

Überblick über die am National Hurricane Center verwendeten Vorhersagemodelle für Intensität und Zugbahn tropischer Wirbelstürme

Anmerkung: Folgender Text basiert auf der englischen Originalversion von Jamie R. Rhome (National Hurricane Center). Für die freundliche Genehmigung zur Übersetzung sei an dieser Stelle Dr. Christopher Landsea vom National Hurricane Center gedankt.

1) Einleitung

"Vorhersagemodell" ist ein allgemeiner Begriff für ein Hilfsmittel, das zur Vorhersage eines zukünftigen Ereignisses (hier: Zustand der Atmosphäre) benutzt wird. Eine solche Vorhersage wird gewöhnlicherweise durch mathematische Berechnungen erzeugt. Das National Hurricane Center (NHC) macht für die Erstellung seiner Vorhersagen von mehreren Modellen Gebrauch.

Vorhersagemodelle reichen von relativ einfachen Methoden, die innerhalb von wenigen Sekunden auf einem gewöhnlichen Computer angewendet werden können, bis hin zu solchen, deren Rechenzeit mehrere Stunden auf Hochleistungscomputern beträgt. **Dynamische Modelle**, auch als "numerische Modelle" bekannt, laufen auf Hochgeschwindigkeitscomputern, die die physikalischen Bewegungsgleichungen der Atmosphäre lösen. Im Gegensatz dazu betrachten **statistische Modelle** nicht die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre, sondern basieren auf Beziehungen zwischen dem Sturmverhalten und sturmspezifischen Details wie Ort und Zeit vergangener Stürme. **Statistisch-dynamische Modelle** verwenden sowohl dynamische als auch statistische Methoden. Ihre Vorhersagen beruhen auf historischen Beziehungen zwischen dem Sturmverhalten und atmosphärischen Variablen, die von dynamischen Modellen erhalten werden. **Trajektorienmodelle** bewegen einen tropischen Wirbelsturm aufgrund der vorherrschenden Strömung in der Atmosphäre, die durch ein separates dynamisches Modell berechnet wird. **Ensemble- oder Konsensmethoden** sind keine wirklichen Vorhersagen an sich, sondern umfassen vielmehr Kombinationen von Vorhersagen verschiedener Modelle.

Die folgenden Abschnitte umfassen eine detailliertere Beschreibung der Modelltypen sowie der gebräuchlichsten Modelle am NHC.

2) Vergleich früher und später Modelle (*early and late models*)

Vorhersagemodelle werden entweder als *früh* oder *spät* klassifiziert. Dies hängt davon ab, ob ihre Vorhersagen für den Meteorologen während des gegenwärtigen Vorhersagezykluses zur Verfügung stehen oder nicht. Im folgenden Beispiel wird der 1200 UTC Vorhersagezyklus betrachtet, der mit dem synoptischen Termin 12 Z (UTC) beginnt und mit der Veröffentlichung der Vorhersage um 15 Z endet. Der 12 Z- Lauf des amerikanischen GFS-Modells ist nicht vor etwa 16 Z beendet und steht dem Meteorologen nicht für die 15 Z-Vorhersage zur Verfügung. Somit wird das 12 Z- GFS als spätes Modell bezeichnet, weil es nicht zur Erstellung der 12 Z-Vorhersage gebraucht werden kann. Umgekehrt sind die Rechnungen der BAM-Modelle nur wenige Minuten nach Beginn abgeschlossen. Sie werden deshalb als frühe Modelle angesehen.

Aufgrund ihres Rechenaufwandes sind dynamische Modelle in der Regel späte Modelle. Glücklicherweise gibt es jedoch eine Methode, mit der man die letzte Vorhersage eines späten Modelles in einer Art und Weise anpassen und somit auf die gegenwärtige synoptische Zeit und Anfangsbedingungen anwenden kann. Im obigen Beispiel würden die Daten für die 6- bzw. 12 Stunden-Vorhersage des vorherigen Modelllaufes von 6 Z geglättet und angepasst werden, so dass die

6 Stunden-Vorhersage (gültig um 12 Z) mit der beobachteten Position und Intensität des Wirbelsturmes um 12 Z identisch ist. Dieser Anpassungsprozess erzeugt eine frühe Version des GFS-Modells, das dann Teil des 12 Z-Vorhersagezyklusses wird. Die angepassten Versionen der späten Modelle sind – größtenteils aus historischen Gründen – als “interpolierte” Modelle bekannt.

3) Interpretation von Vorhersagemodellen

Es ist wichtig zu erwähnen, dass Vorhersagemodelle ziemlich komplex sind und jedes einzelne Modell sowohl Stärken als auch Schwächen hat. Professionelles Training und jahrelange Erfahrung sind für die Interpretation von Modellvorhersagen hilfreich. Im Mittel sind die Fehler offizieller NHC Vorhersagen kleiner als die jedes einzelnen Modelles (<http://www.nhc.noaa.gov/verification/verify3.shtml>). Jede Vorhersage des NHC beruht nicht auf nur einem einzigen Modell, sondern spiegelt die Betrachtung aller Modelle sowie die Erfahrung des vorhersagenden Meteorologen wider. Deshalb sollte man offizielle Vorhersagen des NHC sowie des amerikanischen Wetterdienstes bevorzugen, anstatt einfach nur die jeweiligen Modellvorhersagen zu betrachten. Man sollte sich auch im Klaren darüber sein, dass jede NHC-Vorhersage eine bestimmte Ungewissheit beinhaltet. Eine angemessene Interpretation dieser Vorhersage muss dies berücksichtigen. Meteorologen am NHC diskutieren die Ungewissheiten ihrer Vorhersagen in der *Tropical Cyclone Discussion (TCD)*. Das NHC stellt wahrscheinlichkeitstheoretische Vorhersagen zur Verfügung, die zur Evaluierung von Ungewissheiten benutzt werden können (<http://nhc.noaa.gov/aboutnhcprobs.shtml>). Ausserdem sind detaillierte Informationen über die Verifikation vergangener Vorhersagen erhältlich. Sie erscheinen in einem jährlichen Bericht (<http://www.nhc.noaa.gov/verification/verify3.shtml>).

4) Statistische Modelle

Statistische Modelle basieren auf bekannten Beziehungen zwischen sturmspezifischen Informationen (z. B. Ort, Jahreszeit) und dem Verhalten vergangener Stürme. Während diese Modelle in den vergangenen Jahrzehnten eine Schlüsselrolle bei der Vorhersage von Wirbelstürmen spielten, dienen sie heute oftmals zum Vergleich mit höherentwickelten und genaueren Modellen (dynamische Modelle). Modelle, deren Vorhersagen schlechter sind als die einfacher statistischer Modelle, werden als **untauglich** (*unskillful*) bezeichnet. Modelle, die besser als statistische Modelle abschneiden, werden als **tauglich** (*skillful*) betrachtet. Aufgrund ihrer Einfachheit sind die Rechenzeiten für diese Modelle kurz, und die Vorhersagen stehen bereits nach wenigen Minuten zur Verfügung.

Climatology and Persistence Model (CLIPER5)

CLIPER5 ist ein statistisches Modell zur Vorhersage der Zugbahn. Es wurde ursprünglich 1972 entwickelt und 1998 erweitert, um den Vorhersagezeitraum auf 120 Stunden zu verlängern. Wie der Name bereits impliziert, basiert CLIPER5 auf Klimatologie (*CLImatology*) und Fortdauer (*PERSistence*). Die Einflusswerte sind die sowohl gegenwärtige Bewegung des Sturmes als auch die der vergangenen 12 bzw. 24 Stunden, Bewegungsrichtung, momentane Längen- und Breitengradposition, Datum sowie anfängliche Sturmstärke. CLIPER5 wird primär zur Evaluierung anderer Vorhersagemodelle sowie der offiziellen NHC Vorhersage verwendet. Vorhersagen, die einen grösseren Fehler als CLIPER5 aufweisen, werden als untauglich bezeichnet.

Statistical Hurricane Intensity Forecast (SHIFOR5)

SHIFOR5 ist ein einfaches statistisches Modell zur Vorhersage der Sturmintensität, das Klimatologie und Fortdauer als Einflussfaktoren benutzt.

Decay-SHIFOR5

Decay-SHIFOR5 entspricht dem SHIFOR5-Modell mit dem Unterschied, dass eine Zerfallskomponente für Stürme über Land wirksam ist. Diese berücksichtigt Landeffekte, die zu Abschwächung und Zerfall des Sturmes führen. Decay-SHIFOR5 wird in erster Linie zur Evaluierung anderer Vorhersagemodelle sowie der offiziellen NHC Vorhersage verwendet.

5) Statistisch-dynamische Modelle

NHC91/NHC98

Die Modelle NHC91 (für den Atlantik) und NHC98 (für den Ostpazifik) werden als statistisch-dynamische Modelle bezeichnet, da sie statistische Zusammenhänge zwischen Sturmverhalten und Einflussfaktoren, die durch dynamische Vorhersagemodelle erhalten werden, widerspiegeln. Typische Einflussfaktoren sind die gemittelten Geopotentialfelder des GFS-Modells zwischen 1000 hPa und 100 hPa.

Statistical Hurricane Intensity and Prediction Scheme (SHIPS)

Das SHIPS Modell ist ein statistisch-dynamisches Modell zur Vorhersage der Sturmintensität. Seine Vorhersagen beruhen auf statistischen Beziehungen zwischen Sturmverhalten und Einflussfaktoren, die von dynamischen Modellen geliefert werden. Aufgrund der Verwendung dieser dynamischen Faktoren zusätzlich zu Klimatologie und Fortdauer, ist der durchschnittliche Fehler einer SHIPS-Vorhersage üblicherweise 10-15% niedriger im Vergleich zu SHIFOR5. Hinzu kommt, dass SHIPS die meisten dynamischen Modelle überflügelt hat, wie z. B. das GFS Modell, das die dynamischen Faktoren für SHIPS liefert. SHIPS ist traditionell eines der tauglicheren Vorhersagemodelle für das NHC. Jedoch ist das GFDL Modell in letzter Zeit immer mehr konkurrenzfähig geworden. Ausserdem sind in den letzten Jahren verstärkt Konsensmethoden aufgetaucht, die sich als taugliche Hilfsmittel zur Intensitätsvorhersage herausstellten.

SHIPS basiert auf der Methode der Mehrfachregression. Die Einflussfaktoren für SHIPS umfassen neben Klimatologie und Fortdauer auch atmosphärische und ozeanische Parameter wie vertikale Windscherung, Stabilität, Meeresoberflächentemperatur und Wärmegehalt des oberen Ozeans (*upper oceanic heat content*). Die Daten, aus denen die Regressionsgleichungen abgeleitet werden, beinhalten tropische Wirbelstürme von 1982 bis in die Gegenwart, die sich zu keinem Zeitpunkt über Land befanden. Jedes Jahr werden die Regressionsgleichungen modifiziert, nachdem die Daten des jeweiligen vergangenen Jahres in die Datenbank aufgenommen wurden. Als Folge dessen kann sich die Gewichtung der Einflussfaktoren von Jahr zu Jahr ändern. Die Faktoren, die momentan statistisch am bedeutendsten erscheinen, sind: die Differenz zwischen der aktuellen und der geschätzten maximal möglichen Intensität (*maximum potential intensity, MPI*), vertikale Windscherung, Fortdauer sowie die Temperatur der oberen Troposphäre. SHIPS beinhaltet auch von Satellitendaten abgeleitete Einflussfaktoren wie Stärke und Symmetrie von Konvektion sowie den bereits erwähnten Wärmegehalt des oberen Ozeans.

Decay-SHIPS

Beinhaltet ein Modul, das den Zerfall des Sturmes über Land berücksichtigt. Da Wechselwirkungen mit Land zu einer Abschwächung des Sturmes führen, sind die Vorhersagen von Decay-SHIPS normalerweise besser für Stürme, die auf Land treffen. Für Wirbelstürme über den Ozeanen sind die Intensitätsvorhersagen von SHIPS und Decay-SHIPS identisch.

Logistic Growth in Equation Model Summary (LGEM)

LGEM ist ein statistisches Modell zur Intensitätsvorhersage, das die gleichen Vorgaben wie SHIPS benutzt. Jedoch basiert LGEM auf einem vereinfachten dynamischen Vorhersagesystem anstatt einer Mehrfachregression. Die Entwicklung der maximalen Windgeschwindigkeit wird durch eine Wachstumsfunktion bestimmt, deren Lösung zwischen Null und der MPI liegt. Die MPI wird durch eine empirische Beziehung gewonnen, die die Meeresoberflächentemperatur beinhaltet. Die zeitliche Evolution der maximalen Windgeschwindigkeit hängt von einem Koeffizienten ab, der die Wachstumsrate beschreibt. Letzterer wird durch einen Teil der Eingabewerte des SHIPS Modelles geschätzt. In die LGEM Vorhersage gehen momentan keine Satellitendaten ein. Ein wichtiger Unterschied zu SHIPS besteht darin, dass die Langfristvorhersagen von LGEM stärker von atmosphärischen Parametern (Meeresoberflächentemperatur, Windscherung) zu späteren Zeitpunkten abhängen. Die meisten der Einflussvariablen in SHIPS werden über den kompletten Vorhersagezeitraum gemittelt, während in LGEM die Mittelung über einen Zeitraum von 24 Stunden vor Vorhersagegültigkeit geschieht. Die MPI in LGEM ist ein augenblicklicher Wert, während in SHIPS der Wert über den Vorhersageraum gemittelt wird. Dieser Unterschied macht LGEM-Vorhersagen empfindlicher sowohl für Änderungen atmosphärischer Parameter gegen Ende des Vorhersagezeitraumes als auch Fehler in der vorhergesagten Zugbahn des Sturmes.

6) Dynamische Modelle

Dynamische Modelle sind die komplexesten und rechenzeitintensivsten numerischen Modelle am NHC. Sie erzeugen ihre Vorhersagen dadurch, dass sie die physikalischen Gleichungen lösen, die Bewegungen in der Atmosphäre beschreiben. Dabei benutzen sie eine Vielzahl numerischer Methoden sowie Anfangsbedingungen, die auf verfügbaren Beobachtungen basieren. Da diese Beobachtungen nicht an jedem Ort der Welt gemacht werden können, kann die Modellinitialisierung manchmal enorm vom Ist-Zustand der Atmosphäre abweichen. Dies ist die Hauptursache für Unsicherheiten und Vorhersagefehler bei dynamischen Modellen. Fehler im anfänglichen Zustand eines Modelles wachsen in der Regel mit zunehmendem Vorhersagezeitraum. Deshalb können kleinste Fehler zu Beginn sehr gross in der Vorhersage werden, was der Grund dafür ist, dass Prognosen mit zunehmender Zeit mehr und mehr fehlerhaft werden.

US National Weather Service Global Forecast System (GFS)

Der Begriff "GFS" bezieht sich auf alle Computerprogramme, die die Erstellung der gesamten Produktpalette des globalen Modells des amerikanischen Wetterdienstes NWS unterstützt. Dies beinhaltet auch das globale Datenassimilationssystem (GDAS).

Das GFS Modell an sich ist ein globales Spektralmodell, das auf eine Wellenzahl von 382 (T382, entspricht einem horizontalen Gitterabstand von etwa 35 km) beschränkt ist. Die Auflösung wird während der ersten 180 Stunden des Vorhersagezeitraumes beibehalten. Danach erfolgt eine Beschränkung der Wellenzahl auf 190 (T190, entspricht einem horizontalen Gitterabstand von 80 km) mit 64 vertikalen Niveaus für einen Vorhersagezeitraum von 384 Stunden. Das GFS verwendet als vertikale Koordinate ein kombiniertes Sigma-p-System, ein vereinfachtes Arakawa-Schubert (SAS) Parametrisierungsschema für Konvektion, sowie eine Schliessung erster Ordnung für die Darstellung der planetarischen Grenzschicht.

Alle GFS Modellläufe erhalten ihre Anfangsbedingungen von einer variablen, dreidimensionalen (3-D VAR) statistischen Interpolation zwischen den Gitterpunkten (GSI), die während des Tages fortlaufend aktualisiert wird. Anstatt Daten eines künstlich erzeugten

(Wirbel)Sturmes einzubringen (*bogusing*), verlagert das GFS den analysierten (Wirbel)Sturm im *first-guess* Feld an die offizielle Position des NHC. Eine Assimilation der verfügbaren Daten führt dann zur Erzeugung des Anfangszustandes. Der analysierte (Wirbel)sturm ist jedoch oftmals eine unvollständige Darstellung seiner wirklichen Struktur. Aus diesem Grund scheint das GFS gewöhnlicherweise eher dazu geeignet, Vorhersagen für die Zugbahn sowie das Windfeld fernab des Sturmzentrums zu machen. Das Modell, das vom Environmental Modeling Center (EMC) entwickelt und unterhalten wird, wird pro Tag viermal gestartet (00, 06, 12, 18 UTC).

Limited Area Sine Transform Barotropic (LBAR) Model

Im Vergleich zum GFS Modell, ist LBAR ein einfaches zweidimensionales Modell zur Vorhersage der Zugbahn. Es löst die Wellengleichungen für flaches Wasser (*shallow water wave equations*) und wird durch vertikal gemittelte (850-200 hPa) Winde und geopotentielle Höhen des GFS Modells initialisiert. Ein idealisierter symmetrischer Wirbel sowie ein konstanter Windvektor (entspricht dem anfänglichen Bewegungsvektor des Sturmes) werden zu der GFS Analyse hinzugefügt, um die Zirkulation des Sturmes darzustellen. Die Modellgleichungen werden mit einer spektralen Sinus Transformationsmethode für das Gebiet nahe des Sturmes gelöst. Die seitlichen Randbedingungen werden von der GFS Vorhersage zur Verfügung gestellt.

LBAR besitzt keine horizontalen Temperaturgradienten (und somit keine vertikale Windscherung) und ist deshalb für einen Vorhersagezeitraum von mehr als 48 Stunden oder ausserhalb der Tropen relativ schlecht zu gebrauchen.

Canadian Meteorological Centre (CMC) Global Environmental Multiscale Model (GEM)

Das GEM ist ein hydrostatisches Modell, dessen Gitterpunkte den ganzen Erdball umfassen und in einem Längen-/Breitengradkoordinatensystem liegen. Der horizontale Abstand der Gitterpunkte beträgt 0.3 Breiten- sowie 0.45 Längengrade. In der Vertikalen besitzt das Model 58 Eta-Flächen. Das GEM verwendet ein fortgeschrittenes und rechenintensives vierdimensionales Datenassimilationsschema (4-D VAR), in dem zeitliche Unterschiede in den Anfangsdaten eingeschlossen sind. Das Kondensations-Modul enthält das Kain-Fritsch Schema für hochreichende feuchte Konvektion sowie das Kuo Transient Schema für flache Konvektion. Für die vertikale Diffusion aufgrund atmosphärischer Turbulenz wird der Mischungsweg nach Bougeault und Lacarrere verwendet. Das GEM wird um 12 Z für einen Vorhersagezeitraum von 144 Stunden gestartet. Der 00 Z Lauf erzeugt eine Vorhersage für 240 Stunden, und Läufe am Samstag für 360 Stunden. Die Tauglichkeit des Modells in bezug auf eine Vorhersage der Sturmintensität ist beschränkt.

http://www.smc-msc.ec.gc.ca/cmc/op_systems/recent_e.html

European Center for Medium-range Weather Forecasting (ECMWF) Model

Das ECMWF Modell ist das höchstentwickelte und rechenintensivste Globalmodell, das zur Zeit am NHC verwendet wird. Entwicklung und Unterhaltung geschehen durch eine internationale Organisation, die 28 europäische Mitgliedsstaaten umfasst. Aufgrund der Komplexität, der Auflösung, der Datenassimilation, sowie der Bedürfnisse der Mitgliedsstaaten ist der Modellauf einer der spätesten, die dem NHC zur Verfügung stehen.

Das ECMWF Model ist ein hydrostatisches Spektralmodell, in dem lineare Terme auf 799 Wellen beschränkt sind (die nichtlinearen Terme werden mit einer gröberen Auflösung berechnet) und 91 Flächen in der Vertikalen zur Verfügung stehen (TL799L91). Dies entspricht einem horizontalen Gitterpunktabstand von etwa 25 km. Das Modell verwendet zudem ein gemischtes vertikales Koordinatensystem, das innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht dem Geländeverlauf folgt

(Sigma-System) und in der Nähe der Tropopause rein isobarisch wird (p-System). Das ECMWF war das erste Zentrum, das eine vierdimensionale Dateninitialisierung (4-D VAR) benutzt und eine bessere Assimilation von Beobachtungen ausserhalb der synoptischen Haupttermine zulässt (besonders Satellitendaten). Zweimal täglich werden Vorhersagen über einen Zeitraum von 240 Stunden erstellt. Neben einer guten Eignung zur Zugbahnvorhersage im Mittelfristbereich zeigt seine hohe Auflösung Potential für eine brauchbare Intensitätsvorhersage.

<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide>

Navy Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS)

NOGAPS ist ein globales Sprektalmodell, das auf 239 Wellen beschränkt ist und somit neben 30 Flächen in der Vertikalen einen horizontalen Gitterpunktabstand von 55 km hat. Es verwendet ein gemischtes Sigma-p-Koordinatensystem. Diese Konfiguration hat sechs Sigma-Flächen unterhalb von 850 hPa sowie 24 Flächen oberhalb, die nahe an p-Flächen liegen. Das Zeitintervall der Integration beträgt fünf Minuten, kann aber, wenn nötig, verkürzt werden, um numerische Instabilitäten zu unterbinden (schnell ziehende Tiefs). Das Modell benutzt zudem ein 3-D VAR Analyseschema und erstellt zu jedem synoptischen Haupttermin eine Vorhersage für die folgenden 180 Stunden. Es macht zudem Gebrauch des Emanuel'schen Parametrisierungsschemas für Konvektion, das auch konvektive Durchmischung (ohne Niederschlag) nach der Methode von Tidtkke beinhaltet. Wie andere Globalmodelle auch, kann das NOGAPS keine taugliche Vorhersage zur Intensität, wohl aber zur Zugbahn, machen.

<http://www.meted.ucar.edu/nwp/pcu2/nogaps/index.html>

NWS Geophysical Fluid Dynamics Model (GFDL) Hurricane Model

Das GFDL Model ist ein Gitterpunktsmodell, das ausschliesslich zur Vorhersage von tropischen Wirbelstürmen entwickelt wurde und sich nur auf ein beschränktes Vorhersagegebiet bezieht. Es besteht aus einer dreifach genesteten Gitterkonfiguration. Das äusserste Gitter umspannt ein Gebiet von $75^{\circ} \times 75^{\circ}$ bei einer horizontalen Auflösung von 0.5° (ca. 30 km). Das mittlere Gitter umfasst eine $11 \times 11^{\circ}$ grosse Fläche mit einer Auflösung in der Horizontalen von $1/6^{\circ}$ (ungefähr 15 km). Die Werte für das innerste Gitter sind $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ und $1/12^{\circ}$ (etwa 7.5 km). Die im Vergleich zu anderen dynamischen Modellen hohe Auflösung erlaubt es, relativ kleinskalige Strukturen innerhalb eines Wirbelsturmes (*eye*, *eyewall*) aufzulösen. Jedoch ist es nicht in der Lage, die hoch komplexe Struktur eines Sturmes vollständig aufzulösen.

Das GFDL hat ein Sigma-Vertikalkoordinatensystem mit 42 Flächen. Konvektion wird durch ein vereinfachtes Arakawa-Schubert Schema parametrisiert. Das grossräumige Kondensationsschema beinhaltet Wolkenmikrophysik nach Ferrier, und der Impulsfluss zwischen Ozean und Atmosphäre trägt den starken Windverhältnissen Rechnung. Somit wird eine bessere Schätzung der Winde an der Meeresoberfläche erhalten. Das Modell ist ferner an eine hochauflösende Version des Princeton Ocean Model (POM) gekoppelt. Letzteres erlaubt Veränderungen innerhalb des Ozeans, die durch den Sturm ausgelöst werden (Abkühlung der Meeresoberflächentemperatur), und berücksichtigt auch daraus folgende Rückkopplungseffekte auf den Wirbelsturm. Für den Bereich des Atlantiks hat das POM eine horizontale Auflösung von $1/6^{\circ}$ sowie 23 Sigma-Flächen. Für die Initialisierung ersetzt das GFDL Modell den Wirbel(sturm) des GFS Modelles durch einen achsensymmetrischen Wirbel. Dieser wird in einem gesonderten Modellauf erzeugt und hat Eigenschaften, die von den Meteorologen am NHC vorgegeben werden.

Da die horizontale Auflösung des Modelles ausreichend hoch ist um einige Merkmale des Inneren eines Wirbelsturmes zu simulieren, ist es bis heute das einzig ausschliesslich dynamische

Modell, das brauchbare Vorhersagen sowohl für Zugbahn als auch Intensität liefert (<http://www.nhc.noaa.gov/verification/verify3.shtml>). Die Modellläufe erfolgen alle sechs Stunden und können Vorhersagen für bis zu vier Wirbelstürme produzieren. Der Vorhersagezeitraum beträgt dabei 126 Stunden.

Hurricane Weather Research and Forecasting Model (HWRF)

Dieses Modell wurde vom Environmental Modeling Center (EMC) der National Centers for Environmental Prediction (NCEP) entwickelt und ist seit 2007 im operationellen Betrieb. Das nicht-hydrostatische Modell löst die Gleichungen, die vertikale Luftbewegungen prognostizieren und macht es dadurch möglich, mesoskalige vertikale Luftbewegungen im Inneren eines Wirbelsturmes zu betrachten. Es hat ausserdem ein genestetes Gittersystem mit einem Gitterpunktsabstand von 27 km im äusseren sowie 9 km in inneren. In der Vertikalen besitzt das Modell 42 Sigma-Flächen.

Das GSI 3DVAR Datenassimilationsschema verwendet einen *first guess* Wirbel auf Grundlage der sechsstündigen Vorhersage des vorigen Modellaufes. Dadurch wird zu Beginn der Simulation ein Wirbelsturm verkörpert, der die von den NHC Meteorologen vorgegebene Struktur und Intensität besitzt. Das HWRF Modell ist zudem für den Bereich des Atlantiks an das POM gekoppelt, um die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean in der Umgebung des Sturmes besser repräsentieren zu können. Dies ist ein wichtiger Faktor bei der Intensitätsvorhersage.

Obwohl HWRF gegenwärtig eine ähnliche Konfiguration sowie physikalische Parametrisierungen wie das GFDL Modell besitzt, wird es sich schlussendlich zu einem fortschrittlicheren Vorhersagemodell entwickeln. Zukünftige Versionen werden verbesserte Datenassimilationstechniken (speziell für das Gebiet nahe des Sturmzentrums), eine höhere Auflösung, sowie bessere physikalische Beschreibungen enthalten. Insbesondere wird das HWRF Modell Beobachtungen von luft- und landgetragenen Doppler-Radarsystemen verwenden, die eine bessere Erfassung der anfänglichen Struktur des Sturmes ermöglichen. Dies sollte weitere Verbesserungen bei der Vorhersage von Zugbahn, Intensität und Niederschlag bringen. Das HWRF wird im Laufe der Zeit das GFDL Modell ablösen. Dennoch werden sie während der Hurrikansaison 2007 parallel betrieben.

United Kingdom Meteorological Office (UKMET) Model

Das UKMET Modell ist ein nicht-hydrostatisches Modell, das ein Arakawa-C-Gitter und somit einen Gitterabstand von 0.5 Längengraden in Ost-West- sowie 0.4 Breitengraden in Nord-Süd-Richtung besitzt. Diese Konfiguration entspricht in etwa einem Gitterpunktsabstand von 40 km in den gemässigten Breiten. Das Modell besitzt ein gemischtes Koordinatensystem in der Vertikalen mit 50 Flächen und wird zweimal täglich (00, 12 UTC) betrieben. Der Vorhersagezeitraum beträgt bis zu 144 Stunden. Das 4-D VAR Datenassimilationsschema verwendet Beobachtungen, die innerhalb der sechs Stunden in bezug auf den synoptischen Termin gemacht werden / wurden. Das bedeutet, dass für den 12 Z Lauf Beobachtungen zwischen 09Z und 15 Z miteinbezogen werden. Dementsprechend beginnt der eigentliche Modellauf gegen 0245 Z sowie 1445 Z für die 00Z bzw. 12 Z Vorhersagen. Zwischenläufe für 06 Z und 18 Z Vorhersagen starten gegen 13 Z und 01 Z. Diese produzieren jedoch nur Vorhersagen für die nächsten 48 Stunden.

2002 führte das U.K. Met Office eine neue Version des UKMET Modells ein. Die Neuerungen umfassten Änderungen der Dynamik im Bereich des Sturminnenen, der physikalischen Grundgleichungen sowie der physikalischen Parametrisierungen. Die physikalische Beschreibung der verschiedenen Prozesse wurde 2005 erneut geändert.

Dieses Modell erzeugt normalerweise brauchbare Vorhersagen für die Zugbahn. Jedoch sind Intensitätsvorhersagen nur beschränkt brauchbar.

http://www.metoffice.gov.uk/research/nwp/publications/nwp_gazette/jun06/um_congig.html

7) Ensemble Modelle

Ensemblevorhersagen werden abgeleitet von einer Kombination von Vorhersagen verschiedener Modelle (Konsensvorhersage), oder von einer Vielzahl von Vorhersagen eines einzelnen Modelles.

Konsensmodelle sind keine wirklichen Vorhersagemodelle an sich, sondern repräsentieren eine Kombination bzw. das Mittel verschiedener Vorhersagen mehrerer Modelle. Die einfachste Art, eine Konsensvorhersage zu erstellen ist, die Mittelung der Ausgabewerte jedes einzelnen Modells, d.h. es wird zum Beispiel die gemittelte Längen- und Breitengradposition des Sturmes zu einer bestimmten Zeit bestimmt. Die gebräuchlichsten Konsensvorhersagen am NHC sind GUNA, GONU, und FSSE. Diese werden später genauer erläutert. Im Durchschnitt sind Konsensvorhersagen genauer als diejenigen eines einzelnen Modells, das zur Ensemblevorhersage beiträgt. Die Variation der einzelnen Modellvorhersagen ergibt ein Mass für ihre Unsicherheit.

Ensembles einzelner Modelle sind mehrfache Vorhersagen, die zwar zum gleichen Zeitpunkt starten, dabei aber unterschiedliche Anfangsbedingungen verwenden. Auf diese Weise wird die Ungewissheit des Anfangszustandes der Atmosphäre berücksichtigt. Eine einfache Mittelung aller Ensemblevorhersagen (Ensemblemittel) ergibt oftmals eine brauchbarere Vorhersage als jeder Ensemblelauf an sich. Dies liegt daran, dass sich Fehler jeder einzelnen Vorhersage i.a. gegenseitig aufheben. Jedoch kann es auch vorkommen, dass durch die Mittelung kleinerskalige Details der einzelnen Modelle geglättet werden. Deshalb werden in manchen Fällen Modellläufe für die Erstellung einer Ensemblevorhersage mit einer etwas gröberen Auflösung im Vergleich zu Einzelvorhersagen durchgeführt.

GUNS

GUNS ist ein einfacher Zugbahnkonsens, der durch die Mittelung der Zugbahnen der folgenden Modelle erhalten wird: GFDI (interpoliertes GFDL), UKMI (interpoliertes UKMET), und NGPI (interpoliertes NOGAPS).

GUNA

Wie GUNS, nur mit dem GFSI (interpoliertes GFS) Modell zusätzlich.

CGUN

Ist eine Version von GUNA, die Verzerrungen durch das Modell korrigiert. Die Verzerrungen werden auf Grundlage bekannter Parameter, die zu Beginn der Modellläufe bekannt sind, ermittelt. Dazu gehören u.a. Ort und Intensität des Sturmes.

CONU

CONU ist ein einfacher Zugbahnkonsens, der durch GFDI, UKMI, NGPI, GFSI und das GFNI (interpoliertes GFDN) Modell zustande kommt.

CCON

Ist eine Version von CONU, die Verzerrungen durch das Modell korrigiert. Die Verzerrungen werden auf Grundlage bekannter Parameter, die zu Beginn der Modellläufe bekannt sind, ermittelt. Dazu gehören u.a. Ort und Intensität des Sturmes.

ICON

Ist ein einfacher Konsens der Intensitätsvorhersagen von Decay-SHIPS und GHMI (angepasste GFDL Vorhersage).

Florida State University Super Ensemble (FSSE)

Hierbei handelt es sich um einen Konsens, bei dem sowohl dynamische Modelle als auch die letzte offizielle NHC Vorhersage mit unterschiedlicher Gewichtung einbezogen werden. Anstelle einer einfachen Mittelung wird eine Gewichtung vorgenommen, um die Verzerrungen der einzelnen Modelle zu berücksichtigen. Die Verzerrungen werden auf Grundlage der vergangenen Güte des Modells berechnet, und das Gewicht jedes Modells wird durch eine Mehrfachregression während einer Trainingsphase bestimmt. Die Trainingsphase beinhaltet in etwa 75 frühere Vorhersagen jedes einzelnen Modells. Dies unterscheidet das FSSE von den anderen am NHC benutzten Modellen, da es eine Art 'künstliche Intelligenz' repräsentiert, die fortlaufend von vergangenen Rechnungen der Modelle lernt. Eine Beschränkung der Superensemblemethode besteht darin, dass die vergangene Leistung der Modelle nicht der gegenwärtigen entspricht, was zum Beispiel durch Veränderungen am Modell geschehen kann. Die FSSE Methode ist am genauesten, wenn an den Modellen keine grösseren Änderungen zwischen Trainingsphase und operationellem Betrieb stattfinden.

National Weather Service Global Ensemble Forecast System (GEFS)

Das GEFS ist ein Ensemblevorhersagesystem, welches auf dem GFS Modell beruht. Es besteht aus einem grob aufgelösten Kontrolllauf des GFS (T126L28, entspricht in etwa einem horizontalen Gitterabstand von 100 km, 28 Flächen in der Vertikalen), sowie weiteren 20 Läufen des Modelles mit gleicher Auflösung. Unsicherheiten in den Anfangsbedingungen wird durch den Gebrauch sogenannter *Ensemble Transform Bred* Vektoren Rechnung getragen. Diese erzeugen verschiedene Störungen (Variationen) in den Anfangsbedingungen der 20 Läufe. Eine örtliche Versetzung des Wirbels wird für jeden Anfangszustand der Ensembleläufe vorgenommen. Das bedeutet, dass die exakten Positionen der Stürme zu Beginn als bekannt angesehen werden und deshalb in den Anfangszuständen der Modelle identisch sind.

Das GEFS produziert viermal täglich Vorhersagen bis zu 16 Tage. Die gemittelten Vorhersagen der 20 Läufe werden in der Regel zur Erstellung der Vorhersage verwendet. Jedoch können die einzelnen Ensembleläufe ebenfalls nützliche Informationen enthalten. So kann zum Beispiel die Variation der vorhergesagten Zugbahnen Aufschluss über die Vorhersagegenauigkeiten liefern. Es sollte erwähnt werden, dass im Mittel die GEFS Vorhersagen für die Zugbahn schlechter sind als die einer Konsensvorhersage, die mehrere Modelle umfasst (z.B. GUNA).

Auch im Bereich der Wirbelsturmentstehung kann das GEFS eingesetzt werden. Sagen beispielsweise viele (oder alle) Modellläufe eine Sturmentstehung voraus, würde der Meteorologe eine potentielle Entwicklung stärker in Betracht ziehen.

8) Trajektorienmodelle

Diese Art von Modellen ist um einiges einfacher als statistische oder dynamische, da sie den Sturm nur entlang einer Zugbahn bewegen, die aus den atmosphärischen Strömungsverhältnissen abgeleitet wird. Letztere werden von einem dynamischen Modell zur Verfügung gestellt.

Trajektorienmodelle erlauben keine Wechselwirkungen zwischen dem Sturm und der Atmosphäre. Eine weitere Beschränkung besteht darin, dass die Strömungsverhältnisse nur für eine

Schicht mit einer festgelegten Höhe innerhalb der Atmosphäre berechnet werden. Um die Veränderungen der Strömung mit der Höhe zu berücksichtigen, werden die Modelle mit unterschiedlichen Schichtdicken betrieben.

Beta and Advection Model (BAM)

Dieses Modell umfasst einfache Trajektorienmodelle, die aus vertikal gemittelten Horizontalwindfeldern des GFS Modells die Trajektorien bestimmen. Diese Trajektorien schliessen einen Korrekturterm ein, der dem Betaeffekt aufgrund der Erdrotation Rechnung trägt. Das Konzept des BAM beruht auf der vertikalen Ausbreitung des Sturmes bzw. der steuernden Windströmung. Ausgewachsene Stürme erstrecken sich im Normalfall über die ganze Höhe der Troposphäre und werden deshalb durch Winde gesteuert, die über eine dicke Schicht der Troposphäre gemittelt werden. Die Steuerung schwächerer Wirbelstürme wird dagegen durch Winde hervorgerufen, die über eine dünnere Schicht gemittelt werden. Dementsprechend gibt es drei Versionen von BAM, die unterschiedliche Schichtdicken besitzen: BAM shallow (BAMS, 850-700 hPa), BAM medium (BAMM, 850-400 hPa), and BAM deep (BAMD, 850-200 hPa).

Die Leistung des BAM hängt stark von den Eingabedaten des GFS ab. Eine Divergenz der drei Versionen deutet variierende Steuerungswinde innerhalb des GFS an. Deshalb dient diese Differenz auch als grobe Annäherung für die vertikale Windscherung sowie die Komplexität und Unsicherheit der Zugbahnvorhersage.