil der Datenverarbeitung wird „Postprocessing“ genannt, damit meint man die meteorologischen Anschluss-Verfahren, die auf dem bereit gestellten Modelloutput beruhen.

Einem Regelungs-Techniker würde in der Abbildung vielleicht die Tatsache auffallen, dass die Vorhersagedaten an den Eingang zurückgeschleust werden. Dafür gibt es den Begriff „Positive Rückkoppelung.“ Damit wird der Umstand beschrieben, dass sich leider Fehler im Ausgang erneut auf den Eingang übertragen und damit aufschaukeln können. Dieser Fehler ist systembedingt und kann nicht berichtigt werden – einer der wesentlichen Fehlerquellen dieser Methode, wie man im Kapitel Numerische Methoden: Fehlerquellen nachlesen kann.

Eine wesentliche Kenngröße ist dabei die Maschenweite des Gitters. Diese beschreibt den horizontalen Abstand zweier benachbarter Gitterpunkte. Je kleiner die Maschenweite, umso höher ist die Modellauflösung und umso detaillierter kann das Wettervorhersagemodell den Erdboden und die atmosphärische Strukturen (siehe Abbildung 4) erfassen. Gerade bei den Wettervorhersagemodellen beschreiben die wesentlichen meteorologischen Prozesse in der Atmosphäre und am Erdboden und ihren Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Modellvariablen wie Luftdruck, Temperatur, Wind, Wasserdampf, Wolken und Niederschlag. Viele physikalische Prozesse in der Atmosphäre oder am Boden, beispielsweise die Wolkenbildung oder die Wechselwirkung zwischen der Sonnenstrahlung und Wolkentröpfchen, finden aber auf so winzigen räumlichen Skalen statt, dass sie nicht explizit von Wettervorhersagemodellen aufgelöst werden können. Der Einfluss dieser Prozesse auf die Modellvariablen wird deshalb über Parametrisierungen näherungsweise berücksichtigt.

Um das komplizierte System der Modellgleichungen auf Computern zumindest näherungsweise zu lösen, werden numerische Verfahren eingesetzt. In sogenannten Gitterpunktsmodellen wird die zeitliche Entwicklung der Modellvariablen in einem dreidimensionalen Gitter berechnet, das vom Erdboden bis zur Obergrenze der Atmosphäre reicht. Die vertikalen Abstände zwischen den Gitterpunkten sind in geringeren Höhen kleiner, um bodennahe Phänomene besser beschreiben zu können. mesoskaligen Wetterphänomenen (Wettererscheinungen an Fronten, Konvektion, Föhn etc.) spielt die Orographie eine wichtige Rolle, weil diese Prozesse durch Hebung an Hindernissen (Stau) verstärkt oder infolge Absinken im Lee abgeschwächt werden können. Auch lokale Windsysteme werden durch die Orographie ausgelöst.

Bei zunehmender Vorhersagezeit hängt andererseits die Vorhersage etwa für Deutschland vom anfänglichen Wettergeschehen in immer größerer Entfernung ab, so dass man, je länger man das Wetter in die Zukunft voraus berechnen will, in einem immer größeren Gebiet rechnen muss. Für Vorhersagen ab 5 Tagen muss man bereits global – also auf der ganzen Weltkugel - rechnen.

Der numerische Aufwand zur Lösung der Modellgleichungen wächst mit der Anzahl der Gitterpunkte. Andererseits ist die Leistungsfähigkeit selbst der schnellsten Supercomputer stets beschränkt ist. Das bedeutet, dass man mit der verfügbaren Rechenleistung einerseits und der erwünschten Genauigkeit (kleiner Gitterpunktabstand) andererseits Kompromisse eingehen muss. Der DWD setzt zur Lösung dieses Problems zurzeit drei unterschiedliche Modelle zur numerischen Wettervorhersage ein:

- Das Globalmodell ICON berechnet mit einer Maschenweite von 13 km auf 90 Schichten in der Vertikalen an insgesamt 265 Millionen Gitterpunkten die zeitliche Entwicklung von Wetterparametern wie Luftdruck, Wind, Wasserdampf, Wolken und Niederschlag bis zu sieben Tage voraus.
- Für Europa stellt das Lokalmmodell ICON Nest einer Maschenweite von 6.5 km auf 60 Schichten an insgesamt 40 Millionen Gitterpunkten detailliertere Wettervorhersagen bis zu fünf Tage im Voraus bereit. Während der Rechnung erhält das ICON Nest die Vorhersagen des größeren Bruders ICON als seitliche Randwerte.
- Das hochauflösende Regionalmodell COSMO-DE für Deutschland stellt mit einer Maschenweite von nur 2,8 km und 60 Schichten an insgesamt 11,6 Millionen Gitterpunkten zusätzlich achtmal täglich eine 27-stündige Vorhersage vor allem für die Warnung vor gefährlichen Wettersystemen wie Gewittern und Stürmen zur Verfügung. Auch die Windkarten für Ballonfahrer sowie Leewellenvorhersagen stammen von diesem Modell, da diese Parameter sehr stark von der Orographie geprägt werden. Die seitlichen Randwerte stammen vom ICON Nest. Es ist geplant, in 2018 das COSMO-DE zu erweitern auf einen größeren Modellausschnitt, der dann auch den gesamten Alpenbereich mit abdeckt. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 3. Gleichzeitig wird der Gitterpunktabstand auf 2.2. km verkleinert.

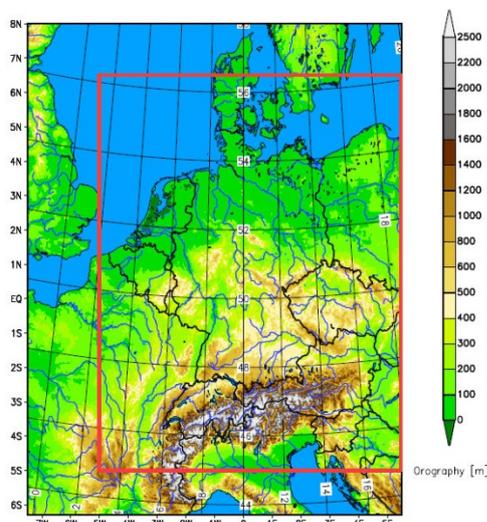


Abbildung 3: Vergrößerung des Modellausschnitts (rot bisheriger Ausschnitt)

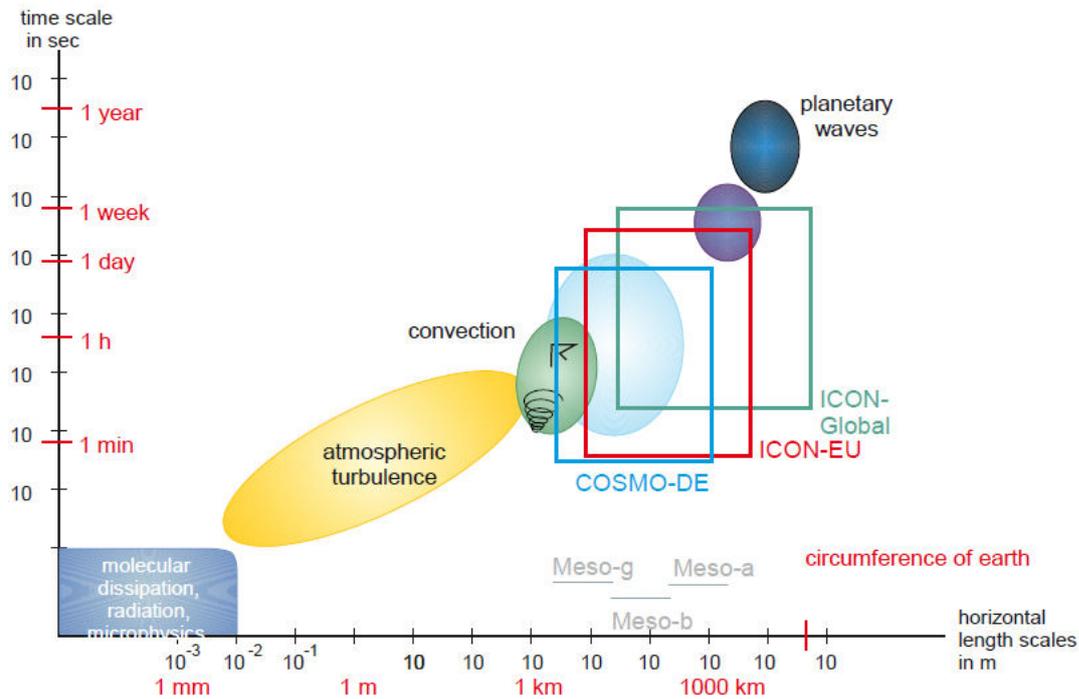


Abbildung 4: Durch die verschiedenen Modelle aufgelöste Skalenbereiche und damit verbundene physikalische Prozesse.

Datenassimilation

Abbildung 2 veranschaulicht das Prinzip der numerischen Wettervorhersage in stark vereinfachter Form. Auf der Eingangsseite gehen nicht nur Messdaten mit ein, sondern weitere Informationen.

Passende Initial- und Randfelder, um ein Modell zu starten, erhält man durch eine Kombination von Beobachtungsdaten, vorangegangenen Modellläufen und klimatologischen Informationen. Die Einbindung dieser Daten in den aktuellen Modelllauf nennt man Assimilation.

Mathematisch gesehen ist die numerische Wettervorhersage ein Anfangswertproblem. Das heißt, wenn man das Wetter Stunden oder Tage in die Zukunft vorausberechnen will, muss man zuerst möglichst genau wissen, wie das Wetter jetzt im Moment ist, und zwar nicht nur am Ort der Vorhersage, sondern in einem großen Gebiet darum herum. Für Vorhersagen ab 5 Tagen benötigt man das Wetter global auf der ganzen Erde. Bevor der Computer also mit der Vorausberechnung des Wetters beginnen kann, muss an allen der typischerweise etwa einigen hundert Millionen Punkten des gedachten dreidimensionalen räumlichen Rechengitters bekannt sein, aus welcher Richtung und wie stark der Wind weht, wie hoch die Temperatur und die Luftfeuchte sind und welcher Luftdruck dort gerade herrscht. Je nach Vorhersagemodell braucht man weitere entsprechende Angaben z.B. über Wolken und Niederschlag, aber auch Größen an der Erdoberfläche und im Erdboden, wie etwa Schneebedeckung, Wasseroberflächentemperatur, Eisbedeckung der Meere und großen Seen und Feuchtegehalt im Erdboden spielen eine Rolle.

Diese vierdimensionale Datenassimilation ist international seit Jahren ein Gebiet intensiver Forschung und Entwicklung, da man sich von einer immer genaueren Erfassung des Anfangszustandes eine weitere Verbesserung der numerischen Wettervorhersage verspricht. Letztlich kann jedoch kein noch so anspruchsvolles Assimilationsverfahren

Beobachtungen ersetzen. Es kann aber versuchen, die vorhandenen Beobachtungen optimal zu nutzen. Die Kombination verbesserter Assimilationsverfahren mit zusätzlichen Beobachtungen aus zuvor datenarmen Gebieten ist der Hauptgrund für die erzielten Fortschritte, zumindest in der großskaligen globalen numerischen Wettervorhersage während der letzten 10 – 15 Jahre, und sie wird auch in der Zukunft weitere spürbare Verbesserungen der Vorhersagen erlauben.

Während eines typischerweise 3 Stunden dauernden Assimilationszyklus verarbeitet das globale Modell GME Informationen von

- ca. 600 Radiosondierungen,
- ca. 9.200 Flugzeugbeobachtungen (AMDAR),
- ca. 37000 Stationsbeobachtungen (zwei Drittel davon automatische Stationen),
- ca. 5.200 driftende Bojen,
- ca. 350.000 AMV-Windmessungen (über Wetter-Satelliten)
- ca. 1.000 Wind-Profiler-Messungen.

Darüber hinaus gehen noch weitere Sensordaten ein, wie z.B. ATOVS.

ATOVS wird zur Bestimmung von Vertikalprofilen der Temperatur und Feuchte in der Atmosphäre sowie des Gesamtzongehaltes bei polarumlaufenden Satelliten NOAA und EUMETSAT eingesetzt.

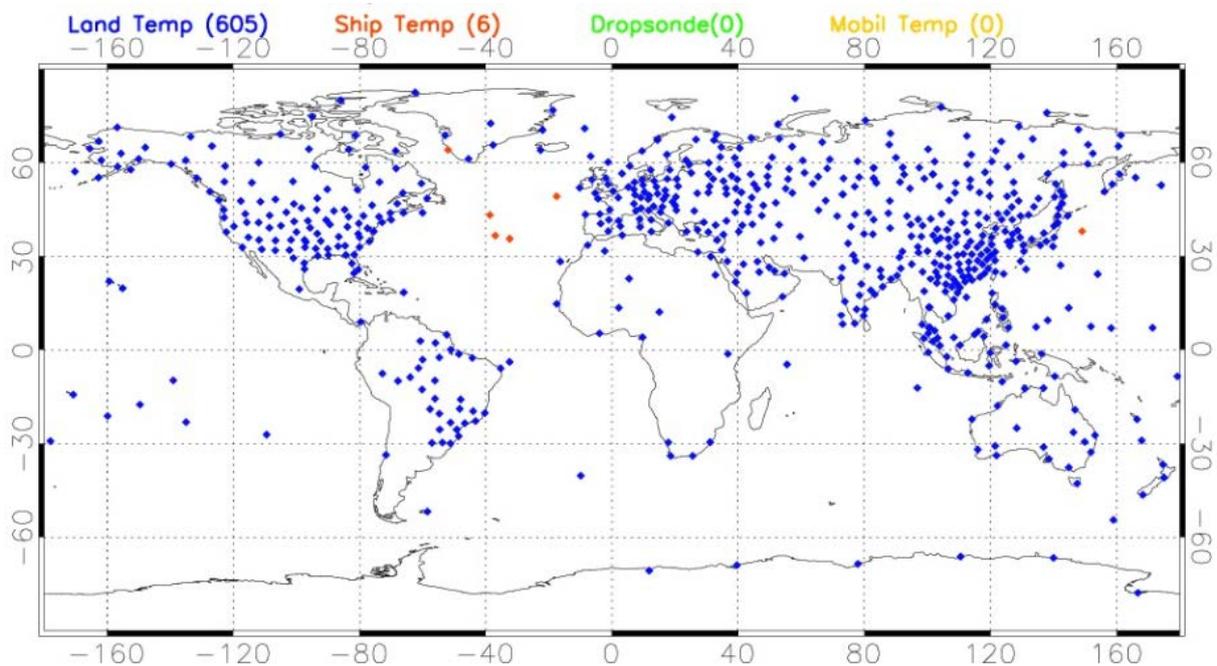


Abbildung 5: Radiosondierungen weltweit

Abbildung 5 zeigt exemplarisch die großen Lücken im globalen Wetterbeobachtungsnetz anhand der Radiosondierungen. Gerade über den großen Wasserflächen – auch über dem Atlantik als der Wetterküche für Europa – gibt es nur sehr wenige Schiffe, die solche Messungen vornehmen.

Hochleistungsrechner

Die Prognose mittels numerischer Wettervorhersagemodelle stellt hohe Anforderungen an die Rechenleistung. Typischerweise sind für eine 24 Stunden Prognose des GME Modells über 250 Billionen mathematische Operationen notwendig. Diese müssen innerhalb von 20 Minuten verarbeitet werden. Aus diesem Grund ist das Vorhersagesystem aus drei Modulen zusammengesetzt. Ein globales Modell GME, welches die gesamte Atmosphäre simuliert, jedoch nur mit mittlerer Genauigkeit. Darin eingebettet befinden sich zwei regionale Modelle mit jeweils gesteigerter Genauigkeit und größerer Auflösung (Details siehe Kapitel Wettervorhersagemodelle). Es ist unter anderem auch die stetige Entwicklung schneller Supercomputer in den letzten 20 Jahren, die eine ständig wachsende Genauigkeit numerischer Wettersimulationen ermöglicht.

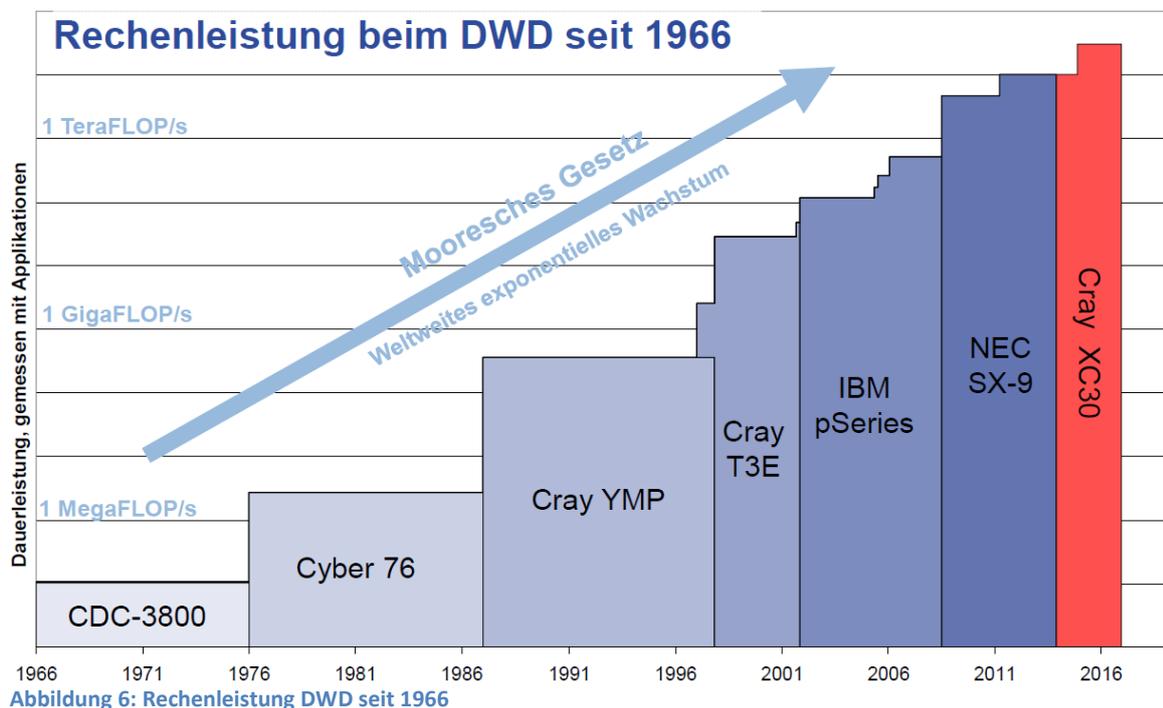


Abbildung 6 zeigt anschaulich, wie sich die Rechenleistung der eingesetzten Hochleistungscomputer im Laufe der letzten 40 Jahre um den Faktor Einhundertmillionen vervielfacht hat.

So hat der Deutsche Wetterdienst (DWD) in Offenbach im Dezember 2013 einen neuen Superrechner in Betrieb genommen. Das Deutsche Meteorologische Rechenzentrum (DMRZ) des DWD will mit dem Rechnersystem XC30 des US-amerikanischen Herstellers CRAY die bisherige Leistung weiter steigern - und dabei noch kräftig Strom sparen. Durch mehr Leistung können künftig neue und deutlich komplexere Vorhersagemodelle eingesetzt werden. Sie sollen die Wetter- und Unwettervorhersagen für Deutschland weiter optimieren, gleichzeitig aber auch genauere Berechnungen des zukünftigen Klimas ermöglichen.

Das zusammen mit dem Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr betriebene Rechnersystem soll in mehreren Stufen weiter ausgebaut werden und der Spitzenleistung auf 2 x 550 TeraFLOPS/s gesteigert werden. Das entspricht unvorstellbaren 2 x 550 Billionen Multiplikationen pro Sekunde oder einer Kapazität von mehr als 30 000 handelsüblichen PCs. DWD-Präsident Prof. Dr. Gerhard Adrian: „Insgesamt ermöglicht der neue Superrechner dem

DWD die Nutzung qualitativ verbesserter Methoden der Wettervorhersage und in der Folge eine weiter optimierte Vorhersagequalität. Davon wird auch die Öffentlichkeit profitieren.“

Numerische Methoden

Der Aufwand für die Entwicklung von Wettervorhersagemodellen übersteigt mittlerweile die personellen und finanziellen Möglichkeiten auch größerer Wetterdienste. Deshalb arbeitet der DWD in der globalen Modellierung (ICON –Projekt) mit dem Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg zusammen. Im Bereich der regionalen Modellierung besteht eine enge Kooperation (COSMO Konsortium) mit den Wetterdiensten Griechenland, Israel, Italien, Polen, Rumänien, Russland und der Schweiz.

Die Zielsetzung numerischer Methoden in der Wettervorhersage besteht darin, die meteorologischen Felder vorherzusagen, welche in den Modellen auf Gittern gegeben sind. Beim DWD werden zwei Arten von Gittern verwendet: ein Rechteckgitter für das regionale Modell COSMO-Modell und ein Dreiecksgitter für das globale Modell ICON. Die approximierten Prozesse sind Advektion, Druckgradient und der Effekt der Kompressibilität, für den die Strömungsdivergenz zu berechnen ist. Weiterhin ist es Aufgabe der Numerik, ein Interface bereitzustellen, um die Beiträge anderer, parametrisierter physikalischer Prozesse wie Strahlung, Grenzschicht, Niederschlagsbildung, Konvektion und Oberflächenmodellierung in konsistenter Weise in das Modell zu integrieren.

Während man schon seit langer Zeit atmosphärische Prozesse numerisch approximiert, entstehen eine Reihe von neuen Problemen durch die erst seit kurzem operationell verwendeten nichthydrostatischen Gleichungen. Diese Gleichungen sind identisch mit denjenigen, welche in der Strömungsmechanik verwendet werden, und verzichten auf spezifisch meteorologische Näherungen, wie sie für die großskaligen Modelle niedrigerer Auflösung bislang üblich waren. Die Benutzung dieser Gleichungen wurde notwendig durch den Übergang zu dem hochauflösenden Modell COSMO-EU mit einer Maschenweite von 7 km, und seither wurde mit der Einführung des Modells COSMO-DE die Auflösung weiter gesteigert.

Numerische Entwicklungen haben zwei Zielsetzungen:

- Berechnung von Prozessen mit erhöhter Genauigkeit
- Effizientere Berechnung von Prozessen, ohne dass damit ein Verlust von Genauigkeit einhergeht

Neben einer räumlichen Diskretisierung müssen die atmosphärischen Gleichungen auch zeitlich diskretisiert werden. Der Schlüssel zu einer effizienteren Zeitintegration ist die semi-implizite Methode. Diese Methode erlaubt es, größere Zeitschritte zu verwenden und so Rechenzeit einzusparen. Mit dem derzeit benutzten expliziten Verfahren ist der Zeitschritt durch eine einschneidende Stabilitätsbedingung eingeschränkt. Eine numerische Methode heißt instabil, wenn der Fehler in kurzer Zeit über alle Schranken steigt. Explizite Zeitschrittverfahren verlangen kleine Zeitschritte, um stabil zu bleiben.

Parametrisierungen

Die Lösung der Modellgleichungen in den Modellen zur numerischen Wettervorhersage (NWV-Modelle) erfordert die Definition eines Raum- und Zeitgitters. Alle Zustandsvariablen der Atmosphäre (Luftdruck, Wind, Temperatur, Luftfeuchte,...) sind nur an den diskreten Punkten dieses Gitters darstellbar. Man spricht in diesem Zusammenhang von „skaligen“ Variablen. Einer direkten Vorhersage im Gitter des Modells sind nur solche Prozesse zugänglich, die charakteristische Abmessungen von mindestens dem doppelten Abstand zwischen den Punkten des Modellgitters haben. Solche Prozesse werden skalige Prozesse genannt. Gegenwärtig haben die NWV-Modelle des DWD horizontale Gitterpunktabstände von etwa 13 km (ICON), 6.5 km (ICON Nest) beziehungsweise 2.8 km (COSMO-DE).

Ein Wetterprozess, wie z.B. ein Schauer, wird in diesem Sinne als „skalig“ bezeichnet, wenn seine räumliche Ausdehnung vom verwendeten Modell her prinzipiell erfasst werden kann. Kleinere Strukturen dieses Prozesses würde das Modell lediglich als „Rauschen“ registrieren, ohne dass eine räumliche und zeitliche Auflösung möglich wäre.

Konkret bezogen auf das hochaufgelösten Modell COSMO-DE bedeutet dies, dass nur Wettererscheinungen aufgelöst werden können, die mindestens 5.8 km (doppelter Gitterpunktabstand) Ausdehnung haben. Jeder Pilot weiß, dass einzelne Schauer sehr viel kleiner in ihrer Ausdehnung sein können. Aufgrund dieser Beschränkung wird man daher kleinräumige Schauer selbst mit dem COSMO-DE nicht vorhersagen können.

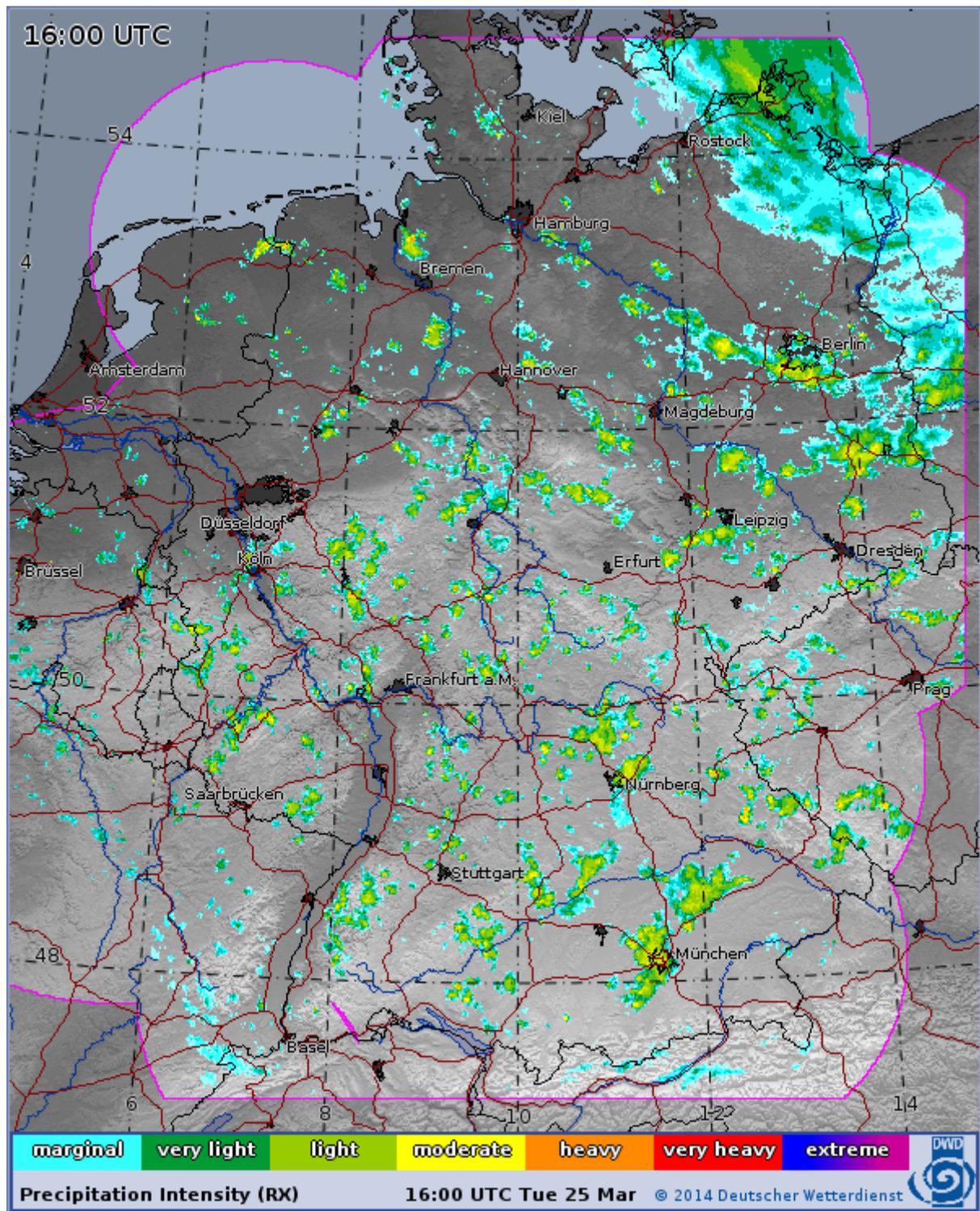


Abbildung 7: RADAR-Bild Deutschland vom 25. März 2014

Abbildung 7 zeigt als Beispiel die Niederschlagsverteilung in Deutschland am 25. März 2014. Es handelt sich um ein typisches Rückseitenwetter mit vielen kleinräumigen Schauern, meist unter 10 km Durchmesser. Daher kann auch ein COSMO-DE die räumliche und zeitliche Auflösung dieser Schauer **nicht exakt** vorhersagen. Es kann lediglich eine Wahrscheinlichkeit für Schauer angegeben werden.

Auch der Vorhersagezeitraum muss, um die Stabilität des Lösungsverfahrens zu gewährleisten, in kleine Intervalle (Zeitschritte) unterteilt werden, die von der räumlichen

Auflösung und der Numerik abhängen. Der Zeitschritt beträgt 130 sec für das GME, 40 sec für das COSMO-EU und 30 sec für das COSMO-DE.

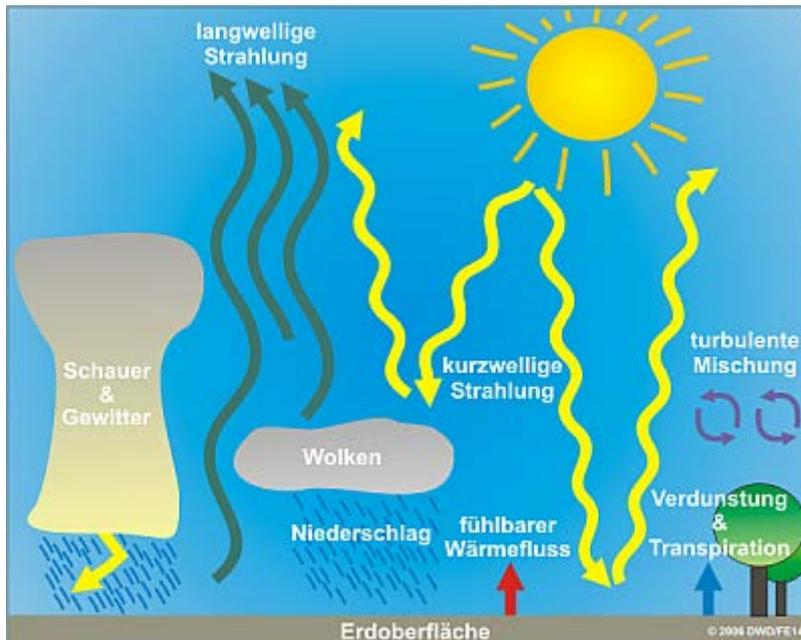


Abbildung 8: Die wichtigsten Prozesse, die in numerischen Modellen der Atmosphäre parametrisiert werden müssen.

Selbst im relativ engmaschigen Gitter des COSMO-DE ist es nicht möglich, alle wichtigen kleinräumigen Vorgänge direkt zu simulieren. Das Beispiel mit den Schauern sollte das veranschaulichen. Ein weiteres Beispiel ist der turbulente Austausch von Impuls, Wärme und Wasserdampf zwischen dem Erdboden und den untersten Atmosphärenschichten. Die hierbei ablaufenden Prozesse haben typische Abmessungen von nur wenigen Metern. Unmittelbar an der Erdoberfläche erfolgen die Transporte sogar durch molekulare Prozesse. Auch andere wichtige Vorgänge, wie die Bildung und das Anwachsen von Niederschlagspartikeln oder die Strahlungstransporte, spielen sich auf sehr kleiner bzw. molekularer Skala ab. Die wichtigsten dieser Prozesse werden in Abbildung 8 dargestellt. Alle diese Vorgänge entziehen sich also einer direkten Simulation im Gitter des Modells. Sie werden in Bezug auf das Modellgitter subskalige Prozesse im Gegensatz zu den direkt simulierbaren skaligen Prozessen genannt. Die Skalen der parametrisierten Prozesse sind von denen der direkt simulierten Prozesse getrennt (Skalentrennung). Trotz ihrer geringen Abmessungen dürfen sie aber nicht vernachlässigt werden. Bei der Niederschlagsbildung leuchtet das unmittelbar ein. Auch die Berechnung der Strahlungsprozesse, die zum Beispiel für die Vorhersage der Tageshöchsttemperatur oder der nächtlichen Temperaturminima wichtig sind, ist sicher zwingend notwendig. Außerdem treten in der Atmosphäre intensive Wechselwirkungen zwischen allen Prozessen auf, auch wenn sie ganz unterschiedliche charakteristische Abmessungen haben. Deshalb sind die subskaligen Prozesse auch für die korrekte Simulation der skaligen Prozesse in NWV-Modellen wichtig. Sie dürfen also nicht vernachlässigt werden. Ihre Berücksichtigung erfolgt mit Hilfe von sogenannten Parametrisierungen.

Eine Parametrisierung ist die Beschreibung eines subskaligen Prozesses durch die an den Modellgitterpunkten vorhergesagten skaligen Zustandsvariablen, sowie die Bestimmung der zeitlichen Änderung dieser Zustandsvariablen aufgrund dieses Prozesses. Einfachste

Parametrisierungen schätzen nur die Auswirkungen der parametrisierten Prozesse auf die zeitliche Änderung der Zustandsvariablen ab. So könnte man zum Beispiel die Strahlungsprozesse in der Atmosphäre dadurch pauschal berücksichtigen, dass man in jedem Gitterelement des Modells immer eine Abkühlung von einem Grad pro Tag annimmt. (Das entspricht dem globalen Jahresmittelwert des Nettoeffekts von solarer Erwärmung und langwelliger Abkühlung in der Atmosphäre. Diese Nettoabkühlung wird durch das Freiwerden latenter Wärme bei der Kondensation von Wasserdampf und durch Wärmetransport vom Boden in die Atmosphäre kompensiert. Es ist leicht einzusehen, dass eine so extrem vereinfachte Parametrisierung im Einzelfall zu recht groben Fehlern führen würde. Wesentlich besser ist es deshalb, anspruchsvollere Modellvorstellungen über den Ablauf der zu parametrisierenden Prozesse zu entwickeln. Darin können dann wichtige Einflüsse auf die parametrisierten Prozesse berücksichtigt werden. Bei der Strahlung wären das unter anderem die Einflüsse des Sonnenstands und der Bewölkung.

Die wichtigsten in den NWV-Modell ICON des DWD parametrisierten Prozesse sind:

1. Strahlung,
2. subskaliger Niederschlag, Wolkenmikrophysik,
3. Schauer- und Gewitterbildung (hochreichende Feuchtkonvektion)
4. Entstehung und Auflösung von Bewölkung,
5. turbulenter Austausch von Impuls, fühlbarer und latenter Wärme zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre,
6. subgrid-skalige orografische Effekte (z.B. Leewellen an Gebirgen) die u. a. Wellen in der Atmosphäre auslösen und dadurch, in großer Höhe eine bremsende Wirkung auf die Strömung ausüben
7. Prozesse in den obersten Schichten des Erdbodens,
8. Änderung der Mächtigkeit und der Temperatur von Meereis, und
9. Änderung der Temperatur von Binnenseen

Die Prozesse 3 (Schauer- und Gewitterbildung) sowie 6 (Wellen) werden in der COSMO-Modellserie als skalige Prozesse abgebildet, leider mit Schwächen (s. Abbildung 3).

Die in den Modellen enthaltenen Parametrisierungen unterliegen einer ständigen Überwachung durch die Verifikation der Vorhersageergebnisse. Ergeben sich hier Hinweise auf unbefriedigende Ergebnisse einer Parametrisierung, oder werden in der Literatur verbesserte Parametrisierungsverfahren angeboten, dann werden die bestehenden Verfahren modifiziert oder ersetzt. Die Modifikation einer bestehenden Parametrisierung bedeutet dabei in der Regel eine verbesserte Bestimmung von freien Parametern, die im Parametrisierungsverfahren auftreten. Jeder Änderung von Parametrisierungen schließt sich ein aufwändiges Verfahren zur Qualitätskontrolle der neuen Version innerhalb des

vollständigen Vorhersagemodells an. Dazu werden über einen längeren Zeitraum (ein bis zwei Monate) mit dem geänderten Modell parallel zum operationellen Modell Vorhersagen gerechnet. Die Ergebnisse beider Versionen werden verglichen (Verifikation), und bei einem insgesamt positiven Resultat wird das bisherige operationelle Modell durch das geänderte Modell ersetzt.

Sehr eng verbunden mit Parametrisierungen, besonders mit der Modellierung der Prozesse in den obersten Schichten des Erdbodens, ist die Beschreibung der Topographie der Erdoberfläche (externe Parameter). Benötigt werden hier zum Beispiel die Land-Meer-Verteilung und die Orographie als Größen, die auch für die Vorhersage der skaligen Variablen wichtig sind.

Skalentrennung

Eine wichtige Voraussetzung für die korrekte Formulierung von Parametrisierungen ist die klare Trennung zwischen der Skala des Modells (wenigstens doppelter Gitterpunktsabstand und doppelte Länge des Zeitschritts) und der Skala des parametrisierten Prozesses. Siehe hierzu Abbildung 4.

Die zu parametrisierenden Prozesse müssen in ihren charakteristischen räumlichen und zeitlichen Skalen wesentlich kleiner als die Skala des Modellgitters sein. Für molekulare Prozesse (Strahlung) ist diese Voraussetzung natürlich erfüllt, ebenso gilt das auch für die Niederschlagsbildung und die turbulenten Austauschprozesse. Es gibt aber auch Prozesse, die keine deutliche Skalentrennung aufweisen. Insbesondere gilt das für die hochreichende Konvektion. Mit charakteristischen Horizontalabmessungen von wenigen Kilometern und einer charakteristischen Zeit (Lebensdauer) von einigen Stunden ist sie für das Globalmodell (ICON) räumlich noch subskalig, im Regionalmodell (ICON Nest) dagegen liegt sie zumindest in der Nähe der aufgelösten Prozesse, und im COSMO-DE können bei einem Gitterpunktabstand von etwa 2.8 km große (aber nur große) konvektive Elemente aufgelöst werden. Zeitlich ist die Konvektion in keinem der Modelle subskalig. Damit ist die Voraussetzung der Skalentrennung nicht erfüllt. Beim ICON und ICON Nest reicht die Auflösung für eine explizite Simulation der Konvektion nicht aus und die Erfahrung zeigt, dass trotz der fehlenden eindeutigen Skalentrennung eine Parametrisierung der Konvektion notwendig ist. Die Ergebnisse sind oft nicht befriedigend, ohne Parametrisierung sind sie aber in der Regel schlechter. Erst das COSMO-DE erlaubt wenigstens in groben Zügen eine direkte Simulation von Schauern und Gewittern für Deutschland und die nächste Umgebung. Damit soll verdeutlicht werden, dass es gerade die konvektiven Prozesse (Schauer und Gewitter) sind, die aufgrund der nicht ausreichenden Skalentrennung für die COSMO-Modelle „weder Fisch noch Fleisch“ sind. Daher haben diese Modelle in der deterministischen Vorhersage von Schauern und Gewittern auch ihre größten Probleme.

Die Aussage „Heute Nachmittag wird es am Frankfurter Flughafen zwischen 14:47 und 15:04 ein kräftiges Gewitter geben“ ist daher nach wie vor Zukunftsmusik. Dazu müsste der Gitterpunktsabstand des Modells dieselbe Skala wie die Zeit aufweisen. Leider sind wir davon im Augenblick noch recht weit entfernt.

Freie Parameter

Ein schwieriges Problem ist die optimale Bestimmung von freien Parametern, die in den Parametrisierungsansätzen auftreten. Da die Parametrisierungen nur eine - manchmal sehr grobe - Annäherung an den jeweiligen Prozess darstellen, sind solche Parameter in der Regel nicht allein aus physikalischen Überlegungen abzuleiten. Sie müssen vielmehr im Kontext des Modells bestimmt werden. Prinzipiell müsste dafür eine große Zahl von Testvorhersagen mit jeweils unterschiedlichen Werten der freien Parameter gerechnet und mit der tatsächlich eingetretenen Wetterlage verglichen werden. Dies ist wegen des enormen Rechenzeitaufwands nicht möglich. Stattdessen behilft man sich in der Regel damit, ein vereinfachtes Modell nur für eine einzige vertikale Säule aus dem Modellgebiet zu rechnen. Dazu wählt man ein Gitterelement, an dem möglichst viele über das übliche Maß hinausgehende Beobachtungen vorliegen. In Deutschland bietet sich dazu der Standort des Observatoriums Lindenberg des Deutschen Wetterdienstes an, an dem z. B. der turbulente Austausch zwischen der Erdoberfläche und den untersten Atmosphärenschichten routinemäßig bestimmt wird. Mit Hilfe der dort vorliegenden Daten ist es möglich, mit dem vereinfachten Modell einen Abgleich der freien Parameter von Parametrisierungen vorzunehmen, ohne dass der Rechenzeitbedarf zu groß ist. Wegen der komplexen Wechselwirkungen zwischen allen Prozessen im Modell kann es aber notwendig sein, bei Abänderung einer Parametrisierung auch die freien Parameter einer anderen, an sich nicht betroffenen Parametrisierung neu abzugleichen.

Externe Parameter

Die Parametrisierungen, aber auch die direkte Simulation atmosphärischer Prozesse im Gitter des Modells, setzen die Kenntnis einer Reihe von Eigenschaften der Atmosphäre und des Erdbodens voraus, die unter dem Begriff externe Parameter zusammengefasst werden. Der wichtigste dieser externen Parameter ist die **mittlere Höhe der Erdoberfläche** für jedes vom Modellgitter dargestellte Gitterelement. Abbildung 9 zeigt diese Größe für das COSMO-EU. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass im ICON Nest bei einer Auflösung von 6.5 km schon eine gute Darstellung der Orographie (Topographie) gewährleistet ist.

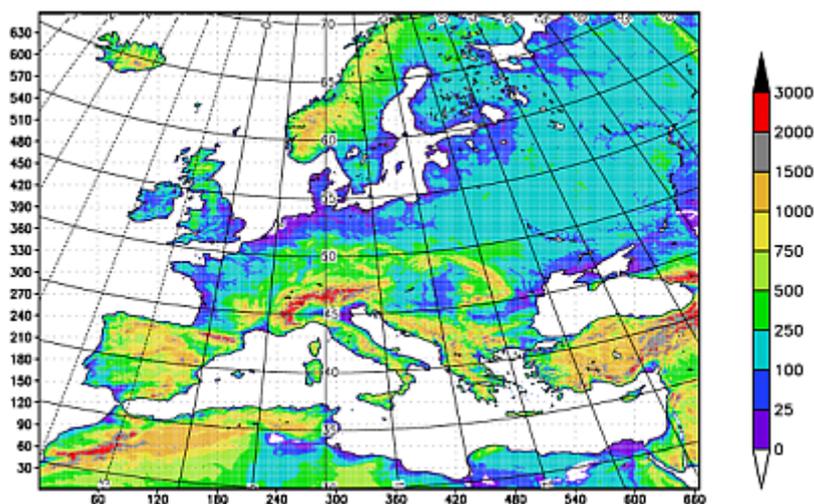


Abbildung 9: Mittlere Geländehöhe (in m gemäß Farbskala) für die Gitterelemente des COSMO-EU. Die Zahlen an den Rändern der Abbildung sind die Nummern der Gitterelemente des ICON Nest in x- und y-Richtung

Weiterhin muss auch die Zusammensetzung der Atmosphäre hinsichtlich der Verteilungen der strahlungsrelevanten Spurengase bekannt sein, die - abgesehen von der des Wasserdampfes - nicht prognostiziert werden. Auch die Eigenschaften des Erdbodens, charakteristische Eigenschaften der Pflanzendecke müssen dem Modell vorgegeben werden. Für den turbulenten Austausch zwischen der Erdoberfläche und den untersten Atmosphärenschichten ist ein charakteristisches Maß der Rauigkeit der Erdoberfläche (die sogenannte Rauigkeitslänge) in jedem Gitterelement wichtig. Mit zunehmender Rauigkeitslänge nimmt bei sonst gleichen Verhältnissen der turbulente Austausch zu.

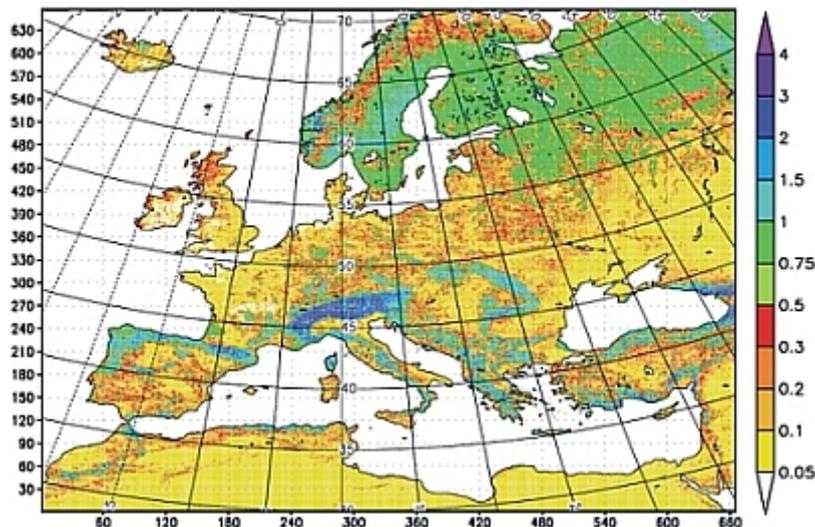


Abbildung 9: Rauigkeitslänge (in m gemäß Farbskala) für Landpunkte als charakteristisches Maß für die Intensität des Austauschs zwischen der Erdoberfläche und den untersten Atmosphärenschichten im ICON Nest.

Abbildung 9 zeigt die Verteilung dieser Größe für das ICON Nest. Große Werte treten auf in Gebirgen, die innerhalb eines ICON Nest-Gitterelements noch große Höhenvariationen haben (Alpen, Pyrenäen), in großen Städten (zum Beispiel London) und auch in bewaldeten Regionen. Über Wasserflächen ist die Rauigkeitslänge sehr klein. Im Gegensatz zur Landfläche wird sie nicht als zeitlich konstant angenommen, sondern sie variiert mit der Windgeschwindigkeit.

Numerische Methoden : Fehlerquellen

Einige Fehlerquellen, die mit der Methode „Numerische Wettervorhersage“ sozusagen „verheiratet“ sind, wurden bereits genannt. Die folgende Auflistung enthält die wichtigsten Fehlerquellen und soll letztendlich verdeutlichen, dass eine Wettervorhersage zwangsläufig dazu verurteilt ist, fehlerbehaftet zu sein. Das bedeutet im Umkehrschluss: eine absolut 100-prozentige Wettervorhersage wird es niemals geben.

- Die Modellgleichungen sind und bleiben ein „Modell“, welches die Wirklichkeit nur näherungsweise abbildet. Zu diesen Vereinfachungen ist man gezwungen, da der Rechenaufwand für genauere Modelle exponentiell ansteigen würde.
- Der Ausgangszustand der Atmosphäre ist nur lückenhaft bekannt.
Beispiel: gerade auf dem Atlantik, der Wetterküche für Mitteleuropa, gibt es nur sehr vereinzelt Radiosondendaten. Auch Flugzeuge, die während des Fluges Temperatur, Feuchte und Windgeschwindigkeit messen können, und Satelliten können das Fehlen

der Radiosondenaufstiege, welche Temperatur, Taupunkt Luftdruck und Wind als Vertikalprofil darstellen, nur eingeschränkt ersetzen.

- Positive Rückkopplung
Dieser Effekt verschlimmert die beiden o.g. systembedingten Fehlerquellen. Fehler werden an den Eingang zurückgeschleust und dadurch sogar verstärkt. Auch dieser Fehler lässt sich nicht eliminieren und basiert auf der Methode Numerische Wettervorhersage.
- Die Rechenleistung der Computer bleibt beschränkt.
Das ist eine physikalische Tatsache, die weltweit den Meteorologen Grenzen aufweist.
- „Ungefilterte“ Ausgabe der Modell-Parameter
Damit ist der Umstand gemeint, dass kein Meteorologe die Vielzahl der Vorhersageprodukte vor der Veröffentlichung prüfen und ggf. modifizieren kann. Der Anwender sieht also reine Maschinenprodukte, die aus den o.g. Gründen a priori fehlerhaft sein können – oder besser: müssen.
- Vorhersagen sind deshalb schwierig, weil sie mit der Zukunft zu tun haben!
Dieses Problem haben auch Anlageberater, welche die Entwicklung an der Börse vorhersagen müssen – leider oft noch weniger zuverlässig wie die Wettervorhersage.

Die Ensemble Technik

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Fehlerquellen sind -wie schon mehrfach erwähnt-, unvermeidbare „Geburtsfehler“, die dem Modell von Beginn an in die „Wiege gelegt“ werden. Insbesondere kleine Ungenauigkeiten im Erfassen des aktuellen Zustandes der Atmosphäre können große Auswirkungen auf den Verlauf von Wettervorhersagen haben.

Da man aber mit diesen Schwächen zwangsläufig leben muss, ist man bestrebt, Methoden zu entwickeln, welche diese Fehler quantitativ beschreiben. Der Ansatz für diese Vorgehensweise heißt „Ensemble-Technik“. Ensemble ist aus dem Französischen abgeleitet und heißt „das Kollektiv“. Mit Hilfe dieses Kollektivs kann man schließlich Wahrscheinlichkeiten berechnen, welche die Zuverlässigkeit einer Vorhersage beschreiben.

Das Ziel von Wahrscheinlichkeitsvorhersagen ist es, die vorhandene Unsicherheit über den aktuellen Zustand zu berücksichtigen, indem viele Vorhersagen mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen gerechnet werden. Aus Sicht der digitalen Signalverarbeitung würde man sagen, dass man ein künstlich erzeugtes „Rauschen“ an den Eingang legt um zu sehen, wie sich das am Ausgang auswirkt. Aus der Schar von Vorhersagen, dem so genannten Ensemble, kann eine Eintrittswahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Ereignis berechnet werden. Zudem liefert das Ensemble ein Maß für die Vorhersagbarkeit der aktuellen Wetterlage und somit auch ein Maß für die Vertrauenswürdigkeit der Prognose.

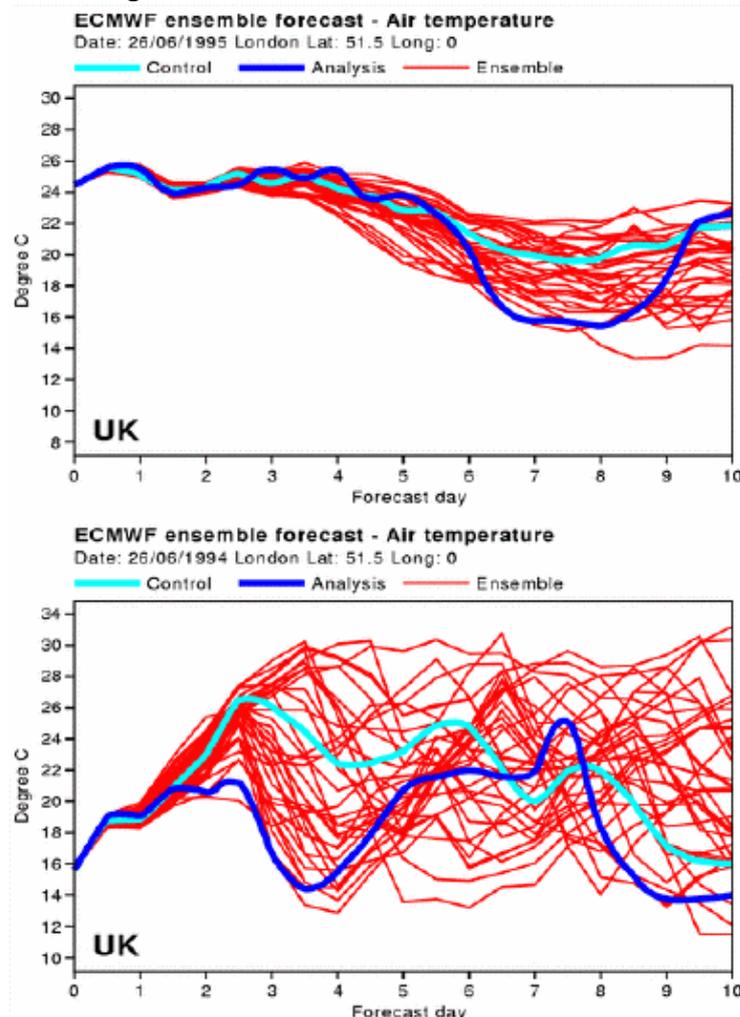


Abbildung 9: Temperaturverlauf mit Ensemble-Technik

Bild 10 veranschaulicht die Vorgehensweise mit 2 Beispielen. In beiden Grafiken wird die vorhergesagte Temperatur an einem bestimmten Ort über der Zeit (10 Tage) dargestellt. Beide Grafiken enthalten dunkelblau dargestellt das Ergebnis des sogenannten Hauptlaufes, rot sind die leicht modifizierten Members, türkis ist der Mittelwert der Members.

Das graphische Ergebnis hat eine gewisse Ähnlichkeit mit einem rauchenden Fabrikschornstein. Links im Bild der nicht sichtbare „Schornstein“, rechts die Linien sind die „Rauchfahnen“.

Im oberen Beispiel sind die „Rauchfahnen“ dicht beieinander, d.h. die Schwankungsbreite und damit die Unsicherheit in der Temperaturvorhersage ist gering. In so einem Fall kann man von einer stabilen Vorhersage ausgehen, da kleine Änderungen am Eingang nur wenig Änderung am Ausgang bewirken. Man beachte aber die große Abweichung des dunkelblauen Hauptlaufes von den Ensemble-Mittel (türkis) ab dem 6. Folgetag. Ohne die Ensemble-Technik müsste man von einem Temperatur-Rückgang ab dem 6. rechnen. Mit der Ensemble-Technik muss man erkennen, dass dieser Rückgang sehr viel moderater ausfallen soll.

Im 2. Fallbeispiel divergieren dagegen die Rauchfahnen schon erheblich nach dem 2. Folgetag, ein Anzeichen für eine unsichere Vorhersage. Kleine Änderungen am Eingang führen zu großen Änderungen am Ausgang. Das Modell reagiert „chaotisch“, d.h. eine Aussage ist sehr unsicher.

Der DWD rechnet das COSMO-DE derzeit mit 40 Ensembles, um zu statistischen Interpretationsmöglichkeiten für das Wetter zu gelangen. Derzeit werden noch keine Produkte aus diesem Verfahren in pc_met verbreitet. Es wird allerdings überlegt, zukünftig ggf. auch Vorhersagen auf der Basis dieser Technik auch den pc_met Kunden anzubieten. Dies wäre für die Abschätzung von Starkwind, Starkregen oder Schneefall sicher auch für die Fliegerei sinnvoll.

Wettervorhersagen: Was können sie und wo sind die Grenzen?

In den vorausgehenden Abschnitten wurde recht detailliert auf die möglichen Fehlerquellen eingegangen. Viele dieser Fehlerquellen sind systemimmanent und sozusagen ein Geburtsfehler der Numerischen Wettervorhersage.

Es stellt sich die Frage, wozu man diesen Aufwand betreibt, wenn der Ansatz im Grunde bereits zum Scheitern verurteilt ist. Antwort: weil es anders gar nicht geht!

Im Grunde funktioniert das Verfahren auch recht zufriedenstellend, jedenfalls hat man mit diesem Ansatz in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erzielt. Die Qualität der Wettervorhersagen nicht nur des DWD hat sich stets weiter verbessert. Für die Zwei-Tage-Vorhersage liegt die Prognosequalität bei einem Wert von deutlich über 0.9 Heute sind die Vorhersagen für sieben Tage genauer als die 48-Stunden-Vorhersage in den 1970er Jahren.

Der Idealwert 1 bedeutet: Die vorhergesagten und die analysierten Daten stimmen exakt überein. Der schlechteste Wert ist -1 und bedeutet: Es wird immer das Gegenteil vom analysierten Wert vorhergesagt. Wie schon mehrfach erwähnt kann man den Idealwert 1 niemals erreichen, sondern nur versuchen, durch immer höherwertige Technik (=schnellere Computer) dem Idealwert ein Stückchen näher zu kommen.

4 Wetterereignisse in der letzten Vergangenheit, an die sich der Leser vielleicht noch erinnert, sollen die Zuverlässigkeit bzw. die Grenzen der Vorhersage aufzeigen.

Orkantief Christian am 28. Oktober 2013

Dieses Orkantief ist in die Geschichte der Meteorologie eingegangen, weil es in Norddeutschland die höchsten je gemessenen Windgeschwindigkeiten bescherte.



Abbildung 10: Landendes Flugzeug in Amsterdam Schiphol



Abbildung 11: Englische Küste



Abbildung 12: Zwillingtürme Greetsiel

Windvorhersagen sind – falls sie nicht durch ein lokales Gewitter hervorgerufen werden – in den Modellen recht zuverlässig. Das liegt einerseits daran, dass der Wind als Vorhersagegröße eine sogenannte skalige Größe ist, die in Verbindung mit der räumlichen Ausdehnung eines Randtiefs nicht durch die Maschenweiten des Modellgitters fallen kann.

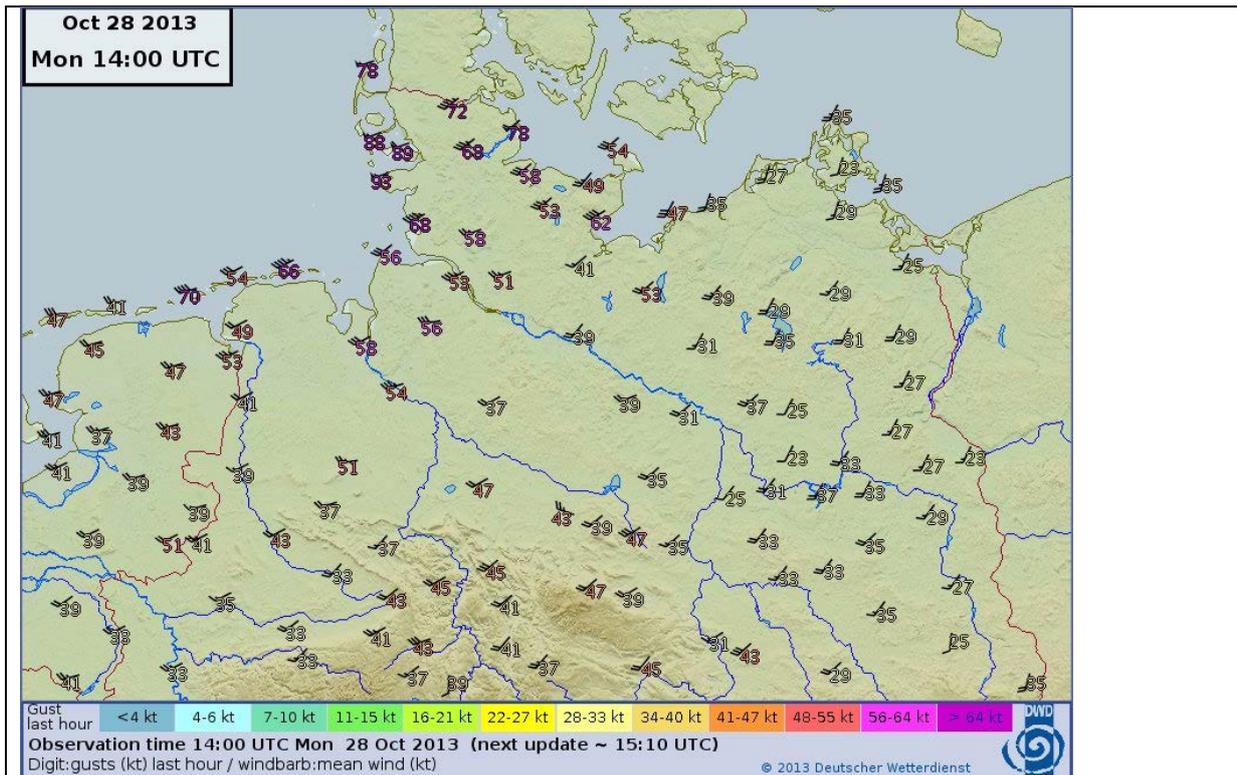


Abbildung 10: aufgetretene Spitzenböen 28.Okt. 2013 zwischen 14 und 15 UTC

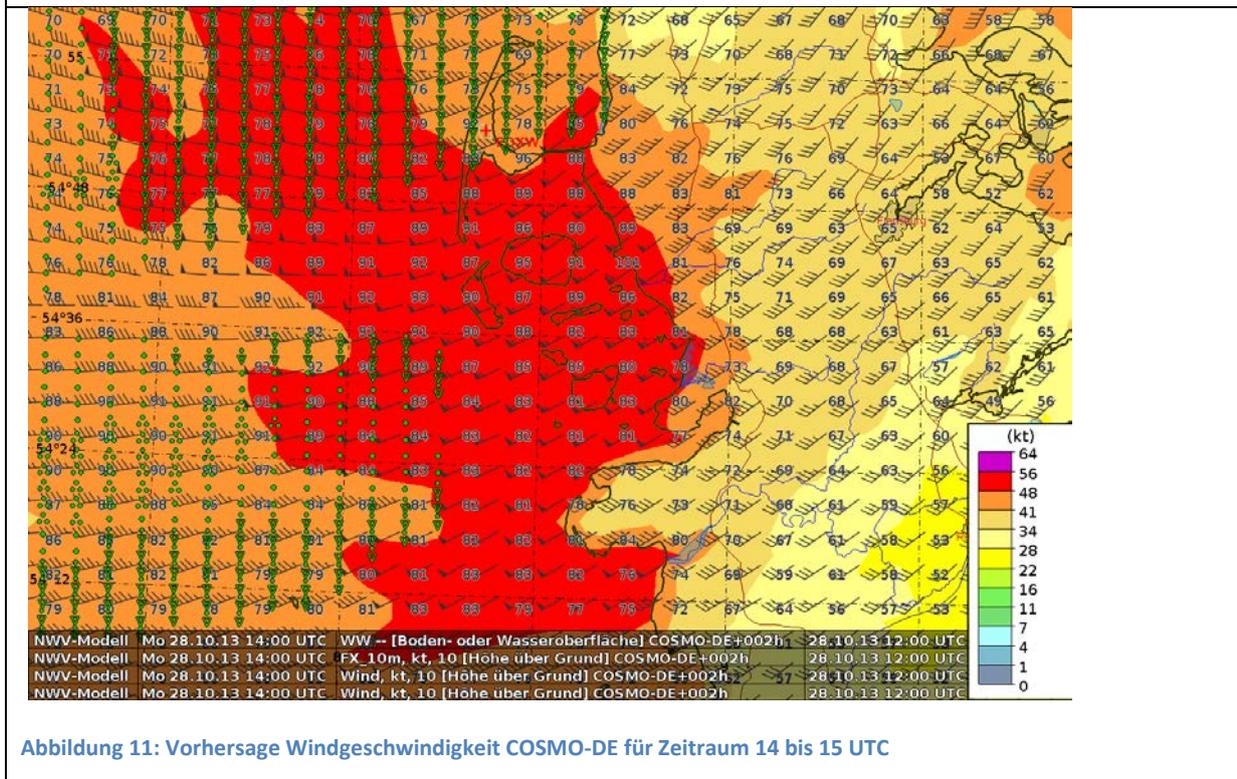


Abbildung 11: Vorhersage Windgeschwindigkeit COSMO-DE für Zeitraum 14 bis 15 UTC

Man kann erkennen, dass sowohl räumlich aus auch zeitlich sowie inhaltlich die Vorhersage sehr präzise war.

Fazit: Wind im Allgemeinen und Sturmevents wie im vorliegenden Fall können sehr zuverlässig vorhergesagt werden. Eine Ausnahme bilden Sturmböen, die durch konvektive Prozesse verursacht werden siehe hierzu Beispiel 3.

Jahrhunderthochwasser im Juni 2013



Abbildung 12: Passau an der Donau

Dieses Hochwasser hatte weite Teile der neuen Bundesländer und Bayern betroffen. Es wurde ausgelöst durch eine sogenannte Vb-Wetterlage. Diese bezeichnet eine Wetterlage mit Höhentrog über Mitteleuropa, auf deren Vorderseite Bodentiefs über Norditalien entstehen und unter Intensivierung die Alpen überqueren. Die Zugrichtung ist dann in der Regel nach Polen. In diesem Fall sind die Tiefs aber wieder auf eine westliche Zugbahn eingedreht und haben dadurch das Hochwasser in den östlichen Teilen der BRD und Tschechien verursacht.

Auch diese Teiltiefbildung ist ein sogenannter mesoskaliger Prozess, der zusätzlich durch die Orographie- in diesem Fall die Alpen und das Erzgebirge – modifiziert werden kann. Das GME-Modell hatte diese Entwicklung bereits 5 Tage im Voraus angedeutet. Dies hatte mich als Autor dieses Artikels veranlasst, in Facebook eine Meldung zu veröffentlichen. Die ich den Lesern dieses Artikels nicht vorenthalten will.

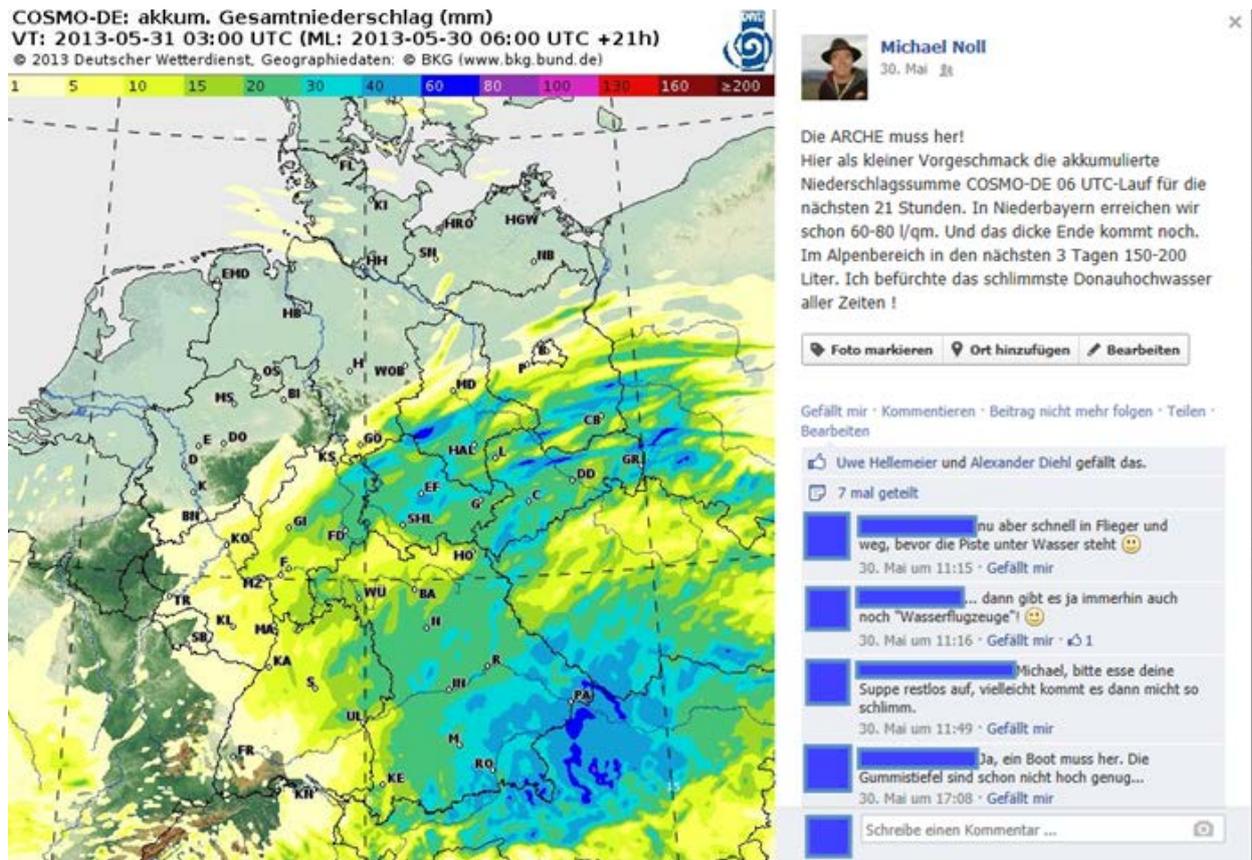


Abbildung 13: Niederschlagsvorhersagen COSME-DE und COSMO-EU

Fazit: Sofern die Niederschläge nicht durch sogenannte subskalige Prozesse ausgelöst werden, ist es möglich, diese nach Zeitpunkt des Auftretens und Intensität recht genau vorherzusagen. Im vorliegenden Fall war die Teiltiefbildung in Verbindung mit extrem feuchter Mittelmehrluft sowie Stauvorgänge an Gebirgen mit beteiligt, das klappt recht gut.

Auch Niederschlag im Zusammenhang mit Fronten wird durch das Modell COSMO recht gut simuliert.

Hagelschlag am 21.05.2013 auf der Autobahn bei Salzburg



Abbildung 14: Hagelschlag 21.05.2013 Autobahn Salzburg

Dieses Bild zeigt lokalen Hagelschlag, wie er sich am 21. Mai 2013 auf der Autobahn Salzburg ereignet hatte. Mehrere Pressemitteilungen waren hierfür Zeuge.

Es handelte sich in diesem Fall um rein konvektive Prozesse, die NICHT durch eine Front oder ein Teiltief oder Hebung an Hindernissen ausgelöst worden sind.

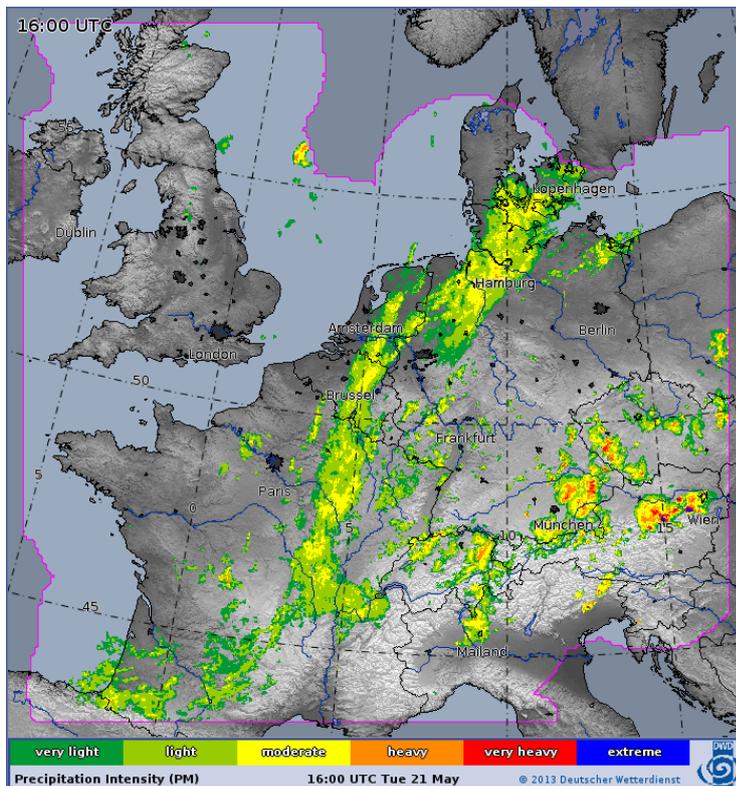


Abbildung 15: RADAR-Bild Europa 21.05.2016 16 UTC

Auch wenn die Abmessungen der konvektiven Zellen in diesem Beispiel sicher größer sind als der doppelte Gitterpunktsabstand von 2.8 km, so sind solche Ereignisse dennoch räumlich und zeitlich nicht deterministisch. Das bedeutet, dann man keine Aussage treffen kann wie: „Auf der Autobahn München Salzburg wird am Grenzübergang um 17:30 ein schweres Hagelunwetter niedergehen!“

Die fehlende Skalentrennung (siehe Seite Abschnitt Parametrisierungen – Skalentrennung) ist hierfür mit verantwortlich.

Fazit: Lokale Schauer und Gewitter lassen sich mit der Methode Numerische Wettervorhersage nicht exakt vorhersagen.

Lokale Windsysteme (für Ballonfahrer interessant)

Lokale Windsysteme sind Zirkulationen, die durch die Orographie bzw. Bodenbeschaffenheit ausgelöst werden. Dazu zählen Land-Seewind-Zirkulationen ebenso wie Berg-Talwind-Systeme oder Hangauf- und Hangabwinde (anabatische/katabatische Winde).

Im vorliegenden Fall geht es um kleinräumige Windsysteme, die am Nordrand des Sauerlandes entlang der Haar auftreten.

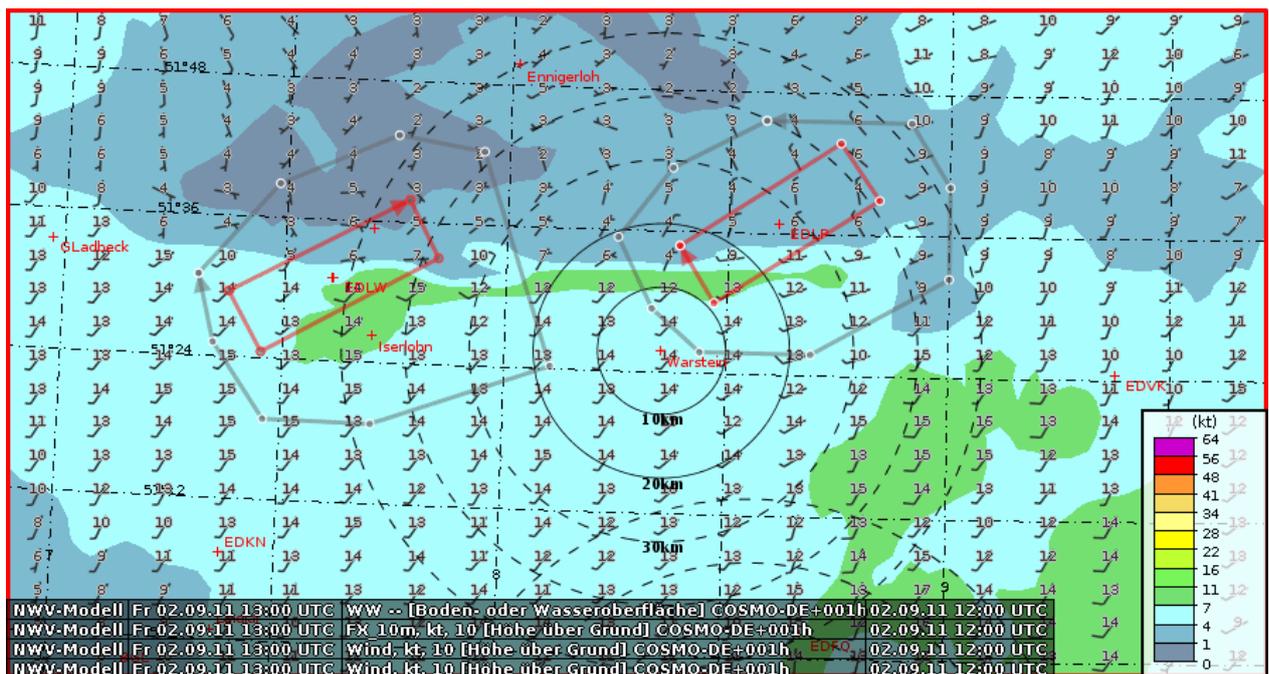


Abbildung 16: Windvorhersage COSMODE 02.09.2011 (Haarstrang-Effekt)

Diese Windsysteme sind Ballonfahren sehr bekannt. Eine Ballonfahrer-Regel sagt: wenn du bei Südwind im Warstein startest, dann lande nicht im Bereich des Haarstranges, sondern überquere die A44 nordwärts, am besten auch noch die B1 und lande dort „stehend“, d.h. ohne dass der Korb bei der Landung infolge zu starken Windes umkippt.

Es stellt sich die Frage, ob solche durchaus kleinräumigen Effekte vom COSMO-DE aufgelöst werden kann. Die Antwort lautet eindeutig: ja, das geht.

In Abbildung 20 sind die Windverhältnisse vorhergesagt. In Kreismitte befindet sich Warstein, der schmale grüne Streifen nördlich davon ist die Windverstärkung, welche durch den Haarstrang hervorgerufen wird. Nördlich davon schließen sich sehr windschwache Bereiche an, die sogar eine gegenläufige Windrichtung aufweisen.



Abbildung 20: Schnitt durch Haarstrang mit schematisiertem Wind

Diesen Sachverhalt konnte ich bereits mehrmals als Passagier im Korb nachvollziehen. Im konkreten Fall ist der Ballon nördlich der Bundesstraße 1 gelandet und mit einer sehr schwachen nördlichen Strömung entgegen der Höhenströmung wieder ein wenig zurück gefahren. Vorhersage und Realität passen gut zusammen.

Fazit: kleinräumige Windsysteme, deren Ursprung orographischer Natur ist, werden von kleinräumigen Modellen wie das COSMO-DE recht gut vorhergesagt. Voraussetzung ist eine gewisse Mindestgröße der auslösenden Orographie. Mehr als 10 km sollten es mindestens sein.

Vorsicht: nicht korrekt vorhergesagt werden insbesondere Böen, die durch konvektive Prozesse (lokale Schauer und Gewitter) ausgelöst werden.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay
AMV	Atmospheric Motion Vectors, Windmessung mit Satelliten über Wolkenverfrachtung
COSMO	Consortium for Small-Scale Modelling
COSMO-DE	COSMO-Modell des DWD für Ausschnitt Deutschland
COSMO-EU	COSMO-Modell des DWD für Ausschnitt Europa
DWD	Deutscher Wetterdienst
DMRZ	Deutsche Meteorologische Rechenzentrum
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GAFOR	General Aviation Forecast
GME	Global Model Extended, Globales Modell des Deutschen Wetterdienstes
GTS	Global Telecommunication System
ICON	Icosahedral Nonhydrostatic
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RADAR	Radio Detection and Ranging
UTC	Universal Time Coordinated

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Flugmeteorologie, Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach
Stand: Dezember 2017

Anregungen und Fragen bitten an:

Per E-Mail: luftfahrt@dwd.de

Wir helfen Ihnen per E-Mail auf schnellstem Weg weiter.

Per Telefon: +49 (0)69 8062 2695

Sie erreichen diese Telefonnummer während der normalen Bürodienstzeiten.

Per Telefax: +49 (0)69 8062 11925