

Analogvorhersage von
tropischen Zyklonenzugbahnen
mit einem selbst-adaptierenden Modell

von

Oliver Sievers

Diplomarbeit im Fach Meteorologie

vorgelegt im Mai 1998

Fachbereich Geowissenschaften

der

Universität Hamburg

Zusammenfassung

Die Vorhersage tropischer Zyklonen wird in zunehmendem Maße von Ensemblevorhersagen beherrscht. Auf diese Weise wird versucht, die Initialisierungsungenauigkeit auszugleichen. Diese Arbeit untersucht die Möglichkeit der Zugbahnvorhersage von tropischen Zyklonen mit einem selbst-adaptierenden Analogmodell. Das Modell lernt selbständig, gemäß den gegebenen Modellparametern und der gewünschten Prognoseart ein Ensemble von optimalen historischen Analoga für die Vorhersage zu suchen. Anhand eines Datensatzes, der knapp 1000 Stürme aus dem West-Atlantik enthält, wird die Sensitivität auf einzelne Modellparameter getestet und der erzielte Großkreisfehler mit demjenigen des Regressionsmodells CLIPER verglichen. Das Analogmodell zeigt in der optimalen betrachteten Konfiguration zwar einen um durchgehend 3% bis 5% höheren Großkreisfehler, dafür wird die Verteilung der Ensemblemitglieder für eine Prognose des Vorhersagefehlers genutzt. Für den Datensatz des Ost-Pazifiks erzielt das Analogmodell dagegen sehr viel bessere Ergebnisse, hier wird über den Vorhersagezeitraum bis 72 Stunden eine Verbesserung von 15% bis 20% gegen das Regressionsmodell erreicht. Eine lineare Kombination aus den atlantischen Analog- und CLIPER-Vorhersagen bringt eine Verbesserung um mehr als 5% gegen CLIPER im Kurzfristbereich bis 12 Stunden.

Abstract

Ensemble methods have growing importance in tropical cyclone track forecasting. Thus, the influence of initial positioning errors should be repressed. In this work, the possibility of track prediction with a self adapting analog model is examined. The model learns independently to search for an ensemble of optimal historic analogues, subject to model parameters and elected kind of prediction. Sensitivity for single parameters is tested with respect to the Atlantic Basin Best Track Dataset, which contains nearly 1000 storm tracks. Though in best configuration the analog model has a great circle error that is a little higher (for 3% to 5%) than that of the regression model CLIPER which is available for control, the ensemble distribution is used for predicting the forecast error. For East-Pacific Basin verification up to 72 hours shows an improvement of 15% to 20% in proportion to the regression model. Linear combination of analog and CLIPER forecasts for Atlantic Basin brings about 5% and more improvement with respect to CLIPER up to 12 hours.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	- 5 -
1.1. Motivation	- 5 -
1.2. Tropische Zyklonen	- 7 -
2. Daten	- 10 -
2.1. Atlantik	- 10 -
2.2. Ost-Pazifik	- 14 -
3. Modelle zur Vorhersage tropischer Zyklonen	- 16 -
3.1. Übersicht	- 16 -
3.2. HURRAN	- 18 -
3.3. CLIPER - Varianten	- 20 -
4. Analog-Modell im Atlantik	- 24 -
4.1. Allgemeines zu Analog-Modellen	- 24 -
4.2. Prognose	- 26 -
4.3. Die Adaption	- 27 -
4.4. Phasenraum und Parameter	- 38 -
4.5. Verifikation	- 43 -
4.6. Ergebnisse	- 49 -
5. Kombination von Vorhersagen	- 67 -
5.1. Kombinationsmodelle	- 68 -
5.2. Ergebnisse	- 70 -

6. Diskussion und Ausblick	- 73 -
6.1. Ergebnisdiskussion	- 73 -
6.2. Ausblick	- 76 -
7. Literatur	- 78 -
Anhang A. Erweiterung auf andere Bassins	- 84 -
A.1. Ost-Pazifik	- 84 -
Anhang B. Tabellen	- 91 -
B.1. Die Saffir-Simpson-Skala	- 91 -
B.2. Die CLIPER-Variablen	- 91 -
B.3. Phasenraumkomponenten für den Atlantik	- 93 -
B.4. Tabellen der Regressionskoeffizienten	- 95 -
B.5. Fehlerberechnungskoeffizienten	- 98 -
B.6. Kombinationskoeffizienten	- 98 -
B.7. Phasenraumkomponenten für den Ost-Pazifik	- 100 -
Anhang C. Hilfsmittel und Danksagung	- 101 -
C.1. Hilfsmittel	- 101 -
C.2. Danksagung	- 101 -
C.3. Erklärung	- 102 -

1. EINLEITUNG

1.1. Motivation

Die Vorhersage tropischer Zyklonen, ihrer zukünftigen Zugbahnen und Intensitäten gehört zu den schwierigsten und drängendsten Problemen in der Meteorologie. Diese Wirbelstürme, die über allen tropischen Gewässern mit einer Oberflächentemperatur von mehr als 27° Celsius existieren können, haben von allen Naturereignissen die größte Zerstörungskraft. In den Jahren 1964 bis 1978 starben weltweit fast doppelt so viele Menschen durch tropische Zyklonen wie durch Erdbeben, Überflutungen, Tornados, Vulkanausbrüche, Erdbeben, Stürme in mittleren Breiten sowie Hitze- und Kältewellen zusammen (Anthes, 1982). Ein einmal aufgespürter Sturm wird daher sorgsam mit allen nutzbaren Meßinstrumenten überwacht, hierzu werden Satelliten, Ozeanbojen, Radar- und Flugzeugmessungen eingesetzt. Die betroffenen Wetterämter nutzen eine Vielzahl von Modellen zur Vorhersage insbesondere der Zugbahnen, um in gefährdeten Küstenabschnitten rechtzeitig Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung veranlassen zu können. Die Evakuierung der meisten Küstengebiete benötigt etwa 24 Stunden, darum ist diese Zeitspanne die entscheidende Vorhersagefrist, für die es gilt, einen minimalen Vorhersagefehler zu machen. Jede unnötig ausgesprochene Warnung kostet pro evakuiertem Kilometer Küste eine Summe von rund 100.000 US-Dollar und mindert das Vertrauen der Bevölkerung in zukünftige Warnungen. Ein Wirbelsturm, der unvermutet auf bewohnte Gegenden trifft, hat dagegen unnötig große Schäden und möglicherweise Verlust von Menschenleben zur Folge.

Die Bewegung tropischer Zyklonen ist von einer Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen der Rotation der Zyklone (Fiorino und Elsberry, 1989), dem umgebenden synoptischen Windfeld, dem Vorticity-Feld der Erde, dem Untergrund und der Feuchtekonvektion abhängig (Holland, 1983). Dies führt häufig zu unerwarteten Bewegungen der Stürme. Da die zugrunde liegende Physik bis heute nicht vollständig verstanden ist, sind selbst dynamische

Modelle nicht in der Lage, die Zugbahnen in ungewöhnlichen Situationen vorherzusagen. Außerdem haben diese den Nachteil, zu langsam zu sein und insbesondere den Kurzfristbereich nicht vorhersagen zu können, da sie meistens eine gewisse Einschwingphase brauchen. In zunehmendem Maße werden zum Ausgleich der Initialisierungsfehler Ensemblevorhersagen gemacht (Zhang und Krishnamurti, 1997; Krishnamurti *et al.*, 1997).

Die Idee dieser Arbeit beruht darauf, einerseits die Dynamik der Zyklonen durch ein statistisches und damit schnelles Programm selbst lernen zu lassen, ohne die physikalischen Hintergründe hinter der Dynamik zu betrachten, andererseits die Vorzüge einer Ensemblevorhersage zu nutzen. Das geschieht mittels eines von Fraedrich und Rückert (1998) vorgestellten selbst-adaptierenden Analogmodells. Bisher wurde untersucht, inwieweit dieses Programm in der Lage ist, die Dynamik von theoretischen Modellen aus „Meßwerten“ heraus zu erkennen. Mit dieser Arbeit erfolgt die Erweiterung auf klimatologische Messungen.

Zunächst werden im zweiten Teil der Einleitung einige allgemeine Bemerkungen zur Struktur von tropischen Zyklonen gemacht. Das Kapitel 2 stellt dann die zur Modellbildung genutzten Datensätze für den Atlantik und den Ost-Pazifik vor. Hierbei wird auch auf historische Entwicklungen in der Beobachtung von tropischen Zyklonen eingegangen. Daran anschließend wird in Kapitel 3 ein Überblick über Modelle zur Vorhersage tropischer Zyklonenzugbahnen gegeben, die bei den Wetterämtern noch im Dienst oder historisch von Interesse sind. Besondere Aufmerksamkeit erfahren dabei das Analogmodell HURRAN sowie das Regressionsmodell CLIPER, wobei ersteres als Analogmodell gewisse Ähnlichkeiten mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell hat, letzteres dagegen als Referenzmodell für eine Qualitätsaussage aller neuen Vorhersagemodelle dient.

Die Grundzüge des selbst-adaptierenden Analogmodells sowie die Spezifikationen für die Zugbahnvorhersage der tropischen Zyklonen bilden den Hauptbestandteil von Kapitel 4. Anhand des Datensatzes für den Atlantik wird das Modell getestet und Ergebnisse für verschiedene Parametervariationen vorgestellt. Neben der Beschreibung der Adaption sowie dem Vergleich mit CLIPER wird bei den Ergebnissen eine Abschätzung des Fehlers gemacht.

Leslie und Fraedrich (1990) haben gezeigt, daß die Kombination von unabhängigen Vorhersagen die Qualität der Zugbahnprognose von australischen Zyklonen um bis zu 15% im Mittel steigern kann. Analog hierzu werden im Kapitel 5 verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, die Prognosen von Analogmodell und CLIPER zu einer neuen Vorhersage zu kombinie-

ren. Wiederum werden Ergebnisse für den Atlantik vorgestellt. Den Abschluß bildet das Kapitel 6 mit einer zusammenfassenden Diskussion der Ergebnisse sowie einem Ausblick. Im Anhang A finden sich als Ergänzung die Modellspezifikationen und Ergebnisse für den Ost-Pazifik.

1.2. Tropische Zyklonen

Tropische Zyklonen treten über fast allen tropischen Gewässern auf. Je nach Entstehungsort ordnet man sie einem von üblicherweise 6 Bassins zu. Im Nord-West Pazifik findet man dabei ca. 30% aller Zyklonen eines Jahres, im Südpazifik rund um Australien 18%, im Nord-Indischen Ozean 15% und im Süd-Indischen Ozean 14%. Im West-Atlantik nördlich des Äquators entstehen etwa 12% der jährlichen Wirbelstürme, weitere 11% im Ost-Pazifik zwischen Nord-Amerika, Äquator und Datumsgrenze (Asnani, 1993)¹. Keine tropischen Stürme findet man dagegen im Südatlantik sowie im Südpazifik östlich der Datumsgrenze.

Sowohl Lebenslauf als auch Struktur der Zyklonen sind in allen Bassins ähnlich. Ausführliche Darstellungen von Entwicklungsstadien, Dynamik und Thermodynamik finden sich zum Beispiel in Riehl (1979), Elsberry *et al.* (1987) und Gray (WMO-Report). Auch die Arbeiten von Dunn und Miller (1960), Anthes (1982) oder Asnani (1993) stellen die Physik der Wirbelstürme umfassend dar, wobei ein Vergleich dieser Arbeiten einen zusätzlichen Einblick in die historische Entwicklung des Wissens um tropische Zyklonen gewährt. Hier wird im folgenden ein kurzer Überblick über den Aufbau von tropischen Wirbelstürmen gegeben.

Ein schwaches Tiefdruckgebiet, das in der Nähe der Innertropischen Konvergenzzone (IT-CZ) als Initialstörung existiert, wird aufgrund der dort vorherrschenden Vorticity zyklonal umströmt. In der Reibungsschicht kommt es zum Einströmen und damit zu einer Massenkongvergenz, die in eine Vertikalbewegung umgesetzt wird. Die Luft aus der Reibungsschicht steigt zunächst trockenadiabatisch, nach Erreichen des Kondensationsniveaus dann feuchtadiabatisch auf. Bei bedingt instabil (*conditional unstable*) geschichteter Atmosphäre und hinreichend hohem Wassergehalt in der aufsteigenden Luft wird diese irgendwann wärmer als die Umgebungsluft (*level of free convection, LFC*) und erfährt so einen Auftrieb. Die beschleunigte Vertikalbewegung sorgt für eine radiale Bewegung von Luftringen, die weiterhin zyklon-

1. Diese Aufteilung ist die am häufigsten gebrauchte und findet sich zum Beispiel in Pike und Neumann (1987), WMO (1979) oder auch deutschen Lehrbüchern wie beispielsweise vom Seewetteramt (1989). Andere Autoren (WMO 1993, Asnani 1993) teilen das australische Bassin in einen östlich und einen westlich/nördlich vom Kontinent gelegenen Teil.

nal um das Zentrum rotieren, in Richtung auf das Zentrum. Aufgrund der Drehimpulserhaltung wird die Rotationsgeschwindigkeit dieser Ringe beim Einströmen laufend erhöht. Die Übergangshöhe zwischen System mit kaltem Kern in Bodennähe und warmem Kern oberhalb des LFC sinkt ab und erreicht sogar die Meeresoberfläche. Das System bildet nun einen „warmen Wirbel“ im Gegensatz zu den Tiefdruckgebieten mittlerer Breiten, die einen kalten Kern haben. In diesem Stadium, das jedoch nur von den wenigsten Tiefdruckstörungen in den Tropen erreicht wird, muß die Zyklone in den meisten Fällen bereits als schwerer Sturm eingestuft werden.

Die aufsteigende Luft fließt in der Höhe radial ab und sinkt großräumig wieder ab. Diese Sekundärzirkulation erreicht ihr Maximum in einem gewissen Abstand vom Rotationszentrum. Daher findet man die maximalen Aufwinde und damit verbunden die höchsten Rotationsgeschwindigkeiten nicht im Zentrum selbst, sondern in einem Abstand von 10 bis 40 Kilometern (Anthes, 1982), zumal direkt im Zentrum die Druckgradientkraft verschwindet. In dem Bereich maximaler Intensität, der durch eine mehr als 50 Kilometer breite Wolkenmauer gekennzeichnet ist, treten Windgeschwindigkeiten von bis zu 300 km h^{-1} im Mittel auf. Für den Hurrikan INEZ 1966 sind für dieses Gebiet Regenraten von 4.8 cm h^{-1} geschätzt worden, im Mittel fallen bis zu 200 km Entfernung vom Zentrum etwa 10 Zentimeter Regen pro Tag. Im Inneren dieses Gürtels kommt es aufgrund verschiedener, bis heute nicht vollständig verstandener Kräfte zu einer leichten Absinkbewegung der Luft. Diese führt zu einer weiteren Erwärmung des Zentrums und dadurch zur Auflösung der Wolken. Sofern bei starken Zyklonen diese Abwärtsbewegung bis auf die Meeresoberfläche fortgesetzt wird, erscheint das wolkenfreie *Auge* des Sturms. Meist ist es jedoch von Cirrus-Fetzen verschleiert. Hier werden Bodendrücke von zum Teil unter 900 Hektopascal gemessen.

Die Energie des Wirbelsturms wird in erster Linie aus latenter Energie geschöpft, die bei der Kondensation frei wird. Käme es nicht zu Abkühlungsprozessen verschiedener Art, so würde eine Erwärmungsrate von 1500°C pro Tag (Anthes, 1982) erreicht. Beobachtet werden Temperaturdifferenzen von etwa 15°C zwischen dem Auge und der Umgebung der Zyklone in einer Entfernung von etwa 1550 Kilometern. Allerdings wird nur der Bereich bis zu einer Zentrumsentfernung von etwa 400 Kilometern als äußerer Bereich bezeichnet, wobei alle diese Angaben für mittlere Zyklonen stehen. Die größten Temperaturanomalien findet man in Druckhöhen von etwa 200 bis 300 Hektopascal.

Der Wirbel, der zwar nicht völlig symmetrisch ist, durch achsensymmetrische Modelle aber sehr gut angenähert werden kann, zieht mit der großräumigen Strömung in Richtung Westen. Hierbei sind starke Korrelationen zwischen dem umgebenden Feld und der Zugbahn gefunden worden (Chan und Gray, 1982). Höhenträge lenken den Sturm früher oder später polwärts und nach Osten um. Sobald der Wirbel keinen Nachschub an latenter Wärme mehr erhält, weil er über Landmassen oder kühlere Gewässer gezogen ist, verliert er sehr schnell an Intensität und löst sich auf.

Die enorme Zerstörungskraft von tropischen Zyklonen wird durch mehrere Faktoren erreicht. Die hohen Windgeschwindigkeiten führen an sich schon zu großen Schäden. Hinzu kommen die Regenmengen, die vor allem im Hinterland der Küsten für Überschwemmungen sorgen. Im vorderen rechten Quadranten¹ des Wirbels wird durch die Kombination aus niedrigem Druck, Bewegung des Wirbels und Wind mit den damit einhergehenden Reibungskräften ein „Wasserberg“ aufgetürmt, der in Verbindung mit dem „normalen“ Hochwasser für Flutwellen von 10 Metern Höhe sorgen und so weite Küstenabschnitte überfluten kann.

Intensitäten von tropischen Zyklonen werden international in Stufen von 1 bis 5 bestimmt. Diese sind in der sogenannten Saffir-Simpson-Skala (Tabelle 3) definiert, die für die einzelnen Bassins nur leichte Abweichungen aufweist (WMO, 1993). Es gehen die maximale Windstärke, der Kerndruck sowie die Flutwelle in diese Bestimmung ein, wobei jeweils der größte Wert entscheidend ist. Die zu erwartende Zerstörung, wie sie in der Skala angegeben ist, muß jedoch nicht zwangsläufig mit den tatsächlichen Schäden übereinstimmen. So ist der Hurrikan ANDREW, der im August 1992 in den USA einen Schaden von schätzungsweise 30 Milliarden US-Dollar verursachte und damit der bisher teuerste Wirbelsturm aller Zeiten war, zum Zeitpunkt seines *Landfalls* in Florida „nur“ mit einer Stärke von 4, in Louisiana von 3 eingestuft worden. Daß die Schäden, die tropische Zyklonen heute verursachen, zunehmend größer werden, liegt vor allem an der schnell wachsenden Bevölkerungsdichte an allen tropischen Küsten und der oft unzureichenden Bausubstanz.

1. Der Bereich, der in Zugrichtung rechts von der Trajektorie und vor dem Zentrum liegt.

2. DATEN

2.1. Atlantik

Dieser Arbeit liegt ein Datensatz des *National Hurricane Center*, Miami, Florida, zu Grunde, der alle bekannten tropischen Zyklonen im atlantischen Bassin seit 1886 enthält. Inhalt und Grenzen der Nutzbarkeit sind in Jarvinen *et al.* (1984) beschrieben. Jeder Eintrag enthält vier wesentliche Informationen:

- die Position (nördliche Breite und westliche Länge);
- maximale Windgeschwindigkeit (in Knoten);
- zentraler Druck (in Hektopascal);
- Datum und Uhrzeit.

Die Daten stehen weder in gleicher noch in gleichbleibender Genauigkeit zur Verfügung. Zwei Effekte spielen hierbei eine wesentliche Rolle, zum einen die im Laufe der Zeit gewachsene Dichte des Meßnetzes, zum anderen die prinzipielle Schwierigkeit, Messungen im Inneren einer tropischen Zyklone durchzuführen. Die hohen auftretenden Winde - es sind Minutenmittelwerte von über 300 km h^{-1} und Böen von über 350 km h^{-1} gemessen worden (Anthes, 1982) - und die damit einhergehende zerstörerische Kraft erfordern einerseits einen sehr festen Aufbau der Meßinstrumente, andererseits ist die Wahrscheinlichkeit gering, daß das Zentrum einer Zyklone solch eine feste Station überquert. Daher sind die im Datensatz angegebenen maximalen Windwerte oftmals geschätzt, indem entweder aus der beobachteten Zerstörung rückgerechnet oder periphere Windmessungen in das Zyklonenzentrum interpoliert wurden. Sofern direkte Messungen möglich waren, muß die erreichte Genauigkeit kritisch überprüft werden. Bei Windbestimmungen von Schiffen aus wird der Wind anhand der beobachteten Oberflächenbeschaffenheit des Wassers geschätzt, wobei sich systematische Fehler gezeigt haben. Ebenso kommt es bei Landstationen zu den typischen Meßfehlern in der Reibungsschicht der Atmosphäre, die im Einzelfall den Faktor 2 erreichen können. Die Einfüh-

rung von Satelliten zur Wetterbeobachtung und die damit verbundene Möglichkeit der Intensitätsbestimmung von tropischen Zyklonen (siehe z.B. Dvorak, 1975) brachte eine Verbesserung der Qualität mit sich, so daß die maximale Windgeschwindigkeit auf 5 Knoten gerundet angegeben wird. Landsea (1993) weist darauf hin, daß bis 1969 den stärkeren Hurrikanen (so werden die atlantischen Wirbelstürme genannt) systematisch eine um etwa 5 Knoten überhöhte Windintensität zugewiesen wurde.

Die Messung des Zentraldruckes stellt ähnliche Probleme dar wie die Bestimmung der maximalen Windgeschwindigkeit. Zwar läßt sich ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen herstellen, es sind aber keine aus dem Wind abgeleiteten Drücke in den Datensatz aufgenommen worden, sondern nur gemessene Werte. Daher fehlt der Druckwert in den Daten häufig, erst ab 1975 ist die Datenreihe annähernd komplett. Die Suche nach dem Grund hierfür führt sofort auf die Meßnetzdicke und die damit verbundene Unsicherheit. Eng verknüpft ist diese Frage mit der technischen Entwicklung. Seit 1871 existiert in den Vereinigten Staaten ein Warndienst, der zunächst mit Landbeobachtungen und Schiffsaufzeichnungen arbeitete. Als Folge wurden Hurrikane fast ausschließlich in unmittelbarer Landnähe oder in der Nähe von Schifffahrtswegen gesichtet. Auf diese Weise sind sicherlich viele Stürme der Entdeckung und Registrierung entgangen. Auch kam es vor, daß ein einmal gesichteter Sturm wieder „verloren“ und erst Tage später neu entdeckt wurde. Die Erfindung des drahtlosen Telegraphen im Jahre 1905 beschleunigte zwar die Weitergabe von Meldungen (insbesondere von Schiffen), löste aber nicht das Problem des lückenhaften Beobachtungsnetzes. Erst seit 1944 ist die Erkundung von Hurrikanen organisiert, indem regelmäßig Flugzeugmessungen im Inneren der Zyklonen stattfinden. Bei der Nutzung vorher aufgenommener Daten ist besonders bei Wind- und Druckwerten Vorsicht geboten. Verbesserungen in der räumlichen Abdeckung der Ozeane ergaben sich ab 1955 durch den Einsatz des Küstenradars und dann ab 1960 durch Satelliten. Weiterhin sammeln heute Bojen im Ozean Daten, die zur Erkennung von tropischen Stürmen herangezogen werden können. Alle diese Daten dienen auch zur Positionsbestimmung.

Bei dem Datensatz handelt es sich um einen sogenannten „Best Track“ Datensatz, das heißt, es werden nicht die laufend gemessenen Positionen abgespeichert, sondern eine unter Einbeziehung aller Quellen geglättete Zugbahn. Diese soll die großskalige Bewegung des Sturms beschreiben, weniger die exakte Position des Zentrums an bestimmten Terminen. Kleinskalige Schwingungen, die typischerweise 5 bis 20 nautische Meilen um den mittleren

Pfad schwanken, werden dabei herausgeglättet, charakteristische Bewegungen wie kleinräumige Kreisbahnen aber beibehalten. Aus der geglätteten Zugbahn, dem „best track“, werden die Positionen zu den 4 synoptischen Zeiten (0000 UTC¹, 0600 UTC, 1200 UTC und 1800 UTC) abgelesen und gespeichert, wobei die Angabe auf ein zehntel Grad gerundet erfolgt. Diese Best Track Positionen weichen im Atlantik durchschnittlich um 20 Kilometer² bis 21 Kilometer³ von den operationellen Positionen ab, die für die aktuelle Vorhersage genutzt werden. Eine weitere Unsicherheit ergibt sich daraus, daß die Aufzeichnungshäufigkeit im Laufe der Zeit erhöht wurde. Vor 1931 wurden nur die Positionen um 1200 UTC gespeichert, bis 1956 nur die Positionen um 0000 UTC und 1200 UTC. Die fehlenden Zwischenwerte bis zu diesem Zeitpunkt wurden aus den vorhandenen Daten heraus interpoliert, so daß die Daten heute zwar sechs-stündig vorliegen, mit zunehmendem Alter jedoch zusätzlich ungenau werden. Insgesamt enthält der Datensatz für den Atlantik 28643 Positionen im Zeitraum 1886 bis 1996. Die geographische Verteilung dieser Positionen ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Best Track Daten dienen zum einen für statistische Untersuchungen, zum anderen zur Verifikation von Vorhersagemodellen. Der Vorhersagefehler ΔV eines Modells wird üblicherweise als Großkreisentfernung zwischen vorhergesagter Position (X_V, Y_V) und Best Track Position (X_0, Y_0) definiert (Neumann und Pelissier, 1981b):

$$\Delta V = 111 \text{ km} \cdot \text{acos}[\sin Y_0 \sin Y_V + \cos Y_0 \cos Y_V \cos(X_0 - X_V)], \quad (1)$$

wobei X und Y die geographische Länge bzw. Breite sind. Weiterhin läßt sich so ein Initialisierungsfehler angeben, der, wie oben schon erwähnt, die Entfernung zwischen Best Track und operationeller Position darstellt und im Atlantik im Mittel bei etwa 20 Kilometern liegt. Wichtig bei der Modellverifikation ist, daß die zu vergleichenden Modelle identische Positionen als Eingabe haben. Häufig werden deshalb ältere Modelle, deren operationelle Vorhersagefehler man bereits kennt, mit den später gefundenen Best Track Daten erneut gerechnet, um so ein vergleichbares Ergebnis zu erlangen. In dieser Arbeit werden Versionen des Analogmodells, wie es in Kapitel 4 eingeführt wird, mit Versionen des Regressionsmodells CLIPER (siehe das Kapitel 3.3) verglichen, indem jeweils beide mit Best Track Daten gerechnet werden.

-
1. *Universal Time Coordinated* - Weltzeit. Die Angabe erfolgt grundsätzlich 4-stellig in Stunden und Minuten (jeweils 2 Ziffern).
 2. Zeitraum 1970-1979, Neumann und Pelissier (1981 b)
 3. Zeitraum 1983-1988, DeMaria *et al.* (1990)

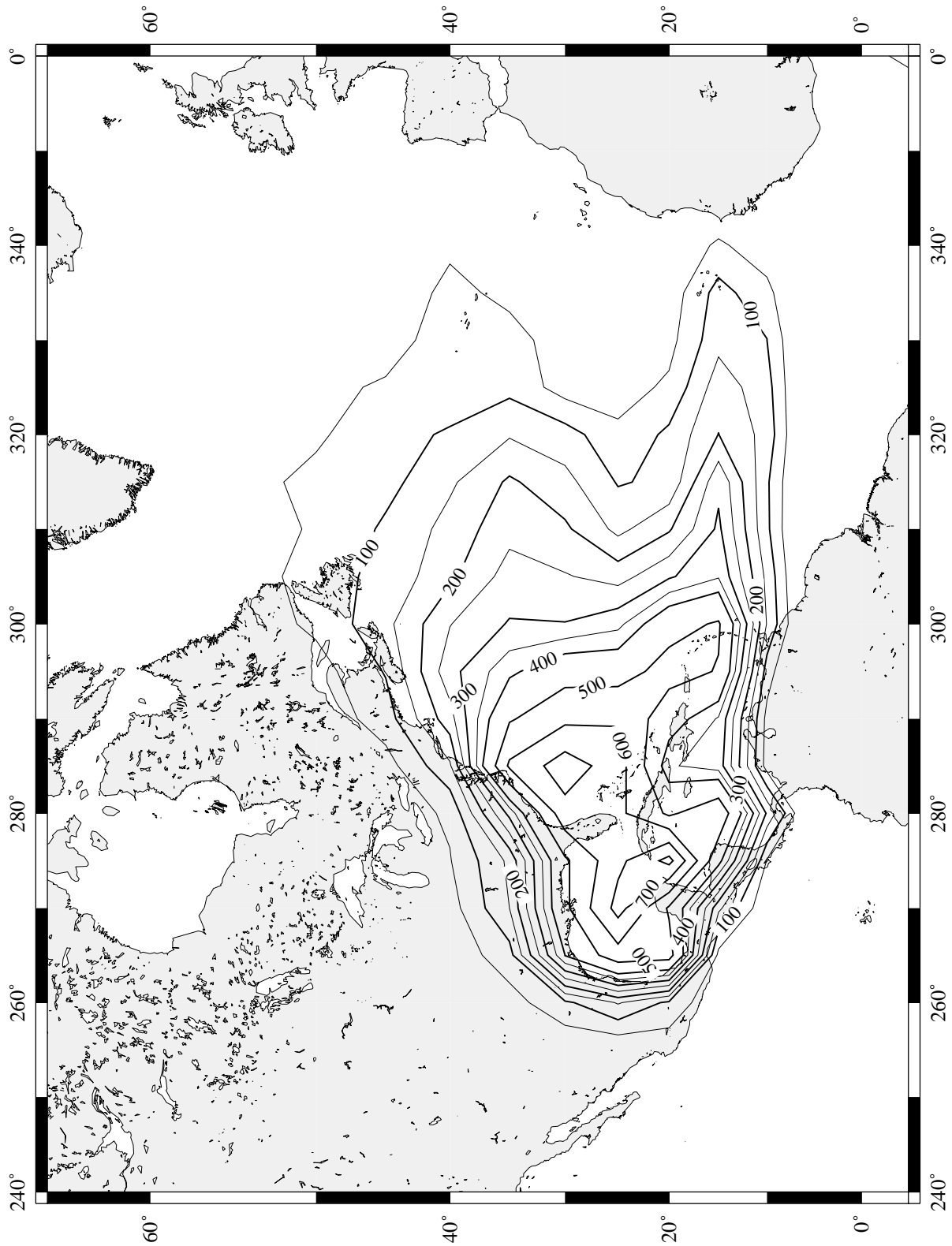


Abbildung 1: Absolute Häufigkeit der im Best Track Datensatz festgehaltenen atlantischen Sturmpositionen. Die Häufigkeit bezieht sich auf Gebiete von jeweils 5° x 5°

2.2. Ost-Pazifik

Das ost-pazifische Bassin umfaßt alle tropischen Zyklonen der Nordhemisphäre zwischen Nordamerika und der Datumsgrenze. Auch von diesem Bassin liegt ein Best Track Datensatz vor, der ebenfalls vom National Hurricane Center, Miami, Florida, gepflegt wird. Der Datensatz enthält Sturmpositionen von 1949 bis 1996, die wie im Atlantik alle 6 Stunden aus einer nachträglich erstellten optimierten und geglätteten Zugbahn extrahiert wurden. Die Probleme und Eigenarten dieses Datensatzes, wie sie bei Brown und Leftwich (1982) geschildert werden, sind ähnlicher Natur wie die des atlantischen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Qualität der Windmessungen, diese sind im Ost-Pazifik nahezu nicht zu verwenden. Bis 1970 existiert mit einigen Ausnahmen nur eine Einteilung in die Windstärken 25 Knoten / 45 Knoten / 75 Knoten. Der Luftdruck wird erst ab 1988 verwertbar erfaßt.

Insgesamt enthält der Datensatz 16188 Positionen aus 660 Stürmen für das Bassin, deren geographische Häufigkeitsverteilung in Abbildung 2 gezeigt wird. Aus dieser Abbildung wird bereits das typische Verhalten dieser tropischen Zyklonen deutlich. Sie entstehen westlich der amerikanischen Küste und wandern zunächst an dieser entlang nach Nordwesten, um dann entweder nach Norden/Nordosten über den Kontinent oder, häufiger, nach Westen über den Pazifik einzudrehen. Letztere streifen dann gelegentlich vor ihrem Absterben die Hawaii-Inseln. Auf eine weitere Betrachtung wird hier verzichtet.

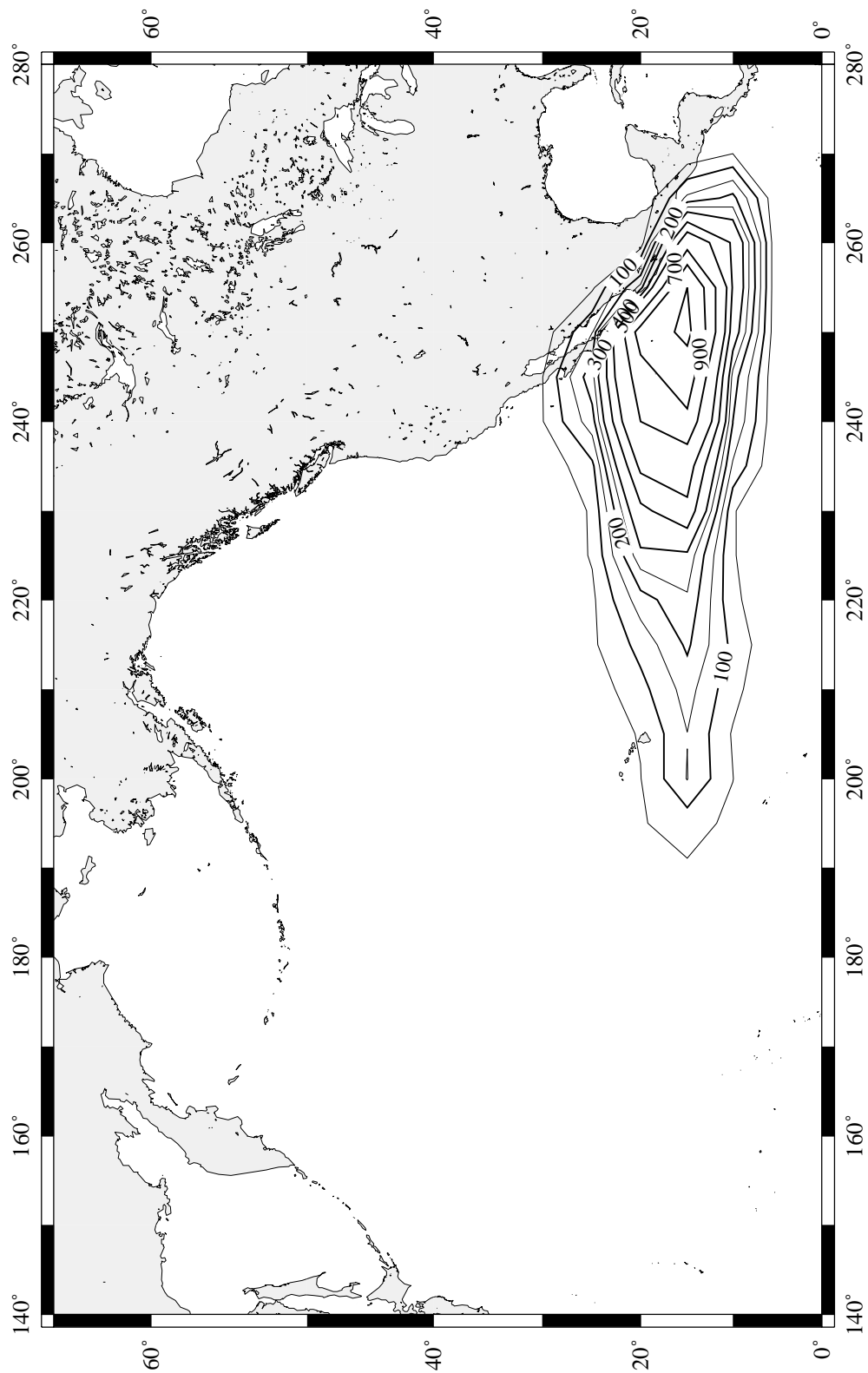


Abbildung 2: Absolute Häufigkeit der Ost-Pazifik - Sturmpositionen 1949 bis 1996, Häufigkeit über eine Fläche von jeweils $5^\circ \times 5^\circ$

3. MODELLE ZUR VORHERSAGE TROPISCHER ZYKLONEN

Im folgenden wird ein Überblick über bisherige Verfahren zur Zyklonenvorhersage in den Tropen gegeben. Die Angaben zu den Modellen beziehen sich, soweit keine anderen Quellenhinweise gegeben werden, auf WMO (1993). Ältere Modellübersichten finden sich zum Beispiel bei Hope und Neumann (1977), wo alle damals weltweit aktiven Modelle aufgeführt sind, oder in der Arbeit von DeMaria *et al.* (1990), in der die damals aktiven Modelle des National Hurricane Centers auf ihre Güte hin überprüft werden. Näher beschrieben werden die atlantischen Modelle HURRAN (**HUR**Ricane **AN**alogs) und CLIPER (**CL**imate and **PeR**sistence) sowie das ost-pazifische EPCLPR (**E**ast **P**acific **CL**imate and **PeR**sistence) als drei statistische Modelle, die entweder dem in dieser Arbeit beschriebenen Modell ähnlich sind (HURRAN) bzw. als Referenz für die Güte der Vorhersage dienen (CLIPER / EPCLPR).

3.1. Übersicht

Vorhersagemodelle werden in mehrere Klassen aufgeteilt. Die Zuordnung der Modelle ist in der Literatur zwar nicht einheitlich, aber vergleichbar. Neumann und Pelissier (1981 a) unterscheiden zwischen *statistischen*, *statistisch-synoptischen*, *statistisch-dynamischen* und *dynamischen* Modellen, Hope und Neumann (1977) zwischen *Anlogmodellen*, *empirischen*, *Regressions-* und *numerischen Modellen*. Die Zuordnung allerdings erfolgt in denselben Klassen wie bei Neumann und Pelissier. Leslie und Fraedrich (1990) trennen die Vorhersagemethoden für den australischen Raum in numerische Wettervorhersagemodelle, ein statistisch-synoptisches und ein quasi-analytisches Modell sowie in die subjektive manuelle Vorhersage auf. Im folgenden erfolgt die Aufteilung analog zu Neumann und Pelissier.

Statistische Modelle

Rein statistische Modelle sind Analog-Verfahren wie HURRAN mit seinen Variationen in den anderen Bassins (TYFOON im West-Pazifik, CYCLOGUE für Australien und andere) und Regressionsverfahren wie CLIPER, die auf Klima und Persistenz beruhen. Wichtig für

rein statistische Verfahren ist, daß nur Position und Jahreszeit (Klima) sowie Bewegung und Intensität (Persistenz), also die Informationen des Best Track Datensatzes in die Betrachtung eingehen.

Statistisch-synoptische Modelle

Geht das beobachtete Feld der geopotentiellen Höhe (oder andere synoptische Daten) mit in die Betrachtungen ein, so erhält man synoptische Modelle. Beispiele sind das NHC67¹ für den Atlantik und Australien, das NHC72 für den Atlantik, das EPHC77² für den Ost- und das Veigas-Miller-Modell für den West-Pazifik. Bei allen handelt es sich um Systeme von Regressionsgleichungen (deshalb „*statistisch-synoptisch*“), die sich in der Auswahl der Vorhersagevariablen unterscheiden. In NHC67 gehen so neben dem Geopotentialfeld Rohdaten von Klima und Persistenz ein, in NHC72 die CLIPER-Vorhersagen, also bereits verarbeitete Informationen über Klima und Persistenz.

Statistisch-dynamische Modelle

Einen Schritt weiter gehen die statistisch-dynamischen Modelle wie NHC73. Zusätzlich zur CLIPER-Vorhersage und dem beobachteten Geopotentialfeld geht das mittels numerischem Modell vorhergesagte Geopotentialfeld ein, um so genauere Aussagen über die zukünftige Zugbahn der Zyklone machen zu können. Neuere Versionen (NHC83 / NHC90) nutzen ein Lagrange-Koordinatensystem, welches den Nullpunkt im Sturmzentrum hat und in Zugrichtung orientiert ist. Dadurch wird der zur Zugrichtung parallele Fehleranteil (*Along-Track*) vom zur Bewegung senkrechten Anteil (*Cross-Track*) entkoppelt, was eine deutliche Verbesserung darstellt (Shapiro und Neumann, 1984).

Dynamische Modelle

Bei den dynamischen Modellen kann man weiter unterteilen. Das Modell BAM (**B**eta and **A**dvection **M**odel) und Verwandte nutzen die gefilterte und gemittelte Vorhersage eines globalen Spektral-Modells, um einen advektiven Fluß in der Umgebung der Zyklone abzuschätzen. Dieser dient, in Verbindung mit einer ersten Näherung des Beta-Effektes, zur Zugbahnvorhersage. WMO (1993) bezeichnet diese Modelle als „Trajektorien-Modelle“.

Im mittelfristigen Vorhersagebereich gelten barotrope Modelle als vorteilhaft (WMO, 1993). Das 1968 vorgestellte SANBAR (**BAR**otropmodell von **SAN**ders) wurde 1990 von

1. *National Hurricane Center, 67 für das Versionsjahr*
2. *East Pacific Hurricane Center*

VICBAR (**Vic** Ooyama **barotropic** model) abgelöst. Die Idee ist wie bei BAM, daß die die Bewegung beherrschende physikalische Größe die Impulsadvektion ist. Mittels der barotropen Vorticitygleichung wird das Feld der Stromfunktion vorhergesagt und Sturmzentren an Orten mit minimaler Stromfunktion und maximaler Vorticity (lokale Extrema) geortet. Das in Australien vorgestellte BARO (Holland *et al.*, 1991) nutzt die nicht-divergente barotrope Vorticity-Gleichung. Dieses Modell ist ein interaktives Modell für Kleinrechner, mit dem der Benutzer sehr schnell sehr gute Ergebnisse erzielt. Insbesondere bei ungewöhnlichen Wetter-situationen ist der Benutzer in der Lage, verschiedene Fälle durch Parametervariationen zu simulieren, um so mangelhafte Ergebnisse anderer Modelle zu erkennen.

Mitte der siebziger Jahre wurde das barokline Modell MFM (**M**oveable **F**ine **M**esh) vorgestellt, welches die primitiven Gleichungen in einem im Sturmzentrum verankerten Koordinatensystem löst. Dieses hat sich nicht durchgesetzt, 1988 ist stattdessen das „**Q**uasi-**L**agrangian **M**odel“ QLM in Betrieb genommen worden. Allerdings sind die Fehler bei beiden Modellen ähnlich, etwa in der Qualität von CLIPER (DeMaria *et al.*, 1990).

Nicht zuletzt mit Hilfe der Globalen Zirkulationsmodelle können tropische Zyklonen in ihrer Bewegung beobachtet und vorhergesagt werden. Für das australische NOGAPS (**N**avy **O**perational **G**lobal **A**tmospheric **P**rediction **S**ystem, ein 18-Schichten, T79 - Modell) haben Goerss und Jeffries (1994) die Möglichkeit zur Zyklonenvorhersage untersucht, Heming *et al.* (1995) für das Modell des britischen Wetterdienstes UKMO (United Kingdom Meteorological Office), und Bengtsson *et al.* (1994) für ECHAM3 (**E**uropean **C**enter, **H**amburg model version **3**), das aus einem Modell des ECMWF (des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage) hervorgegangen ist. Eine einmal erkannte Zyklone wird normalerweise gut vorhergesagt, jedoch hatte zumindest ECHAM3 noch 1993 das Problem, zu viele nicht existente Stürme zu prognostizieren.

3.2. HURRAN

In seiner Ursprungsform (Hope und Neumann 1970, 1971) ist HURRAN ein Analog-Vorhersageverfahren für den Atlantik. Es wurden aber ähnliche Verfahren für alle Bassins entwickelt. HURRAN benutzt den „Best Track Data Set“ (vergleiche Kapitel 2), der für den Atlantik seit 1886 vorliegt, und sucht bei jeder Anwendung nach ähnlichen (analogen) Zyklonen - Zugbahnen in der Vergangenheit. Die Positionen, die zum Zeitpunkt der Entwicklung von HURRAN teils in 12-, teils in 24-Stunden-Intervallen vorlagen, werden von HURRAN mittels

eines nichtlinearen Interpolationsverfahren für alle 3 Stunden berechnet. Als „analog“ definiert HURRAN folgendes:

- Großkreis-Entfernung nicht mehr als $2,5^\circ$ (entsprechend 150 Meilen oder ca. 270 km);
- Zeitliche Abweichung nicht größer als 15 Tage;
- Richtungsabweichung nicht mehr als $22,5^\circ$ sowie
- eine gestaffelte zulässige Abweichung von der Bewegungsgeschwindigkeit: 5Knoten bei langsamen Stürmen (<10 Knoten), 50% bei mittleren Zuggeschwindigkeiten (10-20 Knoten) und 10 Knoten bei schnelleren.

Findet das Programm wenigstens 5 historische Stürme, die diese Kriterien erfüllen, so berechnet es aus diesem Ensemble die Vorhersage. Hierbei wird eine Persistenzkorrektur durchgeführt, indem die analogen Zugbahnen mit derselben Zugrichtung und -geschwindigkeit am selben Ort starten wie die aktuelle Zyklone. Der Persistenzfaktor nimmt linear mit der Zeit ab, bis er nach 36 Stunden den Wert Null erreicht. Weiterhin wird aus der Ensemble-Verteilung eine Fehlerwahrscheinlichkeit berechnet.

Das Gütekriterium, wenigstens 5 analoge Zugbahnen finden zu müssen, stellt gleichzeitig die größte Schwäche von HURRAN dar. In einem von drei Fällen ist HURRAN nicht in der Lage, eine Vorhersage zu machen (Neumann, 1972), da sich die Zyklone auf eine für das betreffende Gebiet unübliche Weise bewegt oder überhaupt in einem für die Jahreszeit unüblichen Gebiet auftaucht. Diese Schwäche führt dazu, daß, neben der fehlenden Vorhersage im Einzelfall, ein vernünftiger Vergleich mit anderen Vorhersageverfahren nicht möglich ist. Hierzu ist ein homogener Satz von Vorhersagen nötig, denn nur die Vorhersagen für gleiche Stürme können verglichen werden. In der Vergangenheit ist deshalb HURRAN in Qualitätsvergleichen entweder gar nicht berücksichtigt, mittels der CLIPER - Vorhersagen auf einen „halb-homogenen“ Vorhersagesatz (Neumann und Pelissier, 1981a) hochgerechnet oder (Neumann und Hope, 1972) im Bedarfsfall verändert worden, indem die Kriterien für ein Analogon lockerer gefaßt wurden, wenn keine 5 Analoga gefunden werden konnten. Letzteres ist bei der australischen Version von HURRAN, CYCLOGUE (Annette, 1978), sogar automatisiert worden. Die dortigen Kriterien, die hier nicht gesondert aufgeführt werden sollen, werden mittels räumlicher und jahreszeitlicher Häufigkeit normiert. Auf diese Weise gab es in der Saison 1976/77 von 40 Fällen nur einen, bei dem keine 5 Analoga gefunden wurden. Bei einer strengen Betrachtung sind aber alle diese Möglichkeiten nicht befriedigend.

3.3. CLIPER - Varianten

CLIPER im Atlantik

Um von der Anwesenheit von analogen Zugbahnen unabhängig zu sein, wurde aus einer HURRAN-Fehlerbetrachtung (Neumann und Hope, 1972) heraus das statistische Vorhersageverfahren CLIPER (**CL**imate and **PER**sistence) entwickelt (Neumann, 1972). Es handelt sich um ein Regressionsverfahren dritter Ordnung. Man spricht auch von „simulierten Analogverfahren“ (Hope und Neumann, 1977).

Die Vorhersage V wird dargestellt als Funktion f von physikalischen Daten x . Bei CLIPER wird die Verschiebung gegen die Initialposition vorhergesagt, die zur Verfügung stehenden Daten sind die Position, die zonale und meridionale Geschwindigkeit jeweils zum aktuellen Zeitpunkt und 12 Stunden zuvor, die maximal auftretende Windgeschwindigkeit in der Zyklone und der Kalendertag (Tabelle 4, Anhang). Diese Daten werden in ein Polynom dritten Grades eingesetzt. Gäbe es nur eine Variable x , so würde die Funktion wie folgt aussehen:

$$V = f(x) = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + c_3 \cdot x^3 \quad (2)$$

Für zwei Variablen x, y ergibt sich folgendes:

$$V = f(x, y) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4y + c_5yx + c_6yx^2 + c_7y^2 + c_8y^2x + c_9y^3 \quad (3)$$

Man erkennt die schnell wachsende Anzahl von Termen. Für N Variablen beträgt die Anzahl T der benötigten Terme:

$$T = \frac{(N + 3)!}{6 \cdot N!} \quad (4)$$

Werden also alle 8 Variablen, die für die CLIPER-Vorhersage bereitstehen, genutzt, ergibt sich eine Gesamtzahl von 165 Termen, die betrachtet werden. Hiervon ist einer die Nullpunktverschiebung c_0 , die anderen 164 sind die Variablen selbst sowie Kreuzkorrelationen zweiten und dritten Grades. Diese sind allerdings nicht unabhängig voneinander, sondern teilweise stark miteinander korreliert. Um den Rechenaufwand gering zu halten, wurde untersucht, welche der Vorhersagevariablen (als Vorhersagevariable werden im folgenden die Variablen aus Tabelle 4 sowie die dazugehörigen Kreuzkorrelationen bezeichnet) die größte Varianz in den Zugbahnen bestimmen.

Es werden für die zonale und meridionale Vorhersage jeweils einheitliche Vorhersagevariablen ausgewählt und sodann für die Vorhersagezeitschritte 12 bis 72 Stunden über die Re-

gressionsanalyse die Konstanten c_i bestimmt. Für die zonale Vorhersage werden 7 Vorhersagevariablen P_j benutzt, für die Meridionale 13 (Q_j). Diese finden sich mit den Konstanten $c_{i,j}$ in Tabelle 9 (zonal) und Tabelle 10 (meridional). Es ergibt sich folgendes Vorhersage-Gleichungssystem für die zonalen bzw. meridionalen Verschiebungen DX bzw. DY :

$$DX_i = c_{i,1} + \sum_{j=2}^8 c_{i,j} P_j \quad i = 1 \dots 6 \quad (5)$$

wobei die $c_{i,j}$ und P_j in Tabelle 9 zu finden sind, sowie

$$DY_i = c_{i,1} + \sum_{j=2}^{14} c_{i,j} Q_j \quad i = 1 \dots 6 \quad (6)$$

mit den Werten aus Tabelle 10. Bei beiden Gleichungssystemen definiert die Laufvariable i den Vorhersagezeitpunkt, die Verschiebung wird in nautischen Meilen angegeben. Das Vorhersageintervall beträgt 12 Stunden, das heißt, DX_2 ist die vorhergesagte zonale Verschiebung des Zyklonenzentrums nach 24 Stunden und so fort. Wie aus den Tabellen deutlich wird, gehen in die Gleichungen nicht die Werte selbst ein, sondern es wird (bei den beiden Positionswerten, dem Wind und dem Tag) zuvor der Mittelwert abgezogen.

Der Datensatz, welcher der Regression zugrunde liegt, ist wie bei HURRAN ebenfalls der „Best Track Data Set“, wobei alle Werte vor 1931 ausgeschlossen wurden (seit 1931 liegen die Positionen zwölfstündig vor, vergleiche Kapitel 2). Es wurden alle Werte bis einschließlich 1970 genutzt. Weiterhin wurden nur Zugbahnen betrachtet, die wenigstens über 5 Tage verfolgt werden konnten und auf diese Weise mindestens drei Vorhersagen über 72 Stunden ermöglichten (bei einer 12-stündigen Persistenz vor der ersten Position). Insgesamt ergibt sich ein Datensatz von 3156 Positionen in 286 Stürmen, die sich über die 40 betrachteten Jahre verteilen.

CLIPER im Ost-Pazifik

Das simulierte Analog-Vorhersagemodell EPCLPR (**E**ast **P**acific **C**limate and **P**eRsis-tence) wurde von Neumann und Leftwich (1977) vorgestellt. In den Grundüberlegungen sind CLIPER und EPCLPR identisch, es werden für EPCLPR nur andere Variablen genutzt.

Die EPCLPR zugrunde liegenden 7 physikalischen Variablen sind in Tabelle 5 dargestellt. Diese werden ergänzt durch die Korrelationen zweiten Grades zwischen den Grundvariablen (Tabelle 6). Die Korrelationen dritten Grades, die in CLIPER verwendet werden, werden hier

nicht betrachtet, dafür wird aber auf die Reduzierung der Anzahl der Vorhersagevariablen verzichtet. Die Erfahrungen in den anderen Bassins haben gezeigt (Neumann und Leftwich, 1977), daß die Vorhersagequalität durch die Variablenreduzierung leidet. Damit ergibt sich eine Gesamtzahl von 35 Variablen P_j zuzüglich des Nullpunktes, die durch die Regressionsgleichungen verknüpft werden:

$$\Delta Y_i = C_{36,i} + \sum_{j=1}^{35} C_{i,j} P_j \quad i = 1 \dots 6 \quad (7)$$

und

$$\Delta X_i = Q_{36,i} + \sum_{j=1}^{35} Q_{i,j} P_j \quad i = 1 \dots 6 \quad (8)$$

Die Verschiebungen ΔX_i und ΔY_i sind in nautischen Meilen angegeben. Den Konstanten C bzw. Q liegt der „Best Track“ Datensatz für den Ost-Pazifik zugrunde (vergleiche Kap. 2). Dieser enthält Stürme seit 1949. In die Berechnungen eingegangen sind alle Sturmpositionen bis 1976, die für den jeweiligen Vorhersagezeitraum hinreichend lange existent sind. Damit ergibt sich für die 12-Stunden-Vorhersage ein Datensatz von 2214 Fällen in 298 Stürmen bzw. 1066 Fällen in 178 Stürmen für die 72-Stunden-Vorhersage. Die Werte der Regressionskoeffizienten finden sich in Tabelle 11 (C) und Tabelle 12 (Q).

Andere CLIPER-Versionen

Nahezu seit seiner Einführung dient CLIPER als Vergleichsmodell für andere, insbesondere neue Vorhersagemodelle (Neumann und Pelissier, 1981 a, b). Da zwischen CLIPER-Fehler und offiziellem Vorhersage-Fehler eine hohe Korrelation besteht, ist die CLIPER-Vorhersage auch für eine Einteilung von Stürmen in Schwierigkeitsklassen genutzt worden (Neumann, 1981). Auch haben die unterschiedlichen Bassins verschiedene Schwierigkeitsstufen (Pike und Neumann, 1987), wobei für letztere Arbeit ein einheitliches CLIPER-Modell für alle Bassins geschaffen wurde. Pike und Neumann nutzten aus den „Best Track“ Daten von 1946 bis 1982 den Kalendertag, die Position sowie meridionale und zonale Verschiebungsvektoren zwischen den Zeitpunkten 0 und -12 Stunden sowie -12 und -24 Stunden. Wegen der geringen Sturmhäufigkeit im Nord-Indischen Ozean wurde hier der Datensatz seit 1877 betrachtet. Es gingen alle Terme ersten und zweiten Grades in die Bestimmung der Regressionsgleichungen ein, das sind inklusive Nullpunkt 36 Terme je Richtung (zonal bzw. meridional).

Wie sehr sich CLIPER gerade als Vergleichsmodell durchgesetzt hat, zeigt sich zum Beispiel in WMO (1993), wo allen betroffenen Vorhersagezentren der Gebrauch von CLIPER „dringend empfohlen“ wird - zum einen als Basis-Vorhersage, zum anderen als Vergleichsmöglichkeit für andere Vorhersagemodelle. So gibt es heute CLIPER-Modelle in allen Basins, die sich alle durch die Auswahl der Vorhersagevariablen etwas voneinander unterscheiden:

- Atlantik Neumann, 1972
- östlicher Nordpazifik Neumann und Leftwich, 1977
- westlicher Nordpazifik Aoki, 1979, Xu und Neumann, 1985
- nördlicher Indischer Ozean Neumann und Mandal, 1978
- südlicher Indischer Ozean Neumann und Randrianarison, 1976
- Australien Leslie *et al.*, 1990

Ein Problem von Regressionsmodellen ist ihr Unvermögen, lokal auftretende typische Abweichungen vom „globalen“ Mittel in den Koeffizienten zu berücksichtigen. Ein Beispiel ist der Golf von Mexico, wo die Zyklonen häufig eine für den Atlantik eher untypische Bewegung ausführen und ein unkorrigiertes CLIPER-Modell in der Qualität nachläßt. Daher wurde für den Golf ein lokales CLIPER-Modell erstellt (Merrill, 1980).

4. ANALOG-MODELL IM ATLANTIK

Als Grundlage dieser Arbeit dient ein sogenanntes „selbstadaptierendes Analogmodell“, wie Fraedrich und Rückert (1998) es beschreiben. In diesem Kapitel wird zunächst eine grundlegende Beschreibung der Funktionsweise des Programmpaketes gegeben. Wie im folgenden dargestellt wird, definieren mehrere Parameter und Daten das endgültige Vorhersageprogramm. Diese werden im weiteren Verlauf des Kapitels beschrieben, gefolgt von Ergebnissen des Modells für das atlantische Bassin.

4.1. Allgemeines zu Analog-Modellen

Analog-Modelle beruhen auf der Annahme, daß gleiche (bzw. ähnliche) Anfangszustände auch gleiche (bzw. ähnliche) zeitliche Entwicklungen durchlaufen. Hat das betrachtete System zum Zeitpunkt t den Zustand $\mathbf{x}(t)$, so wird in einer Bibliothek, die zum Beispiel aus den vergangenen Zuständen bestehen kann, nach gleichen oder „analogen“ Zuständen $\mathbf{x}(\tau)$ gesucht und die zeitliche Entwicklung gleichgesetzt:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(\tau) \Rightarrow \mathbf{x}(t + \Delta t) = \mathbf{x}(\tau + \Delta t) \quad (9)$$

In natürlichen Datensätzen wird ein exakt gleicher Zustand nicht unbedingt zu finden sein, so daß die Bedingung $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(\tau)$ in die Bedingung $\mathbf{x}(t) \approx \mathbf{x}(\tau)$ übergeht:

$$\mathbf{x}(t) \approx \mathbf{x}(\tau) \Rightarrow \mathbf{x}(t + \Delta t) \approx \mathbf{x}(\tau + \Delta t) \quad (10)$$

Es bleibt zu definieren, was „ungefähr gleich“ für einen physikalischen Zustand bedeutet. Hier finden sich mehrere Möglichkeiten. Eine koeffizientenweise Definition, wie sie bei HURRAN (siehe Kapitel 3.2) benutzt wird, könnte wie folgt aussehen: „Wenn Referenz und Analogon in der ersten Komponente um nicht mehr als $\Delta x_{1, \max}$ voneinander abweichen, in der zweiten um nicht mehr als $\Delta x_{2, \max}$, ..., dann nenne $\mathbf{x}(t)$ und $\mathbf{x}(\tau)$ analog.“ Je nach Auswahl der gewünschten Kriterien und des Datensatzes wird es so Fälle geben, in denen keine Analoga ge-

funden werden. Bei HURRAN beispielsweise existieren zu jedem dritten Referenzzustand weniger als 5 Analoga. Zu beachten ist, daß diese Definition einer Ähnlichkeit keine Aussage über die Qualität des gefundenen Analogons macht. Hierfür muß eine Metrik $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau))$ definiert werden, im einfachsten Fall der quadratische euklidische Abstand:

$$d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau)) = \sum_i (x_i(t) - x_i(\tau))^2 \quad (11)$$

Da die Komponenten nicht alle die gleiche Wichtigkeit für die Vorhersage haben müssen, führt man einen Koeffizientenvektor \mathbf{G} ein, der die einzelnen Komponenten verschieden stark gewichtet:

$$d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau)) = \sum_i G_i (x_i(t) - x_i(\tau))^2 \quad (12)$$

In einer weiteren Verallgemeinerung wird nicht der komponentenweise gewichtete quadratische Fehler summiert, sondern eine beliebige Funktion $\sigma(\Delta x)$. Damit ergibt sich als Metrik

$$d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau)) = \sum_i G_i \sigma(x_i(t) - x_i(\tau)) \quad (13)$$

Die Funktion $\sigma(r)$ muß gewährleisten, daß die Metrik $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau))$ positiv definit ist. In (12) ist $\sigma(r)$ definiert als

$$\sigma(r) = r^2 \quad (14)$$

Aus Stabilitätsgründen wird folgendes $\sigma(r)$ verwendet:

$$\sigma(r) = \tanh(r^2) \quad (15)$$

Die Erläuterung hierzu findet sich in Kapitel 4.3.

Die Komponenten x_i des Zustandes müssen die gleiche Dimension haben, damit sie addiert werden können. Ist \mathbf{x} ein Punkt im (physikalischen) Phasenraum, in dem die Komponenten unterschiedliche Einheiten haben können, so sind diese zuvor anzugleichen. In der vorliegenden Arbeit wird dies durch eine Normierung mit dem „Klima“ jeder Komponente i erreicht:

$$x_i = \frac{Z_i - \bar{Z}_i}{\sigma(Z_i)}, \quad (16)$$

wobei \mathbf{x} den vom Programm genutzten Zustand sowie \mathbf{Z} den Meßwert mit Mittelwert $\bar{\mathbf{Z}}$ und Standardabweichung $\sigma(\mathbf{Z})$ darstellt.

4.2. Prognose

Für eine gegebene Metrik $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau))$ lassen sich aus einer Bibliothek von Zuständen die nächsten Nachbarn $\mathbf{x}(t_j)$ des Referenzzustands, also die der Referenz ähnlichsten Zustände, ermitteln. Diese werden zur Prognose der zeitlichen Entwicklung der Referenz verwendet. Bei der Betrachtung nur des nächsten Nachbarn $\mathbf{x}(t_1)$ ergibt sich die *direkte Ein-Analogprognose*, bei der der Wert des Analogons nach einem Zeitschritt $\Delta\tau$ die Vorhersage darstellt. Bildet man ein Ensemble der Größe $N_E > 1$, so läßt sich aus diesem auf unterschiedliche Weise eine Prognose erstellen. Ein einfacher Fall einer Ensemblevorhersage mit $N_E > 1$ ist die ungewichtete Mittelwertprognose. Jeder der N_E nächsten Nachbarn geht zu gleichen Teilen in die Vorhersage ein, unabhängig davon, in welcher Entfernung $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t_j))$ nach (13) das einzelne Analogon liegt. Für die z -te Komponente ergibt sich die Vorhersage \hat{x} damit zu

$$\hat{x}_z(t + \Delta\tau) = \frac{1}{N_E} \sum_{j=1}^{N_E} x_z(t_j + \Delta\tau) \quad (17)$$

Andere Möglichkeiten wären gewichtete Mittelwertprognosen oder Prognosen aus Clusteranalysen (siehe unter anderem Anderberg, 1973). Allerdings lassen sich keine Aussagen darüber machen, welche Art von Kombination in der Praxis die besten Ergebnisse bringt. Für große Vorhersagezeitschritte $n\Delta\tau$ ist darüber hinaus eine iterative Vorhersagetechnik möglich, das heißt, man nutzt die Vorhersage für $n=1$ als neuen Referenzzustand für die weitere Vorhersage. Die Adaption der metrischen Koeffizienten G_j , wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben wird, würde jedoch so aufwendig und rechenintensiv werden, daß von einer Untersuchung dieser Technik abgesehen wird.

Bei der Wahl der Prognoseart muß das *Vorhersageziel* bekannt sein. Dieses wird über eine Fehlerfunktion ΔV beschrieben. In diese geht der Prognosefehler ΔP

$$\Delta P = x_z(t + n\Delta\tau) - \hat{x}_z(t + n\Delta\tau) \quad (18)$$

zu beliebigen Vorhersagezeiten $n\Delta\tau$ und für beliebige Komponenten z ein. Will man also zum Beispiel den ebenen Abstand von $\mathbf{x}(t)$ zu $\hat{\mathbf{x}}$ in den ersten beiden Komponenten über die Vorhersagezeitschritte 1 bis 4 gleichzeitig optimieren, würde man folgende Fehlerfunktion definieren:

$$\Delta V = \sum_{n=1}^4 \sum_{z=1}^2 (x_z(t + n\Delta\tau) - \hat{x}_z(t + n\Delta\tau))^2 \quad (19)$$

Zur Feststellung der Modellgüte wird ΔV über einen hinreichend großen Test-Datensatz gemittelt, der von der Bibliothek unabhängig sein muß. Führt man diese Mittelung für verschiedene Modelle über das gleiche Test-Set durch, so lassen sich sofort Aussagen über das zu bevorzugende Modell machen.

4.3. Die Adaption

Lernregel

Das Adaptionsprogramm stellt ein iteratives Verfahren dar, die Koeffizienten G_i möglichst optimal zu bestimmen. Hierfür ist es zunächst notwendig, das *Adaptionsziel*, das mit dem *Vorhersageziel* konsistent sein muß, zu definieren. Dies geschieht über die Festlegung der Funktion des Adaptions-Vorhersagefehlers ΔV_A . Im Unterschied zum Vorhersagefehler ΔV , der das Vorhersageziel festlegt, beschreibt ΔV_A den Abstand zwischen Referenz und einzelner Analogon, nicht zwischen Referenz und Ensembleprognose. Mittels ΔV_A werden N_E optimale Analogona gefunden, die erst in der Prognose zur Minimierung von ΔV kombiniert werden. Soll beispielsweise die zweite Komponente des Zustandes \mathbf{x} nach einem Zeitschritt $\Delta\tau$ vorhergesagt werden, so wird ΔV_A wie folgt definiert:

$$\Delta V_A = \sqrt{(x_2(t + \Delta\tau) - x_2(\tau + \Delta\tau))^2} \quad (20)$$

$\mathbf{x}(t)$ und $\mathbf{x}(\tau)$ stellen hierbei den physikalischen Zustand zum betrachteten Zeitpunkt bzw. das gefundene Analogon dar. Wichtig bei der Definition von ΔV_A ist, daß die Funktion positiv definit ist, da es sonst im Laufe des Verfahrens zu Unstetigkeiten kommt. Ansonsten ist die Wahl des Vorhersagefehlers und damit des Adaptions- / Vorhersagezieles freigestellt. Die tatsächlich optimierten Vorhersagefehler werden im Kapitel 4.4 vorgestellt.

In die Iteration geht neben dem Vorhersagefehler ΔV_A auch die Metrik $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t_j))$ ein, wie sie in (13) definiert ist. Zum Iterationsbeginn werden die Koeffizienten G_i auf 1 gesetzt (*Euklidische Metrik*). Bei folgender Iterationsvorschrift wird davon ausgegangen, daß eine Ensemblevorhersage aus N_E Mitgliedern gebildet wird. Die Adaption optimiert die Gewichte G_i dahingehend, diese N_E besten Nachbarn zu finden. Hierzu wird ein Adaptionsensemble der Größe N_A bestimmt.

1. Es werden für den ersten Zustand $\mathbf{x}(t_1)$ die N_A nächsten Nachbarn¹ gemäß der gegebenen Metrik $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau))$ mit den aktuellen Koeffizienten G_i bestimmt. N_A ist eine Zahl größer als N_E . Sortiert nach $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau))$ seien folgende $\mathbf{x}(\tau_i)$ gefunden worden: $\mathbf{x}(\tau_1), \mathbf{x}(\tau_2), \dots, \mathbf{x}(\tau_{N_E}), \dots, \mathbf{x}(\tau_{N_A})$.
2. Es wird über die N_E nächsten Nachbarn gemittelt. Es ergibt sich eine mittlere Metrik d_a :

1. Der Begriff *Nachbar* wird hier im Sinne von *Analogon* gebraucht.

$$d_a = \sum_i G_i c_{ai} \quad (21)$$

mit c_{ai} =mittlerem Abstand in der i -ten Komponente.

3. Die N_A Analoga werden neu nach ΔV_A sortiert. Es finden sich so die N_E besten Nachbarn:

$$\mathbf{x}(\alpha_1), \mathbf{x}(\alpha_2), \dots, \mathbf{x}(\alpha_{N_E}), \dots, \mathbf{x}(\alpha_{N_A}),$$

wobei $\Delta V_A(\mathbf{x}(\alpha_1)) < \Delta V_A(\mathbf{x}(\alpha_2)) < \dots < \Delta V_A(\mathbf{x}(\alpha_{N_A}))$ sei.

4. Bei der Mittelung über die N_E besten Nachbarn ergibt sich wiederum eine mittlere Metrik d_b :

$$d_b = \sum_i G_i c_{bi} \quad (22)$$

mit c_{bi} =mittlerem Abstand in der i -ten Komponente. Es sei daran erinnert, daß die Abstände, deren Mittelwerte c_{ai} und c_{bi} hier bestimmt werden, gemäß der Funktion $\sigma(r)$ ermittelt werden, die die positive Definitheit der Metrik gewährleisten muß.

5. Die Schritte 1. bis 4. werden für alle Zustände $\mathbf{x}(t_i)$ des Datensatzes durchgeführt und das Mittel über alle Zustände gebildet. Ist in einer beliebigen Komponente z der mittlere Abstand d_{Bz} kleiner als d_{Az} , so liegt in dieser Komponente das mittlere „bessere Analogon“ näher am Referenzzustand als das tatsächlich gefundene. Entsprechend muß diese Komponente höher gewichtet werden. Zur Bestimmung der neuen Koeffizienten wird folgende Lernregel eingeführt:

$$G'_i = G_i \cdot \frac{d_{Ai}}{d_{Bi}} \quad (23)$$

6. Die Schritte 1. bis 5. werden mit den so bestimmten neuen Koeffizienten G' wiederholt, bis ein vorher festgelegtes Abbruchkriterium erfüllt ist. Dieses ist bei Fraedrich und Rückert (1998) dann gegeben, wenn in den letzten $n=10$ Iterationsschritten eine Verringerung des Vorhersagefehlers ΔV_A um weniger als 3% zu beobachten ist. In der vorliegenden Arbeit wurde kein spezielles Abbruchkriterium gewählt, sondern eine vorher festgelegte Anzahl von Iterationen gerechnet. Es hat sich gezeigt, daß das oben genannte Kriterium bei dem Datensatz der tropischen Stürme mehrfach zu früh zu einem Abbruch des Lernens geführt hätte (vergleiche das Unterkapitel “Rechenzeitoptimierung” ab Seite 30).

Die Lernregel, wie sie in (23) gegeben ist, bietet keine Gewährleistung, daß mit den neuen

Koeffizienten tatsächlich bessere (im Sinne der Vorhersagbarkeit) nächste Nachbarn gefunden werden, sie ist heuristisch. Außerdem ist sie unausgewogen, d.h. auch wenige „untypische“ Fälle in den Zuständen $x(t)$ werden in die Optimierung mit eingehen. Das führt zu einem „Überlernen“, also einer (leichten) Vergrößerung des Vorhersagefehlers eines unabhängigen Datensatzes beim Überschreiten einer „optimalen“ Iterationszahl. Um den Einfluß solcher isolierter Zustände auf die Gewichte zu begrenzen, wird die Metrik nach (13) und (15) benutzt. Da für kleine r die Näherung $\tanh(r) \sim r$ gilt, wird der quadratische Abstand bei nicht weit entfernten Analoga nur wenig beeinflusst, der maximale Abstand aber auf den Wert 1 beschränkt. Damit verursachen Zustände, deren nächste Nachbarn weit entfernt liegen, nur eine begrenzte Veränderung der mittleren Abstände nach (21) bzw. (22). Zur Erkennung des „Überlernens“ wird der Datensatz in ein abhängiges *Lernset* und ein unabhängiges *Kontrollset*, welches in der Adaptionphase das spätere, jetzt noch unbekannte *Testset* simuliert, aufgeteilt und für beide der Vorhersagefehler bei jedem Iterationsschritt aufgetragen. Die Koeffizienten werden nur durch das Lernset bestimmt. Die optimalen Koeffizienten G_i finden sich bei dem Iterationsschritt mit dem geringsten Lernset-Fehler. Weil Lernset und Testset niemals identische statistische Eigenschaften haben werden, muß man erwarten, daß die optimale Lösung für das Lernset nicht die ideale Lösung für das Testset ist. Da allerdings die Eigenschaften ähnlich sein sollten, reicht es, Stabilität des Vorhersagefehlers gegen geringe Variationen in den Koeffizienten G_i zu verlangen. Diese Stabilität kann durch Verrauschen der Zustände getestet werden. Daher werden vor jedem Iterationsschritt alle Zustände mit einem leichten normalverteilten Rauschen überzogen, dessen Standardabweichung konstant auf 1‰ der Standardabweichung der normalisierten Zustände festgelegt wird. Die Werte von geographischer Länge bzw. Breite weisen Standardabweichungen von 15° bzw. 7° auf (siehe Tabelle 7), so daß die Zustände eine Größenordnung unter der Datengenauigkeit (vergleiche Kapitel 2) verrauscht werden. Fraedrich und Rückert (1998) haben gezeigt, daß bei theoretischen Modellen ein Rauschen zwischen 0 und etwa 5% nahezu keine Auswirkungen auf den Testsetfehler hat, erst bei noch größerem Rauschen ist eine Abnahme der Vorhersagequalität zu beobachten.

Die absolute Größe der Koeffizienten G_i hat keine Bedeutung. Werden alle G_i mit derselben Konstanten multipliziert, so erhält man dieselben Analoga. Damit die Werte von \mathbf{G} beschränkt bleiben, werden die G_i in jedem Iterationsschritt normiert, so daß das größte G_i den Wert 1.0 hat. In den Darstellungen werden die Gewichte

$$w_i \equiv \frac{G_i}{\sum_i G_i} \quad (24)$$

angegeben, eine Größe, die anschaulich das Gewicht der Komponente i am Abstand $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau))$ darstellt. Ein Gewicht von 0.2 bedeutet also, daß diese Komponente 20% des Abstandes ausmacht.

Wichtig nicht nur bei der Adaption, sondern bei der gesamten Vorhersage ist die Forderung, die nächsten Nachbarn im konstruierten Phasenraum, nicht aber in der Zeit zu finden. Hierzu müssen alle gefundenen Analoga sowohl untereinander als auch zum Referenzzustand unabhängig sein. Dieses kann durch die Einführung eines minimalen zeitlichen Abstandes ΔT zwischen Referenz und Analoga bzw. zwischen den Analoga selbst (mathematisch durch die Bedingungen $|t_i(t) - t| \geq \Delta T$ und $|t_i(t) - t_j(t)| \geq \Delta T$ für alle $i, j \leq N_E$ ausgedrückt) erreicht werden, wobei ΔT hinreichend groß sein muß, um die Unabhängigkeit der Daten zu gewährleisten.

Rechenzeitoptimierung

Ein grundsätzliches Problem von Analogmodellen ist der Zeitaufwand bei der Berechnung. Bei der eigentlichen Vorhersage wird die Bibliothek für jeden Referenzzustand aus dem Testset einmal komplett durchlaufen und der jeweilige Abstand gemäß (13) zwischen Referenz und jedem Zustand berechnet, was bei großen Bibliotheken schon erhebliche Rechenleistung erfordert. Sehr viel mehr Zeit benötigt die Adaptionsphase des betrachteten Programmes. In jedem Iterationsschritt wird die komplette Bibliothek für jeden Zustand aus Lernset und Kontrollset einmal durchsucht, die Metrik zwischen allen Zuständen berechnet - was jeweils einem Zeitaufwand entspricht, der ungefähr proportional zur Dimension der Vektoren \mathbf{x} ist - und zweimal nach Metrik bzw. Vorhersagefehler ΔV sortiert. Günstige Sortieralgorithmen haben einen Zeitbedarf, der mit dem Quadrat der zu sortierenden Anzahl von Zuständen wächst. Dies bedeutet für die Adaptionsdauer eine Proportionalität zu

$$t \sim N \cdot (L_L + L_K) \cdot (L_B \cdot d_x + L_B^2 + N_A^2), \quad (25)$$

wobei N für die Anzahl der Iterationen, L_L bzw. L_K für die Größen von Lernset bzw. Kontrollset und L_B für die Größe der Bibliothek steht. d_x ist die Dimension der Zustände, und N_A die Anzahl der ausgesuchten Analoga. Da $(L_L + L_K) = L_B$ ist, ergeben sich für jeden Iterationsschritt grob $L_B^3 + d_x \cdot L_B^2 + N_A^2 \cdot L_B$ Arbeitsschritte. Enthält die Bibliothek also 10^4 Zustände (dies ist näherungsweise die Größenordnung der Bibliothek der atlantischen Hurrikane), so erfordert jeder Iterationsschritt mehr als 10^{12} Arbeitsschritte. Geht man weiterhin von nur 4 Fließkommaoperationen pro Arbeitsschritt aus - eine Zahl, die in etwa auf das die Gesamtdauer beherrschende Sortierprogramm zutrifft-, so benötigt die CRAY-C90 des Deutschen

Klimarechenzentrums mit theoretisch verfügbaren 1,5 Gigaflops ($=1,5 \cdot 10^9$ Fließkommaoperationen pro Sekunde) Rechenleistung 2667 Sekunden pro Iteration, also etwa 45 Minuten. Für 12000 Zustände in der Bibliothek erhöht sich die benötigte theoretische Zeit auf 75 Minuten. Aufgrund der hohen Auslastung der CRAY ist aber nur ein Teil der Rechenleistung verfügbar. Gemessen wird eine benötigte Zeit von rund 150 Minuten pro Iterationsschritt bei einer Bibliotheksgröße von 12000 Zuständen. Eine weitere Verlängerung der Rechenzeit wird durch eine umfangreichere Definition des Adaptionsfehlers ΔV_A verursacht, indem zum Beispiel durch Berücksichtigung der Kugelgestalt der Erde Winkelfunktionen genutzt werden.

Für einen Vergleich verschiedener Modelle genügt es, an einer Teilmenge der Bibliothek zu lernen. Wird das Lernset bei einer Bibliotheksgröße von 12000 Vektoren auf 1000 zufällig gewählte Zustände beschränkt, die aus dem gesamten Bibliotheksumfang stammen, so erniedrigt sich die theoretisch benötigte Rechenzeit auf deutlich unter 10 Minuten je Iteration. Der Vorhersagefehler des Testsets erweist sich als erstaunlich stabil gegenüber Schwankungen in der Lernsetgröße. Zur Erlangung einer unter Umständen besseren Lösung ist es möglich, das Lernset mit zunehmender Iterationszahl zu inkrementieren, also wachsen zu lassen. So erlangen die G_i zunächst zügig die ungefähr korrekte Größenordnung, um dann mit zunehmender Lernsetgröße langsamer und genauer zum endgültigen Wert zu konvergieren. Die Abhängigkeit des Vorhersagefehlers von der Lernsetgröße wird beispielhaft an einer Adaption untersucht, bei der eine Ensemblevorhersage mit 18 Mitgliedern gelernt wird. Optimiert werden soll der Vorhersagefehler

$$\Delta V = \sum_{n=1}^{12} \sum_{i=1}^{N_E} (\Delta x_i^2(n \cdot \Delta\tau) + \Delta y_i^2(n \cdot \Delta\tau)) \quad (26)$$

für eine Bibliothek von 10423 atlantischen Sturmpositionen, wobei das Vorhersageintervall $\Delta\tau=6$ Std. beträgt und Δx_i bzw Δy_i die Differenz zwischen Referenz und nächstem Nachbar t_i zum jeweiligen Vorhersagezeitpunkt darstellt. Die Modellparameter sind dem in Kapitel 4.4 vorgestellten Modell A zu entnehmen. Die gegen die später benutzte Bibliothek um etwa 2000 Zustände verkleinerte Bibliothek enthält alle gespeicherten Sturmpositionen bis einschließlich 1970. Die zu untersuchende Größe ist der Vorhersagefehler des Testsets ΔV_T , der aus Gründen der Anschaulichkeit als mittlere Großkreisentfernung von 72-Stundenvorhersage und zugehörigem wahren Ereignis, nicht aber als summierter Fehler wie ΔV gewählt wird.

Nach einer Phase des groben Einschwingens mit hohem N_A (siehe unten) über 50 Iterationsschritte wird die Lernsetgröße systematisch alle 50 Iterationen erhöht, N_A als $N_A=N_E+1$ gewählt. Das Kontrollset hat eine konstante Größe von 500 Vektoren, die Größe des Lernsets

erhöht sich von anfangs 1000 Zuständen (bis Iteration 100) über 2000, 4000 und 8000 auf die gesamte Bibliothek von 10422 Zuständen (je 50 Iterationen), wobei im letzten Fall das Kontrollset auf die minimale Größe von 1 gesetzt wird. Der Verlauf von ΔV für Lern- und Kontrollset und ΔV_T für das Testset gegen die Iterationsdauer ist in Abbildung 3b dargestellt. In Abbildung 3a finden sich die Gewichte w_i , wobei an dieser Stelle nur der Verlauf der Gewichte mit zunehmender Iterationszahl interessiert, nicht aber, welche physikalische Größe hinter welchem Gewicht steht¹. Man erkennt, daß jede Lernsetvergrößerung zu veränderten Trends in der Gewicht-Entwicklung führt. Der Fehler des Testsets ändert sich nur wenig. Bei einer Lernsetgröße von 1000 Zuständen, wie sie für die Adaptionen verwendet wird, ist der Testsetfehler mit 796.8 km (Minimum für 1000 Zustände) um nur 0.4% höher als bei dem minimalen Testsetfehler für die gesamte Bibliothek von 10422 Zuständen bei Iteration 261, der 793.5 km beträgt. Für eine Lernsetgröße von 2000 Zuständen beträgt der Unterschied zur Gesamtbibliothek weniger als 0.1% (794.0 km bei Iterationsschritt 142). Allerdings fällt auf, daß die maximale Lernsetgröße nicht auch den minimalen Lernsetfehler ergibt, dieser liegt bei einer Lernsetgröße von 8000 in der Größenordnung von 791.2 km, das sind 0.3% weniger als für das vollständige Lernset und 0.7% weniger als bei der Lernsetgröße 1000.

Eine weitere Methode, zwar nicht den Rechenzeitbedarf pro Iterationsschritt, aber die Anzahl der benötigten Iterationen zu reduzieren, liegt in der Wahl von N_A . Fraedrich und Rückert (1998) haben für ihre Ein-Analogprognose $N_A=N_E+1$ gewählt, also aus den beiden nächsten Nachbarn den Besseren bestimmt. Für die hier vorliegende Ensembleadaption gibt es die Möglichkeiten, entweder ebenfalls die N_E besten Nachbarn aus N_E+1 nächsten zu suchen oder aus (theoretisch) beliebig vielen. Bei einer Ensemblegröße von zum Beispiel $N_E=18$ kann man erwarten, daß die Änderung der G_i größer ausfällt, wenn man die besten 18 aus 36 nächsten Nachbarn auswählt, als wenn man nur die nächsten 19 Nachbarn zur Verfügung hat. Letzteres verspricht aber durch die kleineren Änderungen eine genauere Bestimmung. Auch birgt eine große Änderung der Koeffizienten die Gefahr von Instabilitäten, indem im nächsten Iterationsschritt für einen Referenzzustand ein komplett anderer Satz von N_A nächsten Nachbarn gefunden werden kann. Es muß also untersucht werden, ob eine unterschiedliche Wahl von N_A einen Einfluß auf die Konvergenzgeschwindigkeit und auf die Größe der „optimalen Gewichte“ hat.

1. Die Zuordnung der Gewichte zu ihrem physikalischen Hintergrund erfolgt in Kapitel 4.6

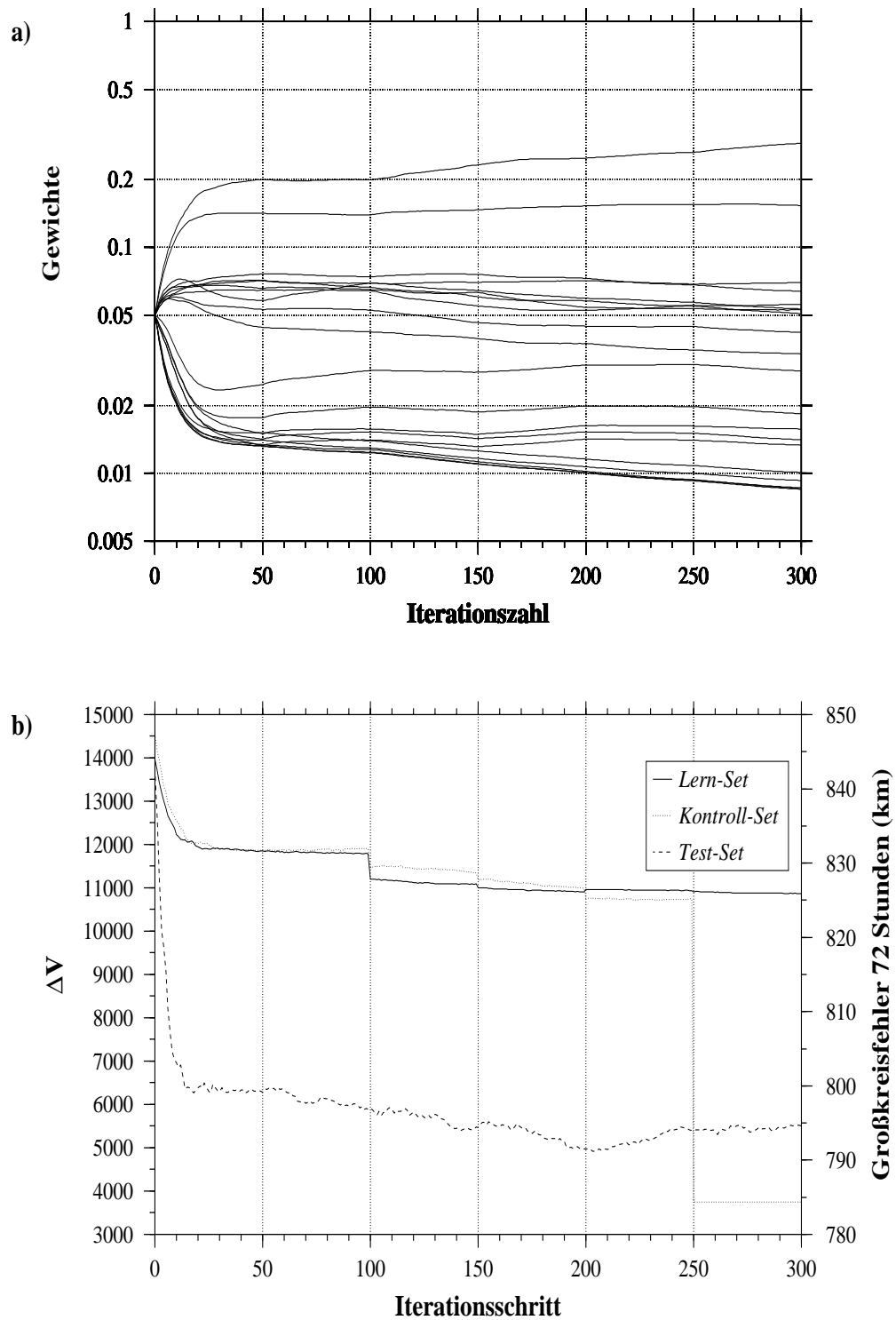


Abbildung 3: Abhängigkeit von Lernset-Größe: (a) Gewichte; (b) Summierter Fehler von Lern- und Kontrollset gemäß (26) und Testsetfehler

Wie bei der oben durchgeführten Untersuchung der Adaptionssensitivität auf die Lernsetgröße wird für diese Untersuchung der Datensatz der atlantischen Sturmpositionen mit insgesamt 10423 Zuständen betrachtet, die Adaption erfolgt bei einer Lernsetgröße von 1000 für eine Ensemblegröße von $N_E=18$. Der Adaptionsverlauf für unterschiedliche Größen von N_A ist in Abbildung 4 dargestellt, wobei in 4a die Entwicklung der Gewichte, im 4b die des Vorhersagefehlers des Lernsets (26) dargestellt ist. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Gewichte, sondern nur die der Zustandskomponenten 1 (aktuelle geographische Länge der Position), 2 (aktuelle geographische Breite), 3 (mittlere zonale Windgeschwindigkeit der letzten 6 Stunden) und 20 (Kalendertag)¹ dargestellt. Wiederum spielt die absolute Größe der einzelnen Komponenten keine Rolle, sondern nur der Konvergenzverlauf. Man erkennt, daß die zur Konvergenz benötigte Iterationszahl mit zunehmenden N_A wie erwartet abnimmt, da die Koeffizienten sich anfangs stärker ändern. Darüber hinaus stellt man fest, daß die Gewichte bei unterschiedlichem N_A nicht zum selben Wert hin konvergieren, sondern zu leicht unterschiedlichen, wobei die Adaption bei hohen N_A zunehmend zum anfänglichen Überlernen neigt. Besonders deutlich wird dies bei den Koeffizienten 1 und 2, die nur ein geringes Gewicht erhalten. Durch die logarithmische Auftragung der Gewichte und die damit verbundene Dehnung der Darstellung zu kleinen Werten hin sieht man deutlich den Wiederanstieg der Gewichte nach Durchlaufen eines Minimums bei ungefähr $N=20$. Der Wiederanstieg geht dabei aber langsamer vonstatten als die Konvergenz bei kleinen N_A , so daß in diesem Bereich die Instabilität bei großen N_A sogar kleiner ist. Der minimale Lernset-Fehler wird auch bei großen N_A erst bei einer Iterationszahl zwischen 180 und 200 erreicht, ebenso wie bei $N_A=N_E+1$. Wird allerdings das oben erwähnte Abbruchkriterium von Fraedrich und Rückert (1998) genutzt, erzielt man deutlich verringerte Rechenzeiten.

Die minimalen Lernset-Fehler (26) für die vier unterschiedlichen N_A liegen zwischen 11502 ($N_A=N_E+2$) und 11859 ($N_A=N_E+18$) und umspannen damit einen Bereich von ca. 3%. Wählt man als Vorhersageziel im Testset, das hier 1566 Fälle umfaßt (vergleiche Kapitel 4.5), die Großkreisentfernung der 72-Stunden-Vorhersage von der Beobachtung, so findet man Unterschiede von unter einem Prozent zwischen den betrachteten Modellen. Das Minimum liegt bei $N_A=N_E+2$ mit $\Delta V_2=789.7$ km und nahezu nicht meßbarem Unterschied zu $N_A=N_E+1$ ($\Delta V_1=790.4$ km, das sind 0.09% mehr als ΔV_2). $N_A=N_E+9$ bzw. $N_A=N_E+18$ erzeugen bei der jeweiligen optimalen Iteration Vorhersagefehler von 797.6 km ($\Delta V_2+1.0\%$) bzw. 795.3 km

1. Diese Auswahl ist rein willkürlich erfolgt und nicht begründet.

($\Delta V_2+0.7\%$). Etwas anders sieht die Situation bei der kurzfristigen Vorhersage aus: nach 12 Stunden ist der Fehler für das kleinste N_A noch am größten, für $N_A=N_E+2$ am kleinsten (81.8km bzw. 80.0km, das entspricht rund 2.5 % Unterschied).

Insgesamt bedeutet dies, daß mit zunehmendem N_E auch der Unterschied zu N_A leicht erhöht werden kann, ohne daß die Qualität des Ergebnisses (gemessen am Testset) leidet. Damit kann die benötigte Iterationszahl bis zur Konvergenz der Gewichte deutlich reduziert werden, sofern ein Abbruchkriterium wie bei Fraedrich und Rückert (1998) gewählt wird, wo eine Reduzierung des Lernset-Fehlers um mindestens 3% in den letzten 10 Iterationsschritten gefordert wird. Bei der Nutzung einer solchen Bedingung ist aber darauf zu achten, daß sie an die Ensemblegröße angepaßt wird. Für $N_A=N_E+1$ erfolgt nämlich die Konvergenz bereits am Anfang so langsam, daß in den ersten 10 Iterationsschritten der Lernset-Fehler von 13970 im Schritt 0 (Euklidische Metrik) auf nur 13622 nach dem 10. Schritt abnimmt, eine Abnahme um weniger als 2.5%. Der somit gefundene minimale Lernset-Fehler von 13614 im Schritt 9 liegt aber um 14.5% über dem minimalen Lernset-Fehler, der (bis zum Schritt 300) bei der Iterationszahl 181 den Wert 11643 annimmt. Für zunehmende N_A nimmt der Effekt in etwa umgekehrt proportional zur Differenz N_A-N_E ab, von 14.5% bei $N_A-N_E=1$ über 7.5% bei $N_A-N_E=2$ und 1.1% bei $N_A-N_E=9$ bis 0.65% bei $N_A-N_E=18$ (siehe Abbildung 5). Kommt also das oben genannte Abbruchkriterium zur Anwendung, so steigt die Genauigkeit mit zunehmendem N_A , wird dagegen das absolute¹ Minimum des Lernset-Fehler gesucht, so darf N_A nur leicht erhöht werden.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß weder die Größe des Lernsets bei gegebener Bibliothek noch die Größe des Adaptionensembles N_A wesentliche Auswirkungen auf die Genauigkeit der Adaption haben. Das gefundene Minimum im Vorhersagefehler bei leicht erhöhtem N_A ($N_{A,min}+1$ bei $N_E=18$) läßt keine einheitliche optimale Adaptionsgröße für alle Ensemblegrößen N_E erwarten. Eine zur Vergleichbarkeit der Modellvariationen einheitliche Festlegung der Adaptionsgröße auf $N_A=N_E+1$ sowie der Lernsetgröße auf 1000 Zustände ist daher gut zu vertreten.

1. Das Problem hierbei ist allerdings, wieviele Iterationsschritte man vorgeben will. Um wirklich sicher zu sein, den minimalen Lernset-Fehler gefunden zu haben, müßte man theoretisch unendlich lange adaptieren. Da das nicht möglich ist, muß immer ein praktikables Abbruchkriterium gewählt werden.

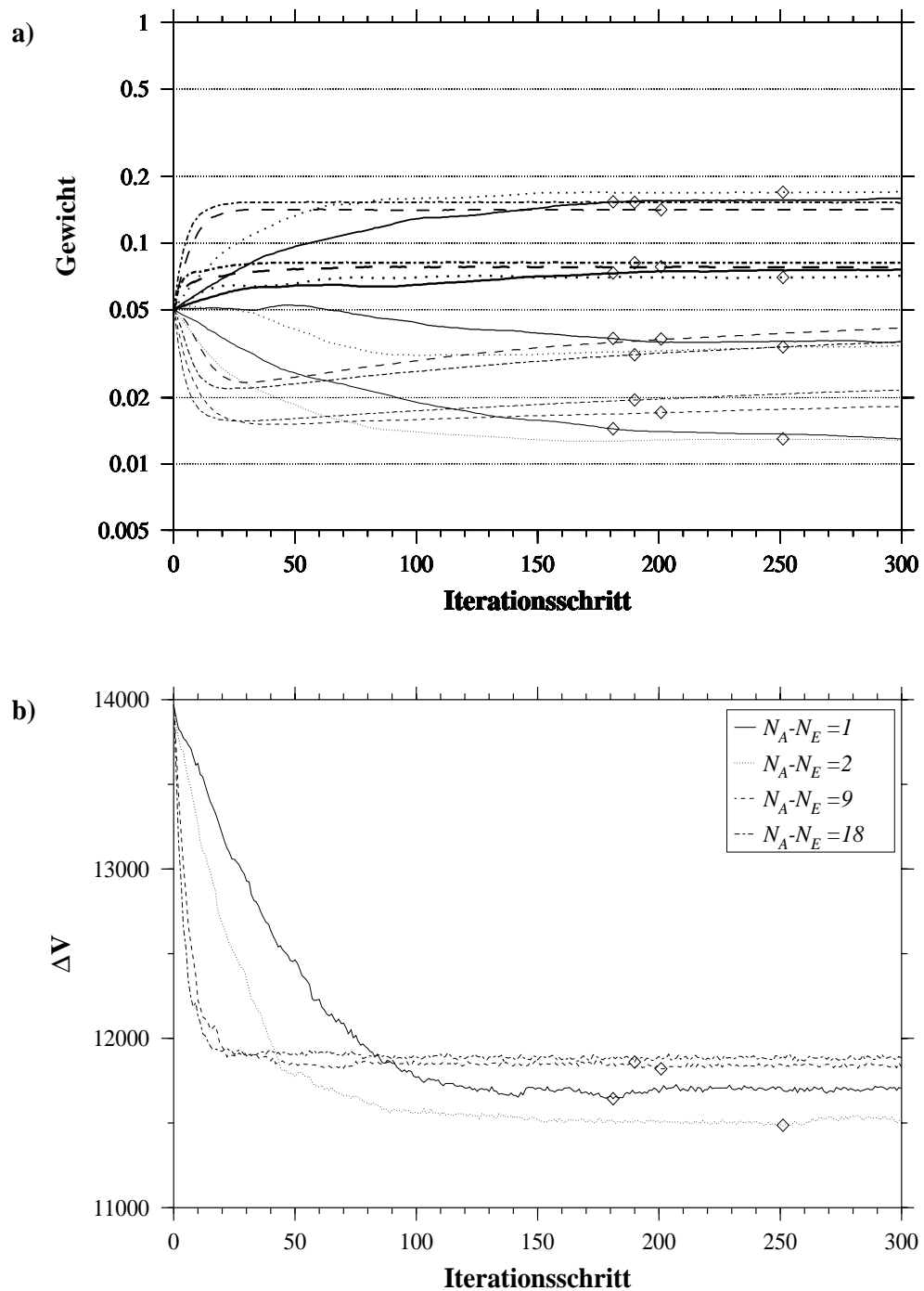


Abbildung 4: Stabilität der Adaption gegen Änderung von N_A : (a) Gewichte (nicht alle Komponenten dargestellt, von oben nach unten stellen die vier Linienbündel die Komponenten 20, 3, 1 und 2 dar); (b) summierter Vorhersagefehler des Lernsets

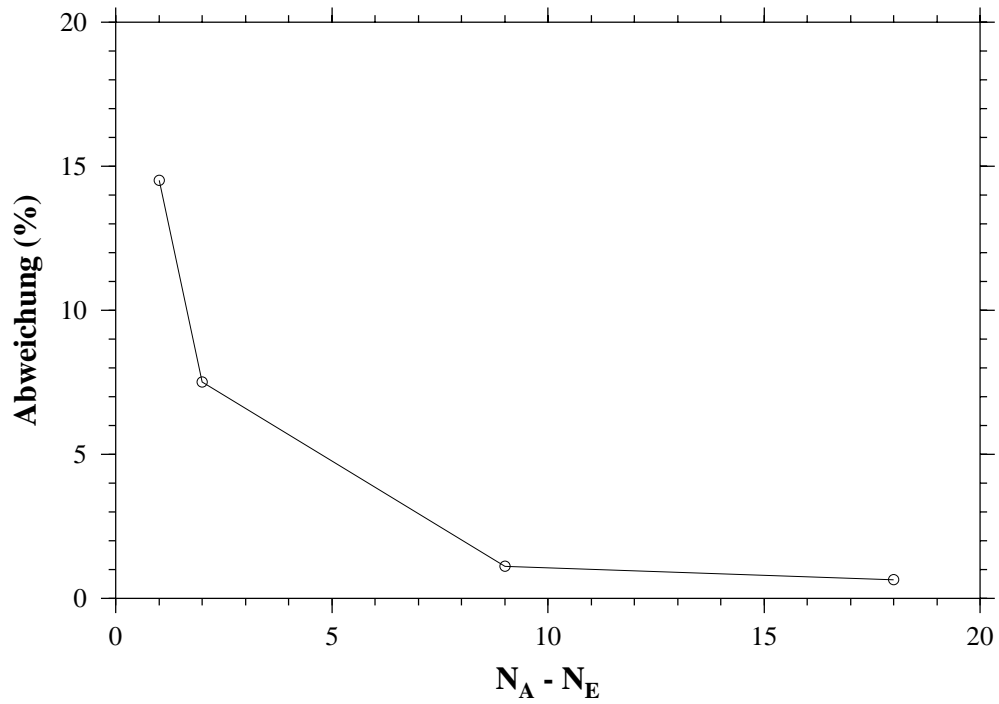


Abbildung 5: Abweichung zwischen dem minimalem Lernsetfehler bei Adaptionabbruch gemäß Fraedrich und Rückert (1998) und dem über 300 Iterationen gefundenen minimalem Lernsetfehler in Abhängigkeit von der Größe N_A bei einer Ensemblegröße von $N_E=18$

4.4. Phasenraum und Parameter

Wie schon weiter vorn ausgeführt wurde, bestimmen verschiedene Dateiformate und Parameter das Vorhersagemodell, die im weiteren vorgestellt werden. Folgende Größen müssen definiert werden:

- Phasenraum mit den Zuständen $\mathbf{x}(t)$;
- Metrik $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau))$;
- Prognosefunktion $\hat{\mathbf{x}}$;
- Vorhersagefehler ΔV der Prognose;
- Adaptionfehler ΔV_A ;
- Ensemblegröße N_E ;
- Adaptiongröße N_A bzw. die Differenz $N_A - N_E$;
- Unabhängigkeitszeitfenster ΔT .

Im Zusammenhang mit den Vorhersagefehlern ΔV und ΔV_A muß der Vorhersagezeitraum festgelegt werden. Die Lernregel des Adaptionprogrammes (23) optimiert die Koeffizienten G_i nur für konstante Rahmenbedingungen, nicht aber die Rahmenbedingungen selber. Da die Adaptionen sehr zeitaufwendig sind (vergleiche Kapitel 4.3), ist eine Reduzierung der zu untersuchenden Freiheitsgrade notwendig. Zu einem wesentlichen Teil geschieht das bereits durch die Festlegung des Vorhersageziels.

Vorhersageziel

Es wird eine Positionsprognose aus einem Ensemble von N_E Mitgliedern für den Vorhersagezeitraum bis maximal 72 Stunden erstellt. Die Ensemblemitglieder werden mittels der Metrik $d(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(\tau))$ gemäß (13) und (15) aus einer Bibliothek von Phasenraumzuständen bestimmt und durch eine ungewichtete Mittelwertbildung kombiniert, bei der die Analoga auf die Position der Referenz verschoben werden. Das wird durch die Prognosefunktion

$$\hat{x}_i(t + n\Delta\tau) = \frac{1}{N_E} \sum_{j=1}^{N_E} [x_i(t_j + n\Delta\tau) + x_i(t) - x_i(t_j)] \quad (27)$$

erreicht, wobei i die Werte 1 und 2 für die beiden Positionskomponenten des Phasenraumes (siehe unten) annimmt, $\Delta\tau$ den zeitlichen Abstand der Zustände von 6 Stunden darstellt und n den Vorhersagezeitpunkt definiert. Eine Prognose der übrigen Komponenten ist ebenso möglich, allerdings muß beachtet werden, welche Komponenten durch die Adaption optimiert vorhergesagt werden können. Der Prognosefehler ΔV wird als Großkreisentfernung (1) zwischen

Beobachtung und Prognose definiert. Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, daß eine Erhöhung von N_A nur zu einer leichten Veränderung des Prognosefehlers führen wird, daher wird, wie dort bereits erwähnt, für jede Ensemblegröße N_E die Adaptiongröße N_A auf den Wert $N_A = N_E + 1$ gesetzt, um die Vergleichbarkeit der Versuche zu gewährleisten.

Phasenraum

Es werden zwei verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, den Phasenraum M zu konstruieren, wobei mehrere Überlegungen eingehen. Die Vektoren $\mathbf{x}(t)$ müssen den Zustand des Systems eindeutig beschreiben, insbesondere muß die Dimension des Phasenraumes hinreichend hoch sein, um das System einzubetten. Bei einem dynamischen System mit der Attraktordimension $dim(A)$ ist die hinreichende Phasenraumdimension $dim(M)$ gegeben durch den Satz von Mañe:

$$dim(M) > d_s \equiv 2dim(A) + 1 \quad (\text{Mañe, 1981}). \quad (28)$$

Dimensionsbestimmungen der Dynamik von tropischen Zyklonenzugbahnen ergeben Werte von 4.86 im Nord-West Pazifik (Peng und Yan, 1994), etwa 6 für den Nord-Indischen Ozean (Pal, 1991) und zwischen 6 und 8 für das australische Bassin (Fraedrich und Leslie, 1989). Damit ergeben sich minimale Phasenraumdimensionen zwischen 10 und 17. Für den Atlantik liegt eine solche Bestimmung nicht vor, insofern wird hier ebenfalls von minimal 17 Dimensionen ausgegangen. Da Pike und Neumann (1987) das australische Bassin als das am schwersten vorherzusagende identifiziert haben, kann man mit der gebotenen Vorsicht davon ausgehen, daß die Dynamik der australischen Zyklonen auch die größte Komplexität, also Attraktordimension hat. Daß dieser Schluß nicht unbedingt korrekt zu sein braucht, erkennt man an dem Wert für den Nord-Indischen Ozean. Obwohl in diesem nach Pike und Neumann (1987) die Zyklonenzugbahnen besonders leicht vorherzusagen sind, liegt die von Pal bestimmte Dimension über derjenigen im Nord-West Pazifik. Allerdings weist Rückert (1995) darauf hin, daß man bei endlichen und fehlerbehafteten Zeitreihen grundsätzlich mit ungenauen Dimensionsschätzungen rechnen muß. Die geschätzte Phasenraumdimension für den Atlantik stimmt gut mit der Anzahl der Vorhersagevariablen in CLIPER überein, dort wird ein Zustand in Breite und Länge durch insgesamt 18 verschiedene Variablen (vergleiche Tabelle 9 und Tabelle 10 auf Seite 95) beschrieben.

Berücksichtigt man, daß der Druckwert in dem ursprünglichen Datensatz nur sehr lückenhaft vorliegt, verbleiben pro Zustand 4 Angaben zur Beschreibung: Zeit, Ort (Länge und Breite) und Intensität in Form der maximal gemessenen Windgeschwindigkeit. Um den

Phasenraum hinreichend zu dimensionieren, werden analog zu Rückert (1995) sogenannte Delayvektoren \mathbf{x} in einer etwas veränderten Form eingeführt. In der ursprünglichen Form enthält der Delayvektor als Komponenten l aufeinander folgende Meßwerte einer univariaten Observablen der Systemzustände. Es ist $x_k = \sigma(z(t = k\tau_s))$, wobei σ der gemessene Wert, z der Zustand zum Zeitpunkt t und τ_s die Samplingzeit, also das Meßintervall ist. Der Delayvektor \mathbf{x} hat dann die Form

$$\mathbf{x}_k = (x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-(l-1)}) \quad (29)$$

Auf diese Art erhält man für $l \geq d_s$ eine eindeutige (also injektive) Zuordnung zwischen System A mit seinen Zuständen z und dem sogenannten rekonstruierten Phasenraum M mit den Delayvektoren \mathbf{x} . Für diesen rekonstruierten Phasenraum M läßt sich nun eine rekonstruierte Dynamik f^r finden, die jeden beliebigen Delayvektor \mathbf{x}_k auf den Entwicklungszustand \mathbf{x}_{k+T} abbildet. Aufgrund der Injektivität zwischen A und M läßt sich so die ursprüngliche Dynamik F^T des Systems rekonstruieren, so daß eine Vorhersage im rekonstruierten Phasenraum einer Prognose des eigentlichen Systems entspricht. Für eine ausführliche Betrachtung des Prinzips der Delayvektoren und seiner Probleme wird auf Rückert (1995) verwiesen.

Die Delayvektoren müssen nicht univariat, sondern können auch multivariat sein. Dies wird zum Beispiel bei Fraedrich und Rückert (1998) bei der Vorhersage einer Komponente des Lorenz-Attraktors (und anderer theoretischer dynamischer Modelle) ausgenutzt. Auf diese Weise wird eine mehrdimensionale Trajektorie (bzw. ein Teil einer Trajektorie) auf den Phasenraum projiziert. In der vorliegenden Arbeit sind die x_k selbst 4-dimensional und enthalten Länge und Breite des Zustandes sowie zonale und meridionale Verschiebung in den letzten 6 Stunden. Der Delayvektor \mathbf{x}_k enthält die x_k bis zum Zeitpunkt $k-3$, bei einer Samplingzeit von 6 Stunden also die Positionen vor 18 Stunden und die Verschiebungen zwischen 24 Stunden und 18 Stunden vor der Referenzzeit. Darüber hinaus wird der Vektor \mathbf{x}_k durch weitere Komponenten ergänzt, so daß man bei strenger Betrachtung nicht von reinen Delayvektoren sprechen kann. Diese zusätzlichen Informationen sind die Position vor 24 Stunden, der maximale Wind und die Nummer des Kalendertages im Jahr (beginnend mit 1 am 1. Januar), die beiden letzteren zum Referenzzeitpunkt. Insgesamt entsteht so ein 20-dimensionaler Phasenraum, der in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum von 1886 bis 1996 insgesamt 24839 Zustände enthält. Die Variante des Modells, die diesen Phasenraum benutzt, wird zukünftig als *Modell A* bezeichnet. Die Komponenten des Phasenraumes mit Durchschnittswert und Standardabweichung über den gesamten Datensatz sind in Tabelle 7 dargestellt.

Die zweite betrachtete Möglichkeit, den Phasenraum zu konstruieren, ergibt sich aus der Überlegung, die die größte Varianz der Zyklonenbewegung erklärenden Variablen als Phasenraumkomponenten zu nutzen. Diese werden durch die CLIPER-Variablen beschrieben, wie sie in Tabelle 9 und Tabelle 10 genannt sind. Da das Programm auf die vorherzusagenden Größen angewiesen ist, wurde zusätzlich als erste und zweite Komponente die Position (Länge bzw. Breite) eingefügt. Es gehen wie in Modell A die Positionen bis 24 Stunden vor dem Referenzzeitpunkt ein, daher hat auch dieser Datensatz 24839 Zustände. Die Durchschnittswerte der Komponenten von Modell B sind in Tabelle 8 aufgeführt. Die Tatsache, daß U_0 und V_0 doppelt vorkommen, ist in der Programmentwicklung begründet und hat keinen Einfluß auf die Ergebnisse, allerdings auf Adaption und Größe der Gewichte. Da sich weiterhin die Komponenten 1 und 9 sowie 2 und 5 jeweils nur durch eine Konstante voneinander unterscheiden, verbleiben 18 unabhängige Komponenten, die letztlich den Phasenraum aufspannen. Bei der Adaption werden jedoch alle 22 Komponenten betrachtet, was wiederum in der Programmentwicklung begründet liegt.

Sonstige Parameter

Das Unabhängigkeitszeitfenster ΔT kann in einem relativ weiten Rahmen liegen, ohne daß ein Einfluß auf die Vorhersagequalität sichtbar wird. Eine exakte Unabhängigkeit könnte erreicht werden, indem die Zugehörigkeit zu verschiedenen Stürmen für zu vergleichende Zustände gefordert wird. Das geschieht hier nicht, sondern es wird ein minimaler zeitlicher Abstand von 20 Zeitschritten á 6 Stunden, also von 5 Tagen gefordert. Bei diesem ΔT kann von hinreichender Unabhängigkeit der Zustände ausgegangen werden.

Die Adaption erfolgt durch Optimierung der Zugbahn, das heißt, es soll der über den Vorhersagezeitraum summierte Vorhersagefehler minimiert werden. Das geschieht über den Adaptionfehler

$$\Delta V_A = \sum_{n=1}^{12} \sum_{c=1}^2 [x_c(t+n\Delta\tau) - x_c(t_j+n\Delta\tau) - x_c(t) + x_c(t_j)]^2 \quad (30)$$

wobei x_c hier die physikalische Größe (geographische Länge und Breite), nicht aber die normalisierte Größe kennzeichnet. Es wird also der pythagoräische Abstand in den ersten beiden Komponenten zwischen Beobachtung nach $6n$ Stunden und zugehörigem Analogon $x(t_j)$, das entsprechend (27) in die Referenz verschoben wird, berechnet und über den Vorhersagezeitraum bis 72 Stunden aufsummiert. Die Kugelgestalt der Erde wird hierbei vernachlässigt, was einerseits im Gegensatz zu den Winkelfunktionen des Großkreises (1) die Rechnerkapazitäten

weniger belastet, andererseits aber keinen großen Fehler verursacht, da es sich um eine Minimierung handelt. Allerdings wird hierbei mit zunehmender Breite die zonale Entfernung höher bewertet als die meridionale. Weiterhin wird eine Vorhersage einzeln zu den Vorhersagepunkten (in 12-stündigen Intervallen bis 72 Stunden) durchgeführt sowie eine Trennung in Breiten- bzw. Längenvorhersage untersucht. Dies geschieht über die Adaptionfehler

$$\Delta V_A = \sum_{c=1}^2 [x_c(t+n\Delta\tau) - x_c(t_j+n\Delta\tau) - x_c(t) + x_c(t_j)]^2 \quad \text{für } n=1\dots 6 \quad (31)$$

bei der Einzelvorhersage, wobei $\Delta\tau=12$ Stunden ist, bzw.

$$\Delta V_A = \sum_{n=1}^{12} [x_c(t+n\Delta\tau) - x_c(t_j+n\Delta\tau) - x_c(t) + x_c(t_j)]^2 \quad \text{für } c=1,2 \quad (32)$$

bei der Breiten- und Längenvorhersage über den gesamten Vorhersagezeitraum mit einer Vorhersageperiode von $\Delta\tau=6$ Stunden. Die Einzelvorhersage von Länge und Breite zu bestimmten Zeitpunkten wird wegen der Vielzahl der hierfür nötigen Adaptionen nicht überprüft.

Als letzter Freiheitsgrad bleibt die Ensemblegröße N_E zu untersuchen. Diese wird für beide Modelle (A und B) und die integrierte Adaption nach (30) variiert. Der Vergleich mit den getrennten Adaptionen nach Zeit (31) bzw. Komponente (32) erfolgt dann für die „optimale“ Ensemblegröße, da eine Variation der Ensemblegröße bei diesen wegen der hohen Anzahl von nötigen Adaptionen zu zeitintensiv gewesen wäre.

4.5. Verifikation

Da verschiedene Vorhersagemodelle nur an der Prognose identischer Zustände verglichen werden können, sind zunächst die Rahmenbedingungen für die Verifikation zu bestimmen. Die Vorhersage erfolgt bis maximal 72 Stunden bzw. 12 Zeitschritte in die Zukunft. Daher werden sowohl in der Adaptionphase als auch bei der Verifikation durch das Testset nur Zustände betrachtet, die mindestens 12 nachfolgende gespeicherte Positionen bis zum Absterben der jeweiligen Zyklone aufweisen. Nur dann ist überhaupt eine Fehlerbestimmung möglich. Diese Einschränkung erfolgt ebenso, wenn bei der *Zeitpunkt*vorhersage eine Kurzfristprognose adaptiert wird, was theoretisch eine Vergrößerung des jeweiligen Datensatzes ermöglichen würde. Diese Unterscheidung des Datensatzes nach Vorhersagezeitpunkten wurde in der Vergangenheit häufig durchgeführt (zum Beispiel DeMaria *et al*, 1990; Elsberry und Peak, 1986; Goerss und Jeffries, 1994; und andere), wird hier aber verworfen, da so die Vergleichbarkeit mit den Modellen mit Adaption über den gesamten Prognosezeitraum verloren gehen würde. Als Nachteil wird dafür in Kauf genommen, daß kleinere Datensätze unter Umständen zu schlechteren Analoga führen können. Insbesondere die Tatsache, daß tropische Zyklonen meist kurz nach dem *Landfall* aufhören zu existieren (bzw. auf Intensitäten unterhalb Wirbelsturmstärke abgeschwächt werden), fällt hier ins Gewicht, da die letzten 24 Stunden vor dem *Landfall* die entscheidenden Vorhersagen für eventuelle Sicherungs- und Evakuierungsmaßnahmen hervorbringen. Im Durchschnitt erhöht sich der Zentraldruck eines Hurrikans über dem Festland oder kalten Wassermassen um 2.5 bis 4 Hektopascal je Stunde (Anthes, 1982), so daß auch starke Stürme mit einem Kerndruck unter 920 Hektopascal (Stärke 5 auf der Saffir-Simpson-Skala, vergleiche Kapitel 1 und Tabelle 3) nach 24 Stunden zu Stürmen mit nur noch geringem Zerstörungspotential abgeflaut sind und somit nicht mehr registriert werden müssen. Insofern werden die letzten Vorhersagen in der Adaption im Durchschnitt etwa 48 Stunden vor dem *Landfall* liegen, so daß zwar Vorhersagen mit dem Analogmodell bis zum *Landfall* und darüber hinaus möglich sind, diese aber weder optimal adaptiert noch in die Verifikation eingegangen sein werden.

Für die Verifikation wird der Zeitraum 1989 bis 1996 genutzt, dieser enthält in 86 Stürmen 1566 Positionen, die für eine 72-Stunden-Vorhersage genutzt werden können. Alle in die Verifikation eingehenden Zugbahnen des Datensatzes sind in Abbildung 6 dargestellt. Man erkennt, daß eine Reihe von Stürmen bis weit in den außertropischen Bereich hinein verfolgt und aufgezeichnet wurden. Obwohl diese Zustände nicht mehr als *tropischer* Sturm gelten, werden sie bei der Verifikation betrachtet.

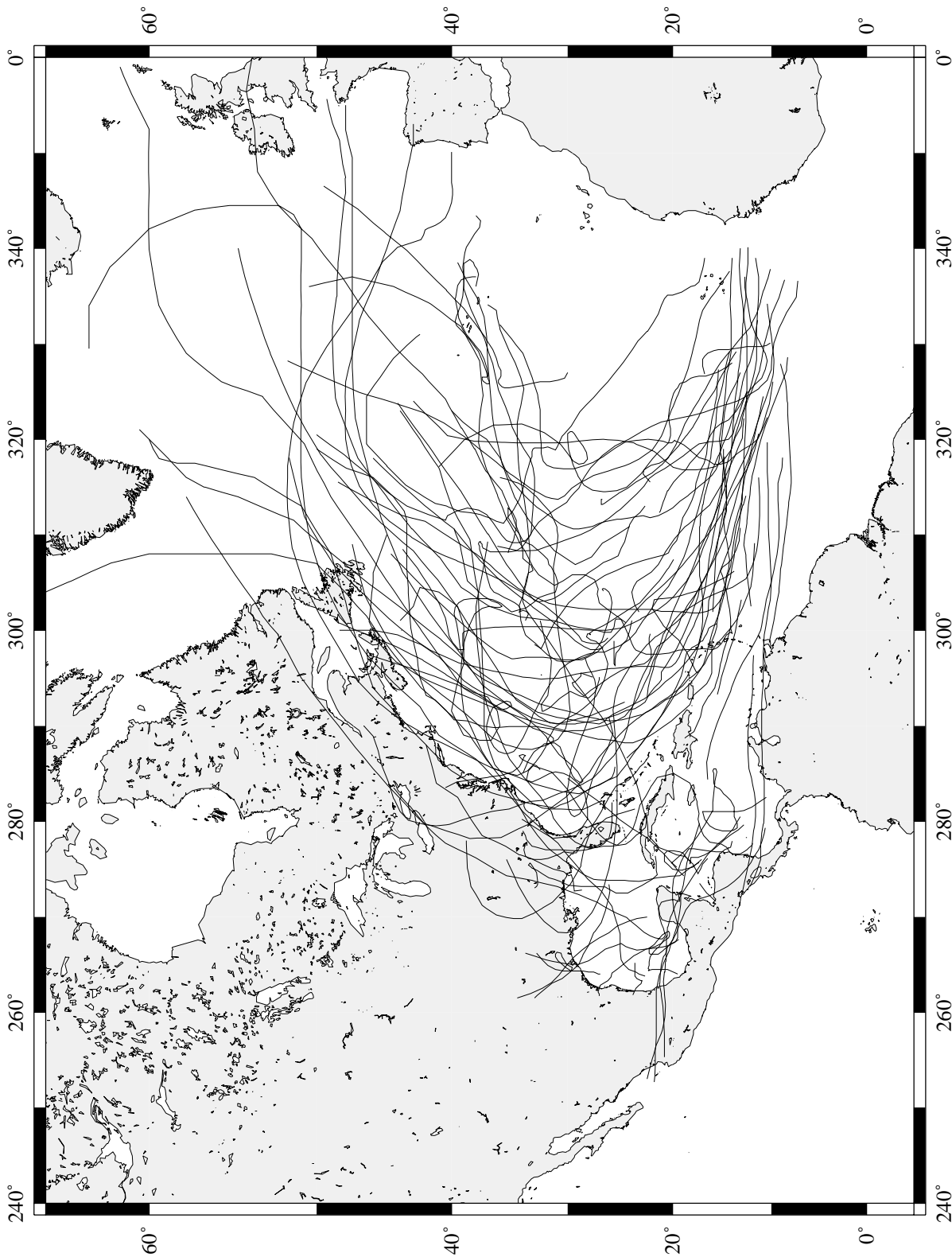


Abbildung 6: Zugbahnen der 86 tropischen Wirbelstürme im Atlantik von 1989 bis 1996

Als Modellbildungszeitraum wird entsprechend der gesamte restliche Aufzeichnungszeitraum von 1886 bis 1988 gewählt. In diesem Zeitraum liegen 864 Stürme mit 12671 für die Adaption geeigneten Zuständen. Die Verifikation erfolgt mit jahresweise wachsender Bibliothek, so daß gewissermaßen der operationelle Einsatz des Programms simuliert wird, ohne daß aber für jedes Jahr eine erneute Adaption durchgeführt wird. Es ist festzustellen, daß eine Reduzierung des Modellbildungszeitraumes auf die Jahre 1951 bis 1988, in denen die Positionen von vornherein im 6-stündigen Takt aufgezeichnet wurden (vergleiche Kapitel 2), zu einer Verschlechterung des Adaptionsergebnisses im Kurzfristbereich um bis zu 5%, im mittelfristigen Bereich ab 60 Stunden dagegen zu einer leichten Verbesserung um weniger als 1% führt (Abbildung 8). Die Vergrößerung der Genauigkeit im Kurzfristbereich durch den vergrößerten Datensatz läßt sich über das erweiterte Angebot an Analoga erklären, da so ein größerer Bereich an statistischen Eigenschaften abgedeckt ist. Die Variabilität der Daten ist sehr groß. Dies kann man zum Beispiel an Abbildung 9 erkennen, wo die Datenreihe der geographischen Längen der Sturmpositionen als gleitendes Mittel über je 1000 Positionen dargestellt ist. Man sieht zum einen die große Variation der mittleren Sturmposition, zum anderen fällt insbesondere die Einführung der flugzeuggestützten Hurrikan-Erforschung ab 1944 auf (erster senkrechter Strich in der Abbildung). Bis zum Beginn der 6-stündigen Datenerfassung 1951 (zweiter Strich) ist die mittlere Position der registrierten Hurrikane um fast 6° nach Osten gewandert, was auf ein deutlich früheres Auffinden von entstehenden Wirbelstürmen hinweist. Betrachtet man den linearen Trend in diesen Zeiträumen, so zeigen die Positionen bis 1944 eine leichte Westdrift, nach 1951 jedoch eine Ostdrift, jeweils von sehr viel stärkeren Variationen überlagert. Ein weiterer Sprung in den Daten findet sich zum Saisonwechsel 1988/1989, welcher durch die dritte Markierung gekennzeichnet ist. Im Mittel liegen die Stürme des Verifikationszeitraumes nochmals 6° weiter östlich als im Zeitraum 1951 bis 1988, ohne daß hierfür ein Grund aus der Datendokumentation ersichtlich wird.

Das in Kapitel 2 angesprochene Überschätzen der maximalen Windgeschwindigkeit bis 1969 könnte ein Grund für die Verschlechterung der mittelfristigen Vorhersage mit vergrößertem Datensatz sein, da die Intensität bzw. die Windgeschwindigkeit für zunehmende Vorhersagezeit immer wichtiger wird (vergleiche Abbildung 7). Bei der zeitlich integrierten Adaption, die für den Vergleich der Bibliotheksgrößen herangezogen wird (30), kann die Fehlervergrößerung durch ungenaue Windwerte offenbar nur im kurzfristigen Bereich durch die größere Abdeckung verschiedener Variationsbereiche ausgeglichen werden. Ein kompletter Verzicht auf die Windwerte dagegen führt zu einer Vergrößerung des Fehlers um durchgehend 0.5 Prozent für den gesamten Vorhersagezeitraum (ohne Abbildung).

Die Möglichkeit der Vorhersageverbesserung mit vergrößertem Datensatz muß für andere Bassins und/oder andere Modelle nicht notwendigerweise auch zutreffen. So hat Annette (1981) für Australien festgestellt, daß bei CYCLOGUE, dem australischen Analogmodell, eine Erhöhung der Bibliotheksgröße um 15% (von ca. 11500 auf knapp 13600) keine nennenswerte Verringerung des Vorhersagefehlers für einzelne Positionen nach sich zieht. Allerdings ist das Programm anschließend in der Lage, für etwa 20% der zuvor nicht erfolgten Vorhersagen (vergleiche Kapitel 3.2.: *HURRAN*) eine Prognose anzubieten. Daraus kann man ableiten, daß bei einer Bibliotheksvergrößerung in erster Linie schwierig vorherzusagende Zustände, bei denen wenige Analoga in der Nähe liegen, besser prognostiziert werden können. Da das vorliegende Modell keine höchstzulässige Entfernung des Analogons gemäß der benutzten Metrik vorschreibt, bedeutet dies eine Verbesserung der Vorhersagequalität mit wachsender Bibliotheksgröße. Eine ähnliche Änderung des Vorhersagefehlers findet man auch bei einer Verkleinerung des Datensatzes im Bereich jüngerer Aufzeichnungen (vergleiche Kapitel 5.2)..

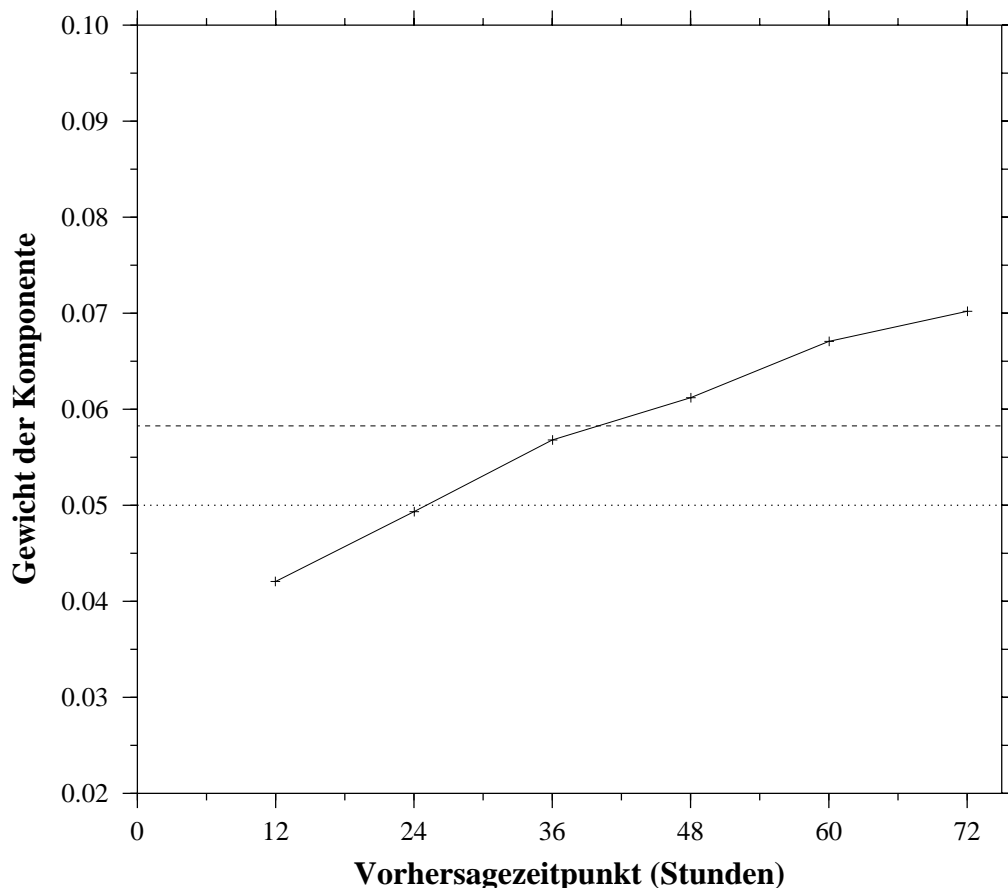


Abbildung 7: Gewicht der Windkomponente (Modell A) gegen Vorhersagezeit bei Adaption gemäß (31). Die untere waagerechte Hilfslinie stellt das euklidische Gewicht bei 20 Komponenten, die obere das Gewicht bei integrierter Adaption dar

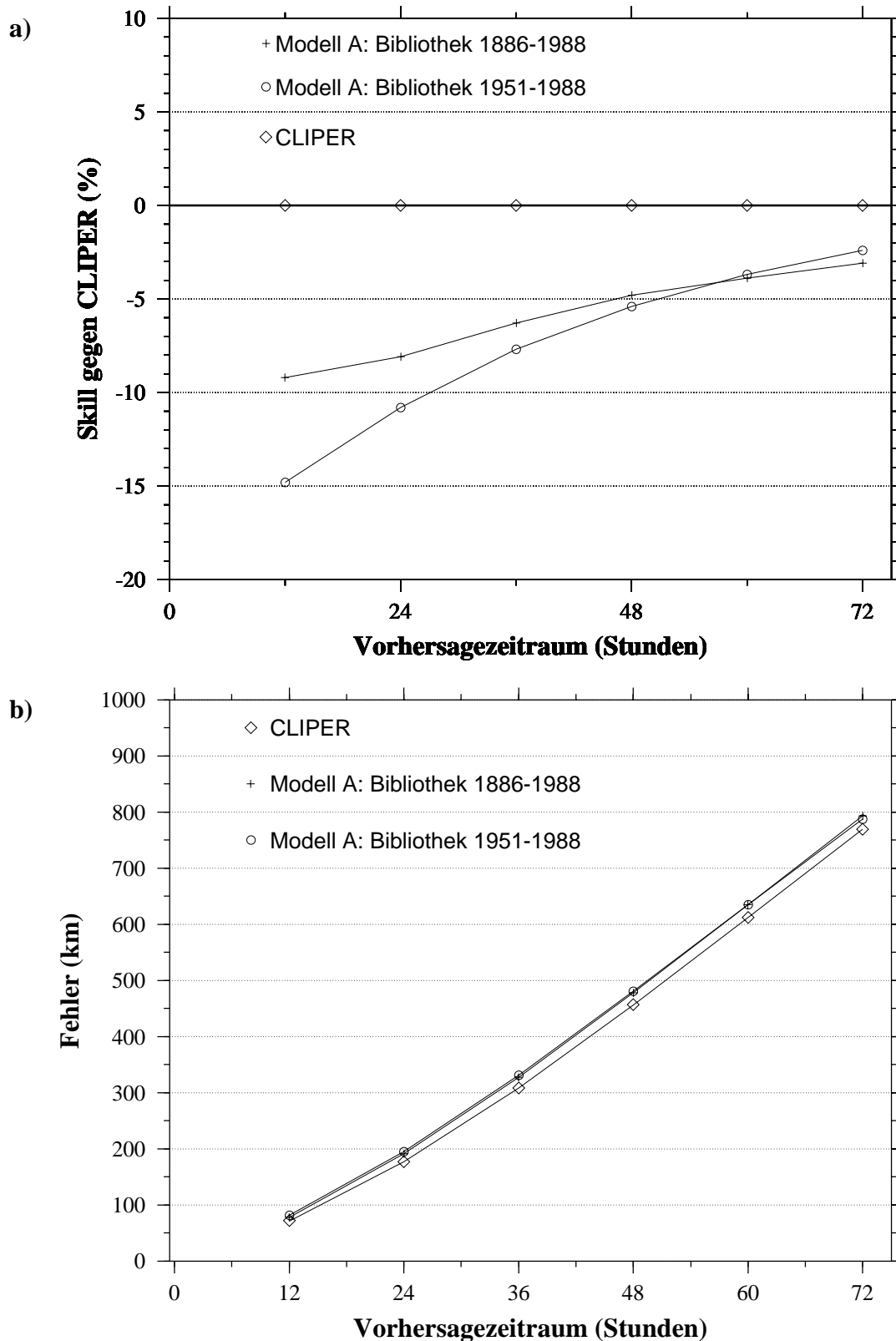


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung des Vorhersagefehlers (1989 - 1996) in Abhängigkeit von der Bibliotheksgröße; (a) Skill gegen CLIPER; (b) absoluter Fehler (Ensemblegröße jeweils $N_E=18$, $N_A=20$; Zugbahnadaption gemäß (30))

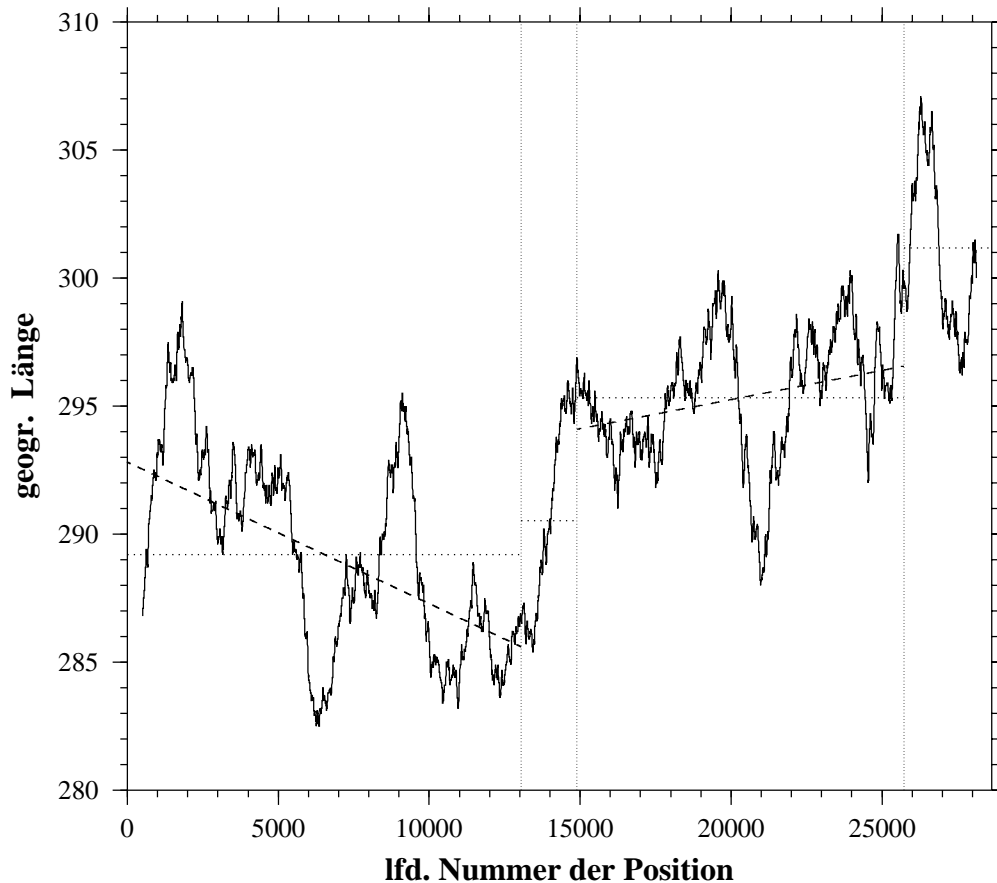


Abbildung 9: Zeitreihe der gespeicherten Längen der Sturmpositionen im Atlantik: gleitender Mittelwert über 1000 Punkte, linearer Trend und Mittelwerte über die Zeiträume 1886-1943; 1944-1950; 1951-1988; 1989-1996 (jeweilige Saisonwechsel: senkrechte Striche)

Wie bereits erwähnt, wird als absolutes Qualitätsmaß der Großkreisfehler (1) des Modells gegen die Best Track Position errechnet und mit demjenigen des CLIPER-Modells verglichen, das ebenfalls mit den Best Track Daten nachgerechnet wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist es üblich, den sogenannten *Skill* (den relativen Fehler) des Modells gegen CLIPER anzugeben. Dieser ist für eine prozentuale Angabe definiert als

$$r = 100 \cdot \frac{F_C - F_M}{F_C} \quad (33)$$

Hierbei stellt F_C den mittleren CLIPER-Fehler und F_M den mittleren Modellfehler über den betrachteten Zeitraum dar. Zu beachten ist, daß diese Definition in der Literatur auch mit umgekehrtem Vorzeichen auftaucht. In dieser Definition, die analog zu (u.a.) Neumann und Pellissier (1981 a,b) sowie Heming (1994) erfolgt, ist das Verifikationsmaß positiv orientiert. Ein positiver Skill bedeutet, daß das Modell besser als CLIPER ist. Bei DeMaria *et al* (1990) dagegen bedeutet ein positiver Skill ein besseres CLIPER- als Modell-Ergebnis.

4.6. Ergebnisse

Ensemblegröße

Wie schon in Kapitel 4.4 niedergelegt ist, wird die Abhängigkeit des Vorhersagefehlers von der Ensemblegröße für beide Modelle A und B durch eine Zugbahnadaption gemäß (30) untersucht. Die Ensemblegrößen werden mit $N_E=4$ beginnend in Schritten von $\Delta N_E=2$ erhöht und der Vorhersagefehler über den Verifikationszeitraum (Großkreisfehler zwischen Beobachtung und Vorhersage) bestimmt. Leith (1974) hat festgestellt, daß bei Ensemblevorhersagen aus Monte-Carlo-Versuchen eine Ensemblegröße von $N_E=8$ als optimal zu betrachten ist, da eine Ensemblevergrößerung über 8 hinaus keine nennenswerte Verbesserung mehr bringt. Insofern stellte sich die Frage, ob dieses Ergebnis auch auf die Ensemblebildung durch das Analogprogramm übertragbar ist.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 (absoluter Fehler) und Abbildung 11 (Skill) dargestellt. Außer bei der 72-Stunden-Vorhersage ergibt sich für Modell B ein durchgehend niedrigerer Fehler (Abbildung 10). Wie aus der Abbildung des Skills hervorgeht, beträgt der Unterschied zwischen den minimalen Fehlern über den gesamten Vorhersagezeitraum jeweils weniger als 1%. Beide Modelle zeigen über den gesamten Vorhersagezeitraum einen größeren Fehler als CLIPER, die absolute Differenz zwischen bestem Analog-Ergebnis und CLIPER wächst von ca. 7 Kilometern nach 12 Stunden auf etwa 20 Kilometer nach 72 Stunden. Relativ betrachtet sinkt die Differenz dagegen mit zunehmender Vorhersagezeit: beträgt der Skill nach 12 Stunden noch $r=-10\%$, so nimmt er auf etwa -2% nach 72 Stunden ab. Bei Modell A nimmt der Fehler im kurzfristigen Vorhersagezeitraum (bis 48 Stunden) bis zu einer Ensemblegröße von $N_E=18$ ab, wobei der relative Gewinn mit zunehmender Vorhersagezeit kleiner wird. Für die späteren Vorhersagen von 60 und 72 Stunden finden sich nahezu identische Ergebnisse ab $N_E=8$. Etwas anders sieht das Ergebnis für Modell B aus. Der minimale Vorhersagefehler verschiebt sich mit zunehmender Vorhersagezeit hin zu größeren Ensembles: liegt der minimale Fehler nach 12 Stunden noch bei einer Ensemblegröße von $N_E=14$ um nur 0.8% über demjenigen des Ensembles mit 8 Mitgliedern, so erreicht die 72-Stunden-Vorhersage bei einer Ensemblegröße von $N_E=20$ ihr Minimum, fast 1.5% besser als die Referenzvorhersage von $N_E=8$.

Der Unterschied zwischen den beiden Modellen hat sich als so gering herausgestellt, daß für die weiteren Untersuchungen trotz des geringfügig höheren Fehlers auf das Modell A mit einer Ensemblegröße von $N_E=18$ zurückgegriffen wird, weil beim Modell B keine eindeutig „optimale“ Größe zu finden ist. Dies erleichtert auch die Interpretation der adaptierten Gewichte, da die Komponenten des Modells A anschaulicher darzustellen sind.

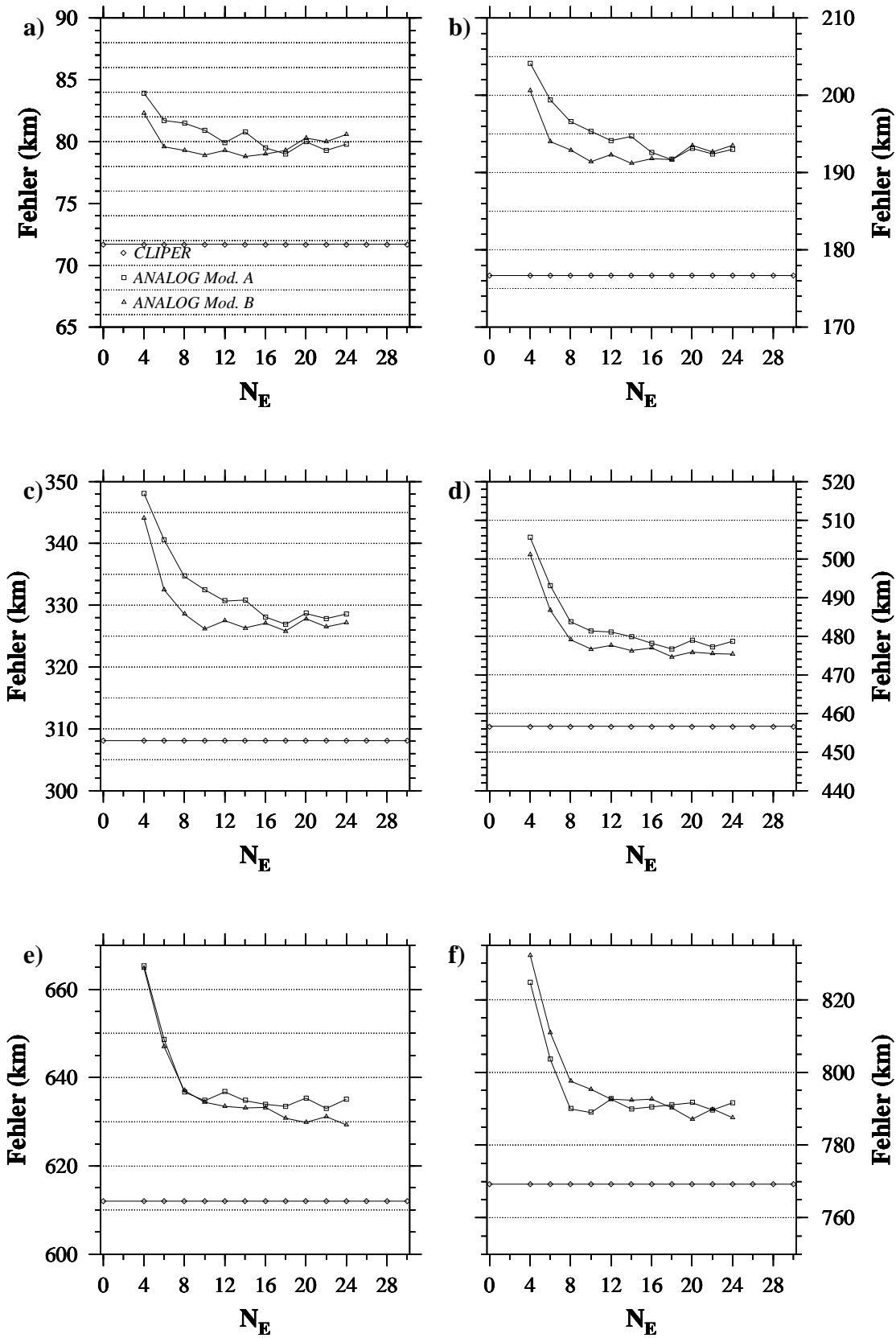


Abbildung 10: Absoluter Fehler der untersuchten Modelle in Abhängigkeit von der Ensemblegröße N_E für verschiedene Vorhersagezeitschritte: (a) 12, (b) 24, (c) 36, (d) 48, (e) 60, (f) 72 Stunden

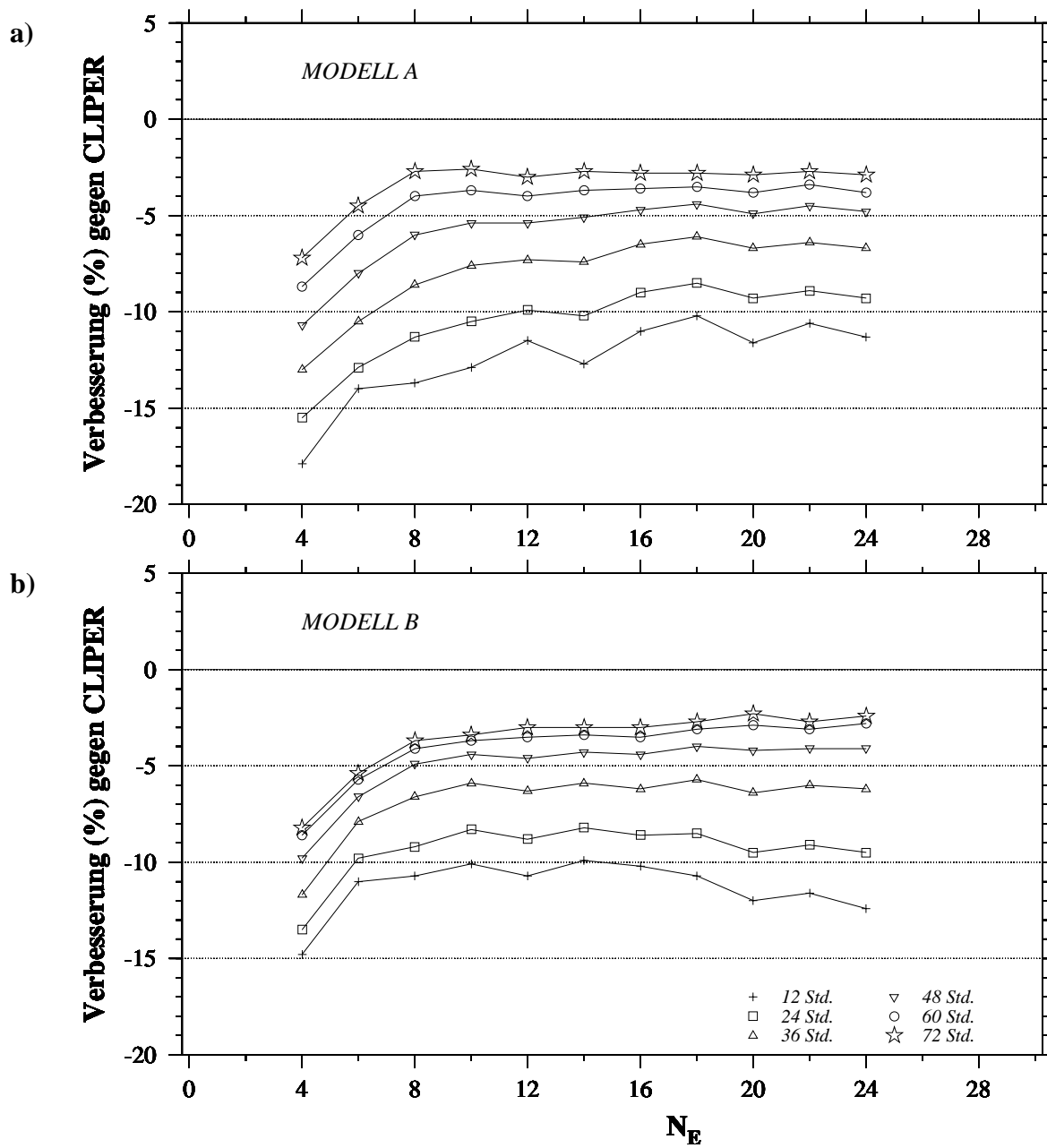


Abbildung 11: Skill der beiden untersuchten Modelle gegen CLIPER (=Nullachse) in Abhängigkeit von der Ensemblegröße N_E für verschiedene Vorhersagezeitschritte: (a) Modell A und (b) Modell B

Zeitpunktadaption

Mit dem als „optimal“ gefundenen Modell A mit einer Ensemblegröße von $N_E=18$ wird untersucht, inwieweit eine nach Vorhersagezeitpunkten oder Komponenten getrennte Adaption das Ergebnis verändert. Diese Untersuchungen werden mit einem erhöhten $N_A=N_E+2$ durchgeführt, daher sind die Ergebnisse des integrierten Modells etwas verschieden von den vorher erhaltenen Fehlern bei der Ensemblegrößenuntersuchung.

Die Aufteilung nach der Zeit erfolgt durch sechsfache Adaption mit (31) für die gewünschten Vorhersagezeitpunkte (12 bis 72 Stunden). Aus der Darstellung des absoluten Fehlers (Abbildung 12a) ist kein Unterschied zwischen zeitlich einzelner und integrierter Vorhersage zu erkennen, jedoch zeigt die zeitliche Auftragung des Skills gegen die Zeit (Abbildung 13) eine deutliche Verbesserung der Einzelvorhersage im Kurzfristbereich. Die Vorhersage nach 12 Stunden weist einen um etwa 5% geringeren Fehler als bei integrierter Adaption auf, womit die Differenz zu CLIPER halbiert wurde. Schon nach 36 Stunden hat sich der Unterschied jedoch auf weniger als 1 Prozentpunkt verringert, und ab 48 Stunden Vorhersage ist kein meßbarer Unterschied mehr ersichtlich. Damit wird deutlich, daß bei der integrierten Adaption die größeren Fehler der späteren Vorhersagezeiten stärker ins Gewicht fallen. Aus den Gewichten selbst ist dies nicht zwangsläufig zu ersehen, wie zum Beispiel an der zeitlichen Entwicklung des Gewichtes der Windkomponente (Abbildung 7) deutlich wird. Das Gewicht, das bei der integrierten Adaption erreicht wird, ist nahezu exakt der Mittelwert der bei den zeitlich getrennten Adaptionen erzielten Werte (5.82 % bei integrierter Adaption gegenüber 5.78 % im Mittel).

Deutlich fällt der Unterschied zwischen integrierter und zonal-meridional getrennter Adaption aus. Abbildung 12b zeigt den absoluten Fehler, Abbildung 13 den Skill gegen CLIPER. Man erkennt, daß die zonal-meridional getrennte Vorhersage einen um mindestens 3% höheren Fehler als bei integrierter Adaption ergibt. Hier liegt der Grund in der Dynamik der tropischen Zyklonen. Die zeitliche Entwicklung eines Sturmes hängt von der exakten Position ab, nicht aber nur von Länge oder Breite.

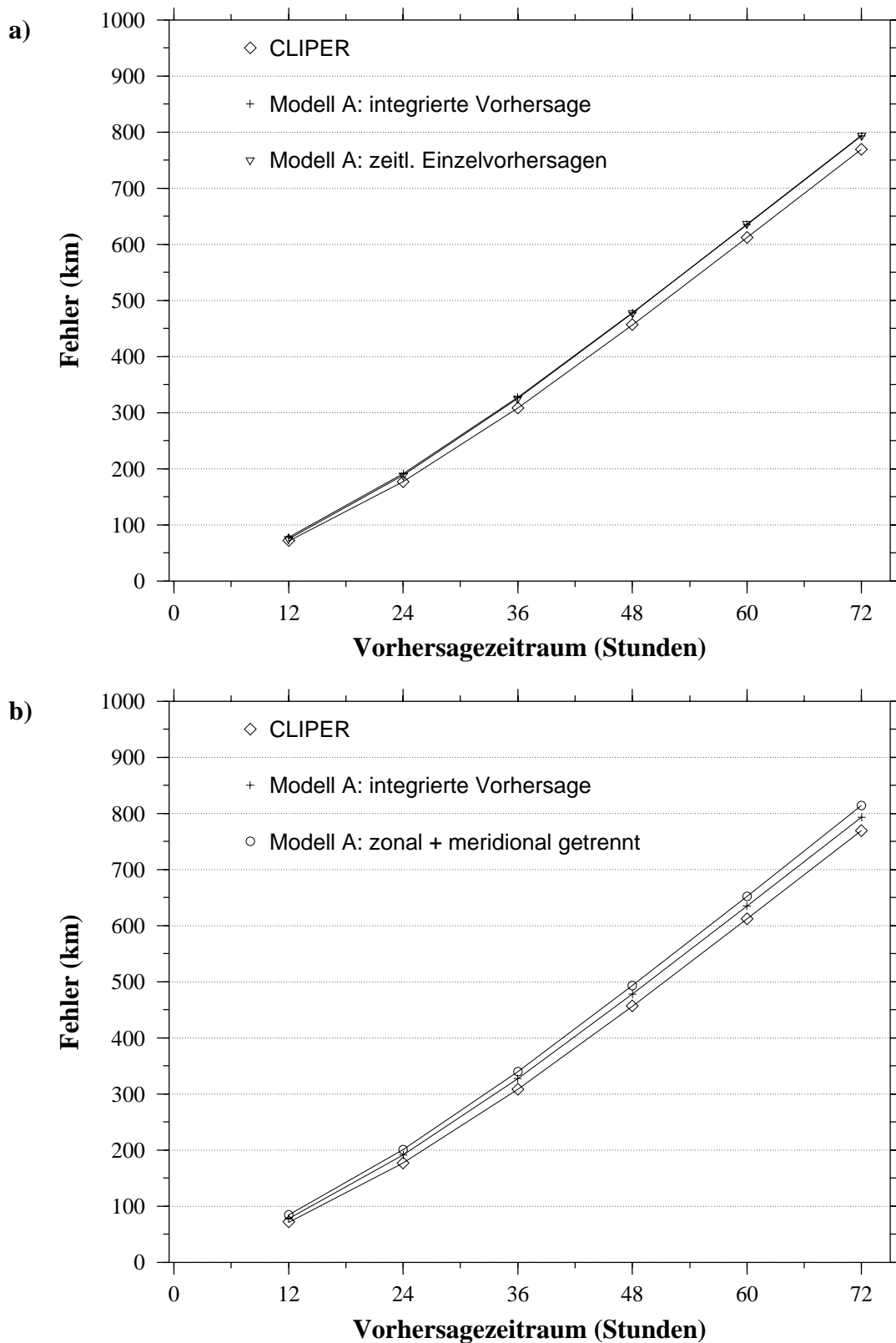


Abbildung 12: Zeitliche Fehlerentwicklung für verschiedene Adaptionmöglichkeiten von Modell A; $N_E=18$, $N_A=20$; (a) gesamt-integrierte (30) und Zeitpunkt-Adaption (31); (b) gesamt-integrierte und zonal/meridional getrennte Adaption (32)

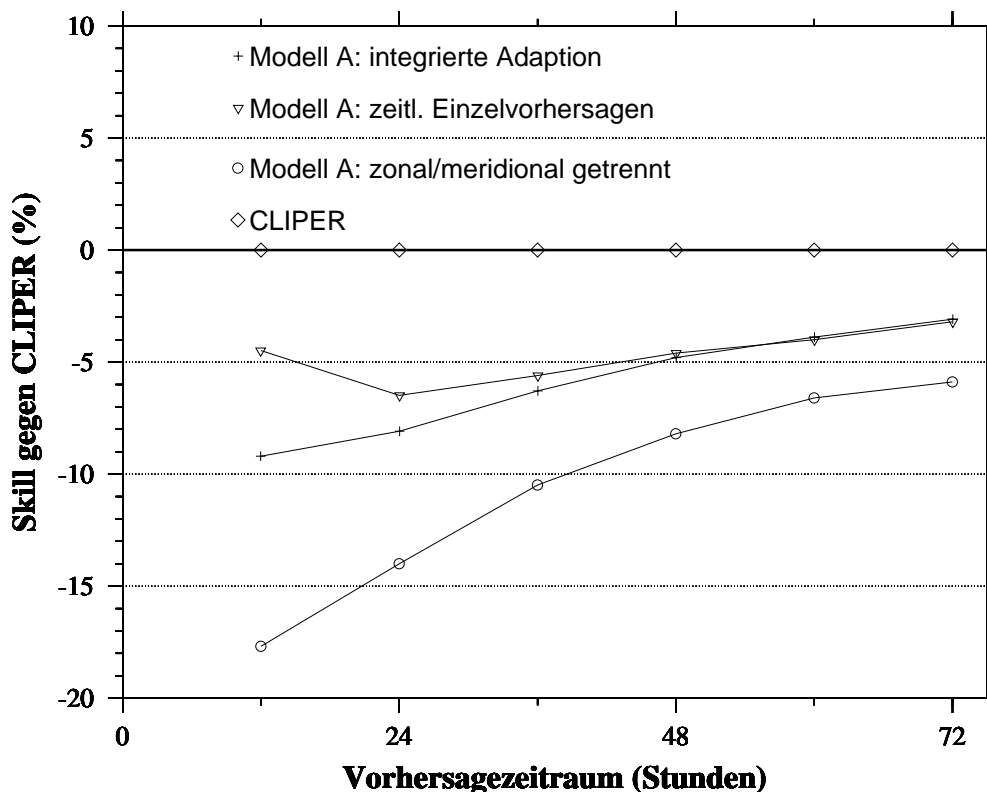


Abbildung 13: Wie Abbildung 12, aber Skill gegen CLIPER (=Nullachse)

Gewichte

Betrachtet man die durch die Adaption erlangten Gewichte (Abbildung 14), so fallen sofort die zonale und meridionale Verschiebung (Komponenten 3 und 4, vergleiche Tabelle 7) der letzten 6 Stunden als die dominierenden Komponenten auf. Zusammen machen sie fast 40% des Abstandes aus, gefolgt von der Persistenz 6 Stunden zuvor. Beachtenswert ist, daß die Gewichte der Längen 12 Stunden vor dem Referenzzeitpunkt ihr Minimum haben, nicht aber wie bei den Breiten zu Beginn des Trajektorienstückes. Ebenso wird die Bewegung von 24 bis 18 Stunden vor der Referenzzeit höher gewichtet als die Bewegung 6 Stunden später. Das deutet darauf hin, daß die Einzelheiten der Struktur der Trajektorienstücke für die zukünftige Entwicklung der Zugbahn nur eine untergeordnete Rolle spielen. Wichtiger scheint neben der aktuellen Zugrichtung vor allem die großskalige Bewegung über die letzten 24 Stunden zu sein. Ebenso wird deutlich, daß die Position der Zyklone einen sehr viel geringeren Einfluß auf die Zugbahn als die Persistenz hat. Das Klima geht vor allem durch die Wind- und Zeitkomponente (Komponenten 19 und 20) ein, die Position dagegen wird selbst zur Referenzzeit weniger stark gewichtet als die „unwichtigste“ Verschiebung.

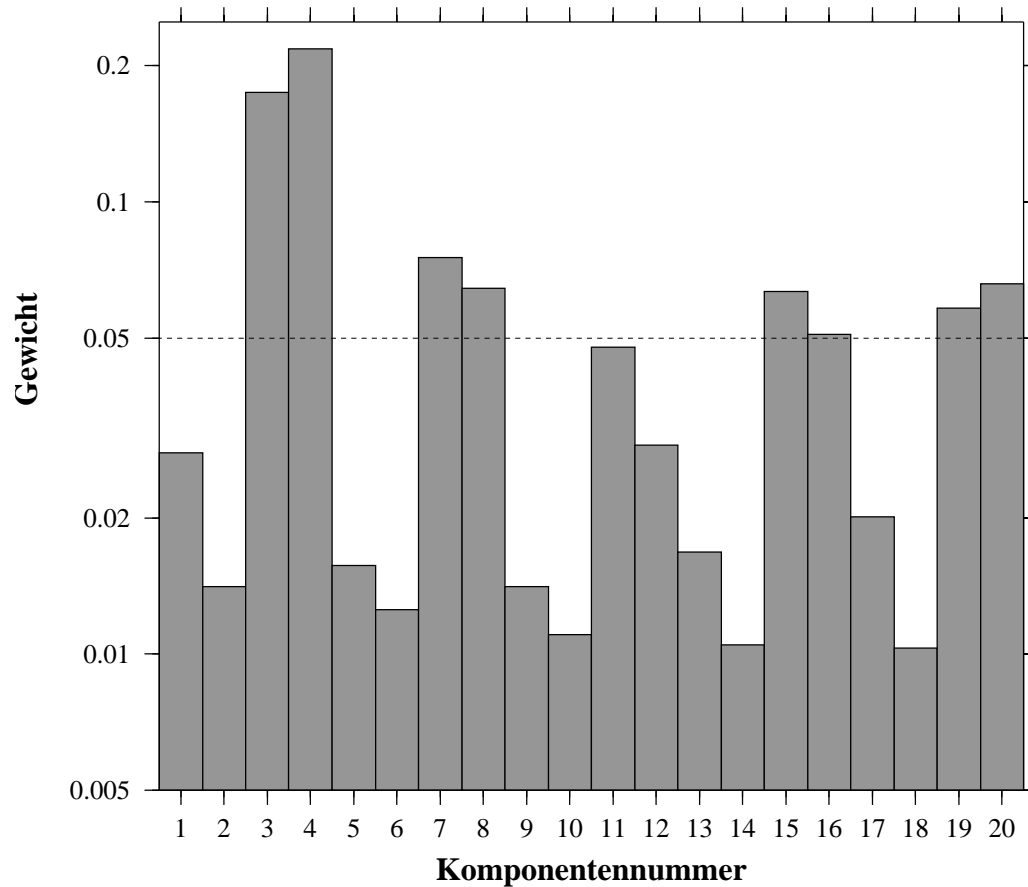


Abbildung 14: „Optimale“ Gewichte der 20 Komponenten für Modell A, Ensemblegröße 18; zur Bedeutung der Komponenten vergleiche Tabelle 7; waagerechte Hilfslinie stellt euklidisches Gewicht (20 Komponenten) dar

Tabelle 1: Zahlenwerte zu Abbildung 14 (%)

Nr.	Gewicht	Nr.	Gewicht	Nr.	Gewicht	Nr.	Gewicht
1	2.79	2	1.41	3	17.47	4	21.77
5	1.57	6	1.25	7	7.52	8	6.44
9	1.41	10	1.10	11	4.77	12	2.89
13	1.68	14	1.05	15	6.33	16	5.09
17	2.01	18	1.03	19	5.82	20	6.59

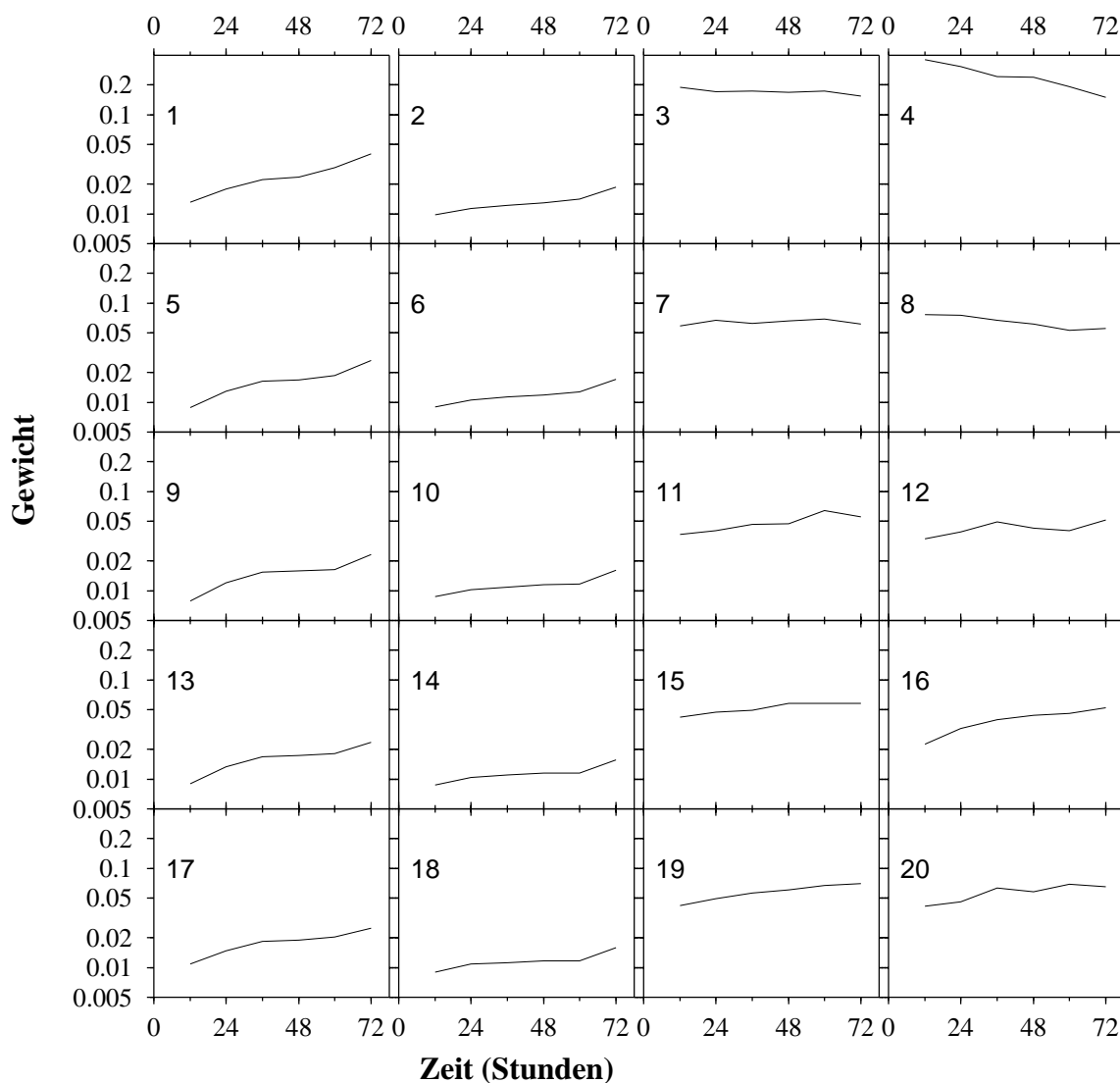


Abbildung 15: Zeitliche Entwicklung der Gewichte der einzelnen Komponenten (1-20) von Modell A bei getrennter Adaption für verschiedene Vorhersagezeitpunkte

Wird die zeitliche Entwicklung der Gewichte, wie sie bei der nach Vorhersagezeitpunkten getrennten Adaption erzielt wird (Abbildung 15), betrachtet, so fällt auf, daß die Persistenzkomponenten in den 12 Stunden vor der Referenz an Gewicht verlieren. Dafür steigt der klimatologische Einfluß (Position, Intensität und Jahreszeit) mit zunehmender Vorhersagezeit. Das entspricht genau den Erkenntnissen, die zum Beispiel in die Persistenzkorrektur von HURRAN eingeflossen sind: in der kurzfristigen Entwicklung sind tropische Zyklone von der Persistenz dominiert, mittelfristig jedoch mehr vom Klima. Für längerfristige Prognosen müssen dann dynamische Einflüsse betrachtet werden (Leslie *et al.*, 1992).

Vergleich mit CLIPER

Der Vergleich des Analogmodells mit CLIPER zeigt einen einheitlich negativen Skill (vergleiche die Abbildungen 8a, 11 und 13) für alle Modellspezifikationen. Im günstigsten untersuchten Fall (Zeitpunktadaption von Modell A mit einer Ensemblegröße von $N_E=18$) liegt er durchgehend bei -5%, mit Abweichungen von etwa $\pm 1.5\%$. Auch unter Einbeziehung der in Kapitel 4.3 gefundenen Möglichkeiten zur Ergebnisverbesserung (bis zu 1% durch eine optimale Wahl der Lernsetgröße und der Adaptiongröße N_A) kann keine Vorzeichenumkehr erwartet werden.

Die Ursache für diese - wenn auch leichte - Überlegenheit von CLIPER ist schwer an bestimmten Gründen festzumachen. Auch das Analogmodell HURRAN zeigt einen Skill gegen CLIPER mit Werten zwischen -5% und -10% (Neumann und Pelissier, 1981 a). Schon diese Arbeit nennt die Verbesserung von CLIPER gegen HURRAN „überraschend“, da CLIPER ursprünglich nur als Ergänzung zu HURRAN bei schlecht vorhersagbaren Situationen gedacht war. Wie die Betrachtung von einzelnen Vorhersagen (zum Beispiel die unten folgenden) zeigt, ist das Regressionsmodell offenbar besser in der Lage, die Richtungspersistenz der Zyclonen zu beschreiben. Sowohl bei den Vorhersagen von Hurrikan ANDREW wie auch bei HUGO ist zu erkennen, daß das Analogmodell mehr als CLIPER zu einer antizyklonal gekrümmten Vorhersage tendiert, unabhängig vom Verlauf der Zyklone. Vermutlich ist dies mit der Trennung der Persistenz in zwei Komponenten, Δx und Δy , zu erklären. Eine Verbesserung könnte unter Umständen erreicht werden, indem die Persistenz durch die Zugrichtung (nach der Kompaßrose) und die Geschwindigkeit dargestellt wird. Allerdings tritt hier das Problem einer zyklischen Variablen auf, das weder Adaption- noch Prognoseteil ohne erheblichen Aufwand lösen können. Das Programm muß erkennen, daß Kompaßkurse von 0° und 360° identisch sind. Insbesondere Trajektorien, die sehr stark gekrümmt sind und/oder über 0° hinausdrehen, sind nur schwer zu behandeln. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt.

Fehlerabschätzung

Einer der wesentlichen Vorteile von Ensemblevorhersagen ist die Möglichkeit einer Abschätzung des Fehlers der Vorhersage. Dieses kann auf verschiedene Weise geschehen. Bei der Positionsvorhersage wird eine Anzahl von x - und y -Koordinaten bestimmt, aus denen zum Beispiel durch ungewichtete Mittelung die Prognose ermittelt wird. Hope und Neumann (1970) berechnen aus der Verteilung der x und y , genauer aus Standardabweichung und Varianz der Koordinaten sowie des Korrelationskoeffizienten zwischen ihnen, eine Wahrscheinlichkeits-Ellipse. Diese schließt eine Fläche ein, innerhalb derer die Zyklone mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zum Vorhersagezeitpunkt liegen wird.

Einen direkten Versuch, den Fehler aus der Varianz der Ensembleverteilung zu berechnen, machen Fraedrich und Ziehmann (1994). Sie stellen Ensemblevarianz und mittleren quadratischen Ensemblefehler gegenüber und über eine lineare Regression einen Zusammenhang zwischen den beiden Größen her. Bei der Ensemblebildung durch eine feste Anzahl von Analoga wird neben der Ensemblevarianz auch der mittlere Abstand der Analoga gemäß der verwendeten Metrik eingehen. Darüber hinaus hat Neumann (1981) einen Zusammenhang zwischen dem gemachtem CLIPER-Fehler und, unter anderem, der mittleren geographischen Länge der Sturmpositionen einer Saison gefunden. Aus diesem Grund wird für das vorliegende Analogmodell eine Fehlerabschätzung mit der Standardabweichung des Großkreisfehlers der Ensemblemitglieder um den Mittelwert (also der Streuung), dem mittleren Abstand der Analoga sowie der aktuellen Position (Länge und Breite) durchgeführt. Die 4 Größen werden hierzu optimal kombiniert. Dies erfordert einen zum Adaptions- und Verifikationszeitraum unabhängigen Datensatz. Hierzu wird in Analogie zu der in Kapitel 5 gemachten Kombination zweier Vorhersagen die Adaption auf den Zeitraum bis einschließlich 1970 beschränkt und mit den Vorhersagen der Jahre 1971 bis 1988 die Regressionsbeziehung zwischen den Variablen bestimmt. Der Zeitraum 1989 bis 1996 dient wiederum zur Verifikation.

Die Größen, die den Fehler bestimmen, werden über die Regressionsgleichung

$$F_E = a_1\sigma + a_2\overline{d(\Delta x)} + a_3x + a_4y + a_5 \quad (34)$$

miteinander verknüpft, wobei F_E der erwartete Fehler, σ die Standardabweichung der Großkreisdistanz der Analoga zur Prognose, $\overline{d(\Delta x)}$ der mittlere Abstand der N_E Analoga zur Referenz und x bzw. y die geographische Länge bzw. Breite ist. Die Koeffizienten für die betrachteten Vorhersagezeitschritte, wie sie aus den Vorhersagen des Zeitraumes 1971 bis 1988 bestimmt werden, finden sich in Tabelle 13.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen erwartetem und beobachtetem Fehler für alle Vorhersagezeitpunkte weisen nahezu keine Abweichungen zwischen abhängigem und unabhängigem Datensatz auf, was auf stabile Koeffizienten a_1 bis a_5 schließen läßt. Die Korrelationen liegen bei 53.5% nach 12 Stunden, nehmen auf rund 52% nach 24 Stunden und etwa 45% nach 72 Stunden ab. Fraedrich und Ziehmann (1994) sehen eine Korrelation von 50% und weniger zwischen Variable und Fehler als nicht hinreichend zur Fehlerbestimmung an. Im vorliegenden Fall wird daher der erwartete Fehler zur Bildung von Wahrscheinlichkeitskreisen um die vorhergesagte Position genutzt.

Betrachtet man nämlich die Verteilung der relativen Abweichung R_F

$$R_F = \frac{F_B - F_E}{F_E} \quad (35)$$

zwischen errechnetem Fehler F_E und beobachtetem Fehler F_B , so findet man große Ähnlichkeiten zwischen den Vorhersagezeitpunkten. Die Summenhäufigkeiten von R_F über den abhängigen Datensatz (1971 - 1988) sind in Abbildung 16a (24 Stunden) und 16c (72 Stunden) dargestellt. Es wird deutlich, daß nach 24 Stunden 55% aller Vorhersagen ein negatives R_F , demnach also einen geringeren Fehler als vorgesagt aufweisen. Für die 72-Stunden-Vorhersage liegt dieser Wert sogar bei etwa 57.5 %. Weiterhin lassen sich so Entfernungen von der vorhergesagten Position berechnen, innerhalb derer die Zyklone mit Wahrscheinlichkeiten von 90% oder 95% beobachtet wird. Für die 24-Stunden-Vorhersage finden sich Werte von $R_F=0.9^1$ bzw. $R_F=1.1$. Aus der Definition von R_F läßt sich so bestimmen, daß die Zyklone mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% um nicht mehr als das 1.9-fache (bei 95% um nicht mehr als das 2.1-fache) von dem vorhergesagten Fehler abweicht. Die Werte nach 72 Stunden werden aus Abbildung 16c bei $1.8F_E$ (für den 90%-Kreis) bzw. $2.1F_E$ (95%) erwartet.

Die Verteilungen, die sich aus den unabhängigen Vorhersagen ergeben, sind sehr ähnlich (Abbildung 16b und 16d) zu denjenigen der abhängigen Prognosen. Demnach zeigen nach 24 Stunden tatsächlich 55% der Vorhersagen einen geringeren Fehler als mit (34) berechnet. In den 90%-Kreis fallen etwa 89.5%, in den 95%-Kreis knapp 92.5% aller Vorhersagen. Nach 72 Stunden ist R_F zwar nur für etwa 55% der Vorhersagen negativ (gegenüber 57.5% wie erwartet), dafür erreichen über 89.75 % der Prognosen den 90%-Kreis und etwa 94.9% den 95%-Kreis. Das sind lediglich 4 bzw. 2 von 1566 Prognosen, die zum Erwartungswert fehlen.

1. Bei einer genaueren Bestimmung erhält man $0.8 < R_F < 0.85$.

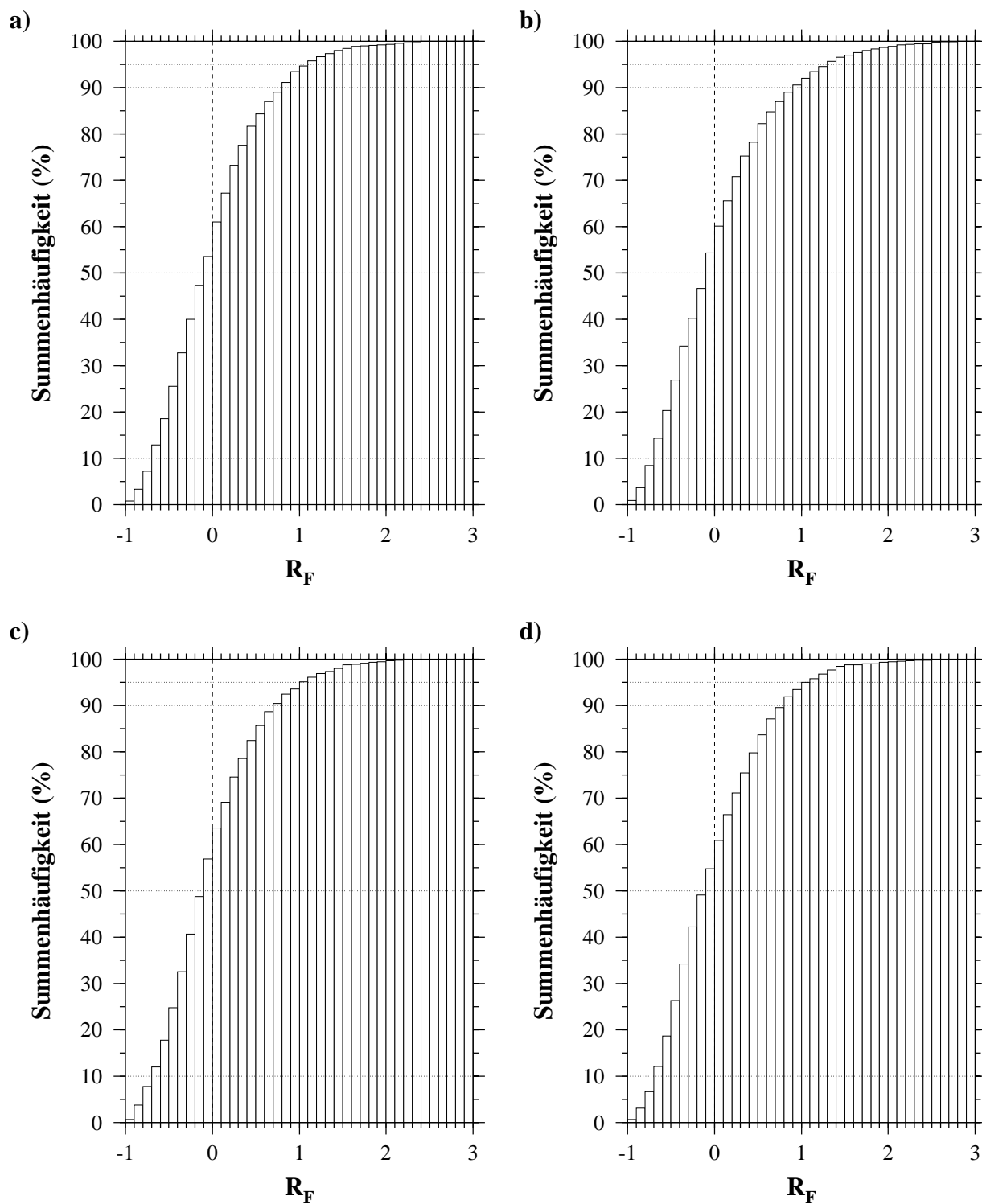


Abbildung 16: Summenhäufigkeit der relativen Abweichung R_F zwischen berechnetem Fehler F_E gemäß (34) und zugehöriger Beobachtung F_B für (a) 24-Stunden-Vorhersage, abhängiger Datensatz 1971 - 1988; (b) 24-Stunden-Vorhersage, unabhängiger Datensatz 1989 - 1996; (c) 72-Stunden-Vorhersage, abhängiger Datensatz; (d) 72-Stunden-Vorhersage, unabhängiger Datensatz; Balkenbreite 0.1

Fehlerverteilung

Der vom Analogmodell gemachte Vorhersagefehler ist im Bassin nicht gleichmäßig verteilt (Abbildung 17), sondern nimmt von Süden nach Nordosten hin zu. Ebenso finden sich Zunahmen des Vorhersagefehlers über Landmassen und dem Golf von Mexiko, die mit den dort auftretenden häufigen Abweichungen von der durchschnittlichen atlantischen Zyklone zu erklären sind. Im Mittel liegt die unabhängige Vorhersage des Analogmodells nach 24 (72) Stunden um 17 (38) km zu weit westlich und um 10 (60) km zu weit nördlich, was in der Tendenz dem CLIPER-Fehler bei unabhängigen Vorhersagen entspricht (Neumann und Pelissier, 1981 b).

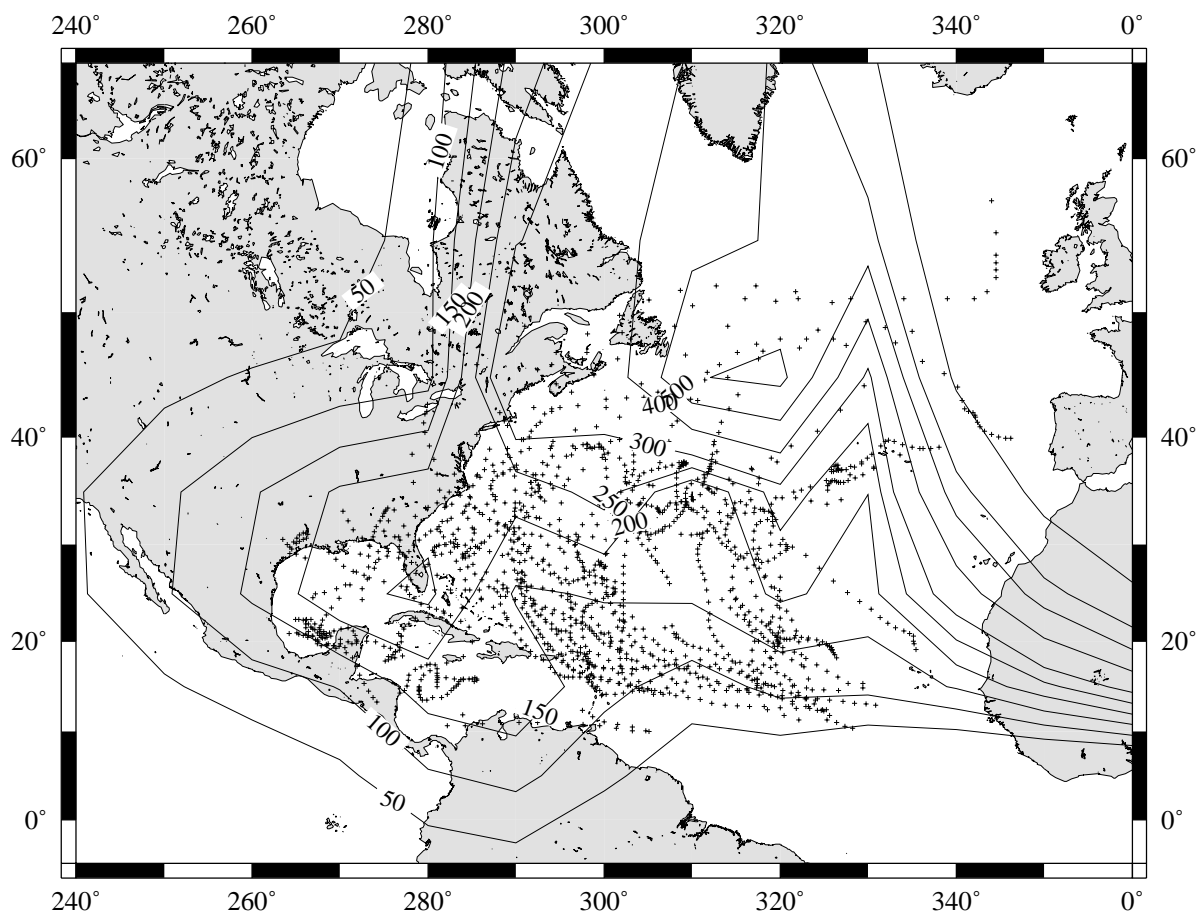


Abbildung 17: Über den Verifikationszeitraum gemittelte Großkreisentfernung zwischen 24-Stunden-Vorhersage und zugehöriger Beobachtung, gemessen am Ort der Beobachtung (+), gemittelt über Gebiete von $5^\circ \times 5^\circ$ ¹

1. Die Darstellung der Randbereiche ist irreführend, da das Isolinien-Programm die Aussage „Kein Meßwert“ mit der Aussage „Fehler=0“ gleichsetzt.

Einzelfalluntersuchung

Anhand mehrerer Vorhersagen wird das typische Verhalten des Analogmodells in der Prognose dargestellt. Hierfür werden die Hurrikane ANDREW (1992) und HUGO (1989) betrachtet. Diese beiden sind als die bisher teuersten Wirbelstürme in den USA bekannt geworden und entsprechend gut dokumentiert. Die Abbildungen zeigen die Vorhersagetracks von Analog und CLIPER sowie die zugehörige Beobachtung im 12-Stunden-Takt bis einschließlich 72 Stunden und die Positionen des Tracks 12 und 24 Stunden vor der aktuellen Position. Auf eine Darstellung der Wahrscheinlichkeitskreise wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet, die Werte finden sich in den begleitenden Texten. Ebenso werden die Analoga nicht dargestellt. Die Analog-Vorhersagen sind die im Kapitel 5 gemachten Prognosen, die auch zur Kombination mit CLIPER sowie zur Fehlerabschätzung genutzt werden.

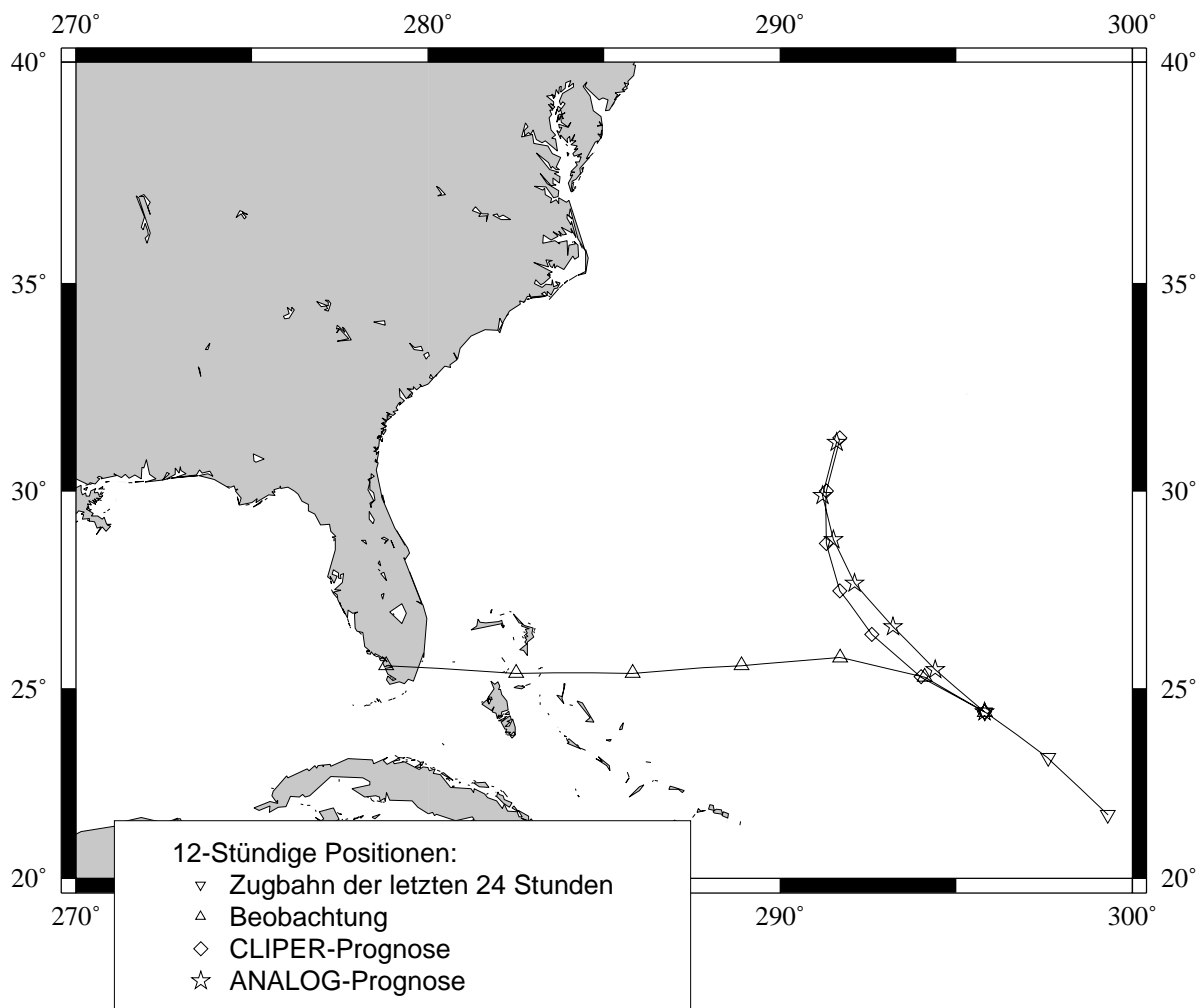


Abbildung 18: ANDREW am 21. August 1992, 1200 UTC

Der Hurrikan ANDREW taucht erstmalig am 16. August 1992 in dem Datensatz auf, um 1800 UTC wird die Position eines tropischen Tiefdruckgebietes vor der afrikanischen Westküste festgehalten. 18 Stunden später erreicht das System Sturmstärke und erhält den Namen ANDREW. Bis zum 20. August zieht der Sturm über den Atlantik, wird aber von einer vertikalen Scherung an der Intensivierung gehindert. Am Morgen des 21.8.1992 bildet sich in der Höhe eine Hochdruckzelle nahe der amerikanischen Küste, unmittelbar nördlich von ANDREW. Dadurch wird der Sturm nach Westen abgelenkt (Abbildung 18) und die Scherung beseitigt, so daß sich der Sturm verstärken kann. Am 22.8. um 0600 UTC wird ANDREW als Hurrikan registriert. Innerhalb von 36 Stunden fällt der Kerndruck um 72 hPa auf minimal 922 hPa, ANDREW ist ein Hurrikan der Stärke 5. In der Nacht vom 23. auf den 24. August überquert der Sturm die Bahamas und bringt eine fast 8 Meter hohe Flutwelle mit sich. Über den Inseln schwächt er sich auf Stärke 4 ab. Gegen 0900 UTC trifft der Wirbel auf die Küste von Florida. Windgeschwindigkeiten von 125 Knoten im Minutenmittel und Böen von 150 Knoten richten zusammen mit einer 5 Meter hohen Flutwelle einen Schaden von etwa 25 Milliarden US-\$ an. Innerhalb von 4 Stunden erreicht ANDREW als Stärke 3-Hurrikan den Golf von Mexiko und beginnt langsam Richtung Nordwesten einzudrehen (Abbildungen 19 und 20). Das über dem Atlantik gelegene Hochdruckgebiet vertieft sich und bildet einen Trog in Richtung Süd-Westen. Dieser lenkt den Sturm in Richtung Norden und am 26.8. um 0830 UTC an die Küste von Louisiana. Über dem Festland schwächt sich der Sturm schnell ab, innerhalb von 10 Stunden hat das System nur noch Sturmstärke, weitere 2 Stunden darauf ist es nur noch als Tiefdruckgebiet registriert. Insgesamt werden 2.5 Mio. Menschen evakuiert, 250000 werden obdachlos, 40 sterben. Der gesamte Schaden wird auf etwa 40 Milliarden US-\$ geschätzt.

Vorhergesagt werden drei Zustände des Sturmes. Der erste ist die Situation am 21.8.1992 mittags, als der Sturm auf das Hochdruckgebiet stößt und nach Westen abgelenkt wird (Abbildung 18). Weder CLIPER noch das Analogmodell sind in der Lage, diese Entwicklung vorzusehen, da ihnen die synoptische Information fehlt. Beide sagen ein Abdrehen nach Nord-Osten und eine zu kleine Geschwindigkeit vorher. Hier interessiert vor allem die 72-Stunden-Vorhersage, da der Landfall in Florida etwa 70 Stunden später stattfindet. Die Großkreisfehler liegen bei 1349 km beim Analogmodell und 1410 km bei CLIPER. Aufgrund der synoptischen Information kann die vorhergesagte Richtung bereits jetzt als nicht korrekt angegeben werden. Der erwartete Fehler des Analogmodells aufgrund der Streuung der Analoga wird zu 646 km errechnet. Damit liegt die tatsächliche Position gerade eben innerhalb des 95% Kreises, der in 1357 km Entfernung von der vorhergesagten Position liegt.

24 Stunden vor dem Landfall (Abbildung 19) folgt der Sturm im wesentlichen einer reinen Persistenzbahn. Das Analogmodell sagt wiederum ein anti-zyklonales Eindrehen voraus, während CLIPER die Track-Richtung sehr gut trifft. Jedoch ist die vorhergesagte Geschwindigkeit zu gering. So verfehlt CLIPER den Ort des Landfalls um nur 46 km (die Abweichung von der Zugbahn ist noch wesentlich geringer, allerdings wird hier nicht zwischen *Cross-Track*- und *Along-Track-Fehlern* unterschieden). Das Analogmodell hat einen absoluten Fehler von 286 km (wiederum nur in der absoluten Position, nicht in der Zugbahn). Erwartet worden waren 212 km. Damit liegt der beobachtete Ort etwa auf halber Strecke zwischen 55%-Kreis und 90% Kreis (bei 404 km). Der Landfall in Louisiana erfolgte fast exakt 72 Stunden nach dieser Vorhersage. Bei erwarteten 690 km Abweichung lag der Analog-Fehler mit 789 km deutlich innerhalb des 90%- Kreises (1242 km), der CLIPER-Fehler erreichte 521 km.

Vergleicht man die Abbildungen 19 und 20, so fällt auf, daß CLIPER sehr viel besser in der Lage ist, die Struktur der Zugbahn vorherzusagen. In beiden Fällen stimmt nur die vorhergesagte Geschwindigkeit nicht mit der tatsächlichen überein. Das Analogmodell ist nicht in der Lage, das scharfe Eindrehen am Ende der Vorhersagezeit zu simulieren. Hier macht sich der Nachteil der Ensemblevorhersage bemerkbar. Scharfe Änderungen in der Bewegungsrichtung werden herausgemittelt.

Abbildung 21 zeigt den Verlauf des Hurrikans HUGO in der Zeit vom 18. September 1989 bis zu seinem Absterben am 25. September. Eingetragen sind jeweils die Vorhersagen um 0600 UTC vom 19., 20., 21. und 22.9.1989. Am 19.9. prognostizieren sowohl das Analogmodell wie auch CLIPER ein Eindrehen nach Nord-Osten. Den Landfall 72 Stunden später sagen beide Modelle nicht vorher. Der Grund liegt wie bei ANDREW in der synoptischen Umgebung. Unmittelbar in Zugrichtung befindet sich ein Hochdruckgebiet, über Florida ein Tief. Beide zusammen sorgen für die Krümmung der Zugbahn nach links, die den Sturm über die Küste von South-Carolina führt. Der Fehler bei dieser 72-Stunden-Vorhersage liegt bei 1228 km (Analog) bzw. 1233 km (CLIPER). Aufgrund der Ensemblestreuung werden 731 km erwartet, damit liegt die Beobachtung innerhalb des 90%-Kreises (1315 km) um die Prognose. In den folgenden Vorhersagen zeigt sich das Beharren des Analogprogramms auf dem Einkurven. CLIPER dagegen reagiert zumindest im Kurzfristbereich sehr viel deutlicher auf die Änderung der Zugrichtung und -geschwindigkeit. 24 Stunden vor dem Landfall liegt der entsprechende Vorhersagefehler bei 403 km gegenüber 259 km bei CLIPER. Bei einem erwarteten Fehler von 195 km liegt die Beobachtung gerade noch im 95%-Kreis (408 km).

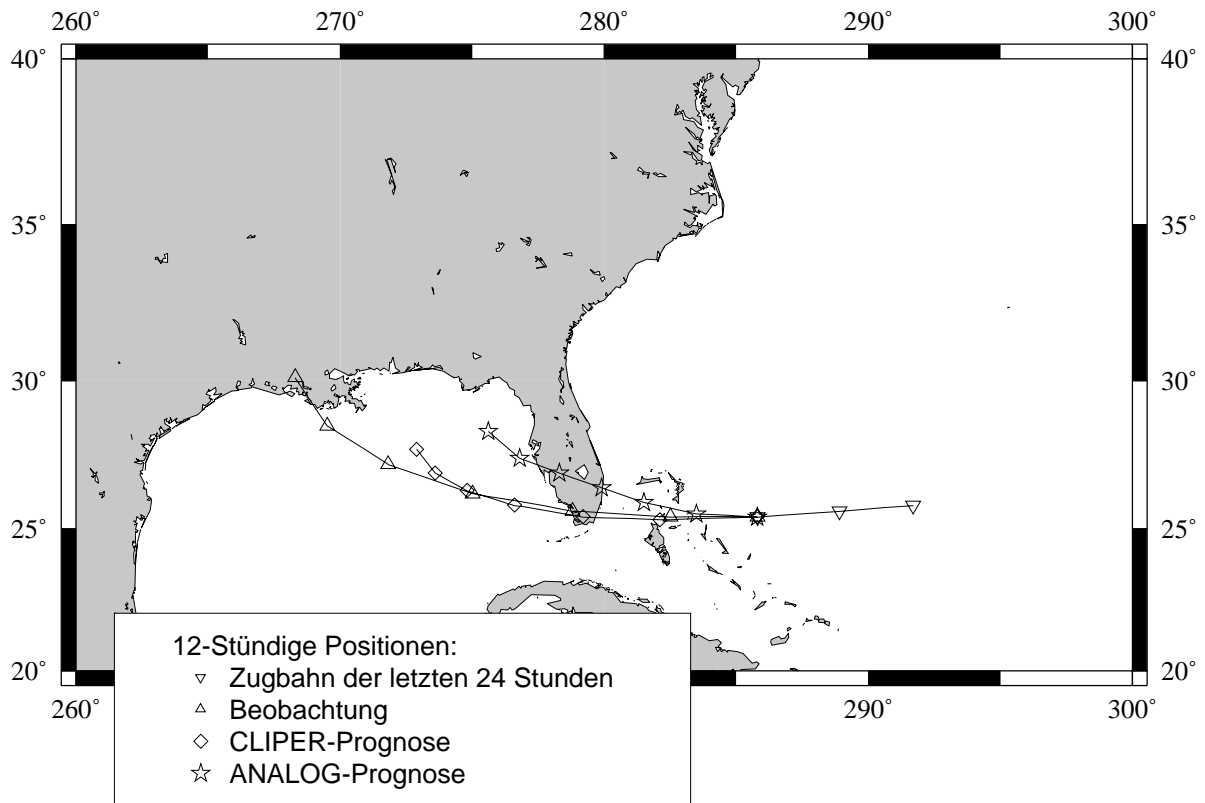


Abbildung 19: ANDREW, 23. August 1992, 1200 UTC

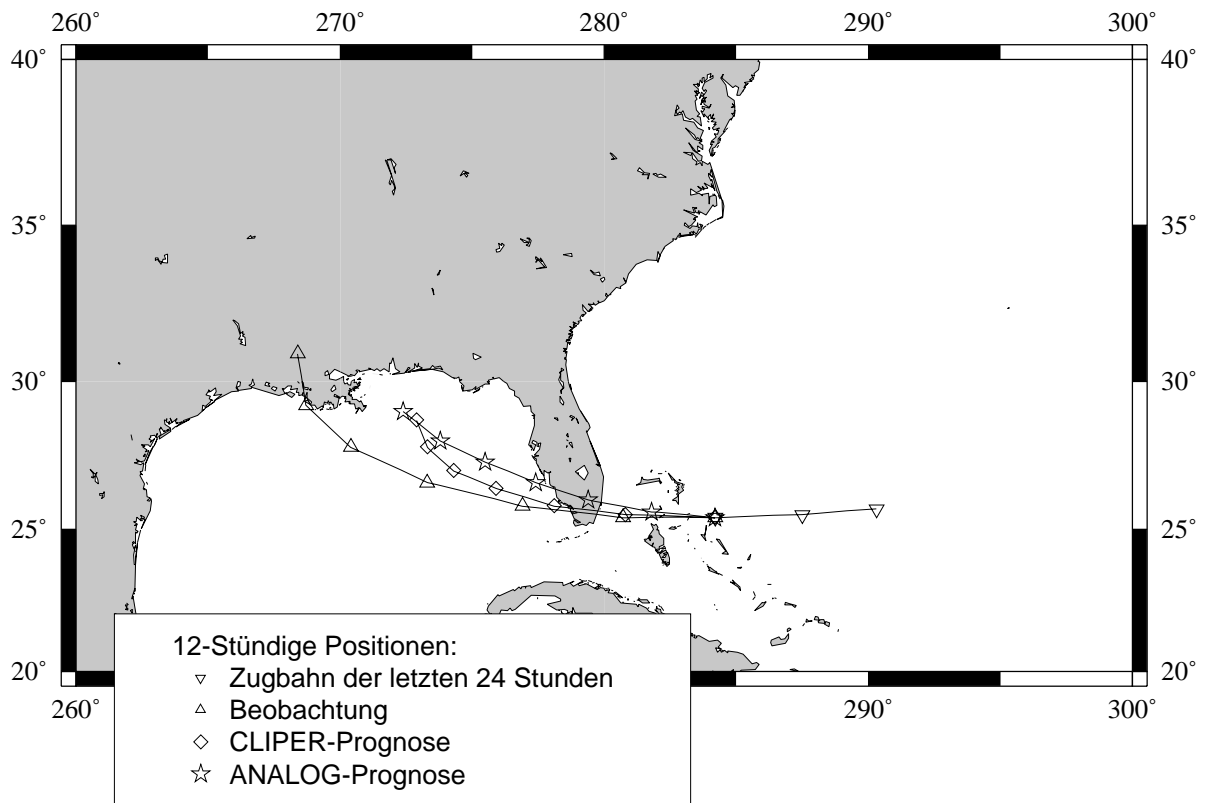


Abbildung 20: ANDREW, 23. August 1992, 1800 UTC

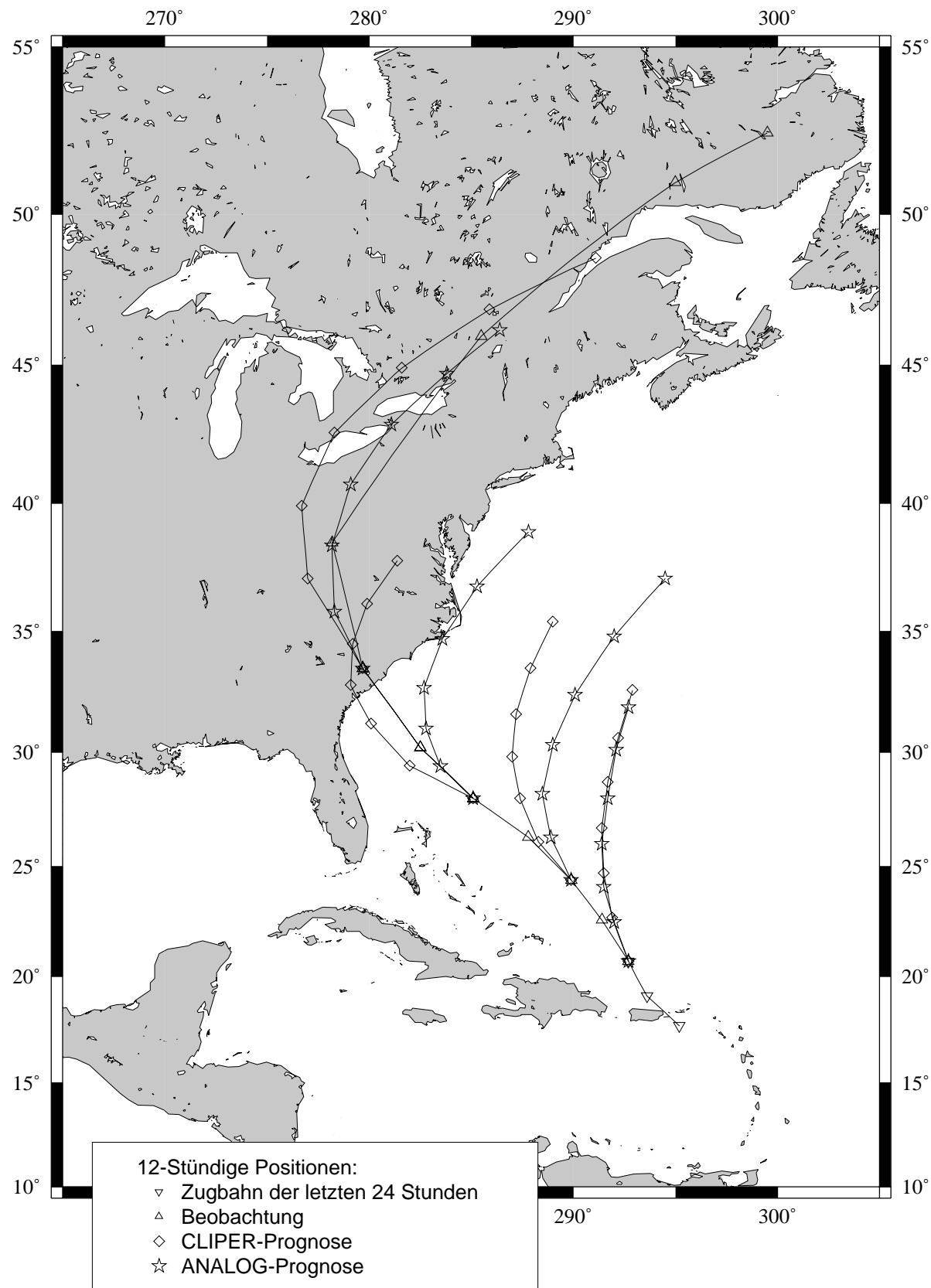


Abbildung 21: HUGO, Zugbahn ab 18. September 1989, 0600 UTC, Vorhersagen von ANALOG und CLIPER am 19., 20., 21. und 22. September 1989, jeweils 0600 UTC

5. KOMBINATION VON VORHERSAGEN

Zwei und mehr unabhängige, nicht exakte Vorhersagen eines Ereignisses können so miteinander kombiniert werden, daß die Kombination im Mittel eine höhere Genauigkeit besitzt als die Einzelvorhersagen, wobei die Genauigkeit typischerweise durch den mittleren quadratischen Fehler E (*MSE, mean square error*) oder dessen Wurzel (*RMSE, root mean square error*) dargestellt wird. Die Koeffizienten der linearen Kombination werden durch Minimierung des *MSE* der Kombination, also durch eine multivariate lineare Regression, bestimmt. Diese Methode der Kombinationsvorhersage geht auf Thomson (1977) zurück und wurde von Fraedrich und Leslie (1987) zur Kombination von Wahrscheinlichkeitsvorhersagen ausgebaut. Leslie und Fraedrich (1990) haben das Verfahren auf tropische Zyklonenzugbahnen im australischen Bassin angewendet und gezeigt, daß durch eine lineare Kombination von statistischer und numerischer Wettermodell-Vorhersage eine Verringerung des mittleren Vorhersagefehlers um 15% und mehr zu erzielen ist.

Im folgenden werden verschiedene Kombinationsvariationen vorgestellt. Auf eine detaillierte Herleitung der Koeffizienten wird dabei verzichtet. Anschließend werden die Ergebnisse der Kombination von Analogverfahren und CLIPER für diese Variationen dargestellt.

5.1. Kombinationsmodelle

Betrachtet wird in allen Fällen eine Kombination $\phi_k=(x_k,y_k)$ von Einzelvorhersagen $\phi_1=(x_1,y_1)$ und $\phi_2=(x_2,y_2)$ mit dazugehöriger Beobachtung $\phi=(x,y)$. Ausgehend von der allgemeinsten Linearkombination der Vorhersagen werden insgesamt 4 Variationen dargelegt. x bzw. y stellen hier keine absoluten Positionen, sondern die zonalen bzw. meridionalen Zyklonenbewegungen dar. Die Koeffizienten werden mittels linearer Regression ermittelt, indem die Fehler der Kombinationskomponenten

$$\begin{aligned} E_x &= \langle (x_k - x)^2 \rangle \quad \text{und} \\ E_y &= \langle (y_k - y)^2 \rangle \end{aligned} \quad (36)$$

minimiert werden. Der Ausdruck $\langle x \rangle$ steht für den Mittelwert über die Menge aller x .

Kombination A

Die allgemeinste Linearkombination von ϕ_1 und ϕ_2 in der hier genutzten Form ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} x_k &= a_1x_1 + a_2y_1 + a_3x_2 + a_4y_2 + a_5 \\ y_k &= a_6x_1 + a_7y_1 + a_8x_2 + a_9y_2 + a_{10} \end{aligned} \quad (37)$$

In dieser Form haben Leslie und Fraedrich (1990) die australischen Zyklonenvorhersagen kombiniert.

Kombination B

Nimmt man an, daß zonale und meridionale Bewegung x und y unkorreliert bzw. nur schwach korreliert sind, kann man das System (37) vereinfachen zu

$$\begin{aligned} x_k &= a_1x_1 + a_2x_2 + a_3 \\ y_k &= a_4y_1 + a_5y_2 + a_6 \end{aligned} \quad (38)$$

Da der Modellbildungszeitraum nur eine endliche Anzahl von Vorhersagen ϕ_1 und ϕ_2 enthalten kann, muß das Kombinationsmodell A trotz der höheren Anzahl von Koeffizienten nicht notwendigerweise die besseren Ergebnisse liefern. Die geringere Koeffizientenzahl in (38) führt nämlich bei gleicher Anzahl von in die Regression eingehender Vorhersagen und Beobachtungen zu stabileren Koeffizienten, was bei starker Variabilität der Daten durchaus zu beachten ist.

Kombination C

In einer weiteren Vereinfachung wird der *Intercept*, die Verschiebung der Regressionsflächen gegen den Nullpunkt, vernachlässigt. Man erhält das Kombinationssystem

$$\begin{aligned}x_k &= a_1x_1 + a_2x_2 \\y_k &= a_3y_1 + a_4y_2\end{aligned}\quad (39)$$

Eine Herleitung des Gleichungssystems für diese Koeffizienten findet sich zum Beispiel in Raible (1997), wobei zu beachten ist, daß es sich dort um eine eindimensionale (Temperatur-anomalie-) Vorhersage handelt. Die Koeffizienten reagieren sensitiv auf Verschiebungen des Datensatzschwerpunktes. In (37) und (38) wird dies durch den entsprechend großen Intercept¹ ausgeglichen. Daher ist es wichtig zu unterscheiden, ob es sich bei x und y um absolute Werte (Positionen) oder um Anomalien (Bewegungen) handelt.

Kombination D

Werden die mittleren Fehler nicht nach (36) einzeln, sondern der gesamte Vorhersagefehler

$$E_{ges} = \langle (x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 \rangle \quad (40)$$

minimiert, so erhält man das Gleichungssystem mit der minimalen Koeffizientenzahl:

$$\begin{aligned}x_k &= a_1x_1 + a_2x_2 \\y_k &= a_1y_1 + a_2y_2\end{aligned}\quad (41)$$

Wird dieses System verwendet, muß dem Umstand Beachtung geschenkt werden, daß es sich bei E_{ges} um den Fehler in der Ebene handelt, die Bewegung tatsächlich aber auf der Kugeloberfläche stattfindet. Man wird verschiedene Koeffizienten erhalten, je nachdem ob x und y als Differenz von geographischer Länge bzw. Breite in Grad oder als Bewegung in Kilometern angegeben sind, wobei in letzterem Fall die geographische Breite in die Größe der zonalen Verschiebung mit eingehen wird. Gleiches gilt für das System (37), während bei den Systemen (38) und (39) dieses Problem nicht auftritt, da hierbei die zonale und meridionale Vorhersage bei der gesamten Rechnung getrennt bleiben. Werden beide Richtungen nicht kombiniert, so haben die Koeffizienten auch keinen Einfluß aufeinander. Die Größe dieses Einflusses wird hier nicht weiter untersucht, es werden einheitlich Breiten- bzw. Längendifferenzen betrachtet.

1. a_5 bzw. a_{10} in (37), a_3 bzw. a_6 in (38)

5.2. Ergebnisse

Die Kombination erfolgt zwischen dem in Kapitel 4 als „optimal“ gefundenen Modell A bei einer Ensemblegröße von $N_E=18$ und CLIPER. Um eine echte Aussage über die Qualität der Kombinationsvorhersage treffen zu können, muß man drei Zeiträume unterscheiden:

- den Modellbildungszeitraum für das Analogmodell, in dem adaptiert wird;
- den Modellbildungszeitraum für das Kombinationsmodell und
- den Verifikationszeitraum.

Letzterer soll wieder die Jahre 1989 bis 1996 umfassen, um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Analogmodells zu gewährleisten. Die in Kapitel 4.5 erläuterte starke Varianz der Daten macht eine möglichst umfassende Datenmenge für die Bestimmung der Kombinationskoeffizienten erforderlich, damit die Koeffizienten stabil werden. Da die CLIPER-Koeffizienten bis einschließlich 1970 gebildet wurden, ist erst ab 1971 eine statistisch unabhängige Vorhersage mit dem CLIPER-Modell möglich. Aus diesem Grund wird die Grenze zwischen den beiden Modellbildungszeiträumen auf den Saisonwechsel 1970 / 71 gelegt. Damit ergeben sich als statistisch unabhängige Zeiträume:

- 1886 - 1970 Adaption der Modelle (CLIPER seit 1931, vergleiche Kapitel 3.3), 10423 nutzbare¹ Zustände;
- 1971 - 1988 Bestimmung der Kombinationskoeffizienten zwischen den Modellen, 2248 nutzbare Zustände;
- 1989 - 1996 Verifikation der Kombinationsmodelle, 1566 nutzbare Zustände.

Die Adaption mit der reduzierten Bibliothek ergibt einen etwas anderen Fehler als das ursprüngliche Modell. Ähnlich wie bei der Reduzierung der Bibliotheksgröße zu Beginn des Datensatzes (vergleiche Abbildung 8 in Kapitel 4.5) nimmt der Fehler im kurzfristigen Vorhersagebereich leicht zu (um etwa 2.5%) und sinkt im längerfristigeren Bereich gegenüber der kompletten Bibliothek um wenige Zehntel Prozent.

Mit den durch die Adaption erhaltenen Gewichten wird die Analogvorhersage für den Zeitraum 1971 bis 1988 durchgeführt. Die so gefundenen 2248 Prognosen je Vorhersagezeitschritt bestimmen über die Regressionsanalyse die Kombinationskoeffizienten. Die Koeffizienten für

1. Ein Zustand ist „nutzbar“ für Adaption oder Verifikation, sofern bis zum Absterben der Zyklone mindestens 12 nachfolgende Zustände gespeichert sind.

die 4 verschiedenen Kombinationsvariationen sind in Tabelle 14 bis Tabelle 17 zu finden. Hierbei ist die Analogvorhersage grundsätzlich die erste Vorhersage, die CLIPER-Vorhersage ist ϕ_2 . Bei der Betrachtung der Koeffizienten fallen einige Besonderheiten auf. Bei den Modellen A bis C, bei denen zonale und meridionale Vorhersage getrennt kombiniert werden, sind die Ergebnisse der meridionalen Kombination in den Grundzügen einheitlich. Die Gewichtung der Analogvorhersage nimmt mit der Vorhersagezeit stark zu, während das Gewicht der CLIPER-Meridionalen Komponenten um über 20 Prozentpunkte abnimmt. In der zonalen Kombination zeigen Modell A auf der einen und die Modelle B und C auf der anderen Seite dagegen Unterschiede. Bei dem umfangreicheren Modell A nimmt das Gewicht der Zonalkomponente von ANALOG durchgehend zu, das der CLIPER-Komponente ab. Die Modelle B und C dagegen, die keine Korrelationen betrachten, zeigen in der Analogkomponente ein abnehmendes Gewicht (mit einem leichten Anstieg zur 72-Stunden-Vorhersage) und entsprechend umgekehrt eine zunehmende Gewichtung von CLIPER. Ähnlich sehen die Koeffizienten bei Modell D aus. CLIPER erreicht die größte Gewichtung nach 36 Stunden.

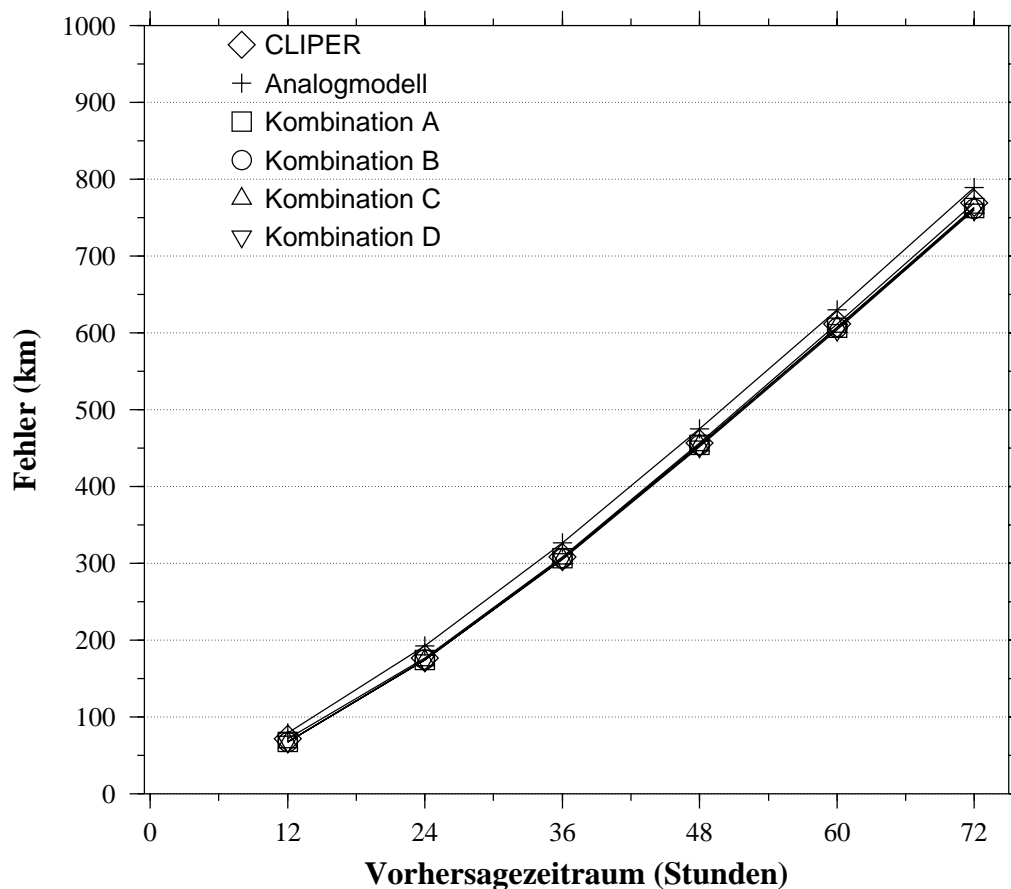


Abbildung 22: Großkreisfehler der Kombinationsmodelle, CLIPER und ANALOG

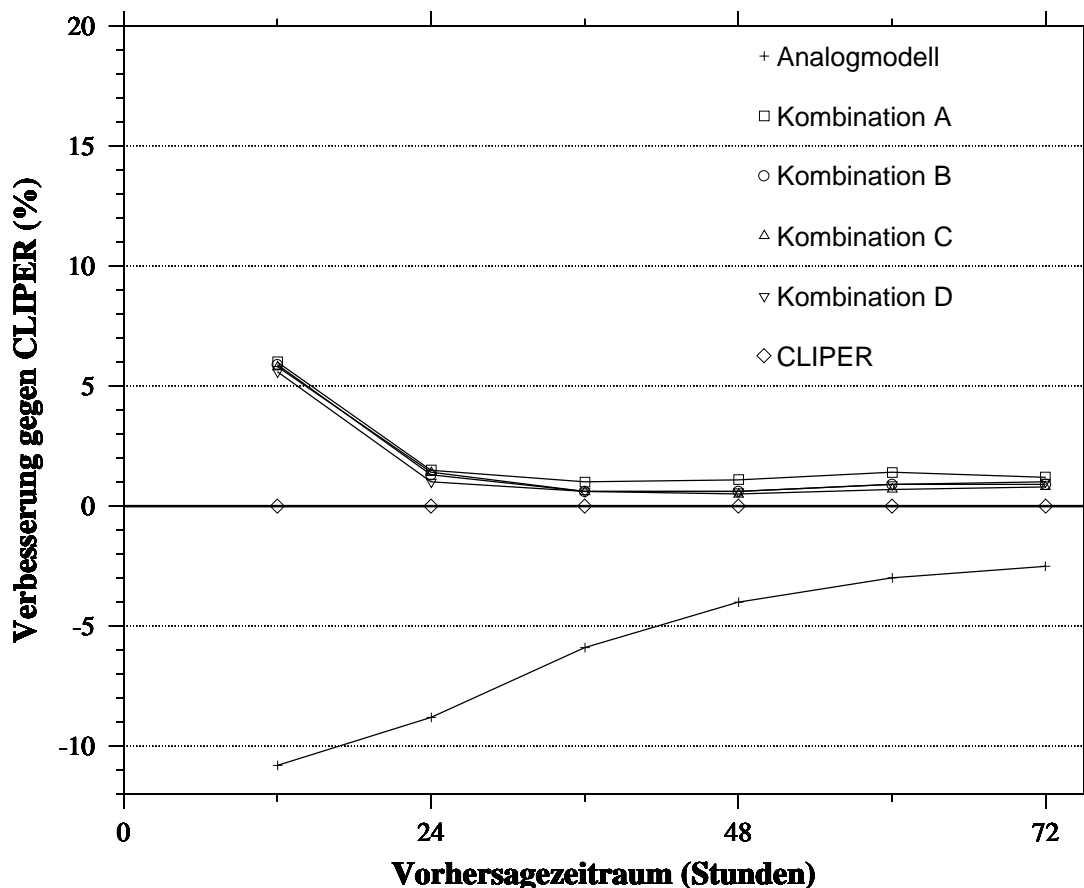


Abbildung 23: Skill der Kombinationsmodelle gegen CLIPER

Die Ergebnisse der kombinierten Prognose über den Verifikationszeitraum sind in Abbildung 22 (Großkreisfehler) und Abbildung 23 (Skill gegen CLIPER) dargestellt. Man erkennt, daß alle 4 Modelle einen nahezu identischen Skill gegenüber CLIPER aufweisen, und das über den gesamten Vorhersagezeitraum. Lediglich das Modell A zeigt zwischen 36 und 60 Stunden einen um etwa 0.5 Prozentpunkte höheren Skill. Das Maximum wird im Kurzfristbereich nach 12 Stunden mit 6.0% (Modell A) erreicht, nach 24 Stunden liegt der Skill zwischen 1.0% (Modell D) und 1.5% (Modell A). Jenseits von 24 Stunden schwankt er zwischen 1.0% und 1.5% bei den Modellen B, C und D bzw. zwischen 1.0% und 1.4% (Modell A). Der Grund dafür, daß die Verbesserung nur gering ausfällt (im Vergleich mit den von Leslie und Fraedrich (1990) gefundenen 15% zwischen dynamischem und statistischem Modell), liegt wahrscheinlich in der Ähnlichkeit der beiden Modelle. Bei beiden handelt es sich um rein statistische Verfahren, die von denselben Variablen abhängen. Daher sind die Prognosen nicht unabhängig und damit die Kombination nicht wirkungsvoll.

6. DISKUSSION UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wird ein Analog-Modell zur Vorhersage tropischer Zyklonenzugbahnen entwickelt. Das von Fraedrich und Rückert (1998) vorgestellte selbst-adaptierende Analog-Modell bildet hierfür die Grundlage. Es wird der mittlere Großkreisfehler aller Vorhersagen im atlantischen Bassin der Jahre 1989 bis 1996 bestimmt und mit den Ergebnissen des Regressionsmodells CLIPER (Neumann, 1972) verglichen. Den Schwerpunkt bilden neben den Vergleichen mit CLIPER Untersuchungen der Sensitivität des Modells auf Veränderungen in seinen Parametern.

6.1. Ergebnisdiskussion

Das Analogmodell besteht aus zwei Teilen, dem Adaptionsteil und dem Prognoseteil. Während der Adaptionphase lernt das Programm, unter Vorgabe einer Metrik sowie des Adaptionszieles in Form eines Vorhersagefehlers, in der Bibliothek von Zuständen die für die Ensembleprognose optimalen Analoga zu finden. Diese Zustände werden durch eine Kombination von Werten, die aus Klima (Position und Jahreszeit) und Persistenz (Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit sowie Sturmintensität) in den jeweils letzten 24 Stunden gebildet werden, dargestellt. Die Untersuchung von zwei unterschiedlichen Möglichkeiten, diese Informationen zu kombinieren, ergibt keinen nennenswerten Unterschied in der Qualität der Prognosen.

Das Prinzip der Adaption besteht darin, aus der Menge der N_A nächsten Analoga (bezüglich der Metrik) das Ensemble der N_E besten Analoga (bezüglich der Vorhersage) zu bestimmen und aus dem Verhältnis der Abstände die Metrik iterativ so neu zu bestimmen, daß im nächsten Iterationsschritt im Mittel bessere Analoga gefunden werden. Die hierzu eingeführte Lernregel ist jedoch nicht geeignet, die Randbedingungen zu variieren, so daß immer die Möglichkeit besteht, Modellspezifikationen zu finden, die zu noch kleineren Vorhersagefehlern führen. So zeigt die Variation der Größe N_A , daß ansonsten identische Vorhersagemodelle

durch unterschiedliche Adaption zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Anhand der Abbildung 4 wird deutlich, daß das Konvergenzverhalten der Metrik bzw. der darin enthaltenen Gewichte von den Adaptionparametern abhängt. Eine verbesserte Lernregel könnte diesem Sachverhalt unter Umständen Rechnung tragen und nicht nur bezüglich der Vorhersagequalität eines Analogons, sondern auch der Randbedingungen optimieren.

Aus Gründen der Rechnerbelastung wird während der Adaption die Kugelgestalt der Erde vernachlässigt, da die Einführung von Winkelfunktionen in der Abstandberechnung zu einer deutlichen Erhöhung der Rechenzeit führt. Als Kompromiß zwischen euklidischem Abstand, wie er bei der Adaption ausschließlich genutzt wird, und korrektem Großkreisfehler (1), der 6 Winkelfunktionen enthält, könnte man weiterführende Versuche mit der von Neumann und Pelissier (1981 a) genutzten Näherung

$$\Delta V \approx 60 \left\{ (Y_0 - Y_f)^2 + \left[(X_0 - X_f) \times \frac{\cos(Y_0 - Y_f)}{2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

machen, wobei der Vorhersagefehler ΔV zwischen Vorhersage (Index f) und Beobachtung (Index 0) eine Funktion von geographischer Länge X und Breite Y ist. Unter Umständen kann man bei einer Adaption mit (42) das Ergebnis verbessern, ohne den Rechenaufwand zu hoch zu treiben.

Es zeigt sich, daß eine Reduzierung der Bibliotheksgröße während der Adaption möglich ist, ohne daß sich der Prognosefehler um mehr als 0.5% ändert. Voraussetzung ist allerdings, daß die zum Lernen genutzten Zustände aus dem gesamten Bibliotheksumfang willkürlich ausgewählt werden. Dann ist eine Reduzierung des Lernsets auf zum Beispiel 1000 Zustände, das sind weniger als 10% der Bibliotheksgröße der Sturmpositionen im Zeitraum 1886 bis 1988, möglich und aus Gründen der Rechendauer auch empfehlenswert. Wird dagegen nur ein bestimmter Ausschnitt aus der Bibliothek verwendet und damit die statistische Bandbreite des Lernsets eingeschränkt, so führt schon eine geringe Verkleinerung des Lernsets zu einer Vergrößerung des Prognosefehlers um bis zu 5%.

Das beste Ergebnis liefert die Vorhersage, wenn die gewünschten Vorhersagezeitpunkte getrennt adaptiert und prognostiziert werden. Im Kurzfristbereich bis 12 Stunden ergeben sich Verbesserungen um rund 5%, allerdings sind nach 48 Stunden keine signifikanten Unterschiede zur Vorhersage der gesamten Zugbahn mehr festzustellen. Das beweist, daß die über den Vorhersagezeitraum integrierte Adaption von den großen Fehlern des mittelfristigen¹ Vorher-

1. Hier: 48 bis 72 Stunden

sagebereiches dominiert wird. Eine Aufteilung in zonale und meridionale Vorhersage führt bei der Zugbahnprognose zu einer Vergrößerung des Vorhersagefehlers um mindestens 3% im längerfristigen Bereich und bis zu etwa 10% im Kurzfristbereich. Eine Trennung der Vorhersage ist demnach weder zeitlich noch räumlich getrennt zu empfehlen, da ersteres eine Verbesserung der Prognose bei einer rund sechsfach längeren Rechenzeit¹ nur im Kurzfristbereich verspricht, letzteres gar eine Verschlechterung darstellt.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit des Prognosefehlers von der Ensemblegröße N_E findet man für Ensemblegrößen jenseits von 8 nur geringe Schwankungen. Die optimale Größe liegt in Abhängigkeit vom genutzten Phasenraum über den Vorhersagezeitraum konstant bei $N_E=18$ oder schwankt zwischen 14 und 20. Hieraus läßt sich eine mögliche weitere Verbesserung ableiten, indem die Ensemblegröße auch bei zeitlich getrennten Vorhersagen variiert wird und nicht nur, wie bei dieser Untersuchung, bei der zeitlich integrierten Vorhersage.

Unabhängig von den gewählten Modellparametern findet sich stets ein größerer Vorhersagefehler als ihn CLIPER aufweist. Im günstigsten betrachteten Fall liegt der Skill bei durchgehend etwa -5%, das heißt, der Fehler des Analogmodells liegt um 5% über dem CLIPER-Fehler. Wie die adaptierten Gewichte zeigen, wird die Vorhersage von der Persistenz, also der Bewegung der Zyklone dominiert. Andererseits deuten einzelne Beispiele darauf hin, daß das Analogmodell auf eine Veränderung der Bewegungsrichtung weniger empfindlich reagiert als CLIPER. Unter Umständen kann eine Darstellung der Persistenzkomponenten im Phasenraum durch Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit hier zu einer Verbesserung führen.

Mit Hilfe einer Kombination aus Streuung der Analoga zu den Vorhersagezeitpunkten, dem mittleren Abstand zwischen Referenz- und Analog-Tracks sowie der Position der Zyklone werden Wahrscheinlichkeitskreise um die Vorhersagepositionen gezogen. Die Verifikation am unabhängigen Datensatz zeigt, daß der aus dem abhängigen Datensatz gefundene erwartete Fehler gut für die Vorhersage der Ungenauigkeit der Prognose geeignet ist. Allerdings erfolgt bislang nur eine Vorhersage des Großkreisfehlers. In Analogie zu früheren Arbeiten ließe sich noch die Vorhersagbarkeit von Wahrscheinlichkeitsellipsen untersuchen, deren Achsen entweder parallel und senkrecht zur Zugbahn liegen oder am Gittersystem der Erdkugel orientiert sein können. Aus den Verteilungen und Korrelationen der Ensemblemitglieder lassen sich auch Wahrscheinlichkeitsellipsen ohne Vorzugsrichtung bestimmen.

1. Bei einer Vorhersage im 12-Stundentakt bis einschließlich 72 Stunden

Kombiniert man die Prognosen des Analogmodells mit der CLIPER-Vorhersage, so erhält man eine Verbesserung gegen CLIPER um maximal 6% nach 12 Stunden und weniger als 2% nach mehr als 24 Stunden. Im Vergleich zu der Kombination zwischen statistischem und dynamischen Modell, die im australischen Bassin eine Verbesserung von mehr als 15% bis zur 48 Stundenvorhersage erzeugt (Leslie und Fraedrich, 1990), ist diese Kombination offenbar weniger erfolgreich. Der Grund dürfte in der großen Ähnlichkeit der beiden Modelle liegen. Beide nutzen statistische Verfahren mit den selben Variablen zur Vorhersage, so daß man nur begrenzt unabhängige Prognosen vorliegen hat. Durch eine Abhängigkeit zwischen den Prognosen wird jedoch die Kombination nur geringe Verbesserungen hervorbringen.

6.2. Ausblick

Für rein statistische Modelle stellt CLIPER ein Verfahren kaum zu überbietender Qualität dar, sofern nicht weitergehende Informationen wie zum Beispiel die synoptische Umgebung in das Modell Einzug halten oder von vornherein ein dynamisches Modell genutzt wird. Letztere zeigen heute einen beträchtlichen Skill gegen CLIPER. So erreicht das britische Wettervorhersagemodell nach 72 Stunden eine Verbesserung von gut 50% im Zeitraum 1992 bis 1994 (Heming, 1994), also einen halbierten CLIPER-Fehler. Wie es typisch für dynamische Modelle ist, ist die Vorhersagequalität im kurzfristigen Bereich weniger hoch. Nach 12 Stunden liegt der Skill nur bei etwa 0%, um dann mit zunehmender Vorhersagezeit anzusteigen.

Die betrachteten Einzelfälle zeigen ebenso wie eine Reihe früherer Veröffentlichungen, daß das umgebende Windfeld die Bewegung der tropischen Zyklonen maßgeblich beeinflusst. Die Einbeziehung eines geeigneten synoptischen Datensatzes in den Phasenraum des Analogmodells könnte ein Weg sein, die Vorhersage mit diesem Modell weiter zu verbessern. Allerdings muß sichergestellt sein, daß Phasenraumdimension und Bibliotheksgröße ein vernünftiges Verhältnis haben¹. Einen ähnlichen Weg gehen Keenan und Woodcock (1981). Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Ergebnisse könnte, wie schon erwähnt, eine Änderung der Lernregel in der Weise sein, daß auch Randbedingungen wie Ensemblegröße oder andere betrachtet und nicht vorgegeben werden müssen. Das dürfte jedoch mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden sein. Einfacher wird es sein, die Kombination der Ensemblemitglieder zu einer Vorhersage zu variieren, indem zum Beispiel ein in irgendeiner

1. Deutlich ausgedrückt: Sofern nur 100 Analoga zur Verfügung stehen, ist die Bildung eines 100-dimensionalen Phasenraumes nicht sinnvoll.

Form gewichtetes Mittel gebildet wird oder das gefundene Ensemble einer Cluster-Analyse unterzogen wird. Ebenso könnte versucht werden, den zuletzt gemachten Fehler für eine Verringerung der Prognoseungenauigkeit zu nutzen, wie es von Fraedrich und Leslie (1998) vorgeschlagen wird. Die bisher mit dem Analogmodell gemachten Versuche in dieser Richtung haben noch keine nennenswerten Ergebnisse gezeigt. Offenbar muß hierzu ein völlig anderer Phasenraum konstruiert werden.

Dynamische Vorhersagemodelle erzeugen Ensemblevorhersagen, indem die Rechnung mehrfach wiederholt wird. Hierbei wird entweder mit der Monte-Carlo-Methode oder mit speziellen Methoden (Zhang und Krishnamurti, 1997) der Anfangszustand in Form der aktuellen Position variiert. Durch ein gezieltes Verrauschen der Referenzzustände bei der Analogsuche ließe sich mit dem Analogmodell ein ähnlicher Effekt erreichen. Als letzter an dieser Stelle genannter Vorschlag für weitere Untersuchungen der Vorhersagbarkeit tropischer Zyklonenzugbahnen mit dem selbst-adaptierenden Analogmodell sei die iterative Vorhersage erwähnt, bei der die 6-Stunden-Vorhersage als Referenz in die nächste Prognose eingeht. Sofern ein Phasenraum inklusive der aktuellen Windgeschwindigkeit wie in dieser Arbeit genutzt wird, muß jedoch ein Weg gefunden werden, die Intensität für den neuen Initialzustand zu prognostizieren. Eine reine Positionsvorhersage ist hierfür nicht ausreichend. Alle diese Untersuchungen lassen sich noch in den anderen Bassins durchführen. Im Anhang A geschieht dies für den Ost-Pazifik, da bisher nur für dieses Bassin die Koeffizienten des Regressionsmodells zum Vergleich vorliegen.

7. LITERATUR

- Anderberg, M. R., 1973: Cluster Analysis for Applications. Academic Press New York and London, 359 pp.
- Annette, P., 1978: CYCLOGUE - Analogic Prediction of the Course of Tropical Cyclones by National Meteorological Analysis Centre, Melbourne. Technical Report 28, Department of Science, Bureau of Meteorology, 22 pp.
- Annette, P., 1981: The Effect of Using an Enlarged Tropical Cyclone Data Base for Analogue Retrieval. Meteorological Note 133, Department of Science and Technology, Bureau of Meteorology, 12 pp.
- Anthes, R. A., 1982: Tropical Cyclones: Their Evolution, Structure and Effects. Meteor. Monogr., No. 41, Amer. Meteor. Soc., 208 pp.
- Aoki, T., 1979: A statistical prediction of the tropical cyclone position based on persistence and climatological factor in the western North Pacific (the PC method). *Geophys. Mag.*, **38**, No.4, 17 - 27.
- Asnani, G. C., 1993: Tropical Meteorological Vol. 2, Chapter 9. Pune: Noble Printers
- Bengtsson, L., Botzet, M. and Esch, M., 1994: Hurricane-Type Vortices in a General Circulation Model, Part I. *Max-Planck-Institut fuer Meteorologie Hamburg*, Report No. 123, 42pp.
- Brown, G. M. and Leftwich, P. W., 1982: A compilation of eastern and central North Pacific-tropical cyclone data. NOAA Technical Memorandum NWS NHC 16
- Chan, J. C. L. and Gray, W. M., 1982: Tropical Cyclone Movement and Surrounding Flow Relationships. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1354-1374.

- DeMaria, M., Lawrence, M. B. and Kroll, J. T., 1990: An Error Analysis of Atlantic Tropical Cyclone Track Guidance Models. *Wea. Forecasting*, **5**, 47 - 61.
- Dunn, G. E. and Miller, B. I., 1960: Atlantic Hurricanes. Louisiana State University Press, 320 pp.
- Dvorak, V.F., 1975: Tropical Cyclone Intensity Analysis and Forecasting from Satellite Imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 420 - 430.
- Elsberry, R. L.(Ed.), Frank, W. M., Holland, G. J., Jarrell, J. D. and Southern, R. L., 1987: A Global View of Tropical Cyclones. University of Chicago Press, 185 pp.
- Elsberry, R. L. and Peak, J. E., 1986: An Evaluation of Tropical Cyclone Forecast Aids Based on Cross-Track and Along-Track Components. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 147 - 155.
- Fiorino, M. and Elsberry, R. L., 1989: Some Aspects of Vortex Structure Related to Tropical Cyclone Motion. *Journ. of the Atm. Sciences*, **46**, No. 7, 975 - 990.
- Fraedrich, K. and Leslie, L. M., 1987: Combining Predictive Schemes in Short-Term Forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1640 - 1644.
- Fraedrich, K. and Leslie, L. M., 1989: Estimates of cyclone track predictability. I: Tropical cyclones in the Australian region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **115**, 79-92.
- Fraedrich, K. and Leslie, L. M., 1998: Improved Tropical Cyclone Track Predictions by Error Recycling. *Wea. Forecasting*, **13**, in press
- Fraedrich, K. and Rückert, B., 1998: Metric Adaption for Analog Forecasting. *Physica A* in press
- Fraedrich, K. und Ziehmann, C., 1994: Predictability experiments of persistence forecasts in a red noise atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **120**, 387 - 428.
- Goerss, J. S. and Jeffries, R. L., 1994: Assimilation of synthetic tropical cyclone observations into the Navy Operational Global Atmospheric Prediction System. *Wea. Forecasting*, **9**, 557 - 576.

-
- Gray, W. M. (WMO Report): Recent advances in tropical cyclone research from rawinsonde composite analysis. Dept. of Atmospheric Sciences, Fort Collins, 407 pp. (keine Jahresangabe verfügbar)
- Heming, J. T., 1994: Keeping an eye on the Hurricane. *nwp Gazette* **1**, No. 2, 3 - 7.
- Heming, J. T., Chan, J. C. L. and Radford, A. M., 1995: A new scheme for the initialisation of tropical cyclones in the UK Meteorological Office global model. *Meteorol. Appl.* **2**, 171-184.
- Holland, G. J., 1983: Tropical Cyclone Motion: Environmental Interaction Plus a Beta Effect. *Journ. of the Atm. Sciences*, **40**, 328 - 342.
- Holland, G. J., Leslie, L. M., Ritchie, E. A., Dietachmayer, G. S., Powers, P. E. and Klink, M., 1991: An Interactive Analysis and Forecast System for Tropical Cyclone Motion. *Wea. Forecasting*, **6**, 415 - 424.
- Hope, J. R. and Neumann, C. J., 1970: An Operational Technique for Relating the Movement of Existing Tropical Cyclones to Past Tracks. *Mon. Wea. Rev.*, **98**, No. 12, 925 - 933.
- Hope, J. R. and Neumann, C. J., 1971: Computer Methods applied to Atlantic Area Tropical Storm and Hurricane Climatology. *Mariners Weather Log*, **15**, 272 - 278.
- Hope, J. R. and Neumann, C. J., 1977: A Survey of World Wide Tropical Cyclone Prediction Models. Preprints 11th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami Beach, AMS, 367 - 374.
- Jarvinen, B. R., Neumann, C. J. and Davies, M. A. S., 1984: A Tropical Cyclone Data Tape for the North Atlantic Basin, 1886 - 1983: Contents, Limitations, and Uses. NOAA Tech. Memo., NWS NHC 22.
- Keenan, T. D. and Woodcock, F., 1981: Objective Tropical Cyclone Movement Forecasts Using Synoptic and Track Analogue Information. Meteorological Note 121, Department of Science and Technology, Bureau of Meteorology, 7 pp.
- Krishnamurti, T. N., Correa-Torres, R., Rohaly, G., Oosterhof, D. and Surgi, N., 1997: Physical Initialization and Hurricane Ensemble Forecasts. *Wea. Forecasting*, **12**, 503-514.

- Landsea, C. W., 1993: A Climatology of Intense (or Major) Atlantic Hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1703 - 1713.
- Leith, C. E., 1974: Theoretical Skill of Monte Carlo Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, No. 6, 409 - 418.
- Leslie, L. M. and Fraedrich, K., 1990: Reduction of Tropical Cyclone Position Errors Using an Optimal Combination of Independent Forecasts. *Wea. Forecasting*, **5**, 158 - 161.
- Leslie, L. M., Holland, G. J., Glover, M. and Woodcock, F., 1990: The skill of tropical cyclone position forecasting in the Australian region. *Aust. Met. Mag.* **38**, 87 - 92.
- Leslie, L. M., Hess, G. D., Holland, G. J., Morison, R. P. and Fraedrich, K., 1992: Predicting changes in intensity of tropical cyclones using a Markov chain technique. *Aust. Met. Mag.* **40**, 41 - 46.
- Mañe, R., 1981: On the dimension of the compact invariant sets of certain non-linear maps. *Lecture Notes in Mathematics*, **898**, 230, Springer Verlag New York.
- Merrill, R. T., 1980: A statistical tropical cyclone motion forecasting system for the gulf of Mexico. NOAA, Tech. Memo., NWS NHC-14, 19 pp.
- Neumann, C. J., 1972: An Alternate to the HURRAN (Hurricane Analog) Tropical Cyclone Forecast System. NOAA Tech. Memo., NWS SR-62.
- Neumann, C. J., 1981: Trends in Forecasting the tracks of Atlantic tropical Cyclones. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **62**, 1473 - 1485.
- Neumann, C. J. and Hope, J. R., 1972: Performance Analysis of the HURRAN Tropical Cyclone Forecast System. *Mon. Wea. Rev.*, **100**, No. 4, 245 - 255.
- Neumann, C. J. and Leftwich, P. W., 1977: Statistical Guidance of the Prediction of Eastern North Pacific Tropical Cyclone Motion - Part 1. NOAA, Tech. Memo, NWS WR-125, 32 pp.
- Neumann, C. J. and Mandal, G. S., 1978: Statistical guidance for the prediction of tropical storm motion over the Bay of Bengal and Arabian Sea. *Indian J. Meteor. Hydrol. Geophys.*, **29**, 487-500.

-
- Neumann, C. J. and Pelissier, J. M., 1981 a: Models for the Prediction of Tropical Cyclone Motion over the North Atlantic: An operational Evaluation. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 522 - 538.
- Neumann, C. J. and Pelissier, J. M., 1981 b: An Analysis of Atlantic Tropical Cyclone Forecast Errors, 1970 - 1979. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 1248 - 1266.
- Neumann, C. J. and Randrianarison, E. A., 1976: Statistical prediction of tropical cyclone motion over the southwest Indian Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 76-85.
- Pal, P. K., 1991: Cyclone Track Prediction over the North Indian Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 3095 - 3098.
- Peng, Y. and Yan, S., 1994: Seasonal variation features of western North Pacific tropical cyclone tracks with their predictability. *Advances in Atmospheric Sciences, Beijing, China*, **11(4)**, 463-469.
- Pike, A. C. and Neumann, C. J., 1987: The Variation of Track Forecast Difficulty among Tropical Cyclone Basins. *Wea. Forecasting*, **2**, 237 - 241.
- Raible, C. C., 1997: Stochastische Kurzzeitprognosen der Temperatur: Stationsvorhersage, Flächeninterpolation und Kombination mit dem Europamodell. Diplomarbeit am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg, 85 pp.
- Riehl, H., 1979: *Climate and Weather in the Tropics*. Academic Press, London, 611 pp.
- Rückert, B., 1995: Nichtlineare Methoden in der Zeitreihenanalyse mit Anwendungen auf klimatologische Daten. Diplomarbeit am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg, 102 pp.
- Seewetteramt, 1989: *Seewetter, Wetterkunde - Wetterkunde für die Berufs- und Sportschiffahrt*. 4. Auflage, Kap. 7.3, DSV - Verlag GmbH, Hamburg.
- Shapiro, L. J. and Neumann, C. J., 1984: On the Orientation of Grid Systems for the Statistical Prediction of Tropical Cyclone Motion. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 188 - 199.

- Thompson, P. D., 1977: How to Improve Accuracy by Combining Independent Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 228 - 229.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F., 1995: The Generic Mapping Tools GMT, Version 3. Technical Reference and Cookbook.
- WMO, 1979: World Weather Watch, WMO Tropical Cyclone Project - Sub-Project No. 6, Operational Techniques for Forecasting Tropical Cyclone Intensity and Movement. WMO-No. 528, World Meteorological Organization.
- WMO, 1993: Tropical Cyclone Programme, Report No. TCP-31, Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. WMO/TD - No. 560, World Meteorological Organization.
- Xu, Y. and Neumann, C. J., 1985: A statistical model for the prediction of western North Pacific tropical cyclone motion (WPCLPR). NOAA Tech. Memo. NWS NHC-28, 30 pp.
- Zhang, Z. and Krishnamurti, T. N., 1997: Ensemble Forecasting of Hurricane Tracks. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78** No. 12, 2785-2795.

ANHANG A. ERWEITERUNG AUF ANDERE BASSINS

A.1. Ost-Pazifik

In Anlehnung an das in Kapitel 4 untersuchte Atlantik-Modell wird ein äquivalentes Analogmodell zur Vorhersage der tropischen Zyklonen im Ost-Pazifik vorgestellt. In wesentlichen Teilen stimmen beide Modelle überein. Als Phasenraumkomponenten für das ostpazifische Modell dienen wie beim Atlantikmodell A die 6-stündigen Positionen und die dazwischenliegenden Verschiebungen bis maximal 24 Stunden vor dem Referenzzeitpunkt sowie die Nummer des Tages im Jahr. Die Intensität in Form der Windstärke dagegen wird nicht betrachtet, da der Best Track Datensatz im Ost-Pazifik hier große Lücken aufweist (vergleiche Kapitel 2.2). Damit ergibt sich der Phasenraum gemäß Tabelle 18 mit 13462 Zuständen aus den Jahren 1949 bis 1996.

Die Adaption erfolgt integriert über die Vorhersageschritte 6 Stunden bis 72 Stunden nach (30), wobei der Abstand zwischen Analogon und Referenz mit der Metrik nach (13) und (15) bestimmt wird. Die Ensemblegröße wird variiert, die Adaptiongröße einheitlich auf $N_A=N_E+1$ gesetzt. Zur Gewährleistung der Unabhängigkeit müssen sowohl Referenz und Analogon als auch die Analoga untereinander einen minimalen Abstand von $\Delta T=20$ Zeitschritten á 6 Stunden einhalten. Für die Prognose werden die gefundenen Analoga gemäß (27) in die Referenzposition verschoben und ungewichtet gemittelt. Als Gütemaß dient zum einen der Großkreisfehler (1), zum anderen der Vergleich mit dem ost-pazifischen Regressionsmodell EPCLPR (vergleiche Kapitel 3.3). Hierzu wird wiederum der Skill (33) des Analogmodells gegen EPCLPR angegeben.

Als Verifikationszeitraum wird der Zeitraum 1989 bis 1996 gewählt. In diesem Zeitraum liegen 2019 für die 72-Stunden-Vorhersage verwertbare Positionen aus 132 Stürmen vor. Die Zugbahnen des Verifikationszeitraumes sind in Abbildung 24 dargestellt. Der Modellbildungszeitraum umfaßt den Rest des Zeitraumes, 1949 bis 1988, mit 4701 Zuständen.

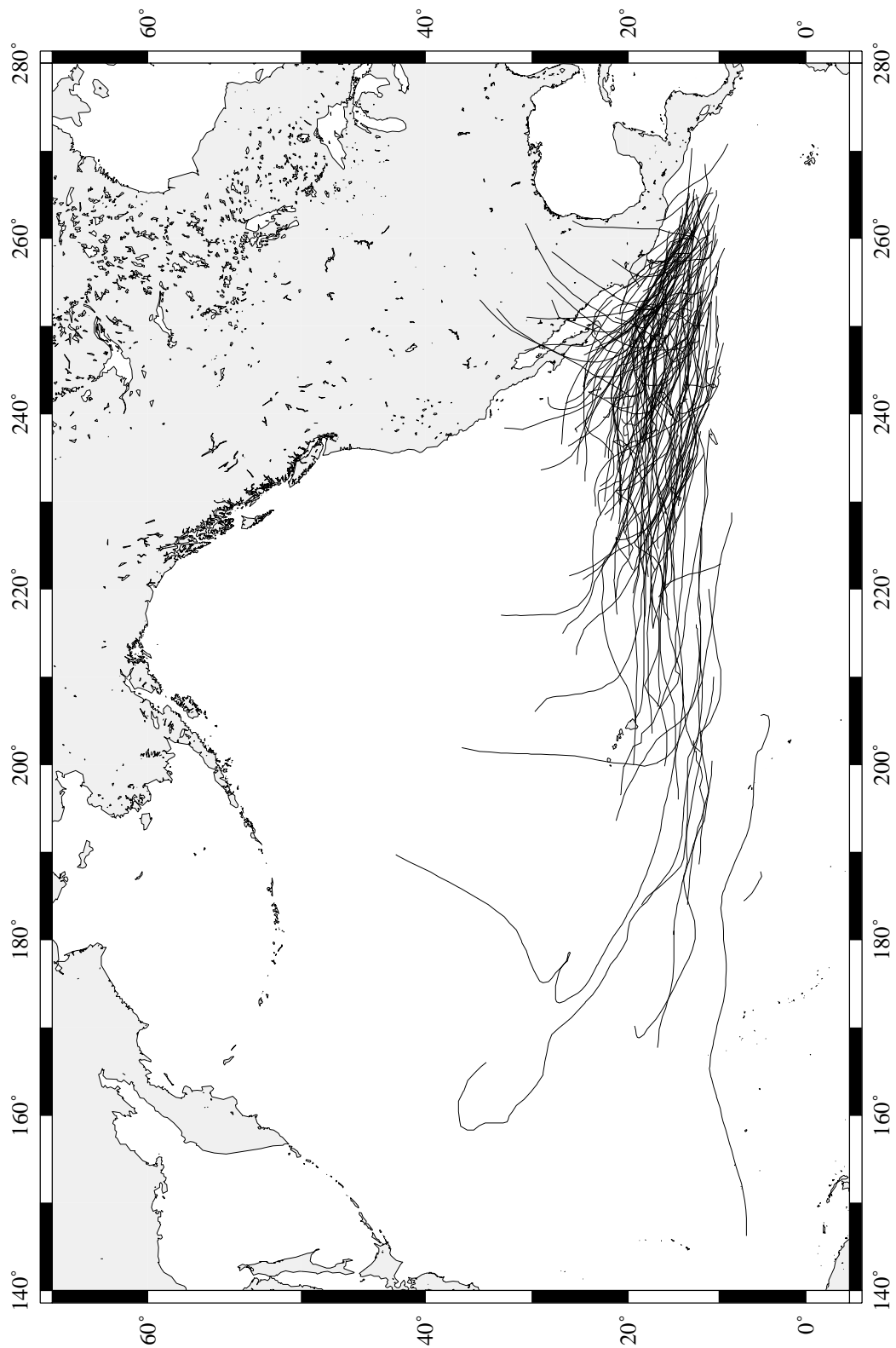


Abbildung 24: Zugbahnen der 132 tropischen Zyklonen im Ost-Pazifik 1989 bis 1996

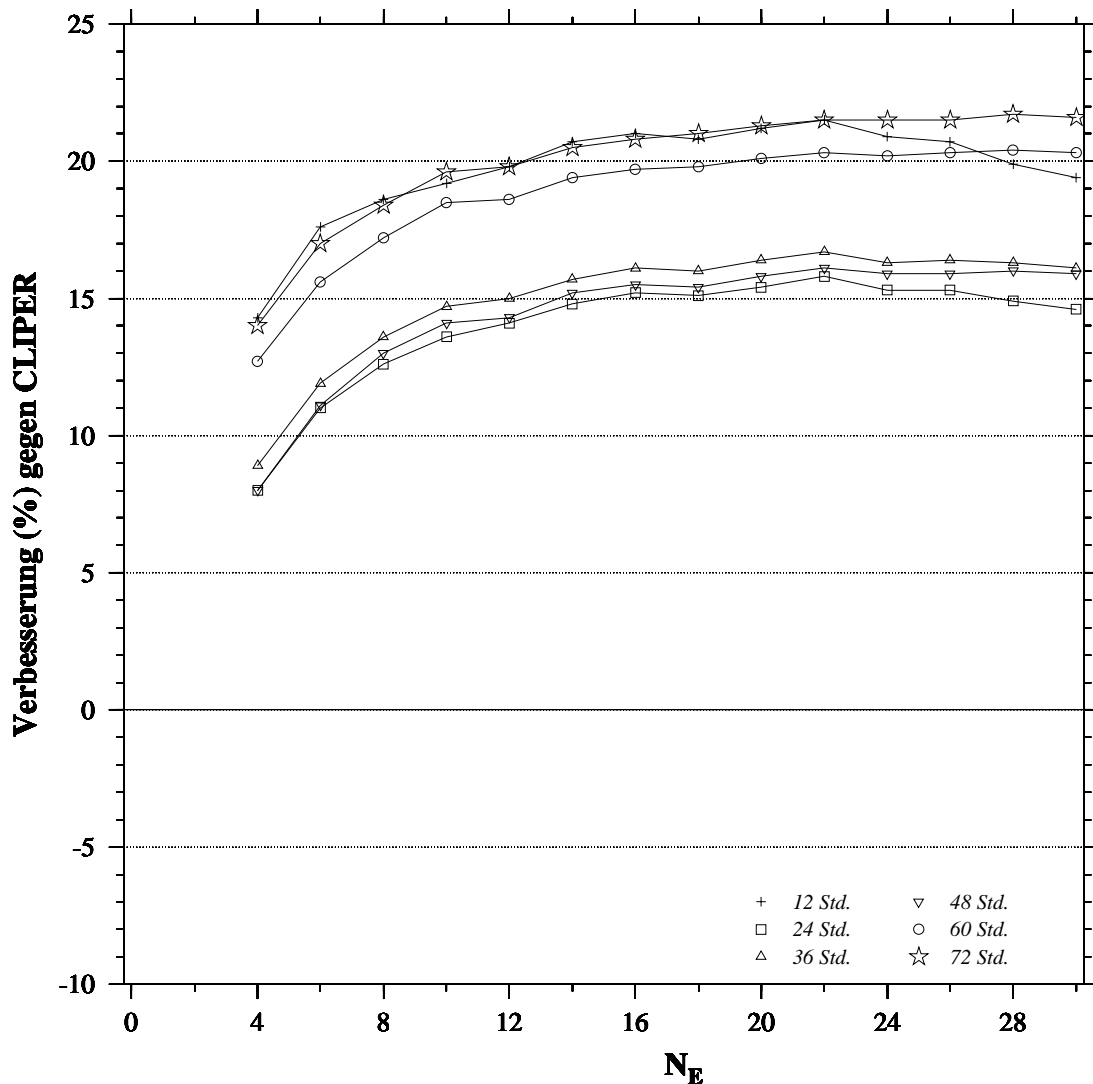


Abbildung 25: Skill der Vorhersagezeitschritte 12 bis 72 Stunden gegen EPCLPR in Abhängigkeit von der Ensemblegröße N_E

In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Abhängigkeiten des Großkreisfehlers bzw. des Skills gegen EPCLPR von der Ensemblegröße N_E dargestellt. Man erkennt ein besonders im kurzfristigen Vorhersagezeitraum ausgeprägtes Minimum des Vorhersagefehlers bei $N_E=22$. Im längerfristigen Bereich (60 und 72 Stunden) ist dieses Minimum zwar erst bei $N_E=28$ zu finden, der Unterschied zu dem Fehler der kleineren Ensemblegröße von 22 liegt jedoch bei 0.1% (60 Stunden) bzw. 0.3% (72 Stunden). Es wird daher die Ensemblegröße von $N_E=22$ als „optimal“ bezeichnet. Der zeitliche Verlauf von Skill und Großkreisfehler bei dieser Ensemblegröße wird in Abbildung 27 gezeigt. Man erkennt eine Verbesserung des EPCLPR-Ergebnisses um durchgehend 15% bis 20%.

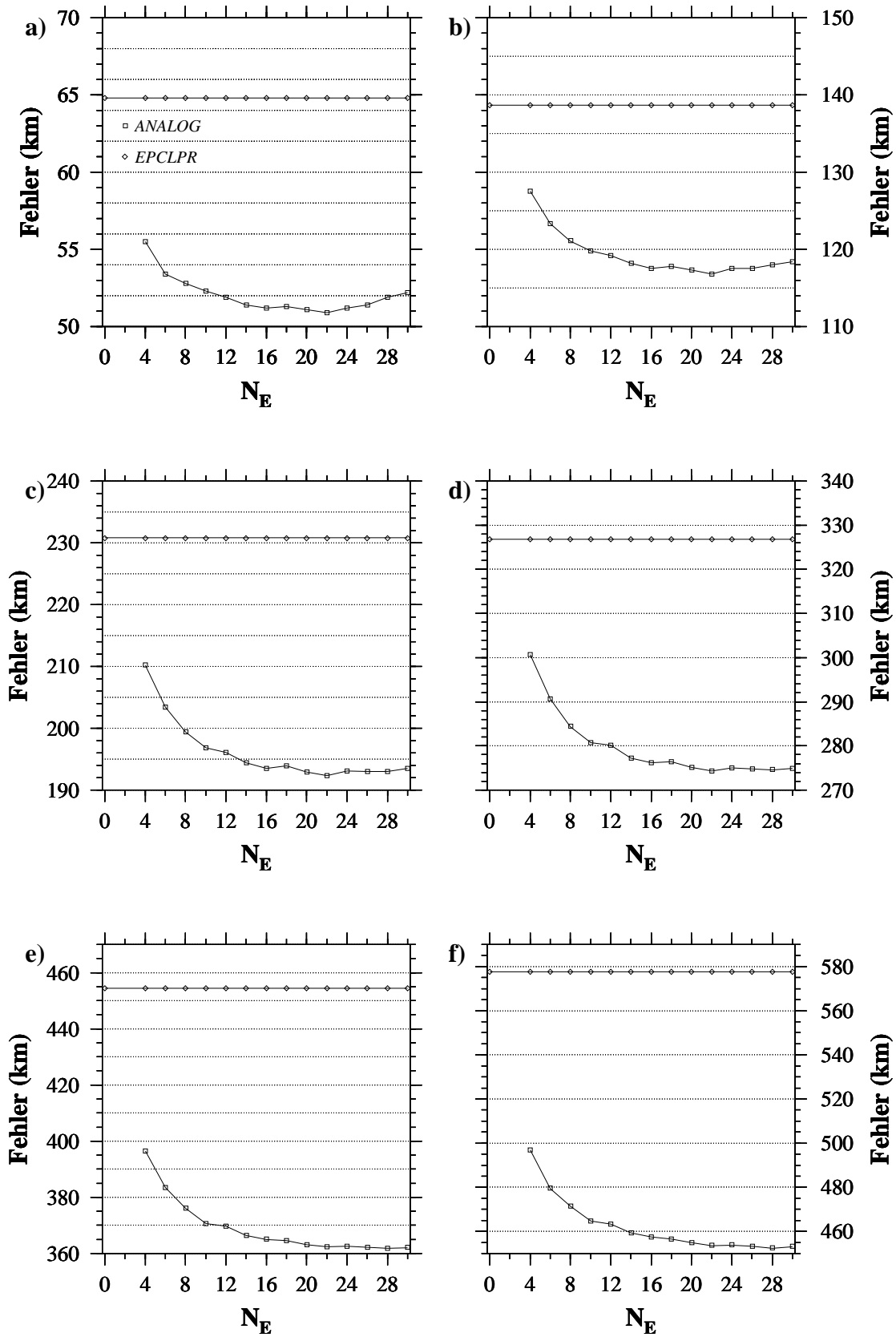


Abbildung 26: Sensitivität gegen Ensemblegröße N_E bei den Vorhersageschritten: (a) 12 Std., (b) 24 Std., (c) 36 Std., (d) 48 Std., (e) 60 Std. und (f) 72 Std.; Legende bei (a).

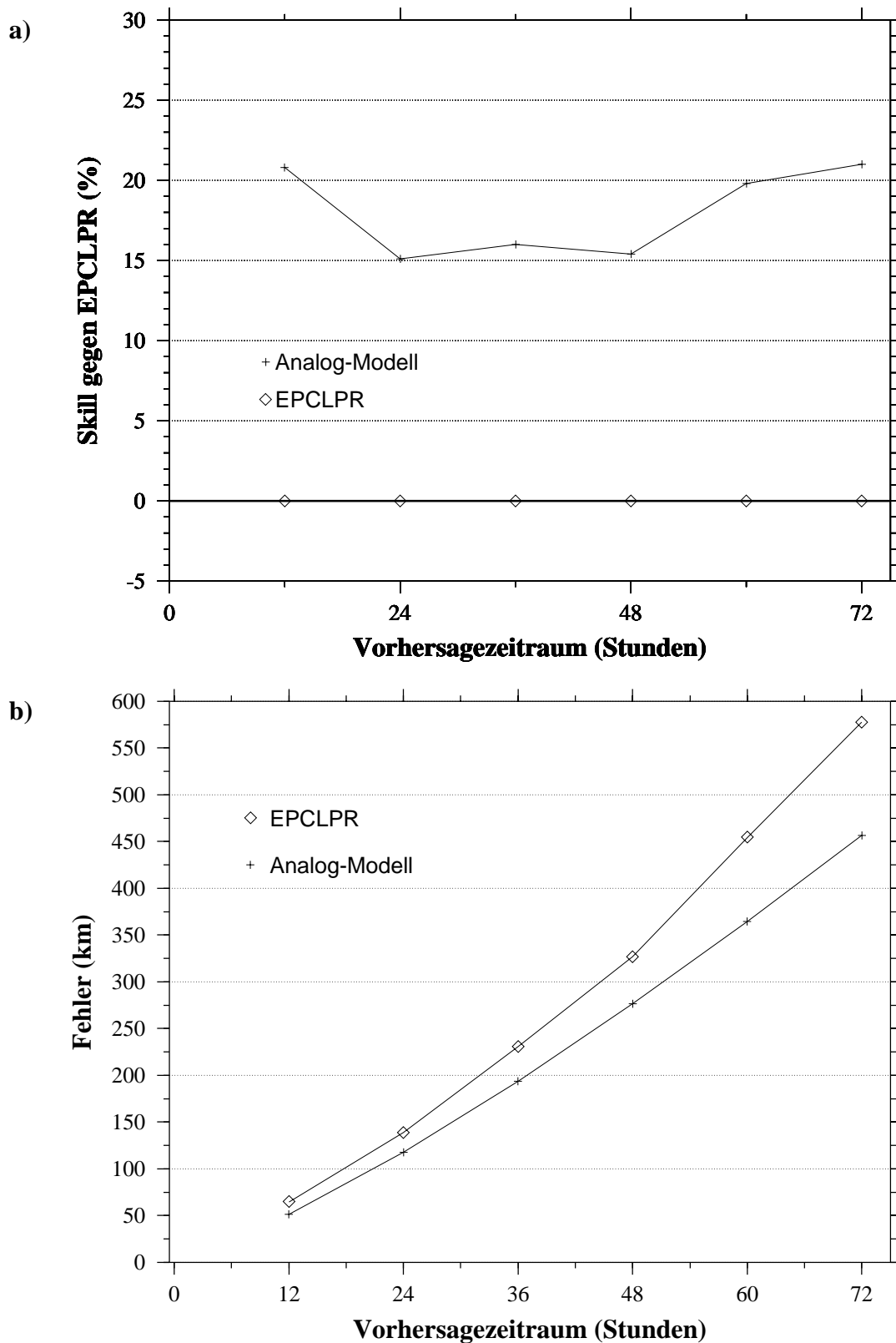


Abbildung 27: Ergebnisse des Analog-Modells für den Ost-Pazifik mit der „optimalen“ Ensemblegröße $N_E=22$: (a) Skill gegen EPCLPR; (b) Absoluter Großkreisfehler

Die Gewichte, wie sie die Adaption ergibt, sind in Abbildung 28 und Tabelle 2 dargestellt. Die Analogsuche wird wie beim Atlantik von den Persistenz-Komponenten sowie dem Tag als Klimagröße dominiert. Die Positionen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die Tatsache, daß die Positionen am Rand der Trajektorie höher gewichtet werden als diejenigen in der Mitte, weist auf die Bedeutung der großskaligen Bewegung hin.

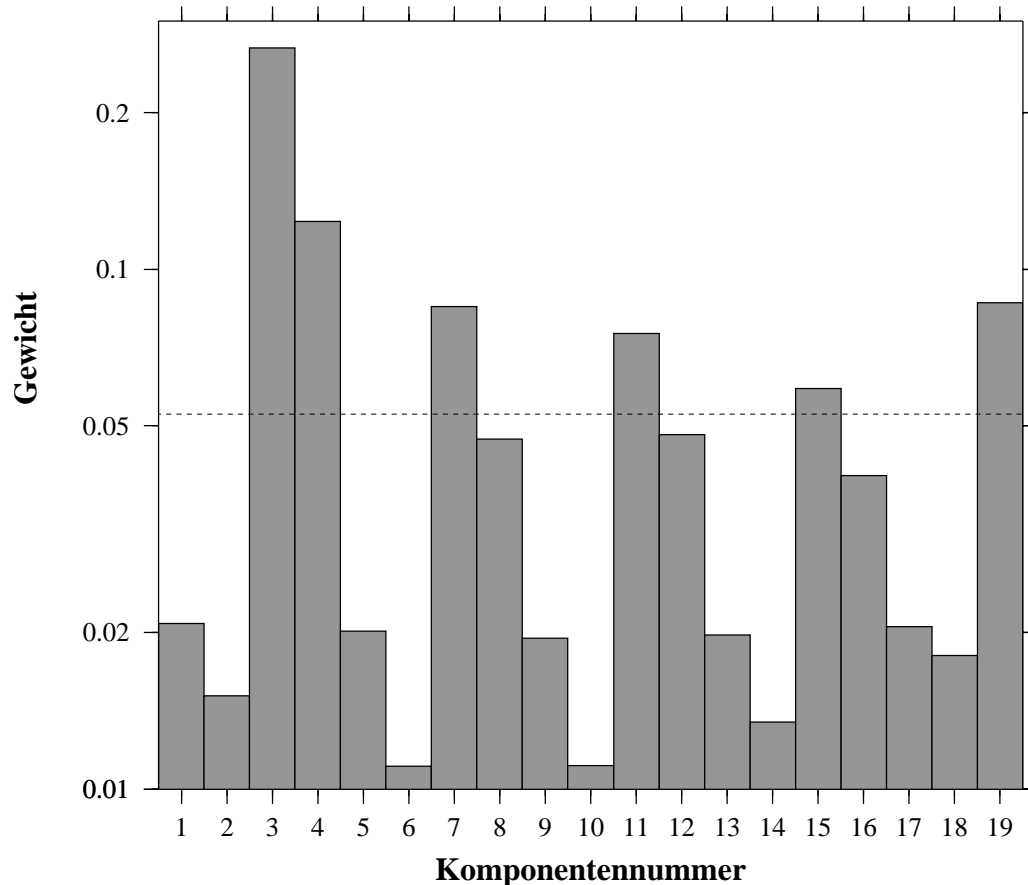


Abbildung 28: „Optimale“ Gewichte der Phasenraumkomponenten des Ost-Pazifikmodells mit „optimaler“ Ensemblegröße $N_E=22$. Die waagerechte Hilfslinie stellt das euklidische Gewicht für 19 Komponenten dar.

Tabelle 2: Zahlenwerte zu Abbildung 28 (%)

Nr.	Gewicht	Nr.	Gewicht	Nr.	Gewicht	Nr.	Gewicht
1	2.08	2	1.51	3	26.66	4	12.36
5	2.01	6	1.11	7	8.47	8	4.72
9	1.95	10	1.11	11	7.51	12	4.80
13	1.98	14	1.35	15	5.90	16	4.01
17	2.06	18	1.81	19	8.61		

Der Grund für die Überlegenheit des Analogmodells gegen EPCLPR erscheint vielschichtig. Einerseits liegen die Zustände über einen sehr viel kleineren Raum verteilt als im Atlantik (vergleiche die Abbildungen 1 und 2). Daher wird das Analogmodell trotz einer im Vergleich zum Atlantik kleineren Bibliothek bessere Analoga finden. Andererseits weist das Regressionsmodell zwei mögliche Schwachstellen auf. Der Verzicht auf die dritten Potenzen bei EPCLPR (vergleiche Kapitel 3.3) könnte im Vergleich zu CLIPER zu Qualitätseinbußen führen. Weiterhin könnte die Anzahl der benutzten Variablen bei EPCLPR schlicht zu hoch sein. Nach Pike und Neumann (1987) sind die ost-pazifischen Zyklonen nach den nord-indischen am leichtesten vorherzusagen. Das würde aber nach den in Kapitel 4.4 gemachten Überlegungen zur Phasenraumdimension eine Attraktordimension von etwa 6 bedeuten (da die Zyklonen sowohl im Nord-Indischen Ozean wie auch im Nord-Pazifik Attraktordimensionen von 5 bis 6 haben). Demnach benötigt man eine Phasenraumdimension von etwa 13 zur Einbettung des Attraktors. Wird diese höher gewählt, so droht eine Verfälschung der Regression durch Schein-Korrelationen, zumal wenn die Anzahl der in die Regression eingehender Zustände klein ist. Im Fall von EPCLPR wurde eine Phasenraumdimension von jeweils 36 für Länge und Breite gewählt, die Regression mit maximal 2200 Zuständen (für die 12-Stunden-Vorhersage) durchgeführt. Möglicherweise läßt sich durch eine entsprechende Reduzierung des Phasenraumes sowie der Betrachtung auch der dritten Potenzen eine Verbesserung des Regressionsmodells erreichen.

ANHANG B. TABELLEN

B.1. Die Saffir-Simpson-Skala

Tabelle 3: Saffir-Simpson-Skala (Atlantik)

Stärke	Kerndruck (hPa)	max. Windstärke (Knoten)	Flutwelle (ft)	Zerstörung
1	≥ 980	64 - 82	4 - 5	Schwach
2	965 - 979	83 - 95	6 - 8	Mäßig
3	945 - 964	96 - 112	9 - 12	Stark
4	920 - 944	113 - 134	13 - 18	Extrem
5	< 920	> 134	> 18	Katastrophal

B.2. Die CLIPER-Variablen

Tabelle 4: In CLIPER eingehende Variablen

Variable	Symbol
aktuelle Position (Länge)	X_0
aktuelle Position (Breite)	Y_0
akt. Ost-West-Bewegung	U_0
Ost-West-Bewegung vor 12 Stunden	U_{-12}
akt. Süd-Nord-Bewegung	V_0
Süd-Nord-Bewegung vor 12 Stunden	V_{-12}
Maximaler Wind	W
Kalendertag	D

Tabelle 5: In EPCLPR eingehende Variablen

Variable	Symbol
Kalendertag	P_1
akt. Position (Breite) [Grad Nord]	P_2
akt. Position (Länge) [Grad West]	P_3
mittl. meridionale Geschwindigkeit über die letzten 12 Stunden [Knoten]	P_4
mittl. zonale Geschwindigkeit über die letzten 12 Stunden [Knoten]	P_5
mittl. meridionale Geschwindigkeit in den vergangenen 12 bis 24 Stunden	P_6
mittl. zonale Geschwindigkeit in den vergangenen 12 bis 24 Stunden	P_7

Tabelle 6: Zusätzliche Vorhersagevariablen P_8 bis P_{35} bei EPCLPR. Die Bedeutung der Terme P_1 bis P_7 ergibt sich aus Tabelle 5

$P_8 = P_1^2$	$P_{15} = P_4 P_2$	$P_{22} = P_5^2$	$P_{29} = P_7 P_1$
$P_9 = P_2 P_1$	$P_{16} = P_4 P_3$	$P_{23} = P_6 P_1$	$P_{30} = P_7 P_2$
$P_{10} = P_2^2$	$P_{17} = P_4^2$	$P_{24} = P_6 P_2$	$P_{31} = P_7 P_3$
$P_{11} = P_3 P_1$	$P_{18} = P_5 P_1$	$P_{25} = P_6 P_3$	$P_{32} = P_7 P_4$
$P_{12} = P_3 P_2$	$P_{19} = P_5 P_2$	$P_{26} = P_6 P_4$	$P_{33} = P_7 P_5$
$P_{13} = P_3^2$	$P_{20} = P_5 P_3$	$P_{27} = P_6 P_5$	$P_{34} = P_7 P_6$
$P_{14} = P_4 P_1$	$P_{21} = P_5 P_4$	$P_{28} = P_6^2$	$P_{35} = P_7^2$

B.3. Phasenraumkomponenten für den Atlantik

Tabelle 7: Phasenraumkomponenten Modell A. Bewegungen nach Süden / Westen sind negativ. Durchschnitt und Standardabweichung über alle 24839 Zustände

Nr.	Größe	Durchschnitt	Standardabweichung
1	nördl. Breite (y), $t=0$	27.98	9.74
2	östl. Länge (x), $t=0$	292.61	18.27
3	Δy [km], $t=-6$ Std. bis $t=0$ Std.	68.68	81.82
4	Δx [km], $t=-6$ Std. bis $t=0$ Std.	1.17	165.43
5	nördl. Breite, $t=-6$ Std.	27.36	9.46
6	östl. Länge, $t=-6$ Std.	292.51	17.96
7	Δy [km], $t=-12$ Std. bis $t=-6$ Std.	63.77	70.79
8	Δx [km], $t=-12$ Std. bis $t=-6$ Std.	-13.96	137.01
9	nördl. Breite, $t=-12$ Std.	26.77	9.21
10	östl. Länge, $t=-12$ Std.	292.48	17.74
11	Δy [km], $t=-18$ Std. bis $t=-12$ Std.	59.34	62.93
12	Δx [km], $t=-18$ Std. bis $t=-12$ Std.	-27.98	123.27
13	nördl. Breite, $t=-18$ Std.	26.18	8.99
14	östl. Länge, $t=-18$ Std.	292.51	17.60
15	Δy [km], $t=-24$ Std. bis $t=-18$ Std.	55.85	56.30
16	Δx [km], $t=-24$ Std. bis $t=-18$ Std.	-40.51	98.49
17	nördl. Breite, $t=-24$ Std.	25.61	8.79
18	östl. Länge, $t=-24$ Std.	292.62	17.53
19	max. Wind [m/s]	58.82	25.70
20	Tag des Jahres	252.30	37.81

Tabelle 8: Phasenraumkomponenten Modell B. Geschwindigkeiten nach Süden / Westen sind negativ. Durchschnitt und Standardabweichung über alle 24839 Zustände

Nr.	Größe	Durchschnitt	Standardabweichung
1	nördl. Breite (Y_0) [deg]	27.98	9.74
2	östl. Länge ($360^\circ - X_0$) [deg]	292.61	18.27
3	U_0 [kt] ^a	1.03	17.39
4	U_{-12} [kt]	-0.36	14.08
5	Y_{0-24} [deg]	3.98	9.74
6	V_0 [kt]	6.18	7.36
7	$V_0^2 U_{-12}$ [kt ³]	681.43	9572.07
8	$(Y_{0-24}) V_0 U_{-12}$ [deg kt ²]	926.32	3950.27
9	X_{0-68} [deg]	-0.61	18.27
10	V_0 [kt]	6.18	7.36
11	V_{-12} [kt]	5.83	6.37
12	$V_0 (V_{-12})^2$ [kt ³]	1036.61	3358.94
13	$(W-71) V_{-12}$ [m/s kt]	-63.18	240.95
14	$V_0 (W-71)$ [kt m/s]	-61.88	302.74
15	$V_0^2 V_{-12}$ [kt ³]	1166.95	4420.81
16	$(Y-24)^2 V_0$ [deg ² kt]	1108.72	3753.26
17	$(D-248)^2 V_{-12}$ [kt]	7478.07	29962.29
18	$V_0 (D-248)^2$ [kt]	7853.70	31732.59
19	$(Y-24)^2 (D-248)$ [deg ²]	701.02	6849.27
20	$(W-71) (D-248) V_{-12}$ [m/s kt]	171.59	8963.76
21	U_0 [kt]	1.03	17.39
22	$(D-248)^2$	1448.30	3197.50

a. kt=Knoten=Seemeilen pro Stunde

B.4. Tabellen der Regressionskoeffizienten

Tabelle 9: Vorhersagevariablen und Konstanten, Zonale CLIPER-Vorhersage

		$c(i,j)$					
j	$P(j)$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
1	(Nullpunkt)	-3.52591	-13.12388	-28.48156	-44.13759	-55.80913	-60.23074
2	U_0	13.69309	23.30256	32.37355	38.93567	43.27097	46.26022
3	U_{-12}	-2.63735	-3.21553	-5.34286	-6.81978	-7.86100	-8.80890
4	Y_0-24	0.81513	3.58451	8.07388	14.10797	21.27143	29.11625
5	V_0	0.68678	3.94936	9.32124	16.35476	24.07252	32.91178
6	$V_0^2 U_{-12}$	-0.00217	-0.00786	-0.01318	-0.01967	-0.02254	-0.02182
7	$(Y_0-24)V_0 U_{-12}$	-0.00060	-0.00676	-0.02041	-0.03853	-0.05992	-0.08554
8	X_0-68	0.12473	0.51356	1.04467	1.69802	2.47757	3.29118

Tabelle 10: Vorhersagevariablen und Konstanten, Meridionale CLIPER-Vorhersage

		$c(i,j)$					
j	$Q(j)$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
1	(Nullpunkt)	7.60553	30.30846	67.69324	120.27143	186.02612	263.15653
2	V_0	13.59909	22.91538	31.94291	38.94701	44.48386	48.41731
3	V_{-12}	-2.57513	-2.48460	-3.69760	-4.38088	-4.72498	-4.45666
4	$V_0 (V_{-12})^2$	-0.00019	0.00497	0.00967	0.01323	0.01074	0.01127
5	$(W-71) V_{-12}$	0.00460	0.00930	0.00954	0.02293	0.03200	0.04297
6	$V_0 (W-71)$	0.00226	0.02511	0.06322	0.09532	0.13383	0.16962
7	$V_0^2 V_{-12}$	-0.00149	-0.00784	-0.01332	-0.01664	-0.01607	-0.01748
8	$(Y-24)^2 V_0$	-0.00027	-0.00598	-0.01611	-0.03201	-0.04866	-0.06486
9	$(D-248)^2 V_{-12}$	-0.00007	-0.00035	-0.00073	-0.00122	-0.00172	-0.00222
10	$V_0 (D-248)^2$	0.00004	0.00016	0.00023	0.00032	0.00036	0.00036
11	$(Y-24)^2 (D-248)$	-0.00020	-0.00100	-0.00281	-0.00546	-0.00877	-0.01268
12	$(W-71) (D-248) V_{-12}$	0.00008	0.00048	0.00115	0.00187	0.00271	0.00369
13	U_0	0.14306	0.38795	0.89408	1.66666	2.76818	4.12125
14	$(D-248)^2$	-0.00008	-0.00067	-0.00218	-0.00435	-0.00733	-0.01102

Tabelle 11: EPCLPR Regressionskoeffizienten $C_{i,j}$, meridionale Vorhersage

j	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
1	0.28183	1.18052	2.38256	3.58511	5.97668	8.56197
2	4.54362	9.34165	14.13007	14.46563	16.85013	11.19234
3	-1.42100	-3.42104	-6.36789	-9.25645	-9.91800	-9.18991
4	-8.56360	4.48317	-3.71111	-7.51016	-31.14655	-41.40225
5	5.71709	10.35844	17.69620	15.18651	0.44341	1.79082
6	12.86888	5.87024	1.74920	-13.89104	-0.09895	-1.79274
7	-6.01259	-10.03888	-14.15262	-10.82519	-1.69509	6.79229
8	-0.00072	-0.00206	-0.00423	-0.00752	-0.01090	-0.01492
9	0.00063	-0.01625	-0.04131	-0.05232	-0.08087	-0.14252
10	0.06721	0.31212	0.56283	0.75825	0.65233	1.01402
11	0.00031	0.00075	0.00406	0.01049	0.01027	0.01463
12	-0.07295	-0.17033	-0.27114	-0.35747	-0.35492	-0.36397
13	0.01014	0.02319	0.03542	0.04482	0.04810	0.03928
14	0.02048	0.02328	0.06976	0.06327	0.04555	-0.00809
15	-0.12879	-0.08382	0.98199	1.49706	2.64653	2.47840
16	0.15884	0.13062	0.01637	0.07362	0.22316	0.45020
17	-0.33551	-0.68624	-1.45030	-3.20021	-1.91375	-1.96895
18	-0.00727	-0.04334	-0.03475	-0.09298	-0.07205	-0.12811
19	-0.07209	0.20527	0.47377	0.87333	-0.34724	0.91126
20	-0.02897	-0.04398	-0.15017	-0.06874	0.19187	0.22103
21	-0.38261	-0.16919	-1.12399	-1.89451	-2.78150	-3.69923
22	-0.33432	-0.24937	-0.38695	-0.35178	-1.11149	-1.73016
23	-0.00643	0.02468	0.01177	0.04631	0.04412	0.14596
24	0.21205	0.05579	-0.77006	-0.94017	-1.06854	-0.87386
25	-0.14236	-0.14558	0.00474	0.04854	-0.12492	-0.37243
26	0.42663	0.32494	1.03102	3.97111	1.03197	0.69980
27	0.37864	0.32959	1.04663	1.74865	3.77791	3.04986
28	-0.22564	0.16422	0.31629	-1.12289	0.40985	0.82163
29	0.00583	0.05279	0.06682	0.14646	0.15913	0.24957
30	-0.09063	-0.65893	-1.36515	-2.41965	-1.83110	-4.12507
31	0.06227	0.10103	0.21472	0.19123	0.03990	0.01827
32	0.38215	0.20131	1.03018	1.84901	2.99691	3.89398
33	0.55811	0.24677	0.49862	0.19994	2.20824	3.86509
34	-0.15284	0.14816	-0.33254	-0.77717	-2.89866	-2.04142
35	-0.17689	0.13097	0.13402	0.57277	-0.36316	-1.26143
36	51.54951	87.70613	191.45848	311.63135	122.90865	-49.45882

Tabelle 12: EPCLPR Regressionskoeffizienten Q_{ij} , zonale Vorhersage

j	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
1	-1.85455	-3.74638	-6.46342	-9.66092	-11.69466	-13.29456
2	10.46346	21.86832	45.26634	70.99454	98.94820	137.46045
3	1.45819	5.46016	7.89286	9.61258	19.26921	28.53558
4	4.08746	7.87156	-10.19538	-49.06210	-38.47107	21.14783
5	25.51109	12.02663	16.22977	11.31185	20.56873	33.27660
6	-6.75084	-9.76737	-18.59772	4.63427	8.63129	-35.92805
7	-17.30367	1.94166	7.22404	20.00237	10.30467	1.47229
8	0.00331	0.00739	0.01291	0.01797	0.02353	0.02915
9	-0.00704	-0.02194	-0.04063	-0.04398	-0.06271	-0.08834
10	0.09916	0.30838	0.69502	0.81899	2.13888	2.48826
11	0.00480	0.00776	0.01312	0.02258	0.02130	0.01642
12	-0.09587	-0.21813	-0.48393	-0.70544	-1.28889	-1.63914
13	-0.00401	-0.01402	-0.01306	-0.01543	-0.00684	-0.01311
14	0.03287	-0.00091	0.06252	0.15327	0.14832	0.11112
15	0.02140	0.41549	1.73121	0.91692	1.78905	1.27456
16	-0.10892	-0.06777	-0.20891	0.06332	0.02972	-0.31684
17	-0.03449	1.52858	0.08821	1.60376	2.42669	1.45771
18	-0.02469	-0.04252	-0.04317	-0.08437	-0.03404	-0.12663
19	0.93308	0.22601	0.68425	1.56295	0.84145	1.77174
20	-0.21166	0.11558	0.12628	0.15139	0.14990	0.14701
21	1.36879	-0.40859	-0.02464	-1.94950	-2.82517	-3.90791
22	-1.07563	-0.36550	-0.60331	-0.70759	-1.64106	-2.68669
23	-0.02778	0.03004	0.01623	-0.04308	-0.03849	-0.02593
24	-0.17880	-0.61352	-2.38881	-2.00883	-3.91345	-3.82812
25	0.13580	0.07664	0.39326	0.22906	0.27010	0.56483
26	0.26839	-3.46122	-2.23628	-3.22331	-4.99370	-2.84130
27	-2.48284	1.11385	0.35949	3.12168	3.57564	2.73703
28	0.00029	1.83346	2.62705	2.45040	4.11566	3.59300
29	0.03171	0.05635	0.06962	0.11245	0.04433	0.10238
30	-0.97447	-0.46202	-1.20352	-2.24124	-2.48466	-3.67784
31	0.22925	-0.06139	-0.07612	-0.09981	0.16656	0.30452
32	-1.49676	0.65331	-0.33997	1.63690	4.13544	5.23015
33	2.23501	1.73573	2.88805	3.01985	5.51485	7.56695
34	2.42468	-1.45265	-0.29809	-3.43679	-5.39915	-4.68612
35	-1.07444	-1.26156	-2.13891	-2.13442	-3.17083	-3.89801
36	4.51569	-175.52870	-230.95285	-251.77850	-957.13672	-1752.63965

B.5. Fehlerberechnungskoeffizienten

Tabelle 13: Koeffizienten a_i zur Fehlerabschätzung

i	Vorhersagezeitraum (Stunden)					
	12	24	36	48	60	72
1	67.8600	120.6000	161.1000	172.4000	160.1000	132.1000
2	0.3383	0.2555	0.1419	0.1584	0.1999	0.3026
3	0.2072	0.6285	1.1030	1.5450	2.1550	2.7100
4	-0.1829	1.4540	4.3900	7.6790	10.6300	12.3400
5	-77.9400	-213.2000	-354.8000	-474.5000	-616.4000	-714.6000

B.6. Kombinationskoeffizienten

Tabelle 14: Kombinationsmodell A, Koeffizienten a_i

i	Vorhersagezeitraum (Stunden)					
	12	24	36	48	60	72
1	0.44710	0.39370	0.35260	0.32950	0.31540	0.32310
2	0.49460	0.53540	0.56120	0.57390	0.57850	0.56350
3	0.06739	0.12390	0.16070	0.18230	0.20560	0.25230
4	-0.09241	-0.14710	-0.17440	-0.17960	-0.14790	-0.10770
5	-0.02266	-0.08427	-0.15450	-0.20960	-0.38850	-0.81740
6	-0.04483	-0.07354	-0.09081	-0.09056	-0.07874	-0.06299
7	0.01857	0.02435	0.02081	0.00900	-0.00926	-0.03186
8	0.25500	0.26980	0.37510	0.49860	0.58800	0.66380
9	0.71260	0.71500	0.62830	0.53850	0.48960	0.46440
10	-0.02961	-0.15280	-0.37130	-0.69810	-1.11900	-1.69300

Tabelle 15: Kombinationsmodell B, Koeffizienten a_i

i	Vorhersagezeitraum (Stunden)					
	12	24	36	48	60	72
1	0.444010	0.396784	0.367934	0.356996	0.356943	0.381759
2	0.493985	0.528662	0.544019	0.547132	0.544713	0.523649
3	-0.039376	-0.105143	-0.149188	-0.134629	-0.012724	0.206070
4	0.229618	0.217323	0.299073	0.412343	0.503586	0.580972
5	0.718675	0.723686	0.631299	0.525150	0.448642	0.389541
6	0.002395	-0.027211	-0.088519	-0.226948	-0.423694	-0.682967

Tabelle 16: Kombinationsmodell C, Koeffizienten a_i

i	Vorhersagezeitraum (Stunden)					
	12	24	36	48	60	72
1	0.459253	0.413005	0.377843	0.359902	0.356876	0.386059
2	0.485663	0.519881	0.539158	0.546200	0.544823	0.520197
3	0.232353	0.201687	0.267643	0.358842	0.433886	0.498486
4	0.717630	0.729583	0.641345	0.536985	0.455513	0.387645

Tabelle 17: Kombinationsmodell D, Koeffizienten a_i

i	Vorhersagezeitraum (Stunden)					
	12	24	36	48	60	72
1	0.394828	0.359212	0.348373	0.356406	0.372514	0.409328
2	0.543716	0.566544	0.562849	0.546717	0.527879	0.493901

B.7. Phasenraumkomponenten für den Ost-Pazifik**Tabelle 18: Phasenraumkomponenten Modell Ost-Pazifik. Bewegungen nach Süden / Westen sind negativ. Durchschnitt und Standardabweichung über alle 13462 Zustände**

Nr.	Größe	Durchschnitt	Standardabweichung
1	östl. Länge (x), $t=0$	236.84	19.18
2	nördl. Breite (y), $t=0$	17.70	4.31
3	Δx [km], $t=-6$ Std. bis $t=0$ Std.	-76.96	61.66
4	Δy [km], $t=-6$ Std. bis $t=0$ Std.	34.31	42.96
5	östl. Länge (x), $t=-6$ Std.	237.57	19.09
6	nördl. Breite (y), $t=-6$ Std.	17.39	4.19
7	Δx [km], $t=-12$ Std. bis $t=-6$ Std.	-80.41	56.81
8	Δy [km], $t=-12$ Std. bis $t=-6$ Std.	33.53	39.06
9	östl. Länge (x), $t=-12$ Std.	238.30	19.00
10	nördl. Breite (y), $t=-12$ Std.	17.08	4.07
11	Δx [km], $t=-18$ Std. bis $t=-12$ Std.	-83.71	53.36
12	Δy [km], $t=-18$ Std. bis $t=-12$ Std.	32.49	35.63
13	östl. Länge (x), $t=-18$ Std.	239.05	18.92
14	nördl. Breite (y), $t=-18$ Std.	16.78	3.97
15	Δx [km], $t=-24$ Std. bis $t=-18$ Std.	-86.12	51.67
16	Δy [km], $t=-24$ Std. bis $t=-18$ Std.	31.49	33.61
17	östl. Länge (x), $t=-24$ Std.	239.82	18.85
18	nördl. Breite (y), $t=-24$ Std.	16.48	3.89
19	Tag des Jahres	230.28	41.63

ANHANG C. HILFSMITTEL UND DANKSAGUNG

C.1. Hilfsmittel

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Programme wurden mit FORTRAN 77 sowie als Shellprogramme unter UNIX auf den Rechnern des DKRZ programmiert und ausgeführt. Die Abbildungen wurden mit den *Generic Mapping Tools (GMT) Version 3* (Wessel and Smith, 1995) erzeugt. Die Arbeit selbst wurde mit dem Textverarbeitungssystem *FrameMaker* Vers. 5 geschrieben.

C.2. Danksagung

Ich danke:

- Prof. Dr. Klaus Fraedrich für eine hochspannende Aufgabenstellung und seine engagierte und lehrreiche Betreuung, die oftmals über den Inhalt der Arbeit hinausging;
- Dr. Richard Blender für seine Unterstützung und Tips sowie seine Bereitschaft, die Arbeit als Zweitgutachter zu betreuen;
- Dipl.-Phys. Bernd Rückert für seine ausführliche Einführung in das Analogmodell;
- Dipl.-Met. Christoph Raible, meinem Mitstreiter in der Analogvorhersage, für viele in langen Diskussionen gewonnenen Anregungen und seine Hilfe bei den Programmpaketen zur multivariaten Regression;
- unserer Bibliothekarin Frau C. Kauhs, die mir benötigte Literatur aus allen Ecken der Welt herbeigeschafft hat;
- den Herren Julian Heming vom UK Meteorological Office, Bracknell, Berkshire, und Sim Aberson von der Hurricane Research Division, Miami, für ihre Hilfe bei CLIPER-Fragen;

-
- den Mitarbeitern des Meteorologischen Instituts für eine äußerst angenehme Arbeitsumgebung und viele beantwortete Fragen;
 - fürs Korrekturlesen: Ulli, Chris, Ingo, Gerd und meiner Mutter;
 - all denen, die mich während der Entstehungszeit dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben, besonders Ulrike und meinen Eltern.

C.3. Erklärung

Hiermit erkläre ich, Oliver Sievers, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt habe und ausschließlich die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe.

Hamburg, den 20.05.1998
