

H. LANGMACK, F. SELMANN, K. FRAEDRICH

# Analog-Vorhersagen von Hurrikan-Zugbahnen

## Analog forecasts of hurricane tracks

### Zusammenfassung

Vorgestellt wird ein ensemblegewichtetes und Metrik-adaptierendes Modell für Analog-Vorhersagen von Zugbahnen tropischer Zyklonen (TC), das auf das Hurrikan-Bassin im Nordatlantik angewendet und am Beispiel von Hurrikan Ivan (2004) demonstriert wird. Prognosefehler werden mit offiziellen Wettervorhersagen verglichen. Durch Konsensus-Vorhersagen und Einbeziehung vergangener Vorhersagefehler können weitere Verbesserungen erzielt werden.

### Abstract

An ensemble-weighted and metric-adapting analog prediction method is introduced as a non-linear statistical forecast system. The method is applied to track predictions of tropical cyclones (TC). Forecasts are evaluated in the North Atlantic hurricane basin and for Ivan (2004). Forecasts by consensus and corrections by past errors yield improvements.

## 1 Einleitung

Tropische Zyklonen (TCs) sind Teil der atmosphärischen Zirkulation, entwickeln sich in verschiedenen Bassins der Nord- und Südhemisphäre und ihre zerstörerische Wirkung wird, insbesondere bei Landfall, offenbar; Hurrikane wie Katrina und Rita (2005) und Ivan (2004) sind dafür bekannte Beispiele. Deshalb sind Vorhersagen ihrer Zugbahnen (und Intensität) von besonderer Bedeutung. Gute Prognosen von Hurrikan-Zugbahnen hängen von vielen externen Faktoren ab, wie beispielsweise von der Zirkulation in der mittleren und oberen Atmosphäre und von der Meeres-Oberflächentemperatur. Zur Vorhersage von TCs stehen den meteorologischen Diensten numerische Wetter-Prognosen (NWP) zur Verfügung, die sich, insbesondere seit Einführung guter Datenassimilation, erheblich verbessert haben. Allerdings kommen neben deterministischen Vorhersagen auch Prognosen statistischer Modelle zum Einsatz; statistisch-dynamische Hybride (optimierte Konsensus-Vorhersagen) werden in jüngster Zeit genutzt.

Zu den statistischen Modellen gehören lineare Methoden wie Markov-Prozesse und nicht-lineare Verfahren. Ausführlich ist bereits die praktische Anwendung linearer statistischer Wettervorhersagen für Stationen in Europa und Australien (Niederschlagswahrscheinlichkeit und Temperatur, <http://www.mi.uni-hamburg.de/vorhersagen>) in *promet* (RAIBLE et al. 2001) dargestellt worden; für Hurrikan-Intensitäten wurden Markov-Modelle erfolgreich getestet (LESLIE et al. 1992). Nicht-lineare statistische Analog-Prognosen der Hurrikan-Zugbahnen werden hier präsentiert.

Empirischen Vorhersagen kommen, nachdem sie an Zeitreihen vergangener TC-Zugbahnen in einem Bas-

sin oder an historische Wetterabläufe angepasst worden sind, unmittelbar nach der Beobachtung zum Einsatz, benötigen nur minimale Rechenzeit, und eignen sich als unabhängige Prognosen zur Konsensus-Vorhersage. Da sie mit vergangenen Zeitreihen geeicht worden sind, gehen deren Verläufe in die Prognosen ein. In diesem Sinn nutzen statistische Modelle das Kurzzeitgedächtnis der Atmosphäre und Information der Bassin- oder Stations-Klimatologie.

Adaptive Analog-Ensemble-Prognosen werden an der Universität Hamburg seit den 90er Jahren entwickelt (FRAEDRICH und LESLIE 1989, FRAEDRICH und RÜCKERT 1998, FRAEDRICH et al. 2003), aktuell eingesetzt und abschließend im Internet dargestellt (<http://www.mi.uni-hamburg.de/hurrikan>) sowie im australischen Wetterdienst operationell genutzt. Weitere Verbesserungen sind erreicht worden:

- (i) Erste Hybrid- oder Konsensus-Prognosen für Hurrikan-Zugbahnen (LESLIE und FRAEDRICH 1990) demonstrierten erheblichen Gewinn für die Praxis und wurden später vom Joint Typhoon Warning Center (siehe GOERSS 2000, loc. cit, BES-SAFI et al. 2002) verwendet.
- (ii) Fehler-Wiederverwertung (*error-recycling*) nutzt Informationen, die in den Prognosefehlern der letzten Vorhersage enthalten sind; zur Verbesserung von statistischen Prognosen der Hurrikan-Zugbahnen trägt dieses ebenfalls bei (FRAEDRICH et al. 2000).

Im Folgenden werden die statistischen Analog-Prognosen von Zugbahnen tropischer Zyklonen vorgestellt (Abschnitt 2), auf das atlantische TC-Bassin angewendet (Abschnitt 3) und am Beispiel des Hurrikans Ivan demonstriert (Abschnitt 4).

## 2 Zugbahnen tropischer Zyklonen: Analog-Prognosen

Das Bassin tropischer Zyklonen im Atlantik hat seinen Schwerpunkt in der Karibik und im westlichen Nordatlantik. Die Zugbahnen der Zyklonen folgen etwa dem Verlauf des Golfstroms, während im Bereich des kühleren Kanarenstromes im östlichen Nordatlantik keine tropischen Stürme auftreten (Abb. 1).

**Analog-Vorhersagen:** Analog-Prognosen gehen davon aus, dass aktuelle Zustände (Ort im Zustandsraum) sich genauso oder ähnlich entwickeln wie entsprechende Zustände in der Vergangenheit mit gleichen oder ähnlichen Anfangsbedingungen. Anfangsbedingung ist der aktuelle Zustand oder das Muster (bei einer oder mehrerer Messgrößen). Wenn es bis zu mehreren Zeitpunkten zurückreichen kann, erhält die Anfangsbedingung eine Art Gedächtnis, dessen Tiefe dem Zurückreichen in die Vergangenheit (Einbettungs-Dimension) entspricht, das auch für nichtlineare Systeme charakteristisch ist. Für Prognosen werden die zu dieser Anfangsbedingung ähnlichsten Muster im vergangenen Datensatz gesucht und gefunden. Aus der zeitlichen Weiterentwicklung dieser ähnlichsten Muster (nächste Nachbarn oder Analoga) werden Vorhersagen (Ensemblevorhersagen) abgeleitet, die für eine resultierende, optimale Vorhersage auf verschiedene Arten gemittelt werden. Der Raum, in dem sich die erweiterten Größen dieses dynamischen Systems bewegen, wird als Phasenraum bezeichnet und ist eine Obermenge des Zustandsraumes. Die Suche nach dem ähnlichsten Muster geschieht über die Bildung eines gewichteten Abstandes (Metrik) der aktuellen Anfangsbedingung zum gefundenen ähnlichen Muster.

Takens' Theorem (Einbettungssatz, TAKENS et al. 1981): Danach ist die Vorhersage eines dynamischen

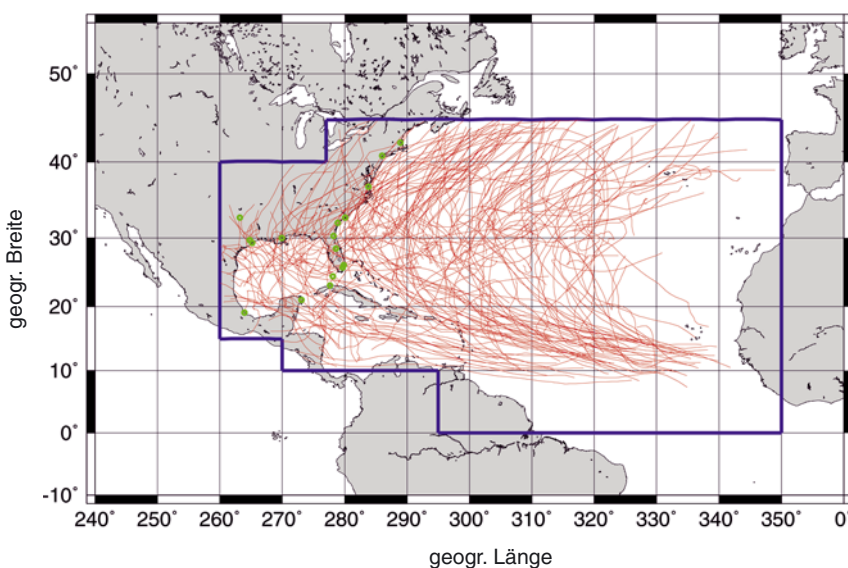


Abb. 1: Zugbahnen tropischer Zyklonen im Nordatlantik (1989 bis 2004). Innerhalb des blau umrandeten Bereiches werden Positionsvorhersagen zur Verifikation erstellt; einige Städte sind grün markiert.

Systems theoretisch möglich bei ausreichend vorliegenden und fehlerfreien Zuständen (Messwerten) der Vergangenheit. Die ausreichende Größe wird ab einer bestimmten Einbettungsdimension  $n_d$  erreicht. Für  $n_d$  gilt der Satz von Maße:  $n_d \geq 2 \cdot d + 1$ , wobei  $d$  die Dimension des Attraktors ist, die auch fraktal sein kann und bei meistens vorhandener Unkenntnis des Gesamtsystems geschätzt werden muss. Ziel ist die Rekonstruktion der Phasenraumdynamik aus Zeitreihen in einer Zeitverschiebungsdarstellung (delay-coordinates), der aus  $n_d$  Werten der Vergangenheit besteht. Das Zugbahnverhalten tropischer Zyklonen im australischen TC-Bassin ergab eine Dimensions-Schätzung von  $d=6$  (FRAEDRICH und LESLIE 1989). Ensemblegewichtete Analog-Prognosen unterscheiden sich in zwei Gewichtungen. (i) Raum-Gewichte („metric-adaption“): Gewichtung der Einzelelemente beim Mustervergleich während der Analogsuche im Einbettungsraum (Gewichtungsvektor  $\vec{\lambda}$ ) und (ii) Ensemble-Gewichte („bi-weights“): Gewichtung der Ensemblemittelung bei Berechnung des Prognosewertes in der Schätzfunktion (bi-weight Funktion mit optimaler Ensemblezahl). Ist das „bi-weight“ gleich eins, bedeutet das ein arithmetisches Mittel aus den Ensemblevorhersagen. Nach Bestimmung der optimalen Parameter für ein Hurrikan-Bassin in einem sogenannten Modellbildungszeitraum können Vorhersagen aus vorhandener Zeitreihen-Historie in einem davon unabhängigen Verifikationszeitraum erstellt werden. Diese werden auch als *Hindcasts* bezeichnet.

**Raum-Gewichte:** Der Stärke des Einflusses der Vergangenheit auf den aktuellen Zustand charakterisiert ein dynamisches System mit Gedächtnis. So kennzeichnet die Gewichtung bestimmter Vergangenheitszustände Eigenfrequenzen und/oder bevorzugte Moden. Exponentiell fallende Gewichte der Zustände im Phasenraum sind typisch für das Kurzzeit-Gedächtnis ohne Moden. Diese Raum-Gewichte werden selbstadaptierend optimiert, wobei sich auch System-Moden herausbilden können. Im Vergleich zu anderen Anwendungen (Windvektor an Stationen) zeigen Zugbahn-Vorhersagen (Ortsvektor) keine ausgeprägten System-Moden, denn sie sind im optimierten Zustand exponentiell fallend (Abb. 2). Die Differenzen (vom aktuellen Zeitpunkt bis 24 h zurück) der geografischen Länge, Breite sowie der Kosinus der Breite spannen den Phasenraum für die Zugbahn-Prognosen im Nordatlantik auf.

**Ensemble-Gewichte:** Analog-Prognosen werden mit gewichteten Ensemble-Mitteln durchgeführt, wobei für die vorangehende Analog-Suche Raum-Gewichte gefunden werden

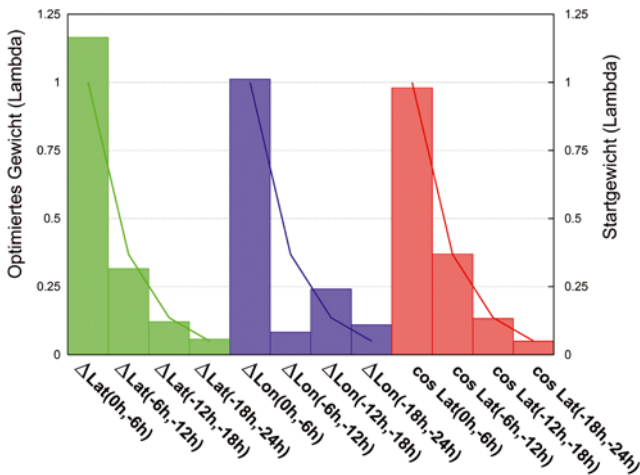


Abb. 2: Gewichtung der Phasenraumzustände: Differenz der geografischen Breite (grün), Differenz der geografischen Länge (blau) und Differenz des Faktors  $10 \cdot \cos(\text{geografische Breite})$  (rot).

müssen (Metrik-Adaption). Dieses Verfahren ist von FRAEDRICH und RÜCKERT (1998) eingeführt, von SIEVERS et al. (2000) angewendet und von McNAMES (2002) modifiziert worden. Bei der gewichteten Mittelung der einzelnen Ensemblevorhersagen werden Vorhersagen nicht in die Analogsuche einbezogen, sondern durch einen Schätzfunktionsvektor ab dem Zeitpunkt  $t+1$  bestimmt. Die nächsten Nachbarn (Ensemblemitglieder) werden mit einer optimierten ‚bi-weight‘ Funktion gemittelt, die die Nähe eines gefundenen Analogons zum aktuellen Muster bewertet (Abb. 3).

Die Vorhersage geschieht mit einer Schätzfunktion  $\hat{g}$ , die aus dem Messvektor  $\bar{x}_t$  im Phasenraum zum Zeitpunkt  $t$  berechnet wird. Der Messvektor  $\bar{x}_t$  setzt sich aus den einzelnen Zustandsvektoren aller  $n_{TS}$  meteorologischen Größen zu den Zeitpunkten  $t, t+1, t+2, \dots, t+n_d$  zusammen. Ebenso gehen die Zustandsvektoren  $\bar{y}_{t(i)+1}$  der  $i$ -ten Analoga zu früheren Zeitpunkten  $t(i)+1$  aus der Zeitreihe ein, gewichtet mit dem Quadrat des optimierten ‚bi-weight‘  $w_i$ . Dieses ‚bi-weight‘ enthält

neben der Ensemble-Gewichtung die mit den Raumgewichten faktorisierte euklidische Distanz zwischen dem aktuellen Zustandsvektor  $\bar{y}_{t+k-1}$  und dem Zustandsvektor des  $i$ -ten Analogons  $\bar{y}_{t(i)+k}$ , aufsummiert über die Einbettungsdimension  $k=1..n_d$ .

**Fehler-Korrektur:** Mit einer Fehlerkorrektur können ensemblegewichtete Vorhersagen weiter verbessert werden, insbesondere, wenn der Vorhersagefehler nicht zufällige Information, also einen systematischen Anteil, enthält. Dann erfolgt in einem zweiten Vorhersagelauf die Vorhersage des Vorhersagefehlers, womit die Prognosen des ersten Laufes korrigiert werden. Zur Modellbildung wird deshalb der Verifikationszeitraum des ersten Laufes in einen neuen Modellbildungs- und Verifikationszeitraum für den zweiten Fehlervorhersagelauf aufgeteilt. Dazu müssen allerdings die Zeitreihen ausreichend lang und repräsentativ sein.

### 3 Prognose und Verifikation im Nord-Atlantik-Bassin

Als Datenbasis werden die sogenannten ‚Best Track‘ Positionsdaten des NATIONAL HURRICANE CENTER (NHC) von 1866 bis 2004 verwendet (Universität Hawaii, <http://www.nhc.noaa.gov/>). Um eine Datenbasis von hoher und gleich bleibender Genauigkeit und gleichem Umfang zu bekommen, wurden für diese Untersuchung nur die Daten des Zeitraumes von 1970 bis 2004 verwendet. Zur Modellbildung werden Zyklonen-Zugbahnen (1970 bis 1988) benutzt, die für unabhängige Vorhersagen nicht mehr zur Verfügung stehen (1994 bis 2003). Zur Verifikation der Zugbahn-Vorhersagen wird deren Genauigkeit bestimmt als Großkreisfehler zwischen vorhergesagter und tatsächlicher (‚best track‘) Position. Die Prognose-Güte charakterisiert diesen Fehler im Vergleich zu einem Referenzmodell (hier: NWP offizieller Vorhersagedienste) und die Zuverlässigkeit kennzeichnet die Abhängigkeit der zu erwarteten Positionsfehler (*ensemble spread*) von deren wirklicher Streuung.

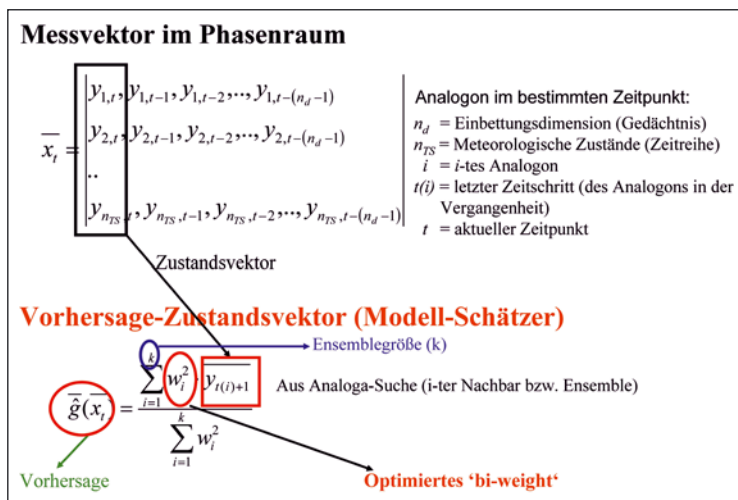


Abb. 3: Datenvektor und Vorhersagen-Zustandsvektor.

**Genauigkeit und Güte:** Der mittlere Vorhersagefehler (1994 bis 2003) des ensemble-gewichteten Analog-Verfahrens für alle tropischen Zyklonen im Nordatlantik im Vergleich zu den offiziellen NHC Prognosen (NWP) ist in Abb. 4 dargestellt.

**Ensemble-Varianz und Fehler-Prognose:** Ensemblevorhersagen haben zum Ziel, den Fehler aus der Varianz der Ensembleverteilung zu prognostizieren (siehe BRANKOVIC et al. 1990, FRAEDRICH und ZIEHMANN 1994). Dazu wird die Ensemblevarianz dem mittleren quadratischen Ensemblefehler gegenübergestellt (Abb. 5). Der mittlere Großkreisfehler der Vorhersage aus dem ensemblegewichteten Analog-Verfahren nimmt mit der Streuung der

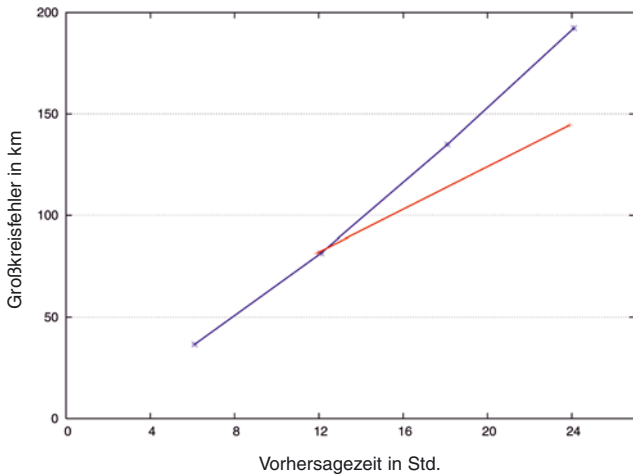


Abb. 4: Mittlere Vorhersagefehler der ensemblegewichteten Analog-Vorhersagen (blau) und offizieller NHC-Vorhersagen (rot) in Abhängigkeit von der Vorhersagezeit.

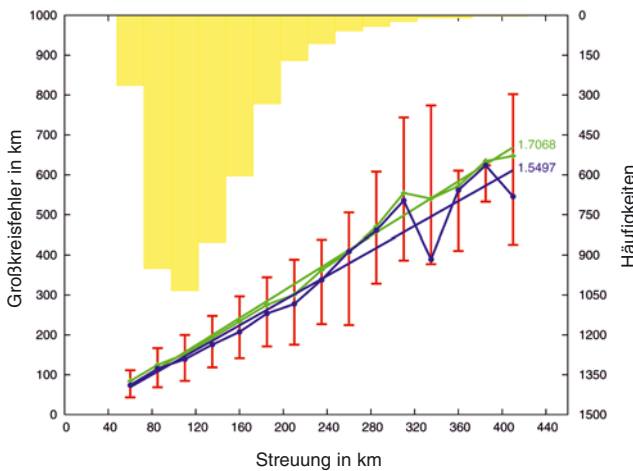


Abb. 5: 24 h-Vorhersagen von Zugbahnen tropischer Zyklonen im Nord-Atlantik (1989 bis 2004): Großkreisfehler mit Regressionen der ensemblegewichteten Analog-Prognose (Mittelwerte und deren Regressionen in grün, Mediane und deren Regressionen in blau, 25%- und 75%-Quantile in rot, linke Achse) in Abhängigkeit von der Streuung des Ensembles (optimierte Ensembleanzahl von 72) und deren Häufigkeiten (gelb, rechte Achse).

Ensembleverteilung zu, wobei die Regression den linearen Zusammenhang quantifiziert, der die Abhängigkeit des Vorhersagefehlers von der Ensemble-Streuung beschreibt (*error-spread relation*).

Geringe Abweichungen von der Regression bedeuten, dass die ‚perfektes Modell-Ensemble‘-Hypothese annähernd erfüllt ist (BRANKOVIC et al. 1990), so dass eine zuverlässige Abschätzung des Positionsfehlers durch die Ensemblestreuung gegeben werden kann. Das heißt, liegen Ensemblevorhersagen überwiegend eng beieinander, so ist deren Streuung (*spread*) gering und der erwartete Vorhersagefehler ebenfalls. Es zeigt sich, dass bei ensemblegewichteten Analog-Verfahren die Positionsfehler der einzelnen Ensemblevorhersagen stets enger beieinander liegen als bei ungewichte-

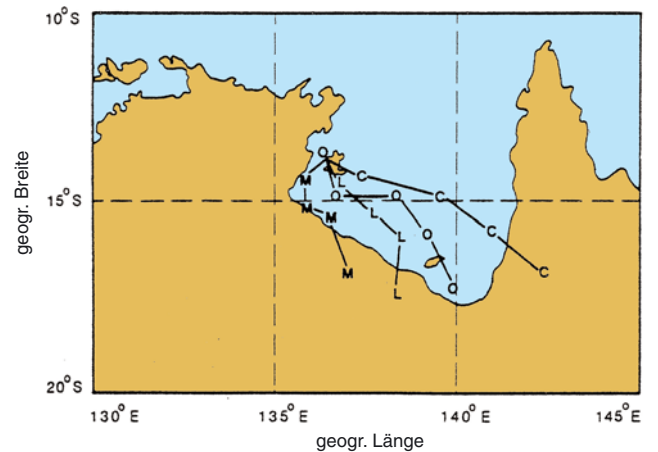


Abb. 6: Vorhersagen mit numerischer Wetterprognose NWP (M), CLIPER (C) und resultierende Zugbahn aus kombinierter oder Konsensus-Vorhersage (L) im Golf von Carpentaria (Nordaustralien) nach LESLIE und FRAEDRICH (1990). Die beobachtete Zugbahn des Zyklons Jason (1987) vom 10. bis 12. Februar ist mit (O) gekennzeichnet.

ten Analog-Verfahren: 12 h-Prognosen mit ensemblegewichteten Analoga zeigen gegenüber den offiziellen Vorhersagen (NWP) ähnliche Fehler (82 km), 24 h-Vorhersagen jedoch verschlechtern sich im Vergleich zu den NWP-Modellen (145 km gegenüber 192 km). Letzteres trifft dann nicht zu, wenn bestimmte tropische Zyklonen eine hohe Klima-Signifikanz aufweisen. Dies bedeutet, dass in der Vergangenheit bereits tropische Zyklonen eine ähnliche Zugbahn genommen haben: Je größer diese Ähnlichkeit, umso höher die Klima-Signifikanz (BARRETT et al. 2006).

**Kombinationsvorhersagen (*consensus forecasts*):** Bei Konsensus-Vorhersagen werden die prognostizierten Zugbahnpositionen eines numerischen mit denen eines statistischen Modells fehlerminimierend kombiniert. In bestimmten Situationen wird dabei das numerische Modell korrigiert, beispielsweise bei fehlerhafter Initialisierung, bedingt durch unvollständige Analyse der Ist-Wetterlage. Prinzipiell sind in derartigen Fällen Analog-Verfahren im Vorteil, da sie die Historie vergangener, ähnlicher Hurrikan-Zugbahnen in ihrer Vorhersage in Form der Klima-Signifikanz berücksichtigen. Mit Hilfe der Kombinationsvorhersage werden NWP-Zugbahnpositionen korrigiert. Optimal kombinierte Positionsvorhersagen auf der Basis verschiedener numerischer und statistischer Modelle (CLIPER) sind erfolgreich von LESLIE und FRAEDRICH (1990) im australischen Hurrikan Bassin angewendet worden (Abb. 6).

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen HAMILL et al. (2006) für Niederschlagsvorhersagen an der US-Pazifikküste und dem Hinterland, indem sie Fehlerprognosen numerischer Wettermodelle aus Reanalysen erstellen, um mit den daraus gewonnenen Parametern die systematischen Fehler zukünftiger Prognosen zu korrigieren.



#### 4 Hurrikan Ivan (2004)

Vorhersagen des Hurrikans Ivan in 2004 werden hier analysiert, weil dieser Hurrikan wiederholt (und inkorrekt) von 12 operationellen NWP-Modellen mit einer signifikanten polwärtigen Komponente prognostiziert worden ist, während empirische auf dem Zugbahn-Klima beruhende Prognosen korrekt und konsistent Ivens Zugbahn prognostizieren (BARRETT et al. 2006). Gezeigt werden 72 Ensemble-Mitglieder, aus denen sich die gewichtete Ensemble-Mittel Prognose ergibt (Abb. 7). An dem hier dargestellten Vorhersagezeitpunkt liegen die Einzelvorhersagen eng beieinander, während sich an anderen Orten auf Ivens Zugbahn eine größere Streuung der einzelnen Ensemblemitglieder ergibt.

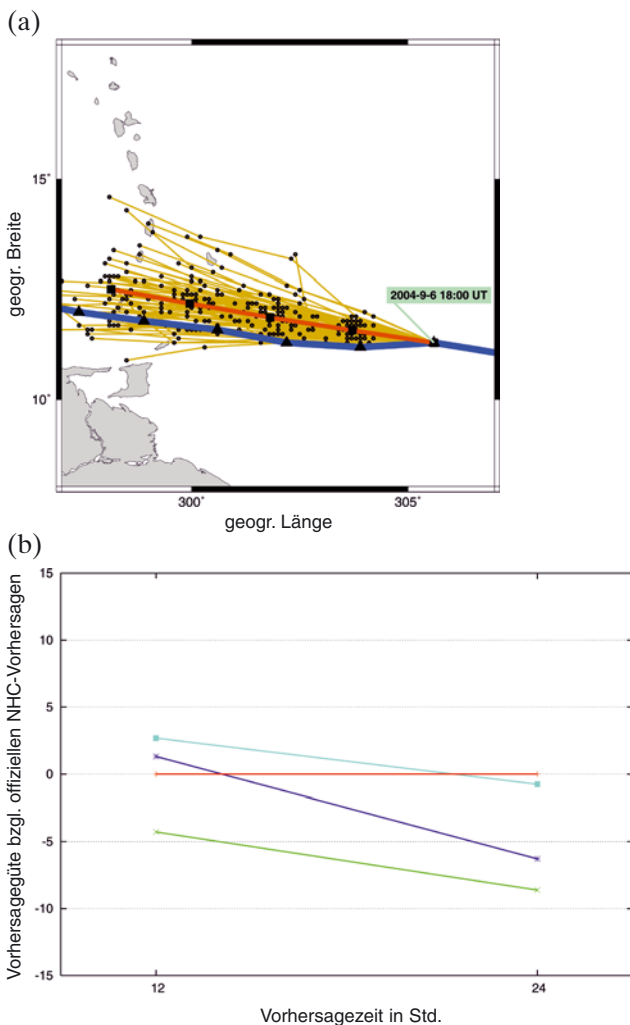


Abb. 7: 24 h-Vorhersage der Zugbahn von Hurrikan Ivan (2004) mit ensemblegewichteter Analog-Verfahren (optimierte Ensembleanzahl von 72 und mit Fehlerkorrektur): a) An der kritischen Position vor den Kleinen Antillen (6.9.2004, 18 UTC, rot) samt Darstellung der Ensemble-Mitglieder (gelb) gegenüber dem ‚best track‘ (blau), b) Mittlere Vorhersagegüte (9. bis 14. September) des ensemblegewichteten Analog-Verfahrens mit (hellblau) und ohne (dunkelblau) Fehlerkorrektur, der Prognosen vom National Hurricane Center (rot) und der Prognosen mit einem Regressionsmodell (grün), (CLIPER, NEUMANN 1972).

Die 12 h-Positionsvorhersagen mit ensemblegewichteter Analogverfahren haben gegenüber den offiziellen Vorhersagen (NWP) einen Vorteil (NWP: 44 km, Analog: 43 km); für die 24 h-Positionsvorhersagen nimmt der Fehler zu (NWP: 87 km, Analog: 91 km). Im Vergleich dazu weist das Regressionsmodell CLIPER (NEUMANN 1972) für Ivan generell größere Fehler auf als die anderen Modelle. Kommt eine Fehlerkorrektur zur Anwendung, ergeben sich die geringsten mittleren Vorhersagefehler für unser ensemble-gewichtetes Analog-Verfahren (Koeffizientenbestimmung zur Fehlervorhersage: April 2001 bis Dezember 2003).

Im Mittel wird die tatsächliche Zugbahn recht gut prognostiziert. Der mittlere Vorhersagefehler für IVAN über den Lebenszyklus beträgt 115 km bei 24 h. Dies geschieht hauptsächlich durch Mittelung der divergierenden nächsten, zweit- und drittnächsten Ensemblesachbarn.

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Atlantischen Hurrikan-Bassin haben sich seit 1970 die Vorhersagen tropischer Zyklonen zunehmend verbessert. Diese Verbesserungen wurden auf die Fortschritte der numerischen Wetter-Prognose (NWP)-Modelle zurückgeführt. Statistische Vorhersage-Verfahren haben bis Ende 80er/Anfang 90er Jahre gute Zugbahn-Prognosen geliefert. Jedoch zeigt sich, dass der wachsende Einfluss globaler NWP-Modelle nicht immer die besten Prognosen garantiert (BARRETT et al. 2006). Deshalb sind hier Arbeiten über nicht-lineare empirische Modelle zur Zugbahn-Prognose von tropischen Zyklonen dargestellt worden (auch in Ergänzung zu *promet* 32, 2006 „Klima und Wetter der Tropen“). Sie prognostizieren gewichtete Ensemble-Mittel, die als nächste Nachbarn des aktuellen Zugbahn-Verlaufs aus dem metrisch adaptierten Einbettungs-Raum gewonnen wurden, in dem die Historie aller unabhängigen Zugbahn-Abschnitte des Bassins vorliegt. Neben der Vorhersage-Güte (im Vergleich zu anderen Verfahren) ist auch das Fehler/Ensemble-Streuungsverhalten (*error-spread*) von Bedeutung.

Obwohl mit wachsenden NWP-Erfolgen die empirischen Verfahren an Bedeutung und an Einfluss auf offizielle Vorhersagen verlieren, können diese über Hybride (Super-Ensembles) wieder an Bedeutung gewinnen. Außerdem sind empirische Analog-Prognosen eher unaufwändige Referenzvorhersagen (um NWP-Güte zu bewerten). Wegen der großen Streuung (*spread*) besitzen ihre Ensemble-Prognosen Vorteile zur Abschätzung von Prognose-Fehlern und zukünftigen Zustandswahrscheinlichkeiten.

Die von RAIBLE et al. (2001) und hier vorgestellten linearen und nicht-linearen empirischen Prognose-Modelle (und deren Verifikation) sind am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg (gemeinsam mit

Studierenden) entwickelt worden, befinden sich dort im online-Betrieb und werden – außerhalb Europas – in Lehre und von regionalen Wetterdiensten eingesetzt. Weitere Anwendungen dieser Methoden sind ‚Predictability-Tests‘ von Zirkulationsmodellen (BLENDER et al. 2003) auf der Zeitskala synoptischer und auch langfristiger Prozesse.

## Literatur

- BARRETT, B. S., L. M. LESLIE, B. H. FIEDLER, 2006: An example of the value of strong climatological signals in tropical cyclone track forecasting: Hurricane Ivan (2004). *Mon. Wea. Rev.* **134**, 1568-1577.
- BESSAFI, M., A. LASSERRE-BIGORRY, C. J. NEUMANN, F. PIGNOLET-TARDAN, D. PAYET, M. LEE-CHING-KEN, 2002: Statistical prediction of tropical cyclone motion: An analog-CLIPER approach. *Weather and Forecasting* **17**, 821-831.
- BLENDER, R., U. LUKSCH, K. FRAEDRICH, C. RAIBLE, 2003: Predictability study of the observed and simulated European climate using linear regression. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **129**, 2299-2313.
- BRANKOVIC, C., T. N. PALMER, F. MOLTENI, S. TIBALDI, U. CUBASCH, 1990: Extended range prediction with ECMWF models: Time lagged ensemble forecasting. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **116**, 867-912.
- FRAEDRICH, K., L. M. LESLIE, 1989: Estimates of cyclone track predictability. I: Tropical cyclones in the Australian region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **115**, 79-92.
- FRAEDRICH, K., C. ZIEHMANN, 1994: Predictability experiments of persistence forecasts in a red noise atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **120**, 387 - 428.
- FRAEDRICH, K., B. RÜCKERT, 1998: Metric Adaption for Analog Forecasting. *Physica A* **253**, 379-393.
- FRAEDRICH, K., R. MORISON, L. M. LESLIE, 2000: Improved cyclone track predictions using error recycling. *Meteorology and Atmospheric Physics* **74**, 51-56.
- FRAEDRICH, K., C. RAIBLE, F. SIELMANN, 2003: Analog ensemble forecasts of tropical cyclone tracks in the Australian Region. *Weather and Forecasting* **18**, 3-11.
- HAMILL, T. M., J. S. WHITAKER, S. L. MULLEN, 2006: Re-forecasts – An important dataset for improving weather predictions. *Bull. Am. Met. Soc.* **87**, 33-46.
- LESLIE, L. M., K. FRAEDRICH, 1990: Reduction of tropical cyclone position errors using an optimal combination of independent forecasts. *Weather and Forecasting* **5**, 158-161.
- LESLIE, L. M., G. D. HESS, G. J. HOLLAND, P. R. MORISON, K. FRAEDRICH, 1992: Predicting changes in intensity of tropical cyclones using a Markov chain technique. *Aust. Met. Mag.* **40**, 41-46.
- McNAMES, J., 2002: Local averaging optimization for chaotic time series prediction. *Neurocomputing* **48**, 279-29.
- NATIONAL HURRICANE CENTER NHC, TROPICAL PREDICTION CENTER, 2006: Data of Websites <http://www.nhc.noaa.gov/>, 11691 SW 17<sup>th</sup> Street, Miami, Florida, 33165-2149 USA.
- NEUMANN, C. J., 1972: An alternate to the HURRAN tropical cyclone forecast system. NOAA Tech. Memo. NWS **SR-62**, 22 S.
- RAIBLE, C. C., E. KIRK, K. FRAEDRICH, 2001: Kurzfristvorhersagen von Niederschlagswahrscheinlichkeit und Temperatur. *Promet* **27**, 80-86.
- SIEVERS, O., K. FRAEDRICH, C. C. RAIBLE, 2000: Self-adapting analog ensemble predictions of tropical cyclone tracks. *Weather and Forecasting* **15**, 623-629.
- TAKENS, F., D. A. RAND, L.-S. YOUNG, 1981: Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics* **898**, 366-381.

## Anschriften der Autoren:

Dipl.-Met. Hans Langmack  
Schollendamm 37  
27751 Delmenhorst  
E-Mail: H.Langmack@t-online.de

Prof. Dr. Klaus Fraedrich  
Dipl.-Met. Frank Sielmann  
Meteorologisches Institut  
Universität Hamburg  
Bundesstraße 55  
20146 Hamburg  
E-Mail: klaus.fraedrich@zmaw.de  
frank@visibility.dkkrz.de