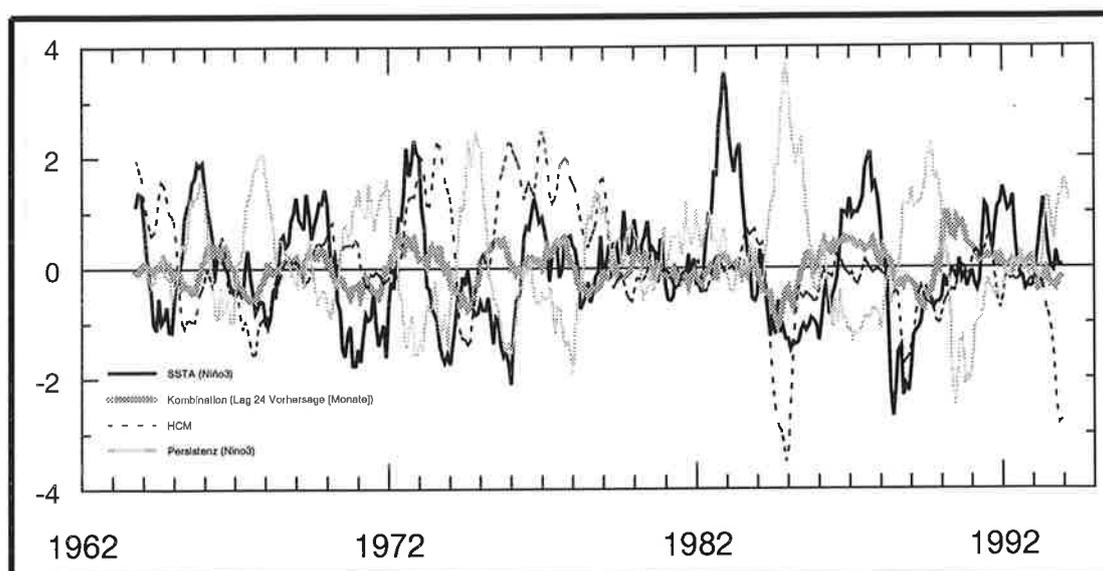




# Max-Planck-Institut für Meteorologie

## EXAMENSARBEIT Nr. 39



### KOMBINATION VON ENSEMBLE-KLIMAVORHERSAGEN AM BEISPIEL **ENSO**

VON

Swen Marcus Metzger

HAMBURG, Mai 1996

# **Kombination von Ensemble - Klima- vorhersagen am Beispiel ENSO**

Diplomarbeit

vorgelegt im Fachbereich Physik  
der Universität Hamburg

von

**Swen Marcus Metzger**  
aus Heidelberg

Hamburg, im März 1995

**ISSN 0938-5177**

Als Diplomarbeit angenommen vom Fachbereich Physik  
der Universität Hamburg

aufgrund der Gutachten von Herrn Prof. Dr. H.Graß  
und Herrn Prof. Ph. D.D. Fay

Hamburg, den 26. 04.1995

Prof. Dr. M. Harsdorf  
Sprecher des Fachbereiches Physik

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>I Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>II Beobachtungszeitreihen</b>	<b>11</b>
<b>III ENSO-Vorhersageschemata</b>	<b>15</b>
3.1 Persistenz . . . . .	15
3.2 Statistisches Vorhersagemodell erster Ordnung (POP) . . . . .	17
3.3 Statistisches Vorhersagemodell zweiter Ordnung (AR-2) . . . . .	19
3.4 Vereinfachtes gekoppeltes Ozean-Atmosphärenmodell (HCM) . . . . .	21
<b>IV Lineare Kombination von Ensemble-Vorhersagen</b>	<b>25</b>
4.1 Kombinationsschema . . . . .	25
4.2 Maße für die Vorhersagegüte . . . . .	28
<b>V Beispiele zur Vorhersagenkombination</b>	<b>31</b>
5.1 Kombination der POP- und AR-2-Vorhersagen . . . . .	31
5.2 Kombination der HCM- und POP- bzw. AR-2- Vorhersagen . . . . .	35
5.3 Kombination der HCM- und Persistenz-Vorhersagen . . . . .	44
5.4 Sensitivitäten . . . . .	47
5.4.1 Bestimmungszeitraum der Gewichte . . . . .	47
5.4.2 Vorhersageperiode . . . . .	50
5.4.3 Ensemblegröße . . . . .	53
5.4.4 Wahl der Persistenz . . . . .	56
5.4.5 Saisonalität . . . . .	59
<b>VI Diskussion und Ausblick</b>	<b>63</b>
<b>Liste der Abbildungen</b>	<b>69</b>
<b>Literatur</b>	<b>71</b>

## Zusammenfassung

Das Kombinationsschema von Fraedrich & Smith (1989) wurde auf die Vorhersage von ENSO (El Niño / Southern Oscillation) angewendet. Dabei wurden die Ensemble-Klimavorhersagen von zwei statistischen Modellen, einem vereinfachten, gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modell und des Persistenzmodells paarweise miteinander kombiniert.

Die Ergebnisse zeigen, daß in den hier betrachteten Fällen der Vorhersagefehler mit dem Kombinationsschema reduziert werden kann, wenn die Vorhersagen antikorreliert sind, und mit gleichem statistischen Gewicht kombiniert werden. Ein typisches Beispiel hierfür lieferte die Kombination der Vorhersagen eines vereinfachten, gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modells mit der Persistenz, für die Vorhersage der 70er Jahre. Für die erzielte Verbesserung der Vorhersagegüte zeigte sich die in der Persistenz enthaltene Phaseninformation verantwortlich. Diese Phaseninformation zeigte eine klare Abhängigkeit von dem Bestimmungszeitraum der statistischen Gewichte, der Vorhersageperiode, der Ensemblegröße, der zur Persistenz verwendeten Beobachtungszeitreihe, sowie der Jahreszeit in der die Vorhersage begann.

# I Einleitung

ENSO (El Niño / Southern Oscillation) ist auf interannualen Zeitskalen von einigen Monaten bis wenigen Jahren die bedeutendste Klimaschwankung. Der Begriff ENSO verbindet das ozeanische Phänomen "El Niño" mit dem atmosphärischen Phänomen "Southern Oscillation" und beruht auf der Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre in den Tropen (Bjerknes, 1969). Eine umfangreiche Einführung hierzu findet man z.B. in *Oceanus*, Vol. 27 (1984).

"El Niño" (span.: das Christkind), nannten die peruanischen Anchovisfischer Ende des letzten Jahrhunderts einen regelmäßig zur Weihnachtszeit auftretenden, warmen Küstenstrom, der mit seinem nährstoffarmen Wasser die Fischereisaison beendet. Nach heutigem, wissenschaftlichem Verständnis wird mit "El Niño" nicht mehr dieses alljährliche Ereignis bezeichnet, sondern eine anomale Zunahme der Meeresoberflächentemperatur (SSTA von engl. Sea Surface Temperature Anomaly) des gesamten äquatorialen Pazifiks (Abb. 1, oben), die im Mittel alle vier Jahre beobachtet wird (Rasmusson & Carpenter 1982). Diese etwa ein Jahr lang andauernde, großräumige Erwärmung führt in den ostpazifischen Küstengewässern zu einer Verminderung ihres Nährstoffgehaltes und einer nachhaltigen Störung der tropischen Ökosysteme (Oceanus et al. 1984). Eine direkte Folge davon ist das Ausbleiben ganzer Fischbestände während der gesamten Fischereisaison, mit großen finanziellen Einbußen für die Fischindustrie und den von ihr abhängigen Wirtschaftszweigen (Glantz et al. 1992).

Die "Southern Oscillation" kennzeichnet einen atmosphärischen Massenaustausch zwischen der östlichen und westlichen Hemisphäre (Walker 1924). Sie kann als eine "Druckschaukel" zwischen dem südostpazifischen Hochdruckgebiet und dem indonesischen Tiefdrucksystem angesehen werden (Berlage 1957). Die Druckdifferenz zwischen den Druckzentren über Tahiti (Frz.Polynesien) und Darwin (Australien) wird als "Southern Oscillation-Index" (SOI) bezeichnet (Abb.1, mitte). Ein stark negativer Wert

des SOI ist u. a. verbunden mit einer ostwärtigen Verschiebung der Indo-Australischen Konvergenzzone. Zeitgleich wird mit dieser Phase der "Southern Oscillation", ein El Niño - Ereignis beobachtet (Abb.1, unten).

Als Folge von "ENSO" kommt es während einer extremen Warmphase im äquatorialen, ostpazifischen Raum zu außergewöhnlich kräftigen Niederschlägen, und über der Westküste Mittel- und Lateinamerikas zu großen Überschwemmungen und Erosion des ariden Landes. Durch die Verlagerung der Konvergenzzone überziehen unterdessen auf der anderen Seite des Pazifiks Dürreperioden den normalerweise feuchten Indo-Australischen Raum und verursachen geringere Ernteerträge und Buschbrände (Ropelewski & Halpert 1987). ENSO beeinflusst auch das extratropische Klima. Dabei ist nicht nur Nordamerika betroffen sondern auch Europa (Fraedrich & Müller 1992).

Diese Auswirkungen, die Lebensraum und -qualität der Menschen weit über die Tropen hinaus nachhaltig beeinträchtigen, haben ein großes öffentliches und wissenschaftliches Interesse an der Vorhersagbarkeit von ENSO hervorgerufen. So wurden im Rahmen des Weltklimaprogramms (WCRP von engl. World Climate Research Program) mit dem TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere) - Projekt in den letzten zehn Jahren verschiedene Modelltypen zur Prognose von ENSO - Ereignissen entwickelt. Diese reichen von statistischen Modellen bis zu hochauflösenden gekoppelten Ozean-Atmosphären Modellen (CGCMs von engl. Coupled General Circulation Models). Die mit diesen Modellen durchgeführten Studien haben das theoretische Verständnis von ENSO verbessert und erste praktische Erfolge bei der Vorhersage der niederfrequenten Variabilität ermöglicht. Gegenwärtig können mit operativ eingesetzten CGCMs brauchbare Vorhersagegüten für eine Vorhersageperiode von bis zu eineinhalb Jahren erzielt werden<sup>1</sup>.

---

1. Eine Beschreibung der Modellhierarchie findet man bei Neelin et al. (1994) und einen Überblick über den "state-of-the-art" der ENSO-Vorhersage bei Latif et al. (1994).

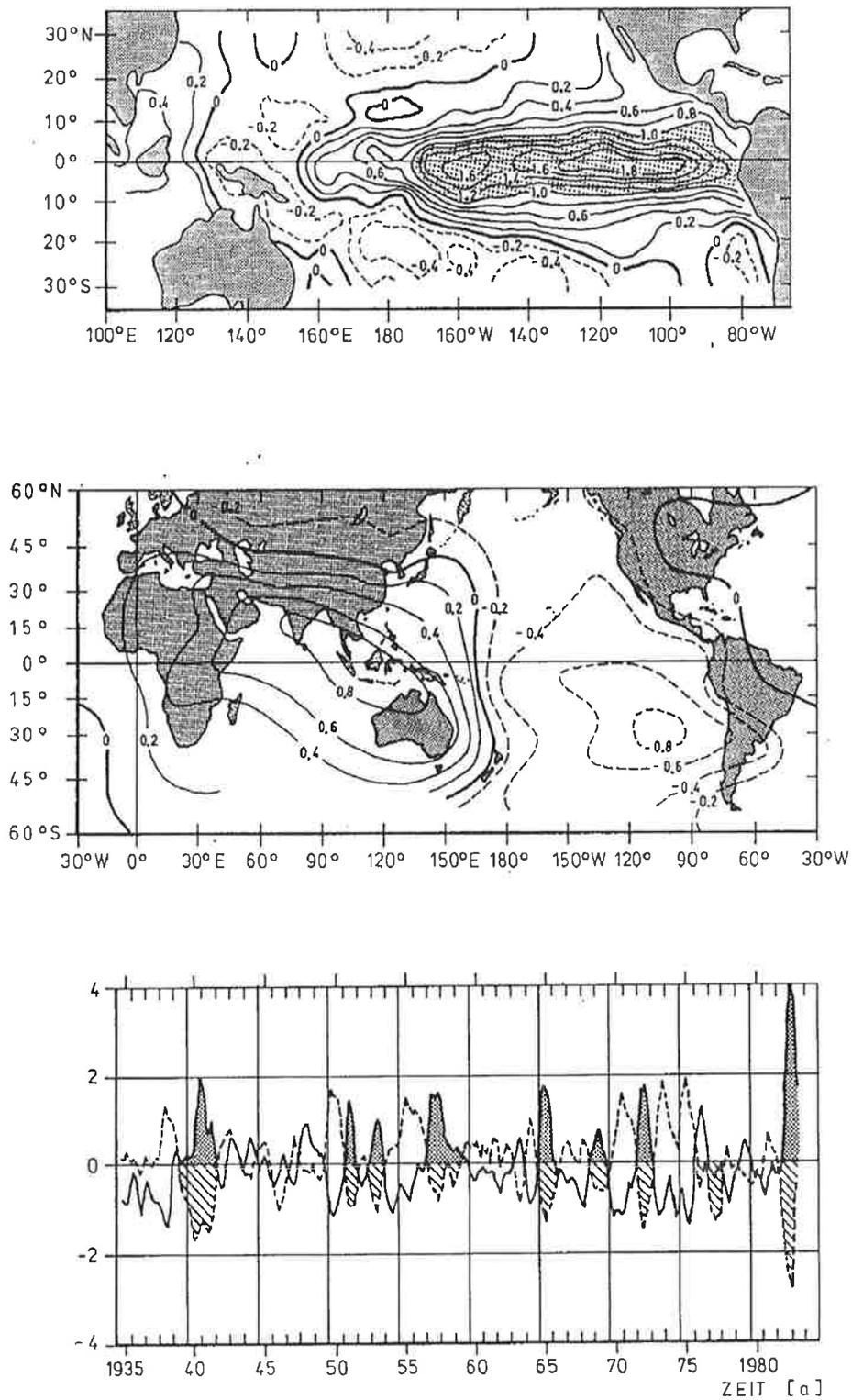


Abbildung 1: (Oben): Geographische Verteilung der Meeresoberflächentemperaturanomalien (SSTA) im Nordwinter eines El Niño Jahres. Nach Rasmusson & Carpenter (1982). (Mitte): Geographische Verteilung der Korrelation jährlicher Bodendruckanomalien mit denen von Djarkarta, Indonesien. Nach Berlage (1957). (Unten): Normierte Zeitreihen der SSTA (durchgezogene Linie) im Südostpazifik (Puerto Chicama, Peru) und des SOI (gestrichelte Linie). Nach Rasmusson (1984).

Allerdings wird mit den gekoppelten Modellen für Vorhersagezeiten bis zu einem halben Jahr noch nicht die Qualität statistischer Vorhersagen erreicht, da sich die Assimilation von Beobachtungsdaten in das Modell und die Kopplung von Ozean- und Atmosphärenmodellen noch in der Entwicklung befinden. Eine Möglichkeit, die bestehende Diskrepanz zwischen den Vorhersagegütern numerischer und statistischer Vorhersageschemata für eine verbesserte Vorhersagefähigkeit zukünftiger ENSO-Ereignisse zu verringern, ist die Kombination von Ensemble-Klimaprognosen verschiedener Modelltypen.

Die Verbesserung der Vorhersagegüte durch eine Vorhersagenkombination untersuchte Thompson (1976). Er zeigte, daß eine optimale Kombination unabhängiger Ensemble-Vorhersagen die Varianz des Vorhersagefehlers um bis zu 20% reduzieren kann. Fraedrich und Leslie (1987) demonstrierten, daß die Kombination von Vorhersagen eines stochastischen Vorhersagemodells mit denen eines numerischen Wettervorhersagemodells die Vorhersagen signifikant verbessert. Fraedrich und Smith (1989) wendeten die Kombination ebenfalls erfolgreich auf die dreimonatige Vorhersage der SST-Anomalie des tropischen Pazifiks an. Deshalb soll das Kombinationsschema von Fraedrich und Smith (1989) in dieser Arbeit auf die Vorhersage von ENSO angewendet werden.

Im folgenden werden die Ensemble-Klimavorhersagen von zwei statistischen ENSO-Vorhersagemodellen mit den Vorhersagen eines vereinfachten gekoppelten Modells kombiniert. In Kapitel II wird zuerst auf die Beobachtungsdaten, die das ENSO-Phänomen beschreiben und den Vorhersagen zugrunde liegen, eingegangen. Kapitel III beschreibt die für die Kombinationsstudie verwendeten Vorhersagemodelle. In Kapitel IV wird das Kombinationsschema vorgestellt und in Kapitel V folgen Beispiele zur Vorhersagenkombination. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse und einem Ausblick.

## II Beobachtungszeitreihen

Eine ausführliche Diskussion der Beobachtungen und der physikalischen Zusammenhänge, findet man z.B bei Rasmusson & Wallace (1983), Wright (1985), Cane (1986), Philander (1990), Neelin, Latif & Jin (1994). Im Zusammenhang mit dem ENSO-Phänomen ist die Variabilität der Meeresoberflächentemperaturanomalie (SSTA) des östlichen tropischen Pazifiks von Interesse. Dabei hat sich durch zahlreiche Analysen von Beobachtungsdaten und Modellstudien gezeigt, daß sowohl die Phase als auch die Intensität von ENSO-Extremen durch eine SSTA-Zeitreihe repräsentiert werden, die einen Mittelwert über das sog. Niño3-Gebiet ( $150^{\circ}\text{W}$ - $90^{\circ}\text{W}$  und  $5^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ) darstellt (Abb.2). Eine solche Zeitreihe wird im folgenden auch als Referenz für die Vorhersagen verwendet.

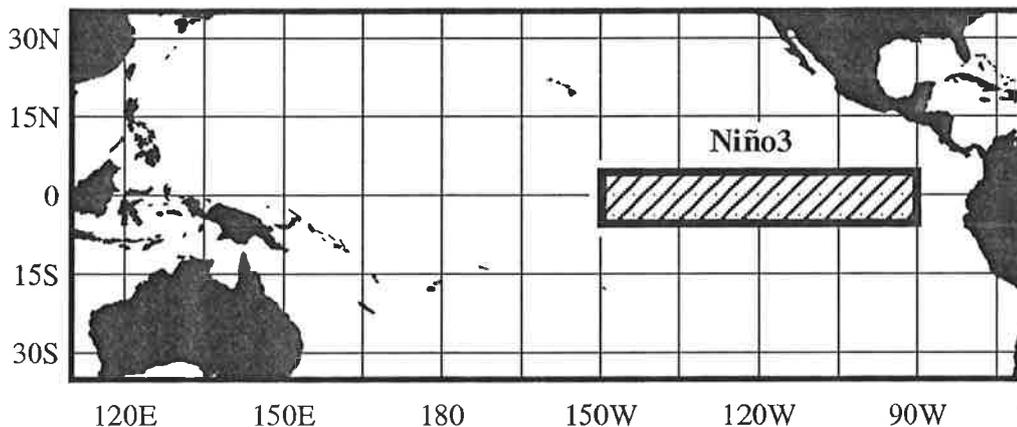


Abbildung 2: Niño3-Gebiet ( $150^{\circ}\text{W}$ - $90^{\circ}\text{W}$ ,  $5^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ).

Nach Abbildung 1 (unten) ist die SSTA im Ostpazifik hoch antikorreliert mit der Luftdruckdifferenz zwischen Tahiti (Franz. Polynesien) und Darwin (Australien), dem sog. SOI. Dabei zeigen beide Zeitreihen eine ausgeprägte niederfrequente Variabilität und bringen den quasiperiodischen Charakter von ENSO zum Ausdruck.

Geht man von El Niño - Bedingungen aus, so breitet sich in der Regel eine äquatoriale Wärmeinhaltsanomalie mit einer Phasengeschwindigkeit von etwa 0.2 m/s nach Osten aus. Dabei wird im Osten die Thermokline vertieft, was zu einer Erwärmung der Meeresoberfläche führt, wodurch der zonale Temperaturgradient abgeschwächt wird. Dadurch schwächen sich die Passatwinde ab, was zu einer weiteren Vertiefung der Thermokline führt. Diese positive Rückkopplung kann zu einer Verstärkung der El Niño - Bedingungen beitragen, bis das Warmwasserreservoir des westpazifischen Beckens erschöpft ist.

Obwohl der Ozean im allgemeinen eine relativ träge Klimakomponente ist, kann er sich in der Nähe des Äquators relativ schnell auf veränderte atmosphärische Randbedingungen einstellen, was in der Existenz relativ schneller äquatorialer Wellenmoden begründet ist. Die interannuale Variabilität die mit ENSO identifiziert wird, basiert auf der Wanderung äquatorialer Wellen und kann mit einer niederfrequenten, quasiperiodischen Zustandsänderung des pazifischen Ozeans erklärt werden. Eine Hypothese für die Erklärung die von ENSO ist neben den Hypothesen von Bjerknes (1969) und Wyrtki (1985) die "delayed action oscillator" Theorie von Schopf & Suarez (1988), die diesen Wellenzyklus beschreibt.

Die Quasiperiodizität von ENSO verdeutlicht folgende Spektralanalyse. Für eine äquatorial über die Region 170°E-90°W gemittelten SST-Anomalie Zeitreihe (Abb. 3), ergibt das Energiespektrum Perioden von 3-7 Jahren mit einem absoluten Maximum bei 42 Monaten. Das Filtern mit einem 13-monatigen Gleitmittel reduziert die hochfrequente Variabilität und trennt somit die, für ENSO charakteristische, interannuale Variabilität vom Rauschen.

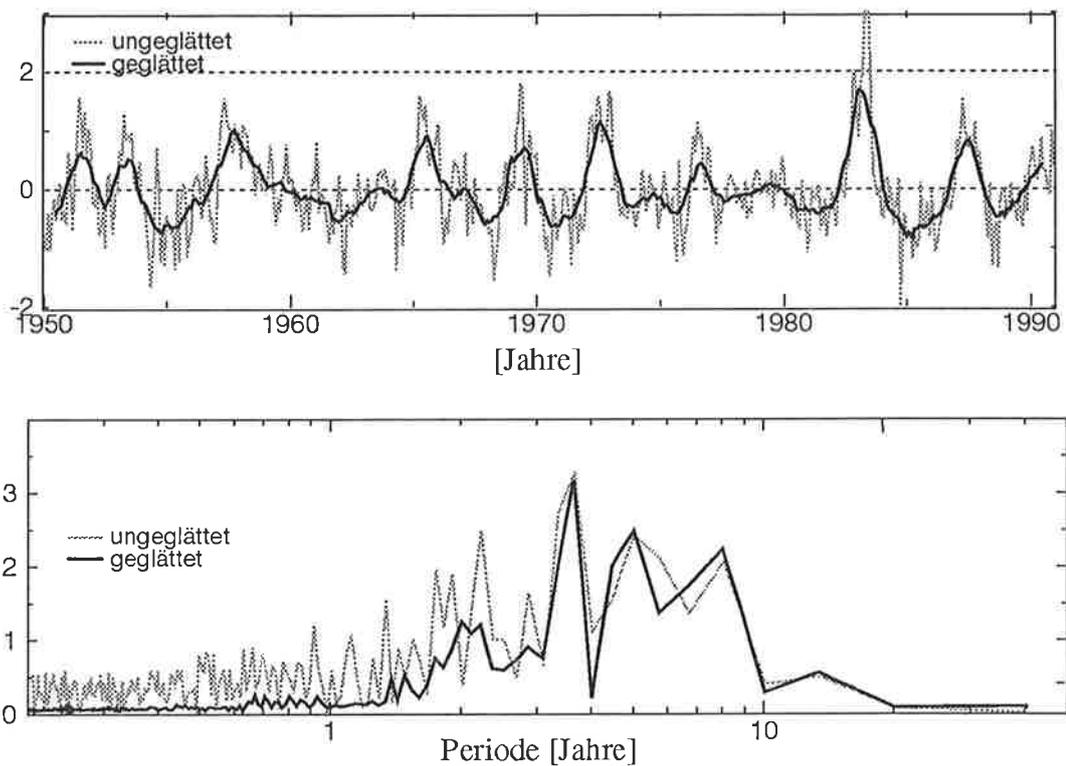


Abbildung 3: Spektralanalyse einer äquatorial über die Region 170° E – 90° W gemittelten SSTA-Zeitreihe. (Oben) die Beobachtungs-Zeitreihen von Januar 1950 bis Dezember 1990; (Unten) das Energiespektrum; wobei die Abszissen die Amplitude [°C] (Oben) bzw. das Amplitudenquadrat (Unten) angibt. Für die Glättung (durchgezogene Linien) wurde ein dreizehnmönatiges Gleitmittel verwendet. Die Monatsmittelwerte der SST-Zeitreihe repräsentieren Anomalien vom langjährigen Monatsmittel (Der Datensatz wurde freundlicherweise von Ning Jiang 1993 zur Verfügung gestellt).



### III ENSO-Vorhersageschemata

Im folgenden werden die verwendeten Vorhersagemodelle beschrieben. Das einfachste Vorhersagemodell, das die in den Beobachtungszeitreihen enthaltene Phaseninformation zum Ausdruck bringt, ist die Persistenz.

#### 3.1 Persistenz

Die Vorhersagen der Persistenz beruhen für die gesamte Vorhersagedauer auf der Konstanz des Momentanzustandes und eignen sich daher als Referenzvorhersagen, die jedes Vorhersagemodell übertreffen sollte. Betrachtet man z.B Monatsmittelwerte einer SSTA-Zeitreihe  $\hat{\phi}(t)$  ( $t=1, \dots, N$ ), so entspricht eine Vorhersage  $\phi(\tau, t)$  für jeden Vorhersagezeitraum  $\tau$  ( $\tau = 0, \dots, m$ ) der Beobachtung  $\hat{\phi}(t)$ . Die Korrelation der Vorhersagen mit der Beobachtung in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitraum  $\tau$  (lag), ergibt für die Persistenz gerade die Autokorrelationsfunktion  $R(\tau)$  von  $\hat{\phi}(t)$ .

$$R(\tau) = \langle \hat{\phi}(t + \tau) \cdot \hat{\phi}(t) \rangle \quad (3.1.1)$$

Dabei wurde die Beobachtung als normiert (Mittelwert = 0, Varianz =1) angenommen und der Operator  $\langle \cdot \rangle$  stellt die Mittelung über die Zeit dar. Abbildung 4 zeigt zum Vergleich die Autokorrelationsfunktionen der geglätteten (durchgezogene) und ungeglätteten (punktierter) SST-Zeitreihe aus Abb. 3.

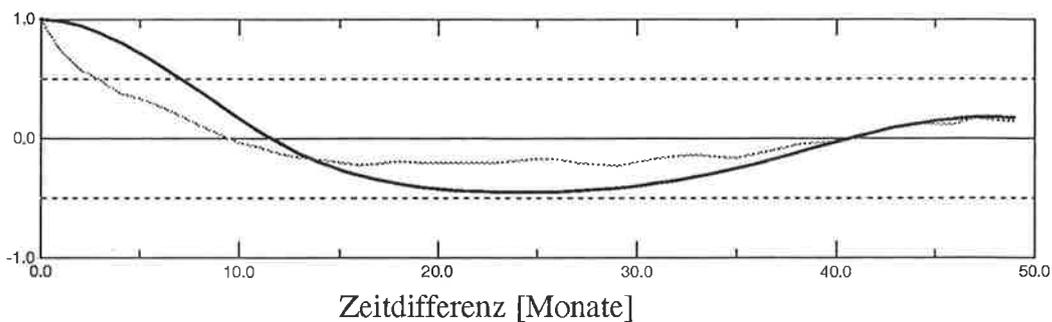


Abbildung 4: Autokorrelationsfunktion der geglätteten (durchgezogenen Linie) und unglätteten (punktierten Linie), SSTA-Zeitreihe (vgl. Abb.3). Die Ordinate entspricht der Zeitdifferenz zum Ausgangszeitpunkt  $t$  [in Monaten] und die Abszisse dem Wert der Autokorrelation [dimensionslos].

Der zeitliche Verlauf der Persistenz beschreibt ein quasiperiodisches Signal, das in der SST-Zeitreihe enthalten ist. Nach etwa zwei Jahren ist die Persistenz maximal antikorreliert, d.h. gegenüber der Beobachtung um  $180^\circ$  phasenverschoben (geglättete SST-Zeitreihe). Die relativ hohe Antikorrelation von -0.5 bringt dabei die Dominanz der mittleren Periode von vier Jahren, in dem Beobachtungszeitraum von Januar 1950 bis Dezember 1990, zum Ausdruck. Diese einfache Abschätzung wird durch einen Vergleich mit der Spektralanalyse der geglätteten SST-Zeitreihe Abb. 3 bestätigt. Die mittlere Periode von etwa vier Jahren fällt mit dem absoluten Maximum des Energiespektrums von rund 42 Monaten zusammen und liegt mitten in dem für ENSO relevanten Spektralbereich von 2-7 Jahren. Die Persistenz der SST-Anomalien ermöglicht demnach nicht nur eine Vorhersage der Amplitude für die nächsten zwei bis drei Monate, sondern auch eine hinreichende Vorhersage der Phase von ENSO-Ereignissen. Da diese Phaseninformation erst zu höheren Vorhersagezeiten um die zwei Jahre voll zur Geltung kommt, bietet sich die Autokorrelationsfunktion auch für eine Vorhersagenkombination an und wird im folgenden nur mit "Persistenz" bezeichnet.

### 3.2 Statistisches Vorhersagemodell erster Ordnung (POP)

Die sog. POPs (Principal Oscillation Pattern) wurden von Hasselmann (1988) und v. Storch et al. (1988) für die Analyse umfangreicher Datensätze entwickelt, um die führenden Raum-Zeit Muster zu extrahieren. Das POP-Vorhersagemodell wird ausführlich bei Xu & v. Storch (1990) beschrieben.

Das POP Modell basiert auf einen diskreten linearen Markov-Prozeß erster Ordnung beschrieben werden:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \boldsymbol{\eta}(t). \quad (3.2.1)$$

$\mathbf{X}(t)$  ist der  $n$ -dimensionale Zustandsvektor zur Zeit  $t$ , und  $\mathbf{A}$  die  $n$ -dimensionale System-Matrix. Um die Dimensionalität von  $n$  zu verringern, wird in den EOF-Raum (EOF = empirical orthogonal function, Wallace et al. 1972, Weare et al. 1982) projiziert, wobei in der vorliegenden Arbeit nur die ersten 10 EOFs berücksichtigt werden. Die Berechnung der Systemmatrix  $\mathbf{A}$  erfolgt durch eine Anpassung einer lag 0 und lag 1 Kovarianzmatrix:

$$\mathbf{A} = (\langle \mathbf{X}_i(t+1) \mathbf{X}_j(t) \rangle) (\langle \mathbf{X}_i(t) \mathbf{X}_j(t) \rangle)^{-1}. \quad (3.2.2)$$

Im allgemeinen ergeben sich als Lösung des Differentialgleichungssystems  $n$  linear unabhängige Vektoren  $\mathbf{P}$ , so daß  $\mathbf{X}$  als eine Summe von  $\mathbf{P}$  ausgedrückt werden kann:

$$\mathbf{X}(t+1) = \sum z_j(t) \mathbf{P}_j. \quad (3.2.3)$$

Dabei ist  $z_j(t)$  die  $j$ -te POP-Koeffizientenzeitserie. Die POPs selbst sind die Eigenvektoren  $\mathbf{P}$  der System-Matrix  $\mathbf{A}$ . Da die Eigenvektoren nicht orthogonal sein müssen, hängen die Koeffizienten  $z_j$  von allen POPs und nicht nur von einem bestimmten  $\mathbf{P}_j$  ab. Im allgemeinen ist die Matrix  $\mathbf{A}$  nicht symmetrisch und ihre Eigenwerte  $\lambda$ , Eigenvektoren  $\mathbf{P}$ , und Koeffizienten  $z$  sind komplex. Für reelle  $\mathbf{X}$  und  $\mathbf{A}$ , treten die Eigenwerte in konjugiert komplexen Paaren auf.

In Polarkoordinaten lassen sich die Eigenwerte  $\lambda$  durch  $\lambda = \rho^t e^{i\omega t}$  darstellen, so daß

$$z(t) = \rho^t e^{i\omega t}. \quad (3.2.4)$$

Die zeitliche Entwicklung der komplexen POP-Koeffizienten, entspricht einer gedämpften ( $|\lambda| < 1$ ) Schwingung. Die charakteristische Periode beträgt  $T = 2\pi / \omega$  und die Dämpfungsrate  $\rho = -1 / \ln|\lambda|$ .

Physikalisch bedeutet dies, daß sich die zeitliche Entwicklung der POPs durch folgenden Zyklus im 2-dimensionalen POP-Raum beschreiben läßt:

$$\bullet \bullet \bullet \rightarrow P^{im} \rightarrow P^{re} \rightarrow -P^{im} \rightarrow -P^{re} \rightarrow P^{im} \rightarrow \bullet \bullet \bullet .$$

Der Übergang zwischen zwei Zuständen entspricht gerade  $T/4$ .

Das POP-Vorhersagemodell basiert auf diesem Zyklus. Die Vorhersage besteht in einer Drehung innerhalb des durch die  $P^{re}$  und  $P^{im}$  aufgespannten POP-Raumes. Die Rotation ist gegeben durch

$$Z^*(t) = \left[ Z^{re} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) - Z^{im} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right] \exp\left(-\frac{t}{\rho}\right) \quad (3.2.5)$$

gegeben. Die Koeffizienten erhält man durch Berechnung des Skalarproduktes aus den Daten und den adjungierten POPs. Diese entsprechen den Eigenvektoren der adjungierten Systemmatrix.

### 3.3 Statistisches Vorhersagemodell zweiter Ordnung (AR-2)

Bei einem univariaten autoregressiven Vorhersagemodell  $p$ -ter Ordnung AR( $p$ ), werden für jeden Vorhersagezeitschritt  $\tau$  die Vorhersagen  $\phi(\tau, t)$  zum Zeitpunkt  $t$ , aus der Kenntnis  $p$  früherer Werte einer Beobachtungszeitreihe  $\hat{\phi}(t)$  abgeleitet.

Der lineare Ansatz eines AR( $p$ )-Prozesse hat folgende Form:

$$\phi(\tau, t) = \sum_{k=0}^p \alpha_k^p \hat{\phi}(t - k \cdot \tau), \quad (3.3.1)$$

mit den Entwicklungsparametern  $\alpha_k^p, k=1, \dots, p$ . Die Bestimmung der  $\alpha_k^p$  erfolgt über die Minimierung des Vorhersagefehlers  $\langle \varepsilon_p^2(\tau, t) \rangle = \langle (\phi(\tau, t) - \hat{\phi}(t))^2 \rangle$ , mit

$$\langle (\hat{\phi}(t) - \phi(t)) \cdot \hat{\phi}(t - k) \rangle = 0, \quad (3.3.2)$$

und  $\langle \hat{\phi}(t) \cdot \hat{\phi}(t - k) \rangle = C(k)$ , aus den sog. Yule-Walker-Gleichungssystem:

$$C(k) = \sum_{l=1}^p \alpha_l^p C(k - l). \quad (3.3.3)$$

Dieses lineare Gleichungssystem ist durch geeignete Methoden zu lösen, siehe hierzu Honerkamp (1990).

Der Fehler  $\varepsilon_p(\tau, t) = (\phi(\tau, t) - \hat{\phi}(t))$  ist für eine gaußverteilte Zufallsvariable mit Mittelwert Null und einen stochastischen Prozeß mit Normalverteilung ebenfalls gaußverteilt. Die Varianz des Fehlers ist dann

$$P_M = C(0) - \sum_{l=1}^p \alpha_l^p C(l). \quad (3.3.4)$$

Die Anzahl der benötigten Parameter zur optimalen Modellanpassung läßt sich dadurch abschätzen, in wie weit die Parameter mit steigender Ordnung  $p$  mit Null verträglich werden.

Der univariate AR(2)-Prozeß mit zwei zeitunabhängigen Parametern  $\alpha_{1,2}$

$$\phi(\tau, t) = \alpha_1 \hat{\phi}(t) + \alpha_2 \hat{\phi}(t - \tau) \quad (3.3.5)$$

wie er in dieser Arbeit als Vorhersagemodell verwendet wird, beschreibt eine gedämpfte Schwingung:

$$\phi(\tau, t) = \hat{\phi}(t) \exp[\kappa(\tau)] \cos[\omega(\tau)], \quad (3.3.6)$$

mit der Dämpfungsrate  $\kappa$ , der  $1/e$ -Abklingzeit  $\rho = -1/\kappa$ , der Schwingungsfrequenz  $\omega$  und der Periode  $T = 2\pi/\omega$ .

### 3.4 Vereinfachtes gekoppeltes Ozean-Atmosphärenmodell (HCM)

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen statistischen Vorhersageschemata, ermöglichen vereinfachte, gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodell bereits eine erfolgreiche Simulation und Vorhersage der für ENSO charakteristischen Raum-Zeit Muster (Zebiak & Cane 1987; Latif & Flügel 1991, Barnett et al. 1993).

Ein Vertreter dieser Modellgruppe ist das sog. Hybrid Coupled Model (HCM), das von Latif & Flügel (1991) für eine Untersuchung der Vorhersagbarkeit von ENSO verwendet wurde. Es ist ein hybrides, gekoppeltes Ozean-Atmosphärenmodell und besteht aus einem vollständigen, nichtlinearen ozeanischen Zirkulationsmodell (OGCM) und einem statistischen Atmosphärenmodell ohne interne Dynamik. Eine ausführliche Modellbeschreibung des OGCM findet man bei Latif (1987).

Das Modell wurde für den tropischen Pazifik entwickelt, um die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre zu studieren. Das Modellgebiet ist durch eine realistische Küstenlinie Latein-Amerikas und Asien / Australien zonal, und dem 30-ten Breitengrad der Nord- und Südhemisphäre, meridional begrenzt. Die meridionale Auflösung variiert von 50km am Äquator, bis hin zu 400km an dem Nord- bzw. Südrand. Die Auflösung ist zonal mit 670km konstant. Die vertikale Auflösung umfaßt 13 horizontale Schichten, 10 davon in den oberen 300 Metern. Die Tiefe ist konstant 4000 m.

Die Beschränkung auf äquatoriale großskalige Prozesse erlaubt eine Formulierung der sog. primitiven Gleichungen mit den folgenden Näherungen: äquatoriale  $\beta$ -Ebene, Boussinesq-Approximation, hydrostatische Näherung und konstanter Salzgehalt. Das Verschwinden des Coriolisparameters am Äquator, verhindert eine Trennung von Schwere-, Trägheits- und Rossbywellen, so daß nicht mehr von der numerisch leichter zu handhabenden quasigeostrophischen Näherung gebrauch gemacht werden kann. Im Gegensatz zu Latif (1987), sind in dieser Modellversion die vertikalen Mischungskoeffizienten nicht konstant, sondern von der als Stabilitätsmaß bekannten Richardsonzahl abhängig.

Das Ozeanmodell, angetrieben mit beobachteten Windschüben der Florida-State Universität (FSU; Goldenberg, O'Brien 1981), ist in der Lage die beobachteten Raum-Zeit Muster der SST-Anomalien zu simulieren (Latif 1987; Barnett et al.1991). Diese sind für den sog. "Kontrolllauf" in Abbildung 5 im Vergleich mit der Beobachtung dargestellt.

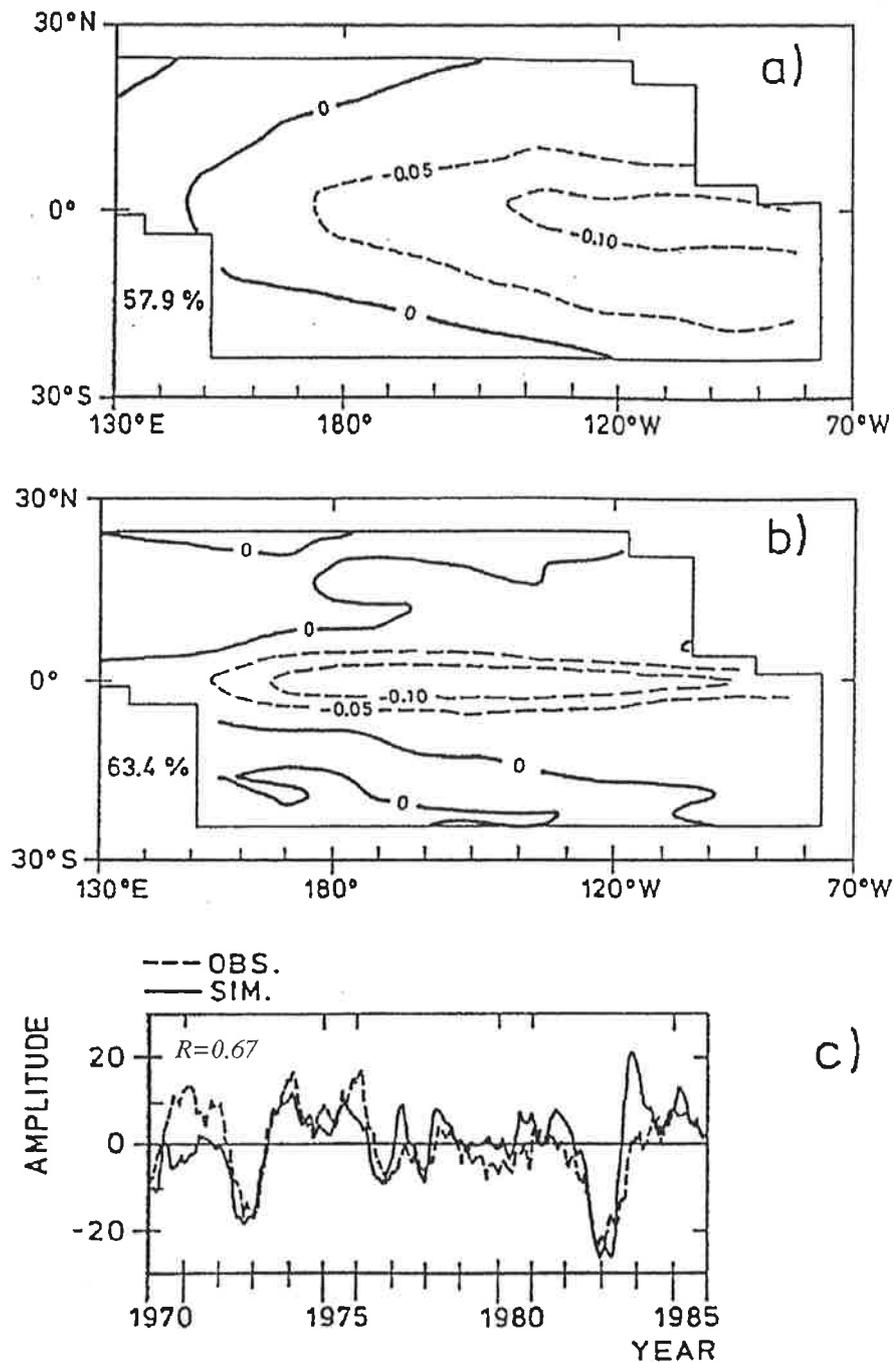


Abbildung 5: Vergleich der 1. EOFs, berechnet aus beobachteten (a) und simulierten (b) SST-Anomalien im tropischen Pazifik. Die jeweiligen Zeitreihen sind in c) dargestellt. Die erklärte Varianzen betragen 57.9% bzw. 63.4%.

Das für die Kopplung mit dem OGCM verwendete Atmosphärenmodell, ist ein statistisches Anomaliemodell. Die atmosphärische Rückkopplung erfolgt mit einer Kopplungsmatrix, welche durch eine lineare Regression zwischen den beobachteten Windschüben und SSTA-Feldern bestimmt wurde. Außerdem wird eine Korrekturmatrix während der gekoppelten Integration angewendet, die die Abweichung von simulierten und beobachteten SSTA-Feldern berücksichtigt (siehe z. B. Barnett et al. 1993; Flügel 1994). Das Atmosphärenmodell treibt somit das ozeanische Zirkulationsmodell mit Windschüben an, die wiederum von den SSTA-Feldern des OGCMs abgeleitet werden.

Die Anfangszustände für die in der Kombinationsstudie verwendeten Ensemble-Vorhersagen des HCMs, wurden einem ungekoppelten Kontrolllauf entnommen, der mit monatlichen beobachteten FSU-Winden von Januar 1961 bis Juli 1994 durchgeführt wurde. Die Modellversion entspricht bis auf eine geringfügig veränderte Kopplungskonstante der von Flügel (1994) verwendeten Version (Flügel 1995, pers. Mitteilung).



## IV Lineare Kombination von Ensemble-Vorhersagen

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen statistischen Vorhersagemodelle sind dem vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphären Modell bei der Vorhersage der für ENSO charakteristischen niederfrequenten Variabilität bis zu einem halben Jahr überlegen, da ihre Modellparameter direkt aus den Beobachtungen abgeleitet werden können. Hingegen begrenzt bei dem HCM, die mangelnde Übereinstimmung des Kontrolllaufes, aus dem die Anfangsbedingungen gewonnen werden, mit der Beobachtung die erreichbare Vorhersagegüte. Darüber hinaus erfassen die Persistenz und das POP-Vorhersagemodell die in Kapitel 2 beschriebene Phaseninformation. Diese Unterschiede in der Vorhersagefähigkeit, können durch eine geeignete Kombination (Thompson 1976, Fraedrich & Smith 1989) der Ensemble-Vorhersagen für eine verbesserte Vorhersage von ENSO ausgenutzt werden.

### 4.1 Kombinationsschema

Betrachtet man mehrere Vorhersage-Ensemble  $\phi_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , die ein und die selbe Beobachtung  $\hat{\phi}$  vorhersagen, so sollen diese derart miteinander zu einer neuen Vorhersage  $\phi^*$  linear kombiniert werden, daß ihr Vorhersagefehler minimiert wird.

$$\phi^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \phi_i \quad (4.1.1)$$

Der Parameter  $\alpha_i$  bestimmt das statistische Gewicht des  $i$ -ten Vorhersage-Ensembles  $\phi_i$ . Sowohl die Beobachtung  $\hat{\phi} = \hat{\phi}(1), \dots, \hat{\phi}(t)$ , als auch die Vorhersagen-Ensemble  $\phi_i = \phi_i(\tau, 1), \dots, \phi_i(\tau, t)$  ( $t$  = Initialisierungszeitpunkt,  $\tau$  = Vorhersagezeitschritt), seien normiert (Mittelwert = 0, Varianzen = 1), d.h. dimensionslos. Dies ermöglicht die Kombination verschiedener physikalischer Größen (z.B. Ensemble-Vorhersagen von SSTA-Niño3 und SOI).

Der Vorhersagefehler  $E^*$  der kombinierten Ensemble-Vorhersage  $\phi^*$  ergibt sich aus der Abweichung von der Beobachtung  $\hat{\phi}$ :

$$E^* = \hat{\phi} - \phi^* \quad (4.1.2)$$

Die Mittelung über alle Einzelvorhersagen zum Vorhersagezeitschritt  $\tau$ , liefert den mittleren quadratischen Fehler  $\varepsilon(\tau)$ :

$$\varepsilon(\tau) = \left\langle \left( \hat{\phi} - \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \phi_i \right)^2 \right\rangle, \quad (4.1.3)$$

Hierin beschreibt der Operator  $\langle \cdot \rangle$  die Mittelung der Einzelvorhersagen  $\phi_i(\tau, t)$  des  $i$ -ten Vorhersage-Ensembles  $\phi_i$ .

Zur Minimierung von  $\varepsilon(\tau)$  sollen nun die statistischen Gewichte optimal bestimmt werden. Bedingung hierfür ist das Verschwinden der Ableitung von  $\varepsilon(\tau)$  nach  $\alpha_i$ .

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_i} \varepsilon(\tau) = 0 = -\hat{\Phi}_{ii} + \alpha_i \Phi_{ii} + \sum_{j=1}^n \alpha_j \Phi_{ij} \quad (4.1.4)$$

Darin beschreibt  $\Phi_{ii} = \langle \phi_i^2 \rangle$  die Varianz des  $i$ -ten Vorhersage-Ensembles  $\phi_i$ ,  $\hat{\Phi}_{ii} = \langle \hat{\phi}, \phi_i \rangle$  die Kovarianz zwischen dem  $i$ -ten Vorhersage-Ensemble  $\phi_i$  und der Beobachtung  $\hat{\phi}$  und  $\Phi_{ij} = \langle \phi_i, \phi_j \rangle$  die Kovarianz zwischen der  $i$ -ten  $\phi_i$  und  $j$ -ten  $\phi_j$  Ensemble-Vorhersage, sowie  $\alpha_{i,j}$  die statistischen Gewichte. Diese Gleichung entspricht der Matrixgleichung

$$(\Phi_{ij}) \cdot \alpha = \hat{\Phi}_{ii}, \quad (4.1.5)$$

wobei die  $(n \times n)$ -Koeffizientenmatrix  $(\Phi_{ij})$  im allgemeinen, d.h. für verschiedene Ensemble-Vorhersagen, regulär ist. Multiplikation mit der Inversen, liefert den Spaltenvektor  $\alpha$  der die gesuchten statistischen Gewichte  $\alpha_i$  enthält.

Beschränkt man sich auf eine Linearkombination von zwei Vorhersagen-Ensemble  $\phi_i$ , mit  $i=1,2$ , so ergeben sich nach (4.1.2) die zwei Gleichungen:

$$\alpha_1 \Phi_{11} + \alpha_2 \Phi_{12} = \hat{\Phi}_1, \quad (4.1.6)$$

$$\alpha_1 \Phi_{21} + \alpha_2 \Phi_{22} = \hat{\Phi}_2. \quad (4.1.7)$$

Die beiden statistischen Gewichte  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  berechnen sich zu:

$$\alpha_1 = \frac{\Phi_{11} \cdot \hat{\Phi}_{22} - \hat{\Phi}_{11} \cdot \Phi_{21}}{\Phi_{11} \cdot \Phi_{22} \cdot (1 - \Phi_{12}^2 / \Phi_{11} \cdot \Phi_{22})}, \quad (4.1.8)$$

wobei man  $\alpha_2$  durch Vertauschen der Indizes erhält.

Unter Berücksichtigung, daß die Ensemble-Vorhersagen  $\phi_{i,2}$  normiert sind, erhält man mit den Korrelationskoeffizienten  $R_{1,2}$  und der Kreuzkorrelation  $r_{12}$ :

$$R_{1,2} = \frac{\hat{\Phi}_{11,22}}{\sqrt{\hat{\Phi} \cdot \Phi_{11,22}}} = \hat{\Phi}_{11,22}, \quad r_{12} = \frac{\Phi_{12}}{\sqrt{\Phi_{11} \cdot \Phi_{22}}} = \Phi_{12}, \quad (4.1.9)$$

eine Darstellung der statistischen Gewichte  $\alpha_{1,2}$ , als Funktion der zu den Vorhersage-Ensemble  $\phi_{i,2}$  korrespondierenden Korrelationskoeffizienten  $R_{1,2}$  und  $r_{12}$ , wobei man  $\alpha_2$  wieder durch Vertauschen der Indizes erhält:

$$\alpha_1 = (R_1 - r_{12} \cdot R_2) / (1 - r_{12}^2) \quad (4.1.10)$$

Die Korrelationskoeffizienten  $R_1, R_2$  beschreiben die Korrelationen zwischen den zwei Vorhersage-Ensemble  $\phi_{i,2}$  und der Beobachtung  $\hat{\Phi}$ . Die Kreuzkorrelationen  $r_{12}$  ist die Korrelation zwischen den einzelnen Vorhersage-Ensembles.

## 4.2 Maße für die Vorhersagegüte

Mit den optimal bestimmten statistischen Gewichten  $\alpha_{1,2}$  folgt für den mittleren quadratischen Fehler  $\varepsilon(\tau)$  aus Gleichung (4.1.3), im allgemeinen gerade das Verhältnis aus der minimalen Varianz des Fehlers der kombinierten Ensemble-Vorhersage und der totalen natürlichen Varianz der Beobachtung

$$\frac{\varepsilon^*}{\hat{\Phi}}(\tau) = 1 - \frac{R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot R_1 \cdot R_2}{1 - r_{12}^2}. \quad (4.2.1)$$

Der Korrelationskoeffizient  $R^*(\tau)$  der Kombinierten Ensemble-Vorhersage ist ein Maß für die Vorhersagegüte und ergibt sich aus der Quadratwurzel des ‘‘Hindcastskills’’

$$H = 1 - \frac{\varepsilon^*}{\hat{\Phi}}(\tau) \text{ zu}$$

$$R^*(\tau) = \sqrt{\frac{R_1^2 + R_2^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot R_1 \cdot R_2}{1 - r_{12}^2}}. \quad (4.2.2)$$

Werden die statistischen Gewichte  $\alpha_{1,2}$  aus dem gesamten Vorhersagezeitraum abgeleitet (‘‘Hindcastskill’’), stimmt diese Formel mit der konventionellen Korrelationsberechnung (Glg. 4.1.9) überein. Der Korrelationskoeffizient  $R^*(\tau)$  der Vorhersagenkombination nimmt genau dann einen höheren Wert als  $R_1$  oder  $R_2$  an, wenn die Vorhersagen unabhängig sind (d.h. die Kreuzkorrelation  $r_{12}$  ist Null, oder negativ). Die Verbesserung der Vorhersagegüte wird dabei maximal, wenn außerdem die Vorhersagen gleichwertig sind ( $R_1 = R_2$ ).

Neben der Korrelationsgüte  $R(\tau)$  eignen sich als weitere Gütemaße der mittlere quadratische Fehler  $\varepsilon(\tau)$  bzw. dessen Quadratwurzel (RMSE) und die erklärte Varianz  $\Xi(\tau)$ . Dabei müssen die relativen Verbesserungen der Vorhersagegüte nicht identisch sein.

Der mittlere quadratische Fehler  $\varepsilon$  (mean squared error) beschreibt den mittleren Amplitudenfehler und ergibt sich aus der Varianz des Vorhersagefehlers einer Ensemble-Vorhersage  $\phi_i$ .

$$\varepsilon_i(\tau) = \frac{\langle (\hat{\phi} - \phi_i)^2 \rangle}{\hat{\phi}}. \quad (4.2.3)$$

Daraus geht unmittelbar die erklärte Varianz  $\Xi$  hervor, die sowohl den Fehler in der Phase als auch in der Amplitude zum Ausdruck bringt:

$$\Xi_i(\tau) = 1 - \frac{\langle (\hat{\phi} - \phi_i)^2 \rangle}{\hat{\phi}} = 1 - \varepsilon_i(\tau), \quad (4.2.4)$$

Bei einem erwartungstreuen Schätzer ist eine um so stärkere Konzentration der Schätzungen um den wahren Wert zu erwarten, je kleiner dessen Varianz und damit auch der mittlere quadratische Fehler ist. Für eine sog. Lag-Null Korrelation ( $\tau=0$ ) ist der Vorhersagezeitschritt  $\tau$  Null und die Übereinstimmung der Vorhersagen mit der Beobachtung ist durch das Modell (z.B. dem Kontrolllauf im Falle des HCM) bestimmt. Für die Persistenz beginnen die Werte der erklärten Varianz  $\Xi(\tau=0)$  und des Korrelationskoeffizienten  $R(\tau=0)$  bei +1 und die der relativen Abweichung  $\varepsilon(\tau=0)$  entsprechend bei 0. Mit wachsender Vorhersagedauer ( $\tau=1,2,\dots,m$ ) weichen die Vorhersagen mehr und mehr von den Beobachtungen ab, wobei  $\Xi$  und  $R$  kleiner werden,  $\varepsilon$  entsprechend größer. Für die Brauchbarkeitsgrenze einer Vorhersage haben sich in der Literatur (z.B. Latif et al. 1994, Barnston et al. 1994) die empirischen Werte von 0.5 für den Korrelationskoeffizienten ( $R$ ), ein Drittel der erklärten Varianz ( $\Xi$ ) und die Standardabweichung der Beobachtung für den relativen Vorhersagefehler ( $\varepsilon$ ) etabliert.



## V Beispiele zur Vorhersagenkombination

In diesem Kapitel werden die Ensemble-Klimavorhersagen der beschriebenen ENSO-Vorhersagschemata miteinander kombiniert.

Die Kombinationsstudie gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 5.1 werden die statistischen Vorhersagen des AR-2 und POP Vorhersagemodells miteinander kombiniert. In Abschnitt 5.2 werden diese jeweils einzeln mit den Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells (HCM) kombiniert. Die erzielte Vorhersagegüte wird hinsichtlich der verwendeten Modelle untersucht. In Abschnitt 5.3 werden die Ergebnisse mit der Persistenz / HCM - Kombination verglichen. Die Persistenz / HCM - Kombination wird in Abschnitt 5.4 für eine Sensitivitätsstudie gegenüber folgenden Faktoren verwendet: der Abhängigkeit der erzielten Vorhersagegüte von dem Bestimmungszeitraum der statistischen Gewichte, der Vorhersageperiode, der Ensemblegröße und der Wahl der Persistenz. Abschließend wird mit dieser Kombination der Einfluß der Saisonalität auf die Kombinationsvorhersagen untersucht.

### 5.1 Kombination der POP- und AR-2-Vorhersagen

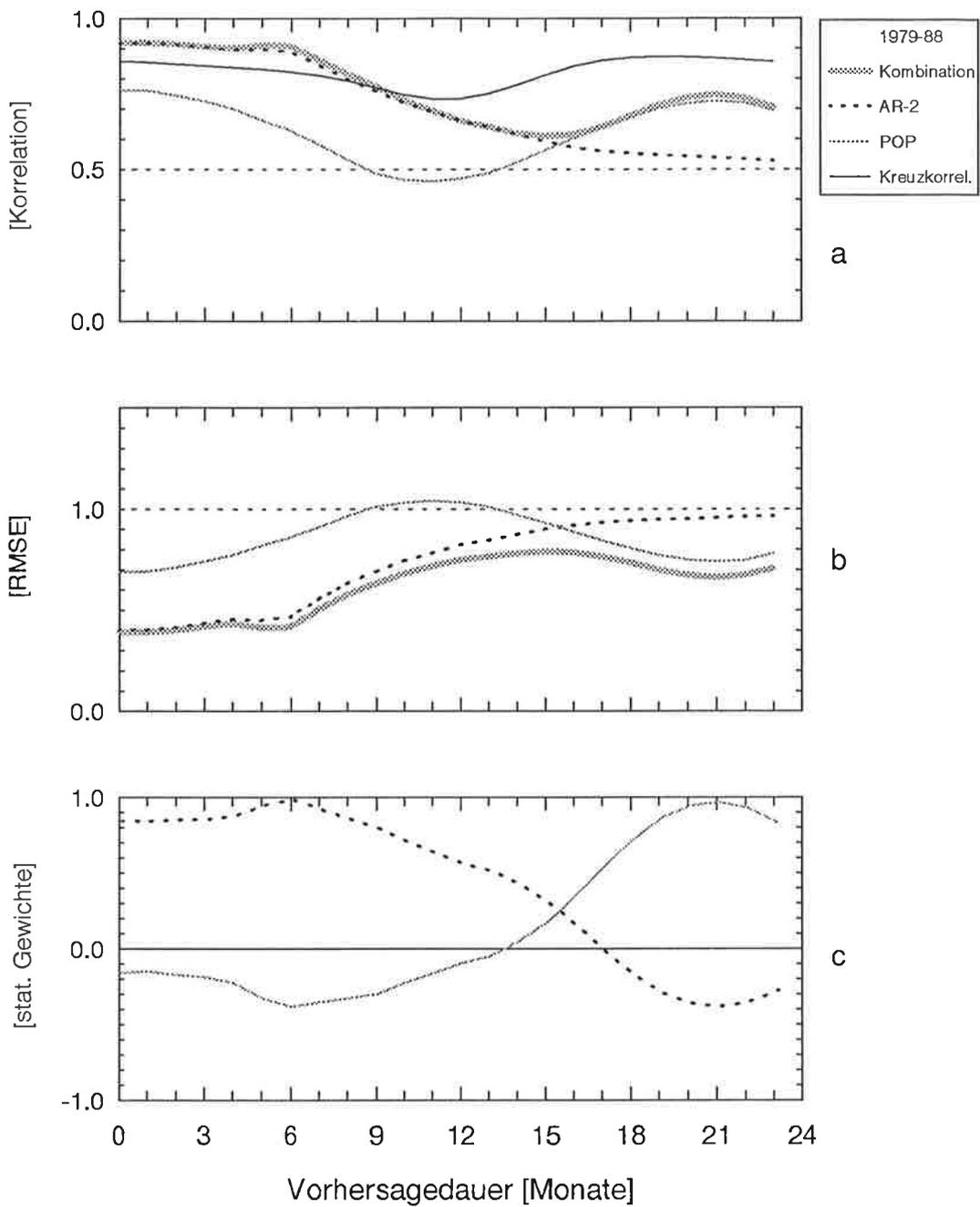
Für die Kombination der statistischen Ensemble-Vorhersagen des multivariaten autoregressiven Vorhersagemodells erster Ordnung (POP) und des univariaten autoregressiven Vorhersagemodells zweiter Ordnung (AR-2) ist aufgrund der zu kurzen Beobachtungszeitreihen ein Kompromiß erforderlich:

Zum einen werden für eine optimale Modellanpassung Zeitreihen benötigt, die mehrere Jahrzehnte umfassen, zum anderen sollten die Vorhersage-Ensemble so groß wie möglich sein, so daß die statistische Signifikanz bei der Korrelationsberechnung gewahrt werden kann. Daher erfolgt die Initialisierung der Vorhersagen monatlich ab Januar 1979 bis Dezember 1988, so daß ein unabhängiger Zeitraum von Januar 1950 bis Dezember 1978 für die Ableitung der Modellparameter zur Verfügung steht.

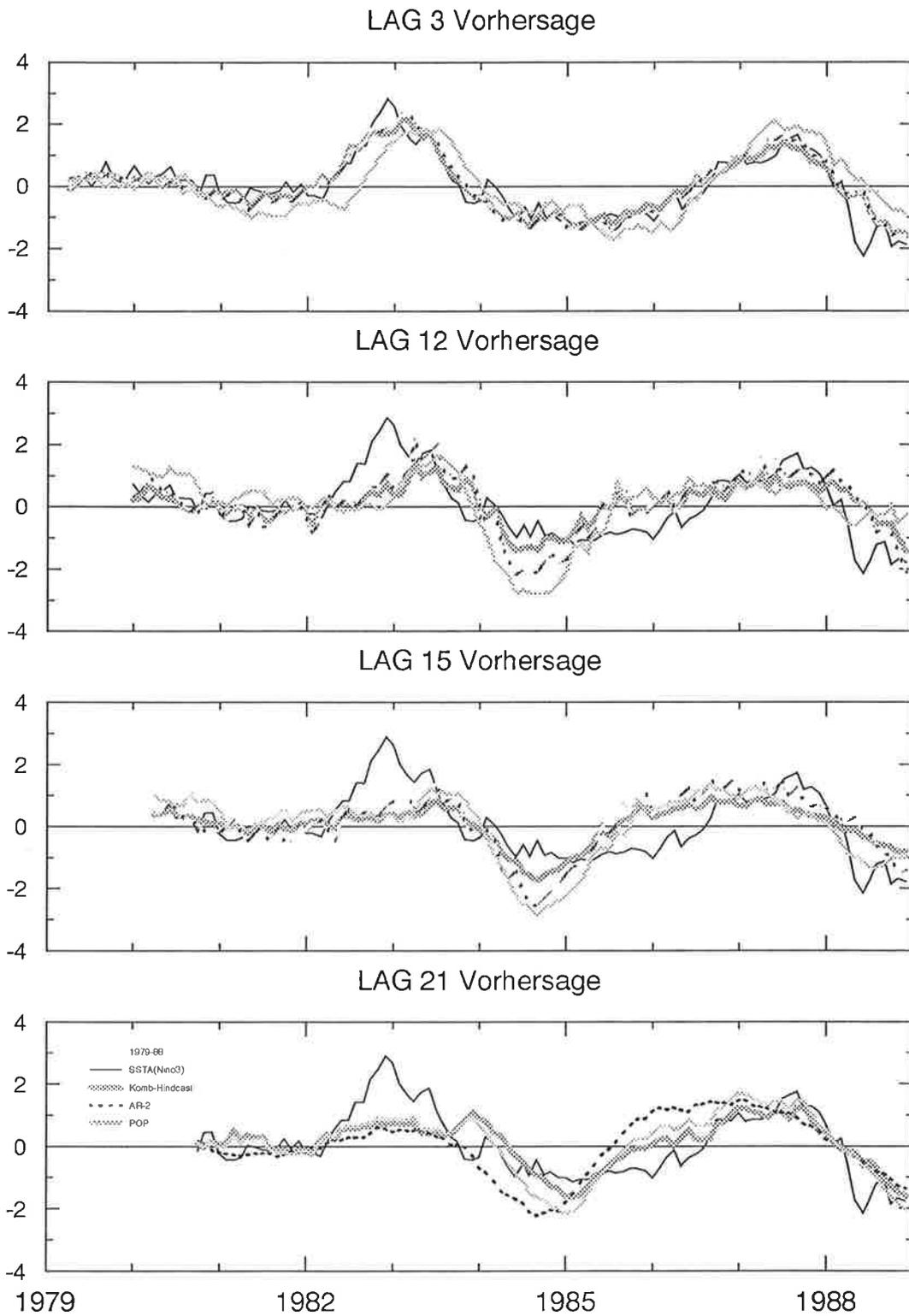
Die Bestimmung der Systemmatrix des POP-Modells erfolgt mittels des bereits in Abb.3 verwendeten SSTA-Datensatzes des äquatorialen Pazifiks (170°E–90°W) mit einer räumlichen Auflösung von 10°. Die POP-Analyse ergibt ein dominierendes Raum-Zeit Muster, welches rund ein Viertel der vollen Varianz erklärt. Die charakteristische Periode wird zu 40 Monaten bestimmt, mit einer exponentiellen Abklingzeit von 29 Monaten. Die Zeitreihen werden für den o.g. Zeitraum (1950-78) mit einem dreizehnmönatigen Gleitmittel geglättet und für die Anpassung der Parameter des AR-2 Modells gemittelt.

Die AR-2 - und POP - Vorhersagen werden entsprechend Kapitel IV, mittels der Korrelation und der Kreuzkorrelation der Ensemble-Vorhersagen gewichtet und mit der SSTA des Niño3-Gebietes (Abb.2) korreliert. Die statistischen Gewichte werden aus dem gesamten Vorhersagezeitraum von 1979 bis 1988 abgeleitet, weshalb die Vorhersagegüte der Kombination mit "künstlicher" Vorhersagegüte behaftet ist. Sie kann daher für dieses Kombinationsschema als eine obere Grenze angesehen werden.

Abbildung 6 zeigt die Vorhersagegüten. Die Korrelationsgüte der Kombinationsvorhersagen ist für die gesamte Vorhersagedauer von zwei Jahren höher als 0.5 (Abb.6a). Der RMSE (Root Mean Squared Error) ist ebenfalls durchweg kleiner als die Standardabweichung der Beobachtung (Abb.6b). Die Vorhersagegüte der Kombination entspricht jedoch nur der Einhüllenden ihrer beiden Komponenten. Sie beruht bis zu einer Vorhersagedauer von 15 Monaten auf der hohen Anfangskorrelation und dem damit hohen statistischen Gewicht der AR-2-Vorhersagen, während das Gewicht der POP-Vorhersagen die Kombination für die verbleibende Vorhersagedauer bestimmt (Abb.6c). Die Verbesserung der POP-Vorhersagen nach einer Vorhersagedauer von eineinhalb Jahren, basiert auf dem quasi-periodischen Charakter von ENSO. Ähnlich wie die Persistenz beinhalten die POP-Vorhersagen die Phaseninformation. Durch die Drehung im POP-Raum (s.Kap.III) drückt sich diese aber in einem positiven Korrelationskoeffizienten aus. Da auch die hohe Anfangskorrelation der AR-2 Vorhersagen auf der Quasiperiodizität von ENSO beruht, sind die beiden Vorhersagen nicht unabhängig voneinander. Ihre Kreuzkorrelation (Abb.6a) ist dementsprechend hoch, und die erzielte Verbesserung der Vorhersagegüte gering.



**Abbildung 6:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des AR-2 Modells (gestrichelt) und des POP Modells (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die mittlere Abweichung der Vorhersagen von der Beobachtung und (c) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die statistischen Modelle basieren auf geglätteten SSTA-Zeitreihen (Jan.1950 - Dez.1978) des äquatorialen Pazifiks (170°E-150°W, 10° Auflösung) Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988.



**Abbildung 7:** Einzel-Vorhersagen der Kombination (dick schraffiert), des AR-2 Modells (gestrichelt) und des POP Modells (dünn schraffiert), für die Vorhersagedauer von 3, 12, 18 und 21 Monaten, sowie die Beobachtung, die SSTA des Niño3- Gebietes (durchgezogene Linie) für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988.

Die bisherigen Betrachtungen konzentrierten sich auf das mittlere Verhalten der Ensemblevorhersagen. Diese werden im folgenden mit den Einzelvorhersagen der ENSO-Ereignisse verglichen werden. Abbildung 7 zeigt die 120 Einzelvorhersagen und die Beobachtung (SSTA des Niño3-Gebiet) für verschiedene Vorhersagezeiten (Lag: 3, 12, 15 und 21 Monate) für den Vorhersagezeitraum (Jan. 1979 bis Dez. 1988). Die Einzelvorhersagen des AR-2 Modells stimmen bis zu einem Jahr gut mit der Beobachtung überein, wenn man von den Vorhersagen beim 82/83-Warmereignis absieht. Ebenso ist erkennbar, daß die lange Kaltphase von 1984 bis 1986 vom POP-Modell nach 21 Monaten besser vorhergesagt wird. Da die POP und AR-2 Vorhersage nach einer Vorhersagedauer von 15 Monaten gleichwertig sind, zeigt die Kombination bei diesem Kaltereignis am deutlichsten eine Verbesserung der Vorhersagegüten. Mit dieser sog. "Hindcast-Kombination" können sowohl der Phasenübergang von der Kaltphase zum 87/88er-Warmereignis, als auch dieser El Niño selbst, fast zwei Jahre im voraus vorhergesagt werden. Die Einzelvorhersagen bestätigen demnach das mittlere Verhalten der Ensemble-Vorhersagen.

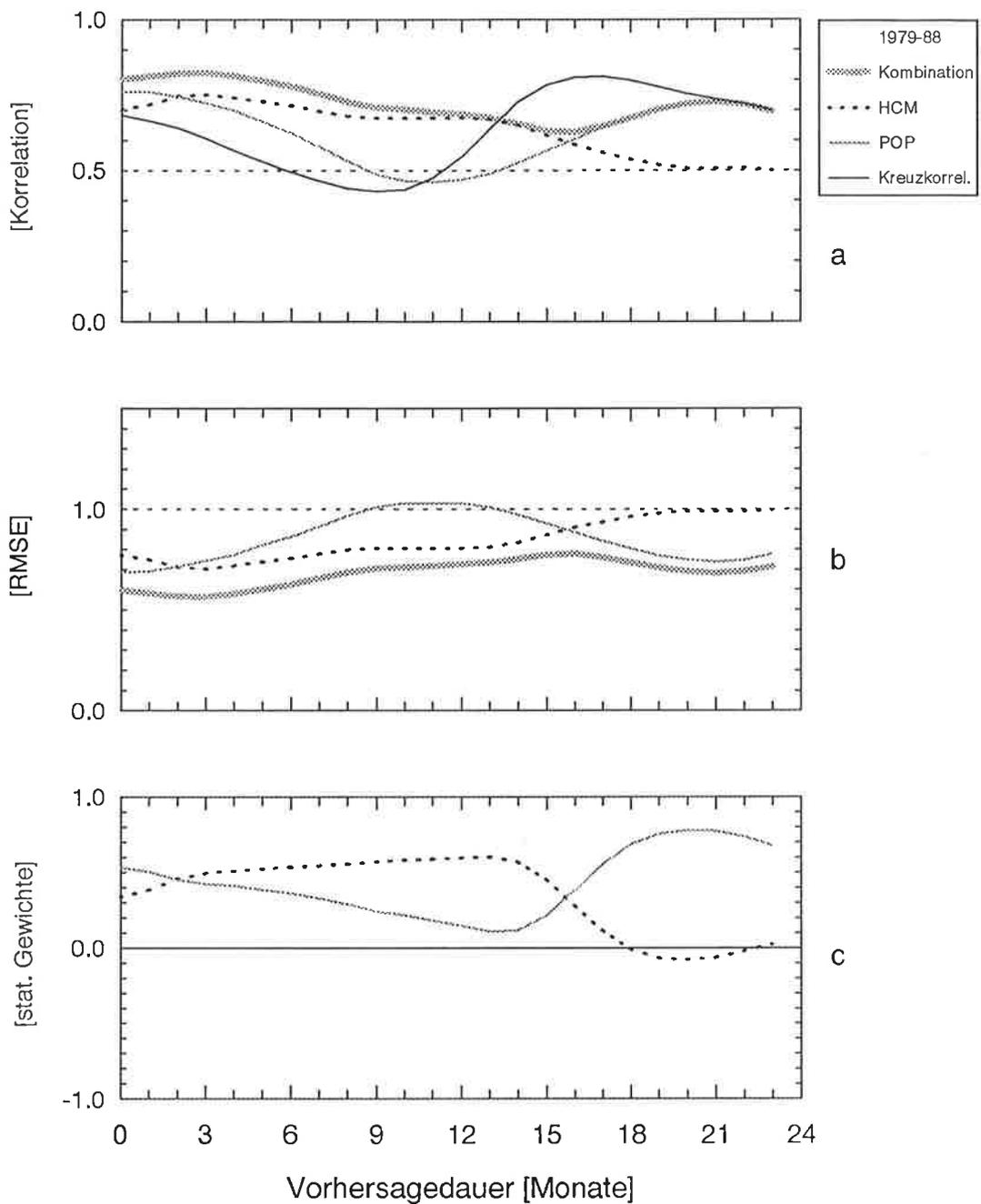
## **5.2 Kombination der HCM- und POP- bzw. AR-2- Vorhersagen**

Die Vorhersagen des POP und AR-2 Modells werden jeweils einzeln mit den Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells, dem HCM, kombiniert. Die Anfangszustände der HCM-Vorhersagen entstammen einem ungekoppelten Lauf, bei dem das ozeanische Zirkulationsmodell mit beobachteten FSU-Winden (Florida State University) von Januar 1961 bis Juli 1994 angetrieben wurde (s. Kap. III). Analog den obigen Betrachtungen werden zuerst die Vorhersagegüten, danach die Einzelvorhersagen diskutiert.

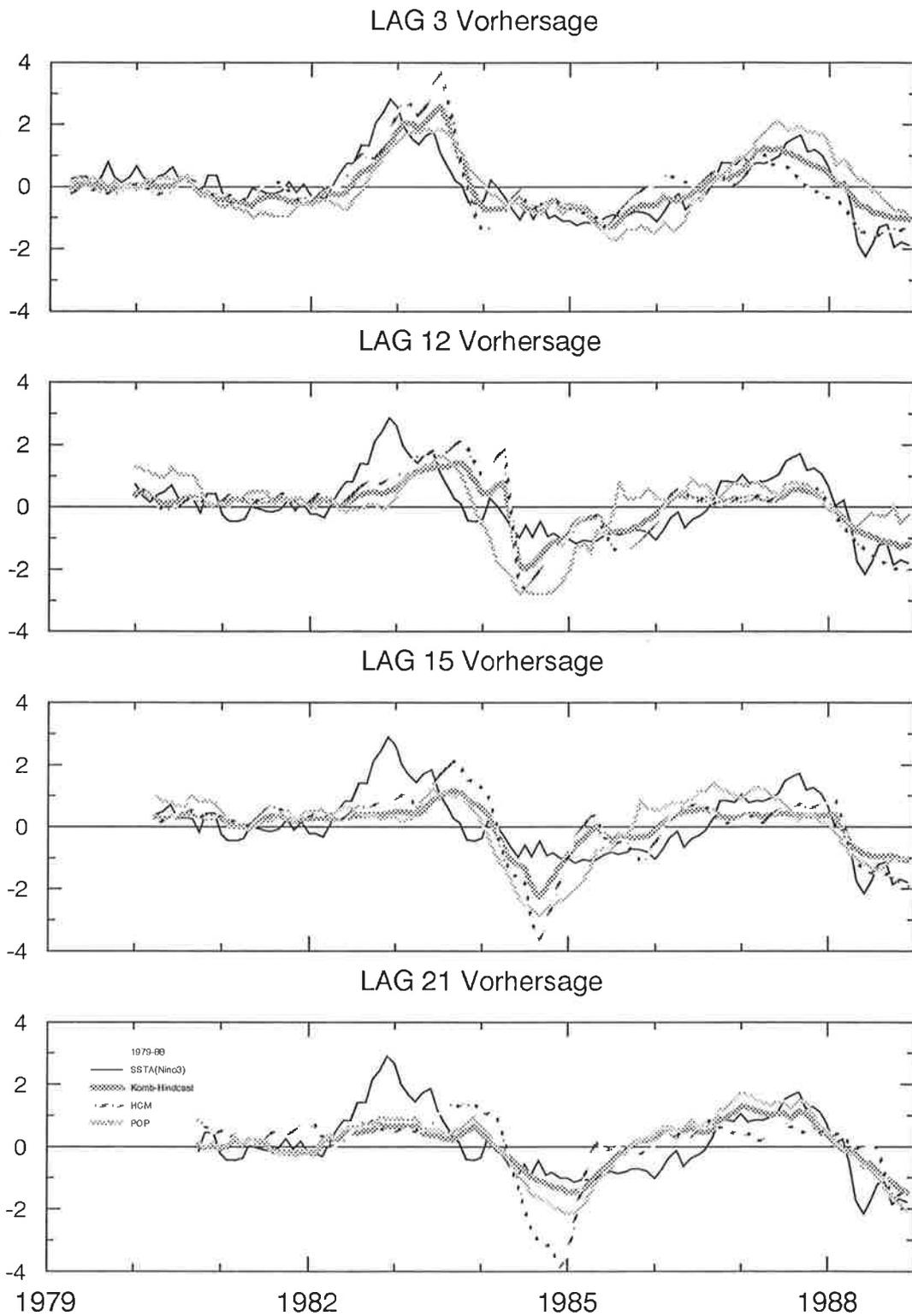
Abbildung 8 zeigt die Vorhersagegüten der Ensemble-Vorhersagen des POP-Modells, des HCMs und der Kombination. Die Vorhersagegüte der Kombination, ist abgesehen von der niederen Anfangskorrelation (Abb.8a), mit der POP / AR-2 Kombination vergleichbar. Die Ursache für die niedere Anfangskorrelation liegt in der Tatsache, daß die Anfangsbedingungen des gekoppelten Ozean-Atmosphären Modells erheblich von der Beobachtung abweichen. So beträgt die Korrelation zwischen der beobachteten und simulierten SSTA des östlichen tropischen Pazifiks nur 0.67 (s.Abb.5, unten).

Die Korrelation der Kombinationsvorhersagen ist für die gesamte Vorhersagedauer von zwei Jahren höher als 0.5 (Abb.8a). Auch der RMSE (root mean squared error) ist durchweg kleiner als die Standardabweichung der Beobachtung (Abb.8b). Die Kombination verbessert den RMSE aufgrund der gleichen Gewichtung der POP und HCM-Vorhersagen bei einer Vorhersagedauer von 3 und 15 Monaten von 0.7 auf 0.6 bzw. von 0.9 auf 0.8 (Abb.8b,c). Während die Anfangskorrelation dieser Kombinationsvorhersagen nur 0.8 beträgt (Abb.8a), sind die Vorhersagegüten ab einem Jahr mit der von der POP / AR-2 Kombination (Abb.6) vergleichbar.

Die Einzelvorhersagen der POP / HCM Kombination sind in Abbildung 9 dargestellt. Das von dem vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell nach drei Monaten überschätzte 82/83-Warmereignis, spiegelt sich in den Kombinationsvorhersagen wider. Insbesondere für die einjährige Vorhersage dieses El Niños, weichen die Kombinationsvorhersagen deutlich von der Beobachtung ab. Die vom vereinfachten gekoppelten Modell nach einem Jahr überschätzte Kaltphase wird hingegen von der Kombination in ihrer Amplitude deutlich besser vorhergesagt. Das sowohl vom POP-Modell als auch vom HCM für die gesamte Vorhersagedauer in der Phase gut erfaßte 87/88er Warmereignis, wird durch die Vorhersagenkombination nicht besser vorhergesagt. Entsprechend dem mittleren Verhalten der Vorhersagenkombination, stimmen auch die Einzelvorhersagen für Vorhersagezeiten ab einem Jahr auffällig gut mit denen der POP / AR-2 Kombination (Abb.7) überein.



**Abbildung 8:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (punktiert) und des POP Modells (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die mittlere Abweichung der Vorhersagen von der Beobachtung und (c) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die statistischen Modelle basieren auf geglätteten SSTA-Zeitreihen (Jan.1950 - Dez.1978) des äquatorialen Pazifiks (170°E-150°W, 10° Auflösung) Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988.

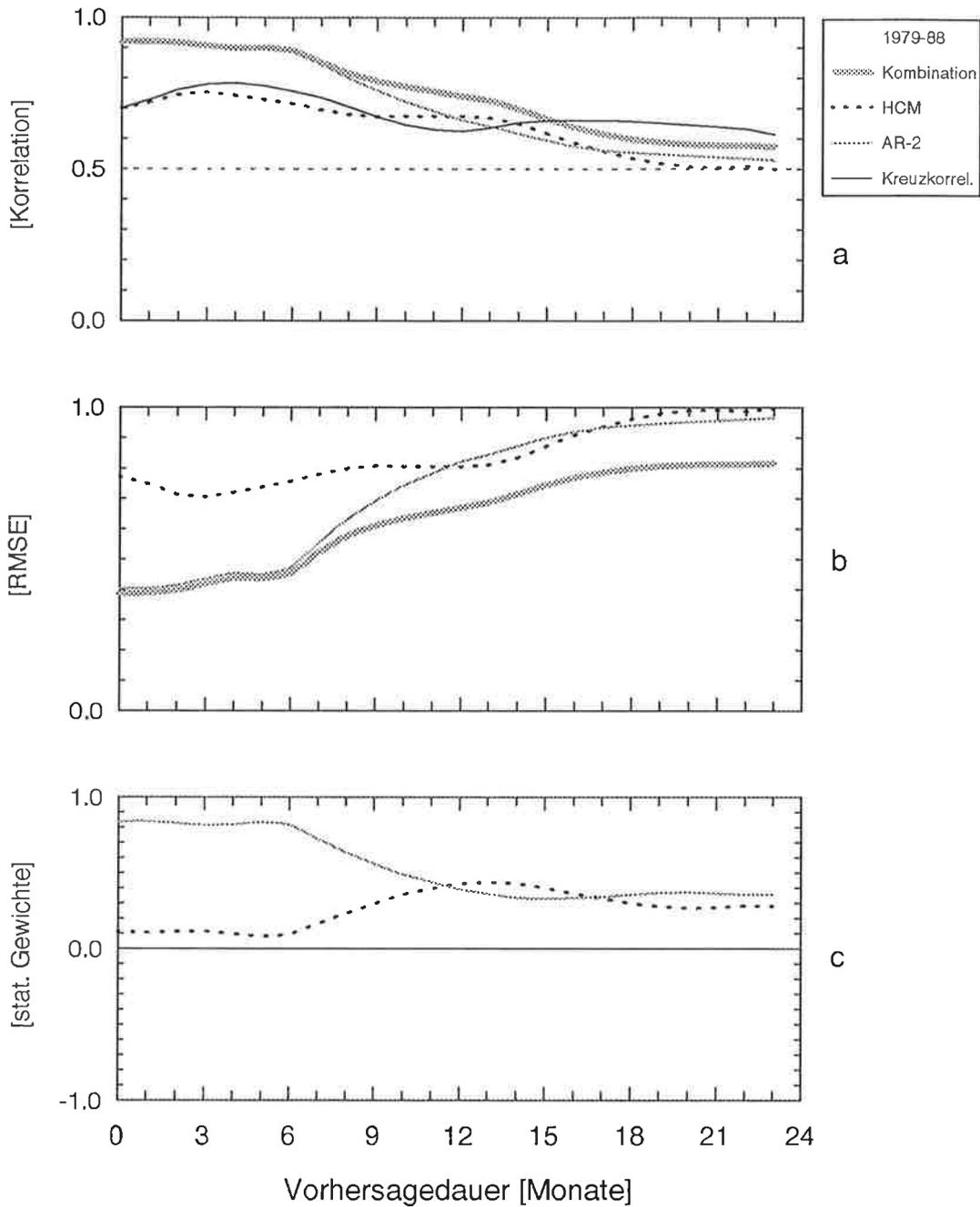


**Abbildung 9:** Einzel-Vorhersagen der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und des POP Modells (dünn schraffiert), für die Vorhersagedauer von 3, 12, 18 und 21 Monaten, sowie die Beobachtung, die SSTA des Niño3- Gebietes (durchgezogene Linie) für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988.

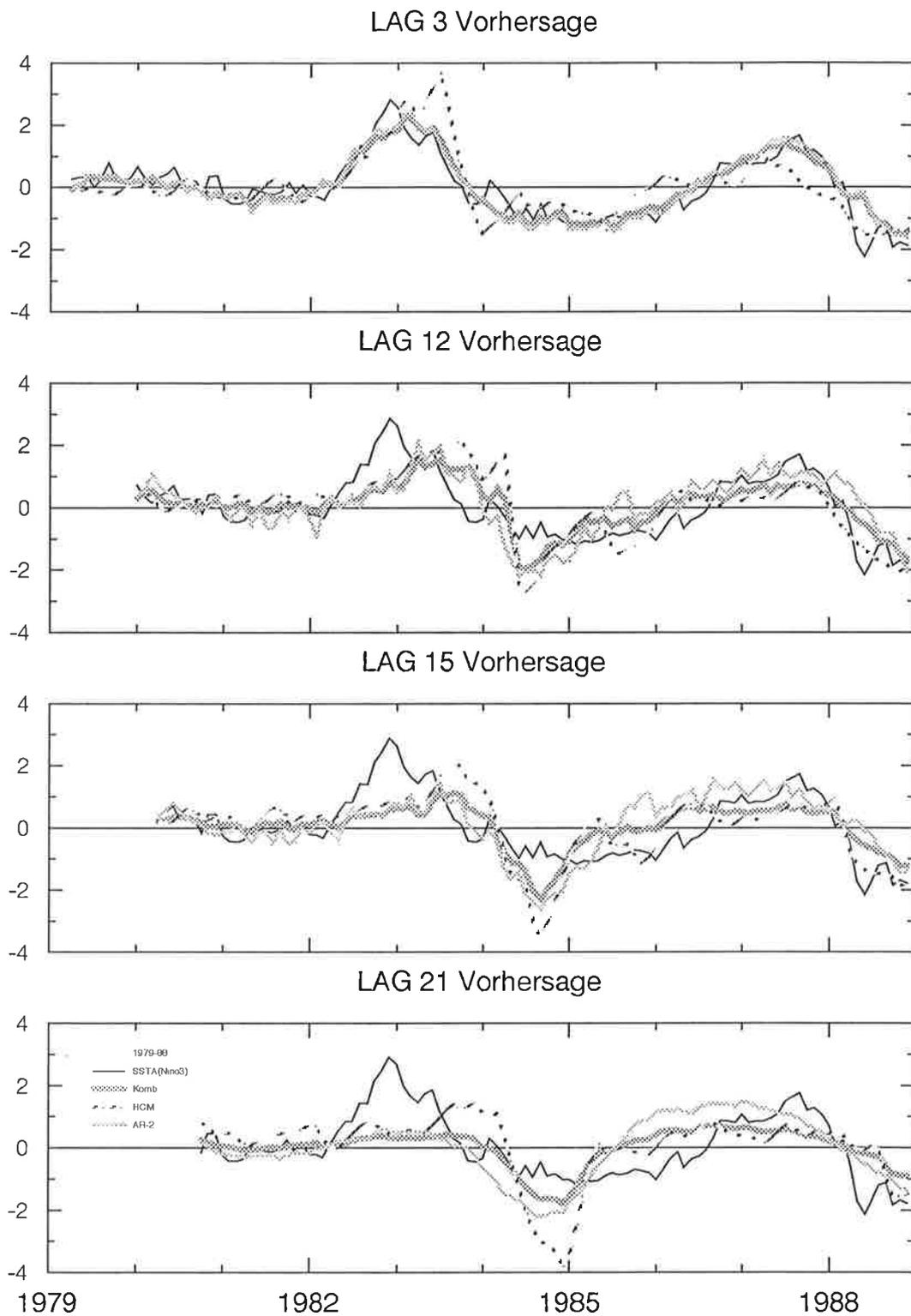
Abbildung 10 zeigt die Vorhersagegüten der Ensemble-Vorhersagen des AR2-Modells, des HCMs und ihrer Kombination. Die Korrelationsgüte der Kombination liegt auch hier für alle Vorhersagezeiten oberhalb 0.5 und der RMSE ist durchweg kleiner als die Standardabweichung der Beobachtung (Abb.10a,b). Dabei wird der Vorhersagefehler durch die Kombination ab einer Vorhersagedauer von 9 Monaten um etwa 15% verringert, da die AR-2 und HCM Vorhersagen gleichwertig werden (Abb.10c).

Die Einzelvorhersagen der AR-2 / HCM Kombination sind in Abbildung 11 dargestellt. Das von dem vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell nach drei Monaten überschätzte 82/83-Warmereignis, wird hier im Gegensatz zur POP / HCM Kombination von den Kombinationsvorhersagen deutlich besser vorhergesagt. Hingegen stimmen die einjährigen Kombinationsvorhersagen dieses El Niño-Ereignisses bereits mit denen der POP / HCM Kombination überein. Obwohl die AR-2 und HCM Vorhersagen ab einem Jahr mit dem gleichen Gewicht in die Kombination eingehen, zeigen auch diese Kombinationsvorhersagen ein Verhalten, das den bisherigen Kombinationen entspricht.

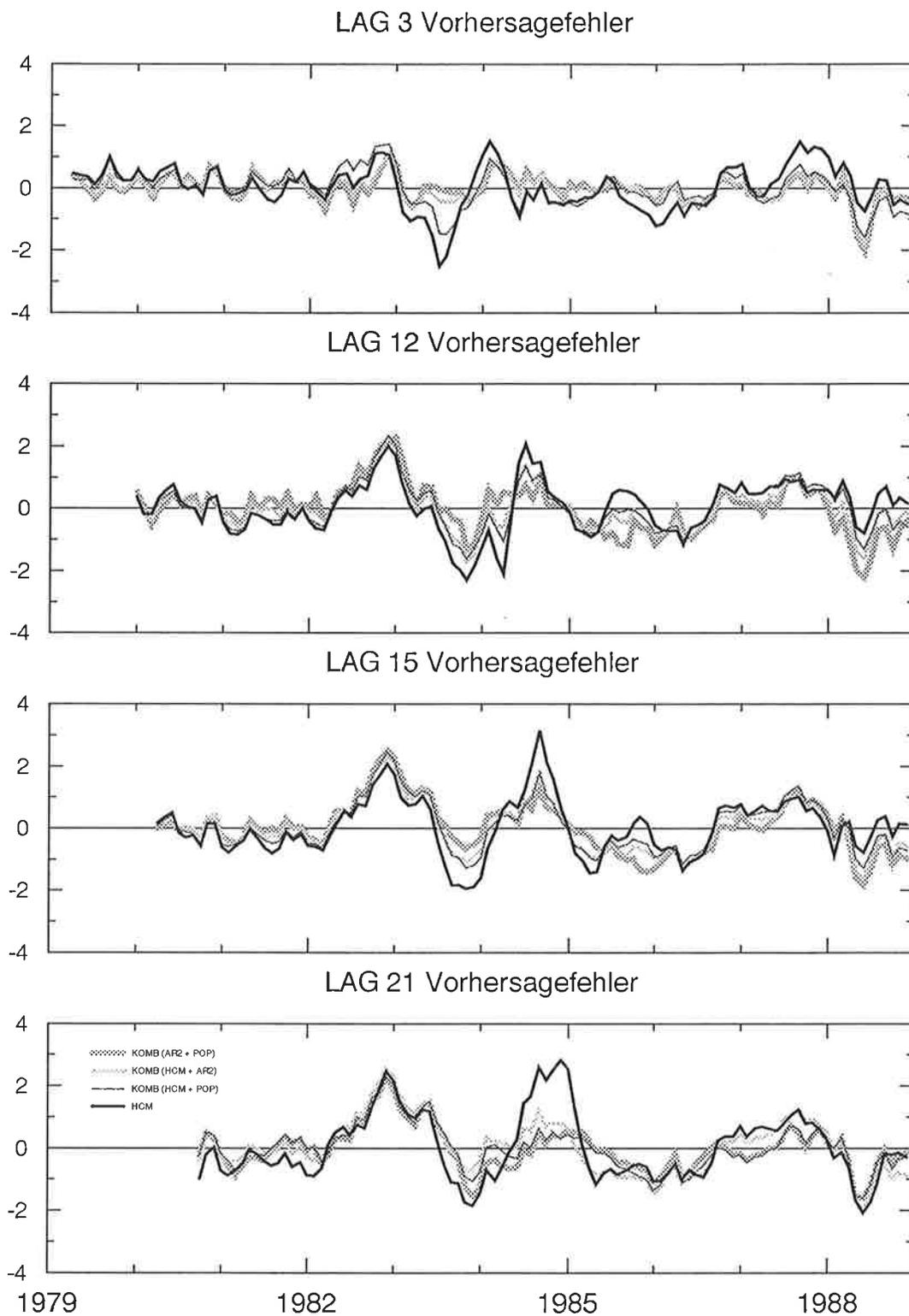
In Abbildung 12 sind für einen Vergleich die Vorhersagefehler der bisher gezeigten Kombinationen (POP / AR-2 , POP / HCM , AR-2 / HCM) und des HCMs dargestellt. Der Vorhersagefehler ergibt sich aus der Differenz der Einzelvorhersagen und der Beobachtung. Es fällt auf, daß alle drei Kombinationen einen nahezu identischen Vorhersagefehler aufweisen. Dieser ist für die relativ lange 84/86er Kaltphase, für alle Vorhersagezeiten bis zu 50% geringer als der Vorhersagefehler des vereinfachten gekoppelten Modells. Die beiden El Niño Ereignisse werden hingegen durch die Vorhersagenkombination nicht wesentlich besser vorhergesagt. Insbesondere der außergewöhnliche 82/83 El Niño wird auch von den Kombinationen gleichermaßen wie vom vereinfachten gekoppelten Modell in seiner Intensität unterschätzt. Der Vorhersagefehler ist dabei bereits nach einem Jahr von der Größenordnung der natürlichen Variabilität.



**Abbildung 10:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und des AR-2 Modells (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die mittlere Abweichung der Vorhersagen von der Beobachtung und (c) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die statistischen Modelle basieren auf geglätteten SSTA-Zeitreihen (Jan.1950 - Dez.1978) des äquatorialen Pazifiks (170° E-150° W, 10° Auflösung) Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988.



**Abbildung 11:** Einzel-Vorhersagen der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und des AR-2 Modells (dünn schraffiert), für die Vorhersagedauer von 3, 12, 18 und 21 Monaten, sowie die Beobachtung, die SSTA des Niño3- Gebietes (durchgezogene Linie) für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988.



**Abbildung 12:** Differenz aus der beobachteten SSTA des Niño3-Gebietes und den Einzelvorhersagen der Kombinationen aus AR-2 / POP (dick schraffiert), HCM / POP (dünn schraffiert) HCM / AR-2 (gestrichelt), sowie den Einzelvorhersagen des HCMs (durchgezogene Linie), für die Vorhersagedauer von 3, 12, 18 und 21 Monaten und dem Vorhersagezeitraum von Januar 1979 - Dezember 1988.

Die Tatsache, daß die Einzelvorhersagen der Kombinationen aus dem POP und AR-2 Modell, sowie des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells, ENSO vergleichbar vorhersagen können, bringt ebenfalls die Abhängigkeit der Vorhersagen zum Ausdruck. Sie geht aus den hohen Kreuzkorrelationen hervor (Abb. 6a,8a,10a) und bedingt die nur geringfügige Verbesserung der Vorhersagegüten durch ihre Kombination.

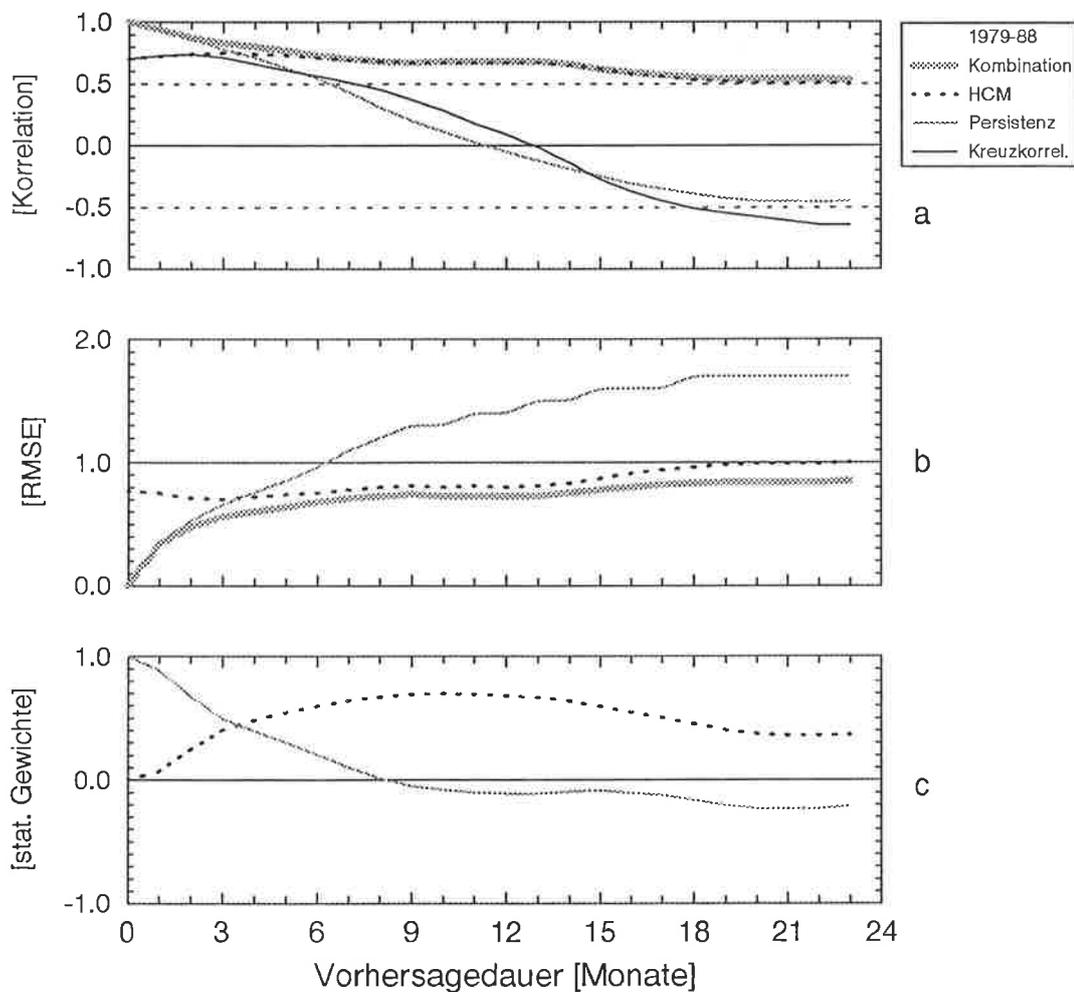
Die Abhängigkeit der Vorhersagen ist zu erwarten, da die Vorhersagefähigkeiten der Modelle mehr oder weniger auf der Quasiperiodizität von ENSO beruhen. Das vereinfachte gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodell basiert auf einem Konzept, das mit der in Kapitel II erwähnten "delayed action oscillator" Theorie in Einklang steht (Latif & Flügel 1991, Flügel 1994) und diese Quasiperiodizität beschreibt. Gleichmaßen ist die Vorhersagegüte des AR-2 und POP-Modells an eine, den Datensatz dominierende Periode gekoppelt.

### 5.3 Kombination der HCM- und Persistenz-Vorhersagen

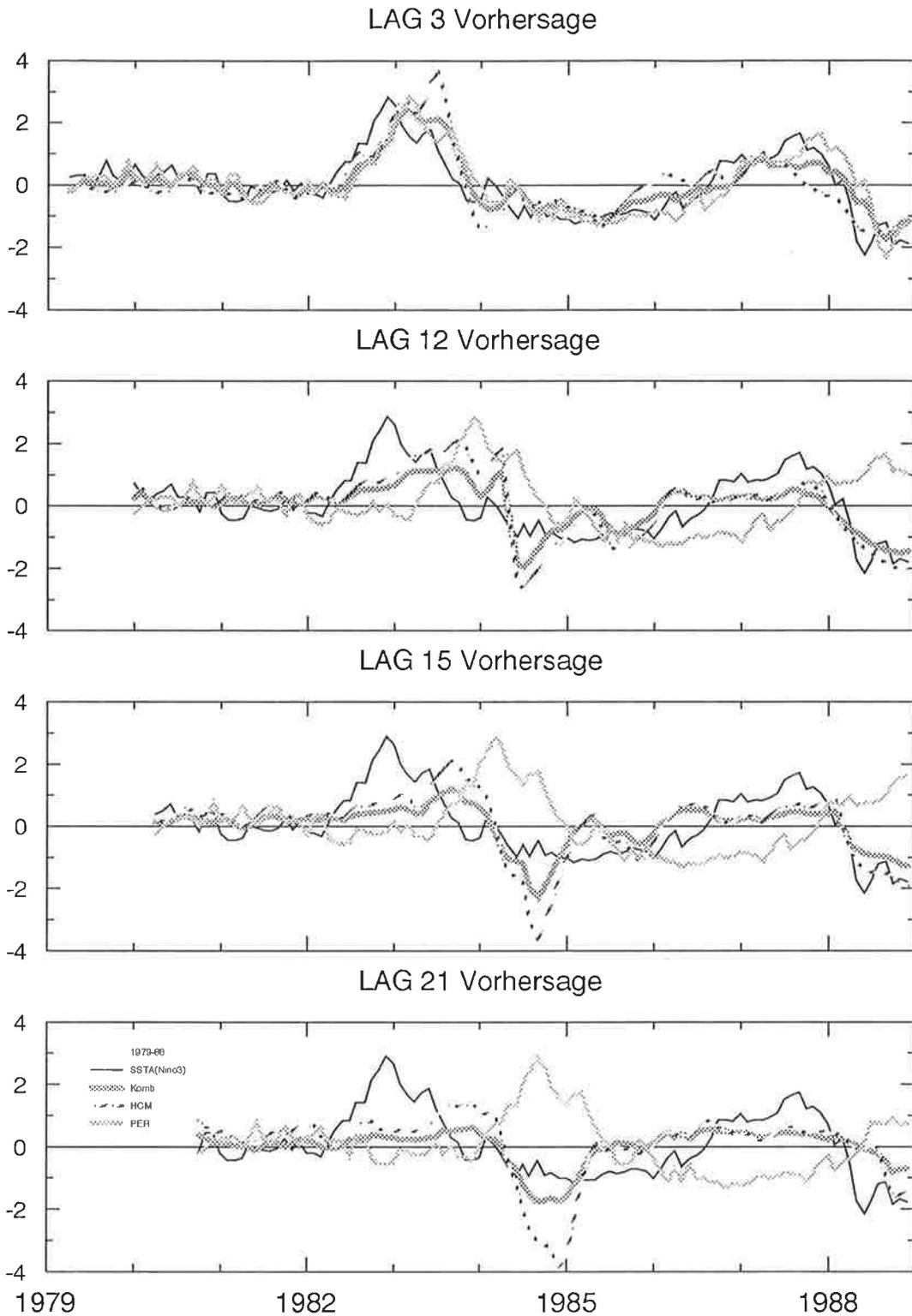
Die Ensemble-Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells werden nun mit der Persistenz kombiniert. Die Vorhersagen der Persistenz basieren auf der SSTA des Niño3-Gebietes. Analog zu den vorangegangenen Kombinationsbeispielen wird der Zeitraum von Januar 1979 bis Dezember 1988 vorhergesagt. Aus diesem werden wieder die statistischen Gewichte abgeleitet.

In Abbildung 13 sind die Vorhersagegüten des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells, der Persistenz und ihrer Kombination dargestellt. Die Korrelationsgüte der Kombinationsvorhersagen beginnt entsprechend der Korrelation der Persistenz bei 1 und bleibt gemäß der Korrelation des HCMs, für die gesamte Vorhersagedauer über 0.5. (Abb.13a). Dabei ist keine nennenswerte Verbesserung der Korrelation erkennbar. Der mittlere Vorhersagefehler (RMSE) wird hingegen um ca. 15% ab einer Vorhersagezeit von 15 Monaten durch die Vorhersagenkombination verringert und bleibt für alle Vorhersagezeiten deutlich unterhalb der Standardabweichung der Beobachtung (Abb.13b). Die bereits diskutierte geringe Anfangskorrelation der HCM-Vorhersagen, wird durch das hohe statistische Gewicht der Persistenz kompensiert. Nach einer Vorhersagedauer von 3 Monaten werden die Vorhersagen jedoch bereits gleich gewichtet. Die Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Modells dominieren dann die restliche Vorhersagedauer, wobei sie allerdings nach eineinhalb Jahren wieder etwas an Gewicht (Abb.13c) verlieren. Die Persistenz und die HCM-Vorhersagen sind bereits nach einem Jahr nicht mehr miteinander korreliert (Abb.13a). Entsprechend der zunehmenden Phasenverschiebung zwischen Persistenz und Beobachtung, wird auch die Kreuzkorrelation der Vorhersagen nach einem Jahr stark negativ.

Die Einzelvorhersagen in Abbildung 14 zeigen die mit der Vorhersagedauer zunehmende Phasenverschiebung zwischen Persistenz und Beobachtung. Nach einer Vorhersagedauer von 21 Monaten ist die Persistenz des Niño3-Gebietes außer Phase zur Beobachtung, d.h. das 82/83 Warmereignis ist um 21 Monate "versetzt". Dabei fällt auf, daß die Kombinationsvorhersagen von dieser Phaseninformation der Persistenz nur im Bezug auf die Kaltphase profitieren. Die beiden El Niño-Ereignisse werden hingegen nicht besser vorhergesagt.



**Abbildung 13:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz der SSTA(Niño3) (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die mittlere Abweichung der Vorhersagen von der Beobachtung und (c) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988.



**Abbildung 14:** Einzel-Vorhersagen der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz (dünn schraffiert), für die Vorhersagedauer von 3, 12, 18 und 21 Monaten, sowie die Beobachtung, die SSTA des Niño3- Gebietes (durchgezogene Linie) für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988.

## 5.4 Sensitivitäten

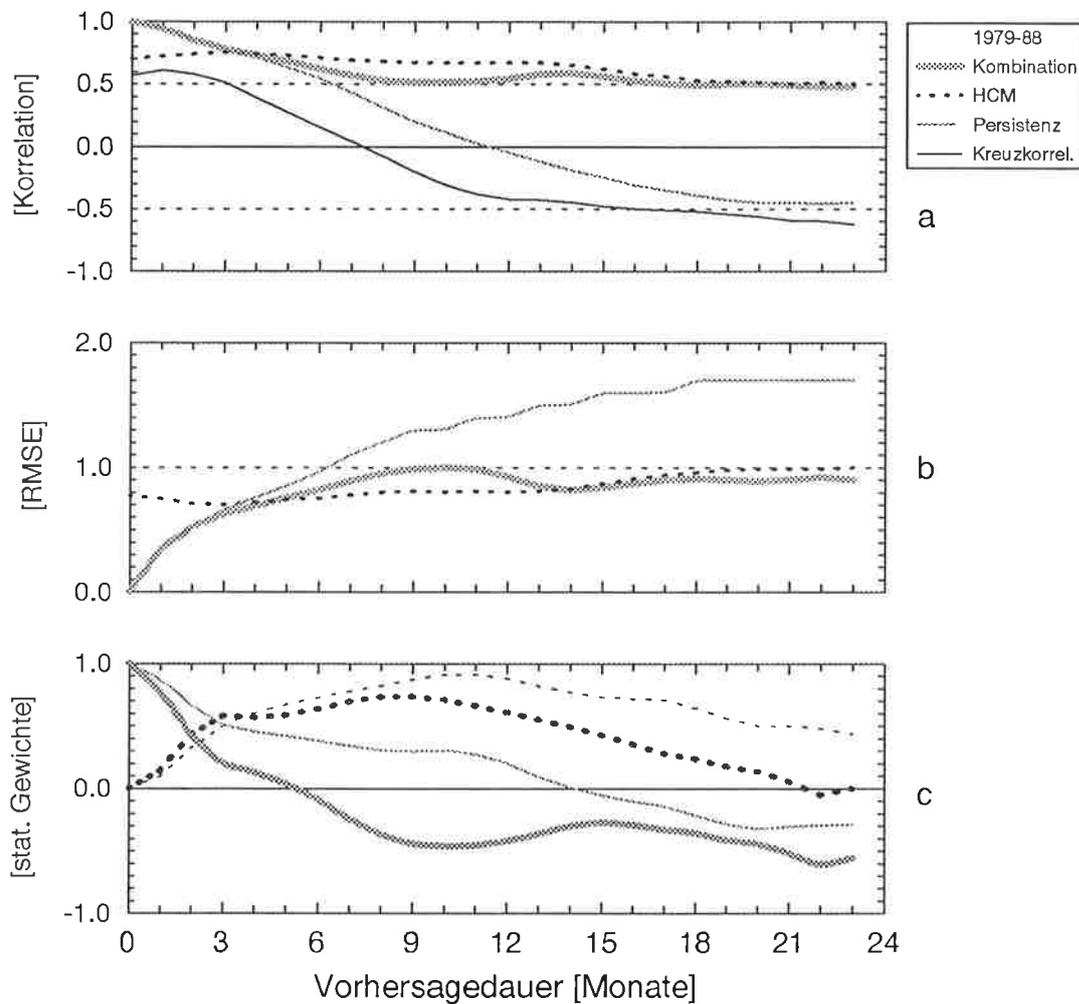
Analog zum vorangegangenen Kombinationsbeispiel werden die Ensemble-Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells mit der Persistenz kombiniert. Mit dieser Vorhersagenkombination wird der Einfluß folgender Faktoren auf die Vorhersagegüte untersucht: Bestimmungszeitraum der statistischen Gewichte, Vorhersageperiode, Ensemblegröße, Wahl der Persistenz und Saisonalität.

### 5.4.1 Bestimmungszeitraum der Gewichte

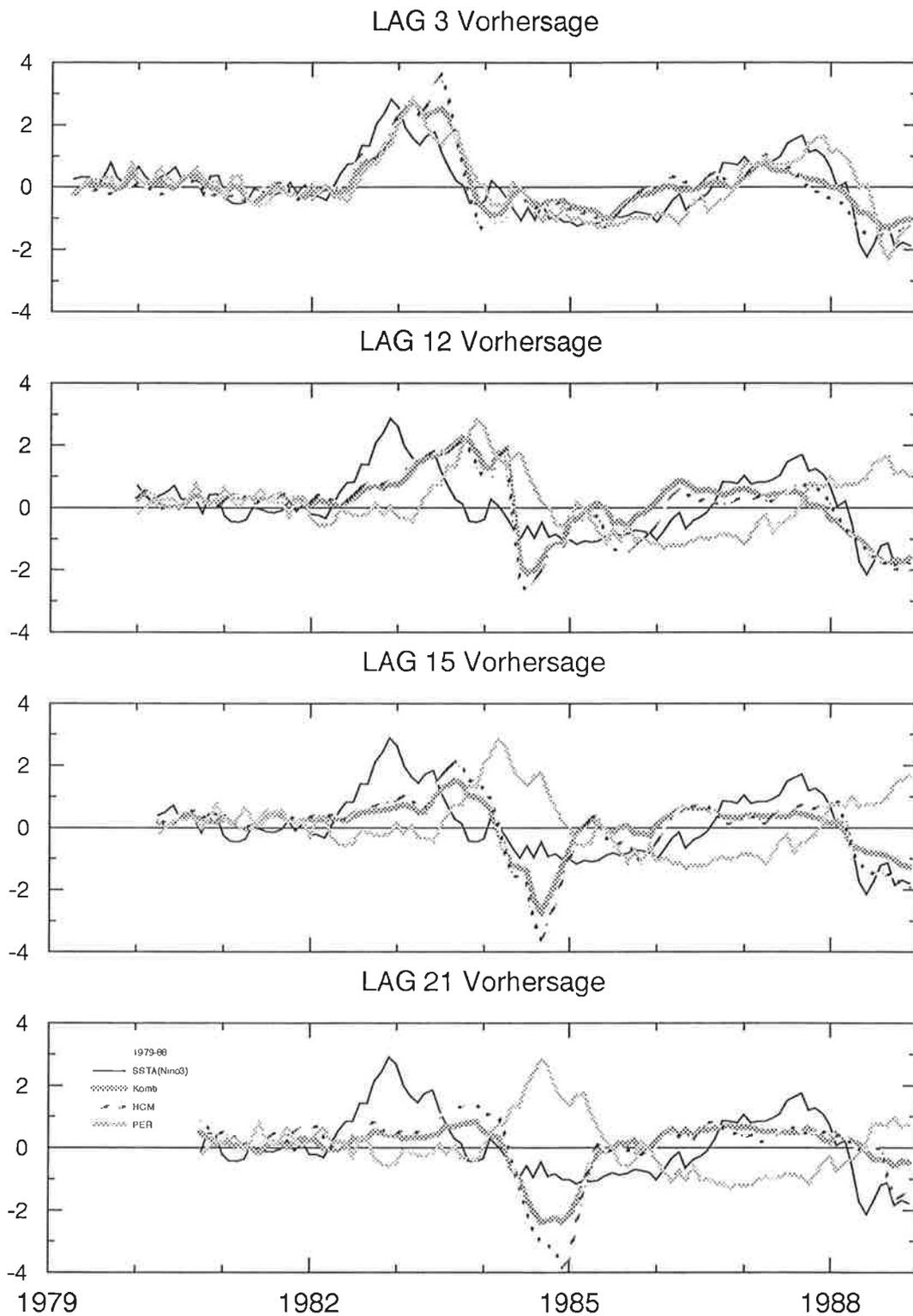
Bei den bisherigen Kombinationsbeispielen wurden die statistischen Gewichte aus dem Vorhersagezeitraum selbst abgeleitet. Dadurch wird die Vorhersagegüte der Kombinationsvorhersagen künstlich angehoben. - Hingegen kann die künstliche Anhebung der Vorhersagegüte als vernachlässigbar angesehen werden, die durch die Anomaliebildung und durch die Bestimmung der Kopplungsmatrix des vereinfachten, gekoppelten Modells bedingt ist (Flügel 1995, pers. Mitteilung). - Um dieses künstliche Anheben der Vorhersagegüte abzuschätzen werden die statistischen Gewichte aus einem unabhängigen Vorhersagezeitraum gewonnen. Der Vorhersagezeitraum wird halbiert und die Kombinationsvorhersagen anschließend über beide Hälften gemittelt. Dabei werden die aus der einen Hälfte abgeleiteten Gewichte für die Vorhersagekombination der zweiten Hälfte des Vorhersagezeitraumes verwendet, und umgekehrt.

Die Abbildung 15 zeigt die resultierende Vorhersagegüte ohne künstliche Anhebung. Im Gegensatz zu den bisherigen Kombinationsbeispielen, ist diese nicht durchweg ihren beiden Komponenten überlegen. Für eine Vorhersagedauer von 3 bis 12 Monaten ist die Vorhersagegüte der Kombination niedriger als die Vorhersagegüte des vereinfachten gekoppelten Modells (Abb.15a,b). Die statistischen Gewichte beider Hälften unterscheiden sich erheblich (Abb.15c). Für die Persistenz weichen sie für Vorhersagezeiten unter einem Jahr sehr stark von einander ab, für die HCM-Vorhersagen ab einem Jahr. Die statistischen Gewichte des Zeitraumes von 1979-83 sind durch dicke Linien und die des Zeitraumes von 1984-88 durch dünne Linien in Abbildung 15c dargestellt.

In Abbildung 16 sind die zugehörigen Einzelvorhersagen dargestellt. Die Kombinationsvorhersagen weichen nach einer Vorhersagedauer von einem Jahr deutlich stärker von der Beobachtung ab, als im vorangegangenen Beispiel (Abb.14). Betrachtet man die beiden Teilvorhersagezeiträume von 1979-83 und 1984-88, so fällt auf daß diese gerade von den beiden El Niño Ereignissen der 80er Jahre dominiert werden. Diese werden, wie bereits diskutiert wurde, von dem vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell, insbesondere nach einem Jahr unterschiedlich gut vorhergesagt.



**Abbildung 15:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz der SSTA(Niño3) (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die mittlere Abweichung der Vorhersagen von der Beobachtung und (c) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988. Die statistischen Gewichte wurden dabei aus dem Vorhersagezeitraum Jan.1979 - Dez. 1983 (dicke Linien) und Jan.1984 - Dez. 1988 (dünne Linien) abgeleitet.



**Abbildung 16:** Einzel-Vorhersagen der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz (dünn schraffiert), für die Vorhersagedauer von 3, 12, 18 und 21 Monaten, sowie die Beobachtung, die SSTA des Niño3- Gebietes (durchgezogene Linie) für den Vorhersagezeitraum: Jan.1979 - Dez. 1988. Die statistischen Gewichte wurden dabei nicht aus dem Vorhersagezeitraum abgeleitet.

Die für die zweite Hälfte des Vorhersagezeitraumes (1984-88) relativ hohe statistische Gewichtung der HCM-Vorhersagen nach einem Jahr, beruht daher im wesentlichen auf der guten Vorhersage der Phase des 86/87er El Niño Ereignisses. Hingegen wird das vom HCM vorhergesagte 82/83er El Niño Ereignis deutlich geringer gewichtet.

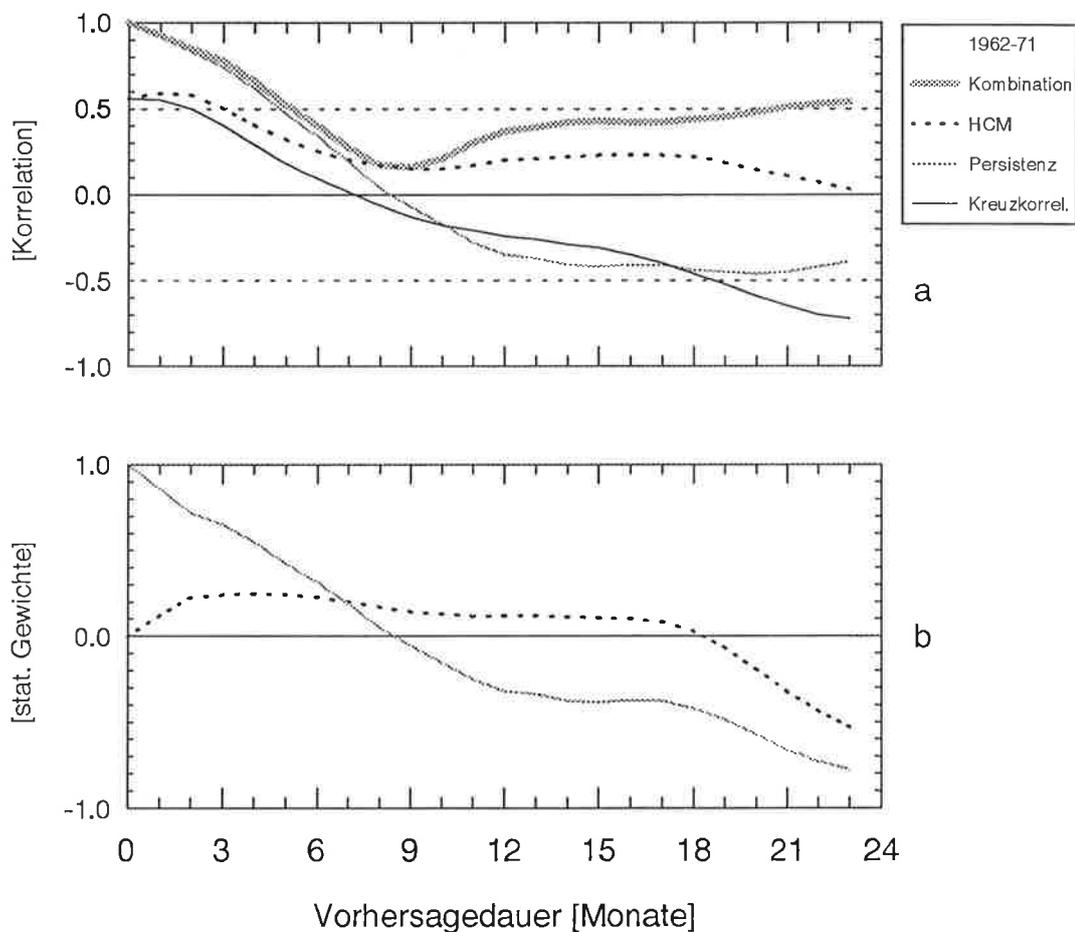
Um eine künstliche Anhebung der Vorhersagegüte durch die Kombination zu vermeiden, werden die Ensemble-Vorhersagen von HCM und Persistenz aus der ersten Hälfte des Vorhersagezeitraumes (1979-83) mit dem statistischen Gewicht kombiniert, das aus der zweiten Hälfte des Vorhersagezeitraumes (1984-88) bestimmt wurde. Entsprechend wird für die zweite Hälfte verfahren. Die Kombinationsvorhersagen werden anschließend mit der Beobachtung aus dem gesamten Vorhersagezeitraum (1979-88) korreliert. Durch diese Verfahrensweise werden die Einzelvorhersagen nicht mehr optimal gewichtet, und die gezeigten Kombinationsvorhersagen sind für die Vorhersagedauer von 3 bis 12 Monaten den Vorhersagen des HCMs unterlegen.

#### **5.4.2 Vorhersageperiode**

Im folgenden wird der Einfluß des Verifikationszeitraumes auf die Vorhersagegüte der Kombinationsvorhersagen qualitativ untersucht. Die Gewichtung der Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells und der Persistenz werden dabei aus dem gesamten Vorhersagezeitraum abgeleitet.

In Abbildung 17 sind die Vorhersagegüten der Persistenz, des HCMs und der Kombination für den Zeitraum Januar 1962 bis Dezember 1971, und in Abbildung 18 für den Zeitraum Januar 1972 bis Dezember 1981 dargestellt. Betrachtet man die Korrelationsgüten der 60er Jahre (Abb.17a) und der 70er (Abb.18a) Jahre, so zeigen sowohl die Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Modells als auch die Persistenz eine deutlich geringere Vorhersagegüte in Bezug zu den bereits diskutierten 80er Jahren (Abb.13a). Die Kombination zeigt hingegen eine bemerkenswerte relative Verbesserung der Vorhersagen, wenngleich die Vorhersagegüte absolut gesehen ebenfalls geringer ist. Auffällig ist außerdem, daß die Vorhersagen des HCMs in den 70er Jahren nach einem Jahr nur noch mit dem gleichen Gewicht wie die Persistenz kombiniert werden (Abb.18b) und die Kombination in Relation zu den 60er Jahren stärker profitiert.

Die unterschiedlichen Vorhersagen der 60er, 70er und 80er Jahre, lassen sich durch die langperiodische (dekadische) Variabilität des Klimas erklären. Wie bereits in Kapitel III erläutert wurde, kann aus der Lage der Korrelationsminima der Persistenz die dominante Periode abgeschätzt werden. Für die 60er Jahre beträgt demnach die mittlere Periode 36 Monate mit einem Wert für die Korrelation von ca. -0.4 (Abb.16.a). Für die 70er Jahre beträgt sie in etwa 26 Monate mit einem Wert für die Korrelation von -0.2 (Abb.18a). Nur die 80er Jahre werden durch eine mittlere Periode von ca. 48 Monaten repräsentiert, wobei die Korrelation von -0.5 eine höhere Dominanz dieser Periode ausdrückt (Abb.13a).



**Abbildung 17:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz der SSTA(Niño3) (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1962 - Dez. 1971.

Das periodische Verhalten von ENSO in den 80er Jahren, wird durch das 82/83 und 86/87 Warmereignis bestimmt und erlaubt, übereinstimmend mit der "delayed-action-oscillator"-Theorie, dem HCM eine brauchbare Vorhersage zumindest der Phase für die gesamte Vorhersagedauer. Die 70er Jahre weichen hingegen am stärksten von einer strengen Periode ab. Dies ist bedingt durch das sog. unterdrückte 76/77 El Niño - Ereignis (vgl. Abb.3), das von dem vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodell nicht vorhersagbar ist (s. u.). Dadurch nimmt die Vorhersagegüte des HCM die Qualität einer Persistenzvorhersage an (Abb.18a).

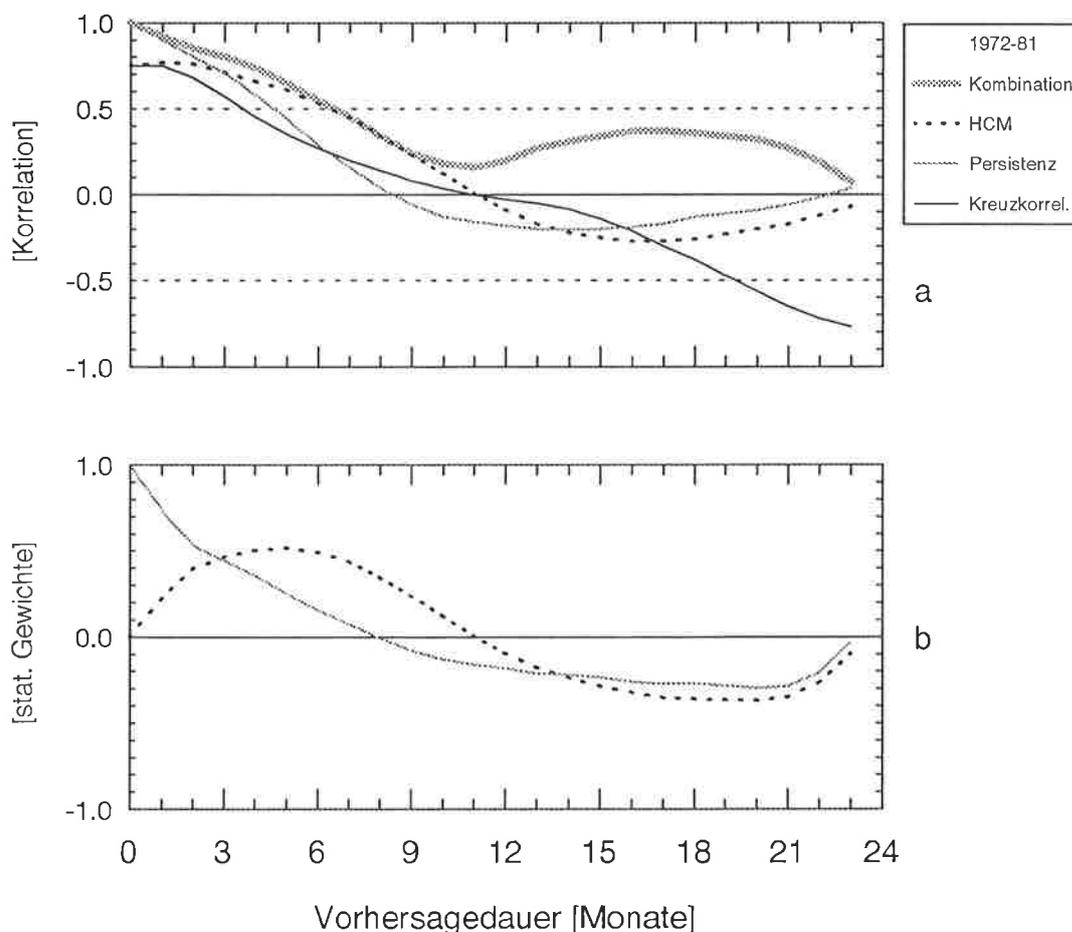


Abbildung 18: Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz der SSTA(Niño3) (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1972 - Dez. 1981.

Die Kombination der Vorhersagen für die 70er Jahre, erfüllt jedoch gerade die nach der Kombinationstheorie (Kap.IV) für eine Verbesserung der Vorhersagegüten erforderlichen Voraussetzungen: die Unabhängigkeit der Vorhersagen, d.h. geringe oder negative Kreuzkorrelation (Abb.18a) bei einer gleichen statistischen Gewichtung (Abb.18b).

### 5.4.3 Ensemblegröße

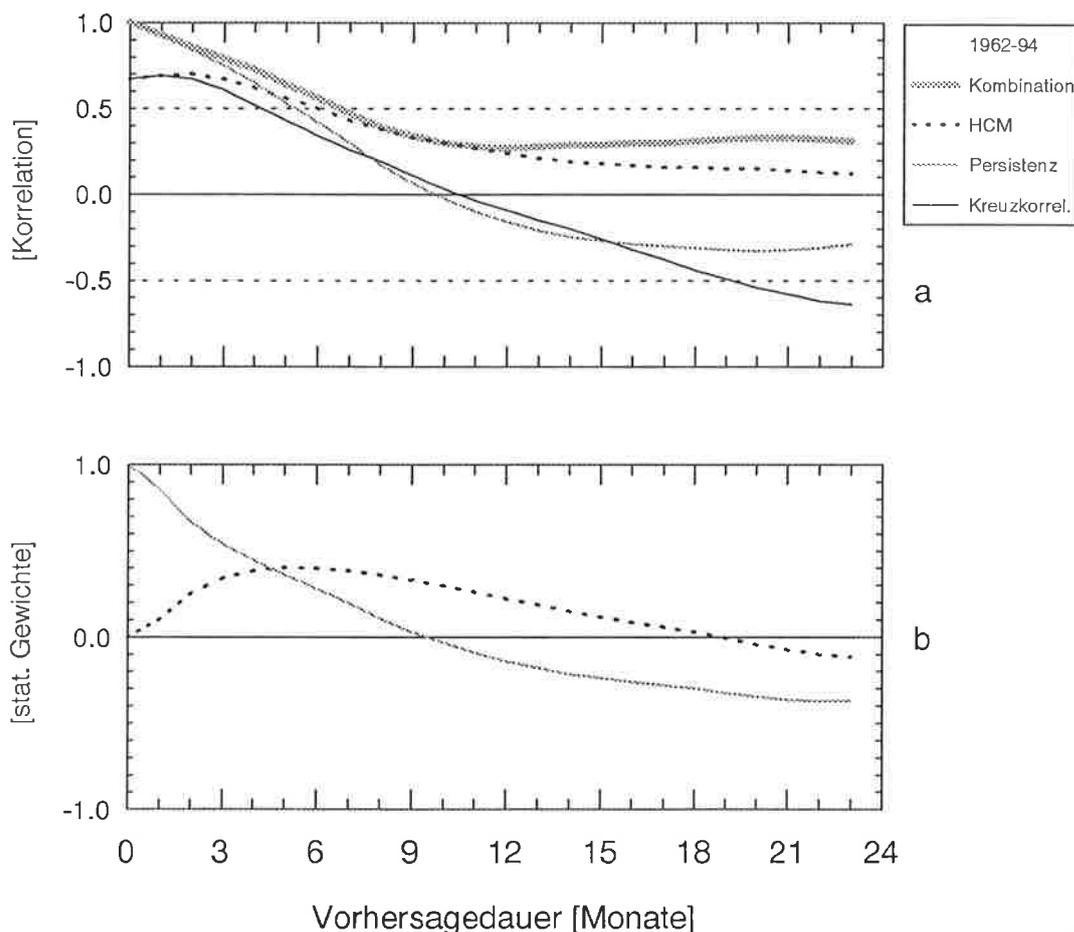
Im vorangegangenen Abschnitt hat sich gezeigt, daß die Vorhersagegüten empfindlich von dem Verifikationszeitraum abhängen. Die dabei zugrunde liegende Ensemblegröße umfaßte 120 Einzelvorhersagen, wodurch gerade 10 Jahre, d.h. maximal zwei ENSO-Zyklen vorhergesagt wurden. Um den Einfluß dieser geringen statistischen Signifikanz auf die Kombinationsergebnisse zu untersuchen, wird der Vorhersagezeitraum von 10 auf 32 Jahre vergrößert. Die Vorhersage-Ensemble umfassen nunmehr 384 Einzelvorhersagen.

In Abbildung 19 sind die Vorhersagegüten des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells, der Persistenz und der Kombination für den Vorhersagezeitraum Januar 1962 bis Dezember 1993 dargestellt. Die Korrelationsgüte der HCM-Vorhersagen unterschreitet bereits nach einem halben Jahr und nur einen Monat später als die Persistenz, den Wert von 0.5 (Abb.19a). Die Standardabweichung der Beobachtung wird ebenfalls bereits nach einem halben Jahr vom mittleren Vorhersagefehler der Persistenz und des HCMs überschritten. Mit zunehmender Vorhersagedauer gewinnt die Persistenz an statistischem Gewicht und dominiert ab 18 Monaten die Kombination (Abb.19c). Die ab einer Vorhersagedauer von einem Jahr durch die Kombination verbesserte Vorhersagegüte, wird demnach durch die Phaseninformation der Persistenz bestimmt. Die im Vergleich zu den 80er Jahren geringere Korrelation von -0.3 ist durch die Mittelung über die verschiedenen ENSO-Perioden der einzelnen Jahrzehnten bedingt. Nach dem Korrelationsminimum der Persistenz ergibt sich die mittlere Periode der SSTA des Niño3-Gebietes zu ca. 40 Monaten (Abb.19a).

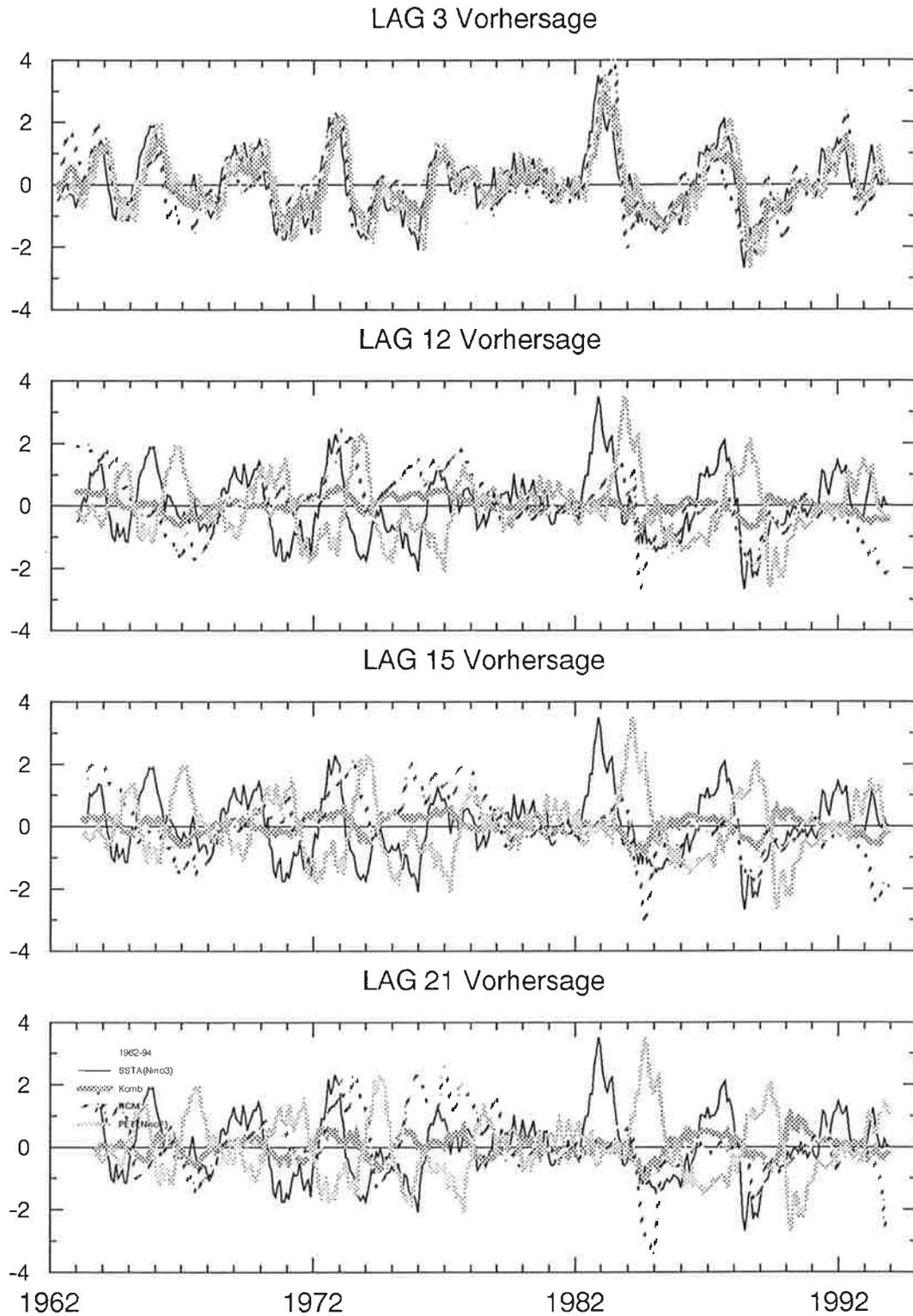
Abbildung 20 zeigt die Einzelvorhersagen für den gesamten Vorhersagezeitraum von 1962 bis 1993. Das unterdrückte 76/77er El Niño Ereignis ist deutlich erkennbar, ebenso wie die unterschiedliche niederfrequente Variabilität der einzelnen Dekaden. Während nach einer Vorhersagedauer von drei Monaten die Vorhersagen des HCMs, der

Persistenz und der Kombination nur geringfügig von der Beobachtung abweichen, sind sie bereits nach einem Jahr wertlos. Nach 21 Monaten spiegelt sich jedoch die Phaseninformation der Persistenz in den Kombinationsvorhersagen wider.

Der relativ hohe Einfluß der Verifikationsperiode und der Ensemblegröße auf die Vorhersagegüten verdeutlicht das Problem der zu kurzen Zeitspannen. Auf der einen Seite müssen für eine erfolgreiche Kombinationsvorhersage ohne künstliche Vorhersagegüte, nicht nur die Modellparameter, sondern auch die statistischen Gewichte aus einem Zeitraum abgeleitet werden der mehrere Dekaden umfaßt. Auf der anderen Seite profitiert gerade die Kombination von der unterschiedlichen Phaseninformation der Persistenz der einzelnen Jahrzehnte.



**Abbildung 19:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz der SSTA(Niño3) (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1962 - Dez. 1994.



**Abbildung 20:** Einzel-Vorhersagen der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz (dünn schraffiert), für die Vorhersagedauer von 3, 12, 18 und 21 Monaten, sowie die Beobachtung, die SSTA des Niño3- Gebietes (durchgezogene Linie) für den Vorhersagezeitraum: Jan.1962 - Dez. 1994.

#### 5.4.4 Wahl der Persistenz

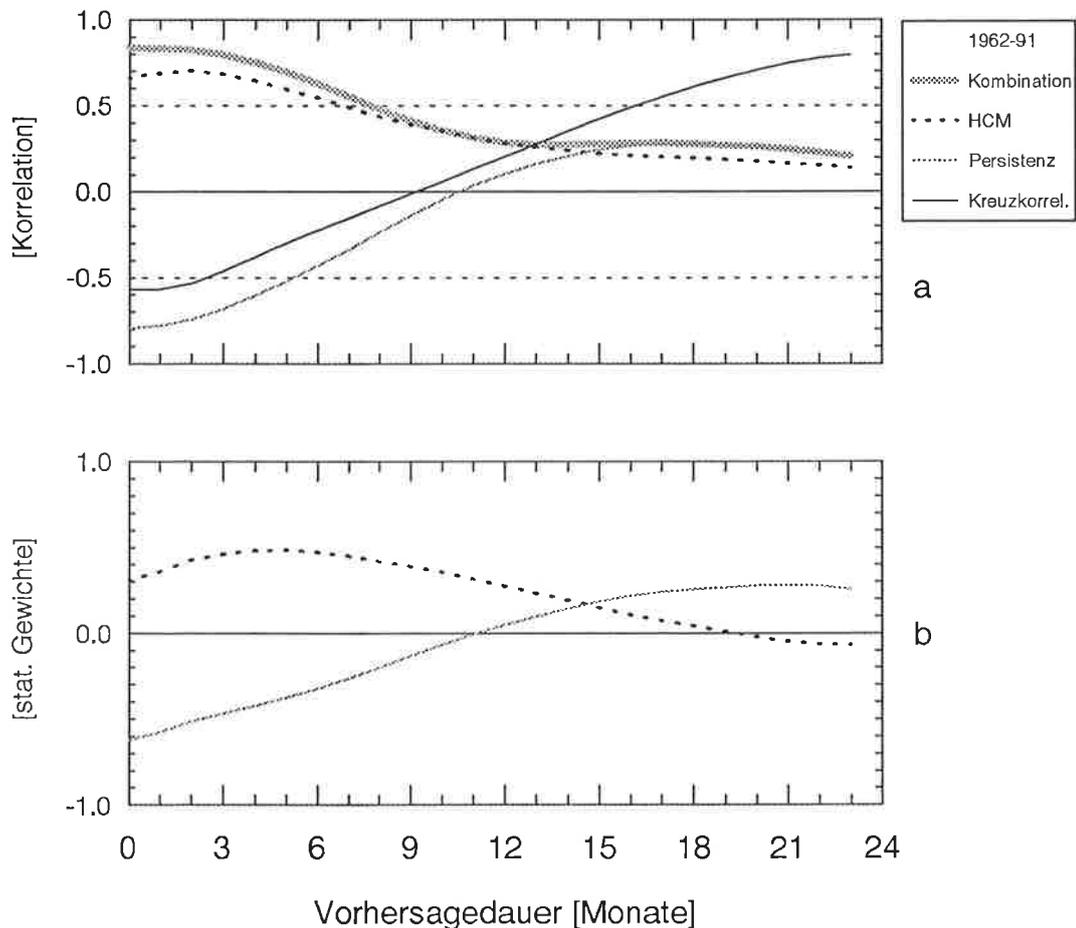
Bei den bisherigen Sensitivitätsbetrachtungen profitierte die Kombination im wesentlichen von der Phaseninformation der Persistenz. Diese beschränkte sich auf die SSTA des Nino3-Gebietes. Da die SSTA mit dem SOI hoch korreliert ist (Abb.1), wird nun die Persistenz des SOI mit den Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells für den Zeitraum von Januar 1962 bis Dezember 1993 kombiniert. Zum Vergleich wird auch die Persistenz der äquatorial über das Gebiet von 170°E bis 90°W gemittelten SSTA-Zeitreihe (vgl. Abb.3,4) für die Vorhersagenkombination verwendet. Die Verifikation der Vorhersagen erfolgt, wie in den vorangegangenen Kombinationsbeispielen, durch die Korrelation mit der SSTA des Nino3-Gebietes.

Abbildung 21 stellt die Vorhersagegüten und das statistische Gewicht des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells, der Persistenz des SOIs und der Kombination dar. Aufgrund der Gegenläufigkeit der Amplituden von SSTA und SOI, ist die Persistenz bis zu einer Vorhersagedauer von einem Jahr negativ korreliert. Die relativ hohe Anfangskorrelation von -0.8 verdeutlicht die gute Übereinstimmung der Phasen des SOIs und der SSTA (vgl. Abb.1). Nach einer Vorhersagedauer von ca. 18 Monaten ist das dominante Signal des SOIs mit dem der SSTA um 180° Phasenverschoben, und die Persistenz erreicht ein Korrelationsmaximum von 0.3 (Abb.21a). Aufgrund der hohen Kreuzkorrelation und geringen statistischen Gewichtung (Abb.21a,b), lassen die Kombinationsvorhersagen keine nennenswerte Verbesserung der Vorhersagegüte erkennen.

In Abbildung 22 sind die Vorhersagegüten und das statistische Gewicht des vereinfachten gekoppelten Modells, der Persistenz der äquatorial gemittelten SSTA-Zeitreihe und deren Kombination dargestellt. Im Vergleich zu oben, profitiert die Kombination von der relativ hohen Antikorrelation der Persistenz von ca. -0.5, ab einer Vorhersagedauer von eineinhalb Jahren (Abb.22a). Dabei überwiegt die Gewichtung der Persistenz bei der Vorhersagenkombination (Abb.22b).

Die Verbesserung der Vorhersagegüte zeigt eine klare Abhängigkeit von der Wahl verschiedener Persistenzen. Diese Persistenz des SOIs erlaubt mit einem Korrelationsmaximum von 0.3 nach einer Vorhersagedauer von 18 Monaten nur geringe Verbes-

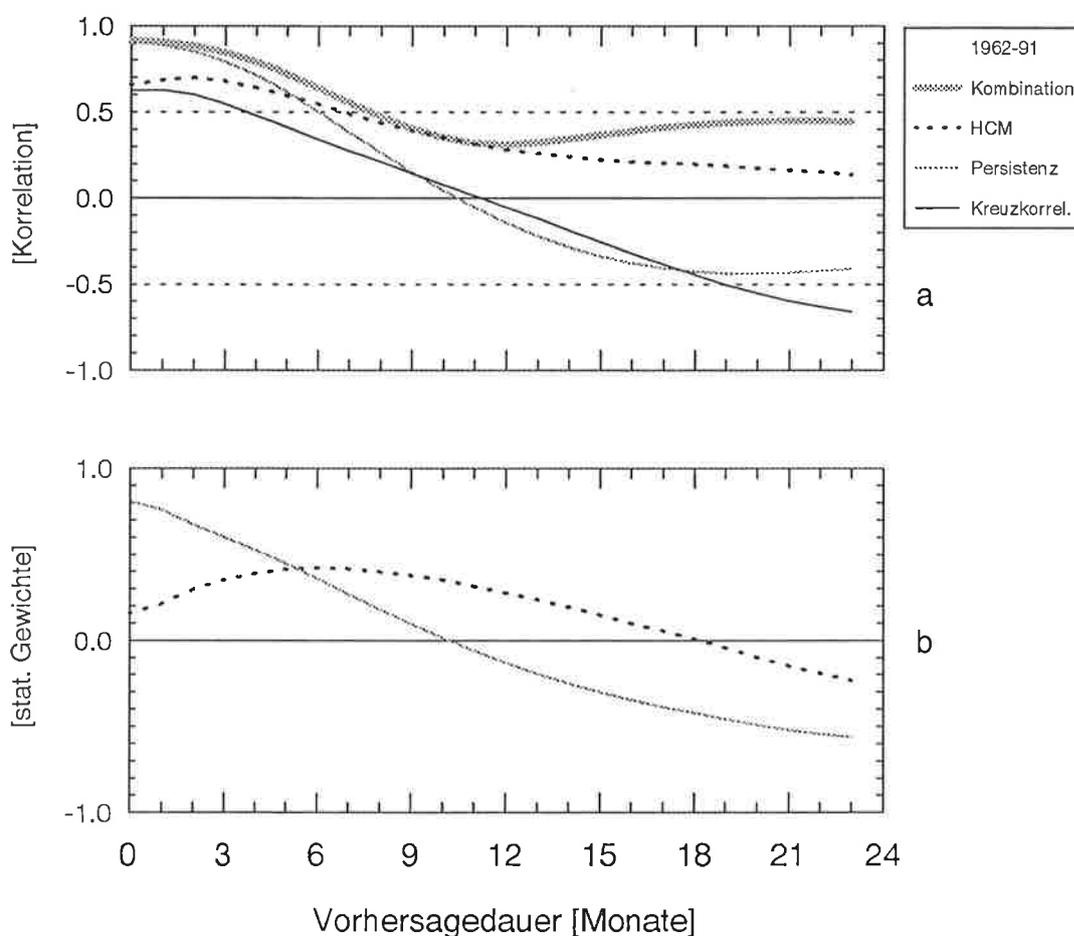
serung der Vorhersagegüte (Abb.21a). Hingegen profitiert die Kombination am meisten von der Persistenz der äquatorial gemittelten SSTA, die nach einer Vorhersagedauer von 20 Monaten mit ca. - 0.5 maximal antikorreliert ist. Dabei ist sie für den gleichen Vorhersagezeitraum von Januar 1962 bis Dezember 1993, höher antikorreliert als die Persistenz der SSTA des Nino3-Gebietes, die ebenfalls nach einer Vorhersagedauer von 20 Monaten, nur einen Wert von ca. - 0.3 annimmt (Abb.19a).



**Abbildung 21:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz de SOIs (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1962 - Dez. 1991.

Die Abschätzungen der Persistenz lassen die höhere Variabilität des SOIs gegenüber der SSTA erkennen, was eine geringere Verbesserung der Vorhersagegüte nachsichzieht. Für die Kombination von Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells (HCMs), sind demnach die Persistenzen atmosphärischer Indizes von ENSO weniger geeignet als ozeanische.

Darüber hinaus sind auch die Persistenzen der Meeresoberflächentemperatur verschieden. So spiegelt die höhere Persistenz der äquatorial gemittelten SST-Anomalien das wärmere und daher mit der Atmosphäre stärker wechselwirkende Oberflächenwasser des Westpazifiks wider. Daraus ergibt sich eine geringere Variabilität im Vergleich zur SSTA des Niño3-Gebiets und somit eine höhere Phaseninformation für die Vorhersagekombination.



**Abbildung 22:** Vorhersagegüte der Kombination (dick schraffiert), des HCMs (gestrichelt) und der Persistenz der äquatorial (170°E–90°W) gemittelten SSTA (dünn schraffiert). (a) zeigt die Korrelation, (b) die Gewichtung der Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer. Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1962 - Dez. 1991.

Die Wahl der Persistenz ist für die Kombination mit den von Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells ebenso von Bedeutung wie die des Verifikationszeitraums. Daher sei darauf hingewiesen, daß es für eine solche Vorhersa-

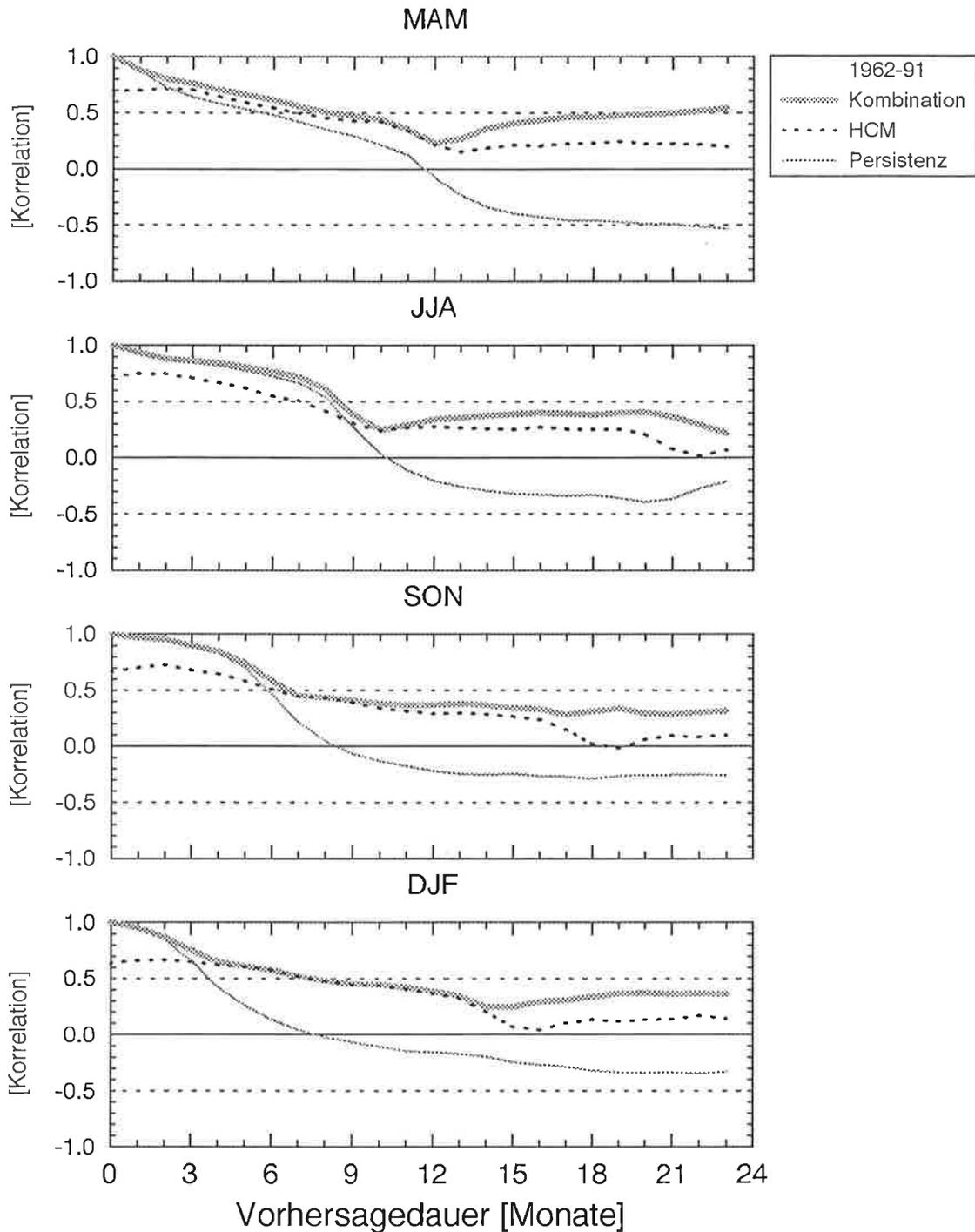
genkombination geeigneter Persistenzen gibt. Bedingt durch den pazifischen Äquatorialstrom, der von den normalerweise vorherrschenden Passatwinden angetrieben, kühleres Oberflächenwasser von Ost nach West transportiert, zeigen die Anomalien der außeräquatorialen SST ( $5^{\circ}$ – $15^{\circ}$ Nord bzw. Süd und  $180^{\circ}$ E– $90^{\circ}$ W) eine höhere Persistenz (siehe z.B. Barnett et al. 1993, Ji et al. 1994).

#### 5.4.5 Saisonalität

Die Persistenz der Meeresoberflächentemperaturanomalien ist außer von großskaligen Meeresströmungen, ebenso von der Lage der innertropischen Konvergenzzone (ITZ) abhängig (Barnett et al. 1993). Da die ITZ an den Jahresgang gekoppelt ist, wird im folgenden der Einfluß der Saisonalität auf die Vorhersagekombination mit der Persistenz untersucht.

Die mit der Jahreszeit variierende Persistenz atmosphärischer und ozeanischer Anomalien, wurde durch die Arbeit von Wright (1985) für die SSTA und des SOIs belegt. Ebenso zeigen die Vorhersagen des vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells (HCM) eine saisonale Abhängigkeit (Latif & Flügel 1991). Daher wird der Einfluß der Saisonalität auf die Kombinationsvorhersagen untersucht. Analog den vorangegangenen Sensitivitätsbetrachtungen, werden für den Vorhersagezeitraum von Januar 1962 bis Dezember 1991, die Vorhersagen des HCMs mit der Persistenz der SSTA des Niño3-Gebietes kombiniert. Dabei erfolgt die monatliche Initialisierung der Vorhersagen entsprechend den Jahreszeiten, so daß die vier gleichgroßen Vorhersage-Ensemble 87 Einzelvorhersagen umfassen.

In Abbildung 23 sind zum Vergleich die jahreszeitliche Abhängigkeit der Vorhersagegüten des HCMs, der Persistenz und der Kombination dargestellt. Für die Persistenz und das HCM ergibt sich übereinstimmend mit den o.g. Arbeiten von Wright (1985) und Latif & Flügel (1991), die gleiche saisonale Abhängigkeit der Vorhersagbarkeit: Einen Einbruch der Vorhersagegüten bei den Frühjahrsvorhersagen im März, April und Mai (Abb. 23a), während der Herbst und Winter am besten vorhersagbar sind (Abb. 23c,d). Die Kombination profitiert hingegen am meisten von einer Vorhersageninitialisierung im März (Abb. 24a).



**Abbildung 23:** Saisonale Abhängigkeit der Korrelationsgüten: Kombination (dick schraffiert), HCMs (gestrichelt) und Persistenz / SSTA(Niño3) (dünn schraffiert). Die Verifikation der Vorhersagen erfolgte mittels der SSTA des Niño3- Gebietes für den Vorhersagezeitraum: Jan.1962 - Dez. 1991. Die Vorhersagen wurden bei der Vorhersagedauer 0, für das Frühjahr im März (MAM), den Sommer im Juni (JJA), den Herbst im September (SON) und den Winter im Dezember (DJF) initialisiert, wobei die darauffolgenden zwei Monate ebenfalls in die Korrelationsberechnung mit eingingen.

Die relative Verbesserung der Vorhersagegüten durch eine Initialisierung der Vorhersagen im Frühjahr gegenüber den anderen Jahreszeiten, resultiert aus der höheren Phaseninformation der Persistenz. Diese läßt sich möglicherweise folgendermaßen deuten: Für eine Frühjahrsinitialisierung fällt nach einer Vorhersagedauer von 20 Monaten die maximale negative Korrelation der Persistenz mit der besseren Vorhersagbarkeit im Herbst und Winter zusammen. Dabei ist auch die Persistenz der SSTA höher, da aufgrund der Monsunzeit Atmosphäre und Ozean in den Tropen stärker miteinander wechselwirken und die Anomalien der Meeresoberflächentemperatur länger als zu anderen Jahreszeiten beharren lassen.



## VI Diskussion und Ausblick

Die Untersuchungen dieser Arbeit konzentrierten sich auf eine Verbesserung der Vorhersage von ENSO-Extremen durch Kombinationen von Ensemble-Klimavorhersagen. Obwohl nur eine beschränkte Auswahl an Vorhersagemodellen zur Anwendung kommen konnte, lassen sich dennoch einige Schlußfolgerungen ziehen:

Die Varianz des Vorhersagefehlers konnte durch die Vorhersagenkombination verringert werden, insbesondere wenn die Vorhersagen nach einer Vorhersagedauer von eineinhalb Jahren, gleichwertig und antikorreliert waren. Obwohl die Vorhersagen dann meist nur geringe Vorhersagegüten hatten, spiegelte sich die verbesserte Vorhersagegüte auch in den Einzelvorhersagen wider.

Die Verbesserung der Vorhersagegüte zeigte sich am deutlichsten bei der Kombination der Vorhersagen des vereinfachten, gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modell mit der Persistenz. Für die Vorhersage der 70er Jahre z.B., nahmen die Vorhersagen des vereinfachten, gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modells aufgrund des "unterdrückten" 76/77er El Niño-Ereignisses die Vorhersagegüte einer Persistenz-Vorhersage an. Die Vorhersagen wurden daher gleich gewichtet und waren nach einem Jahr antikorreliert. Da somit die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Kombination erfüllt waren, resultierte dies in einer deutlicheren Verbesserung der Vorhersagegüte, gegenüber der Vorhersage anderer Jahrzehnte. Die Kombination profitierte dabei im wesentlichen von der Phaseninformation, die in der Persistenz nach einer Vorhersagedauer von eineinhalb Jahren nach enthalten ist. Aufgrund der insgesamt geringen Vorhersagegüte, sind die Kombinationsvorhersagen jedoch praktisch wertlos.

Die Sensitivitätsbetrachtungen ergaben eine klare Abhängigkeit der erzielten Vorhersagegüte von dem Vorhersagezeitraum. Ebenso zeigte die Vergrößerung der Vorhersagen-Ensemble von 120 auf 384 Einzelvorhersagen eine geringere Verbesserung der Vorhersagegüten. Dies ist bedingt durch die dekadische Variabilität innerhalb des

größeren Vorhersagezeitraumes, und der dadurch geringeren Phaseninformation der Persistenz. Aus dem gleichen Grund ist die Persistenz von atmosphärischen Anomalien für eine Vorhersagenkombination weniger geeignet als ozeanische. Ein Vergleich der Kombinationen, die auf der Persistenz einer äquatorial über den Pazifik gemittelten SSTA-Zeitreihe basierte, mit der Kombination, die auf der Persistenz der SSTA des Niño3-Gebietes basierte, spiegelte dabei auch die regional unterschiedliche Variabilität der SSTA wider. Gemäß der persistenteren Anomalien des wärmeren Westpazifiks ist die hochfrequente Variabilität der über das Niño3-Gebiet gemittelten SSTA im Ostpazifik höher. Die Kombination profitierte dementsprechend deutlich mehr von der Persistenz der äquatorial gemittelten SSTA-Zeitreihe.

Die Untersuchungen zur Saisonalität ergaben die gleiche jahreszeitliche Abhängigkeit der Kombinationsvorhersage wie bei der Persistenz und den Vorhersagen des vereinfachten, gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modells: Ein Einbruch der Vorhersagegüten im Frühjahr (März, April, Mai), wobei Spätherbst und Winter am besten vorhersagbar sind. Dies führt bei einer Initialisierung der Vorhersagen im Frühjahr, durch das Zusammenfallen der maximalen Phaseninformation der Persistenz nach 20 Monaten mit der besseren Vorhersagbarkeit des Winterhalbjahres, zur deutlicheren Verbesserung der Vorhersagegüten gegenüber den anderen Jahreszeiten.

Die bisherigen Betrachtungen konzentrierten sich auf den Fall, bei dem die statistischen Gewichte aus dem Vorhersagezeitraum abgeleitet wurden. Durch diese Vorgehensweise wurde die Vorhersagegüte der Kombinationsvorhersagen künstlich angehoben. Diese sog. "Hindcast-Kombinationsvorhersagen" definieren daher die obere Grenze, der mit diesem Kombinationsschema erreichbaren Vorhersagegüte.

Die Bestimmung der statistischen Gewichte aus einem Zeitraum, der von dem Vorsagezeitraum unabhängig ist, ergab eine Vergrößerung des Vorhersagefehlers. Dabei erwies sich die Halbierung des Vorhersagezeitraums als ungeeignet, da einzelne sehr unterschiedlich vorhersagte ENSO-Ereignisse die Gewichtung der Vorhersagen dominierten. Für eine optimale Bestimmung der Gewichte müssen diese aus Vorhersagezeitreihen abgeleitet werden, die mehrere Jahrzehnte umfassen.

Aufgrund der Kombinationsbeispiele, die durch die zu kurzen Beobachtungszeitreihen bedingt waren, können diese Kombinationsergebnisse nur eine Tendenz für eine erfolgreiche Kombination von Ensemble-Klimavorhersagen aufzeigen. Auf drei weitere, interessante Kombinationsmöglichkeiten sei noch kurz hingewiesen.

Beispielsweise könnte die Verwendung der Persistenz einer außeräquatorial gemittelten SSTA-Zeitreihe - wegen der persistenteren Anomalien außerhalb des pazifischen Äquatorialstroms -, oder die Persistenz der Temperaturen aus der Tiefe, eine Verbesserung der Vorhersagegüte bewirken (eine flächendeckende Darstellung der Persistenz der SSTA findet man z.B. bei Ji et al. 1993). Ebenso ließe sich der Einfluß weiterer, persistenter Anomalien die mit ENSO korreliert sind, untersuchen, wie z.B. der Wärmeinhalt (Wasserstand), Australischer Monsun, Niederschlag, etc. (einen Überblick über die verschiedenen ENSO-Indizes findet man z.B. bei Wright 85). Neben den verschiedenen Persistenzen könnten andere, ebenfalls erfolgreiche ENSO- Vorhersagemodelle für die Kombination verwendet werden, wie z.B. das Modell von Zebiak & Cane (1987). Einen aktuellen Überblick über Langfristvorhersagemodelle geben z.B. Barnston et al. (1994). Eine durchaus vielversprechende Kombinationsvariante, könnte auch eine Kombination mehrerer Vorhersagemodelle sein. Darüber hinaus könnte das Kombinationsschema so optimiert werden, daß die Ableitung der statistischen Gewichte auf einer Minimierungsbedingung basiert, die sowohl den Amplitudenfehler als auch den Phasenfehler berücksichtigt.



## **Danksagung**

Ich möchte danken

dem Direktorium des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg, insbesondere Herrn Prof. Dr. K. Hasselmann für die Möglichkeit, diese Diplomarbeit am Institut durchführen zu können, und den sehr guten Arbeitsbedingungen bei der Anfertigung der Arbeit,

den Herren Prof. Dr. H. Graßl und Prof. Ph.D. D. Fay für die Begutachtung der Arbeit,

Herrn Dr. M. Latif für die Themenstellung und die Betreuung der Arbeit, und Herrn Prof. Dr. K. Fraedrich für die Anregung zu diesem Thema,

Herrn Prof. Dr. W. Roedel für die Formale Unterstützung bei meinem Hochschulwechsel von Heidelberg nach Hamburg,

den Herren Dr. M. Flügel, Dipl. Phys. C. Eckert und Dr. H. Luthardt für die fruchtbaren Diskussionen und der unermüdlichen Hilfsbereitschaft,

sowie allen Mitarbeitern des Instituts, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.



## Liste der Abbildungen

1.	Geographische Verteilung: - der SST im Nordwinter eines El Niño-Jahres; -der Korrelation jährlicher Bodendruckanomalien mit denen von Djakarta, Indonesien; Vergleich der Zeitreihen von SSTA / SOI .....	9
2.	Niño3-Gebiet (150W-90W, 5N-5S).....	11
3.	Spektralanalyse einer geglätteten / ungeglätteten SSTA-Zeitreihe. ....	13
4.	Persistenz einer geglätteten / ungeglätteten SSTA-Zeitreihe. ....	16
5.	Vergleich der 1.EOFs beobachteter und simulierter SSTA .....	22
6.	Vorhersagegüten (1979-88): Kombination (AR-2 + POP) .....	33
7.	Einzel-Vorhersagen (1979-88): Kombination (AR-2 + POP).....	34
8.	Vorhersagegüten (1979-88): Kombination (HCM + POP) .....	37
9.	Einzel-Vorhersagen (1979-88): Kombination (HCM + POP).....	38
10.	Vorhersagegüten (1979-88): Kombination (HCM + AR-2) .....	40
11.	Einzel-Vorhersagen (1979-88): Kombination (HCM + AR-2).....	41
12.	Vorhersagenfehler (1979-88): Kombination (AR-2 + POP, HCM + POP) (AR-2 + HCM, HCM) .....	42
13.	Vorhersagegüten (1979-88): Kombination (HCM + Persistenz-Niño3).....	46
14.	Einzel-Vorhersagen (1979-88): Kombination (HCM + Persistenz-Niño3) .....	47
15.	Vorhersagegüten (1979-88): Kombination (HCM + Persistenz-Niño3) ohne künstliche Vorhersagegüte .....	49
16.	Einzel-Vorhersagen (1979-88): Kombination (HCM + Persistenz-Niño3) ohne künstliche Vorhersagegüte .....	50
17.	Vorhersagegüten (1962-71): Kombination (HCM + Persistenz-Niño3) .....	52
18.	Vorhersagegüten (1972-81): Kombination (HCM + Persistenz-Niño3) .....	53
19.	Vorhersagegüten (1962-94): Kombination (HCM + Persistenz-Niño3) .....	55
20.	Einzel-Vorhersagen(1962-94): Kombination (HCM + Persistenz-Niño3) .....	56
21.	Vorhersagegüten (1962-91): Kombination (HCM + Persistenz-SOI) .....	58
22.	Vorhersagegüten (1962-91): Kombination (HCM + Persistenz-SSTA) .....	59
23.	Vorhersagegüten (1962-91): Kombination (HCM + Persistenz-SSTA-Niño3) Saisonale Abhängigkeit (MAM, JJA, SON, DJF) .	61



## Literatur

- Barnett, T. P., M. Latif, E. Kirk, and E. Roeckner, 1991: On ENSO physics. *J. Clim.*
- Barnett, T. P., M. Latif, N. Graham, M. Flügel, S. Pazan, and W. White, 1993: ENSO and ENSO-related Predictability. Part I: Prediction of Equatorial Pacific Sea Surface Temperature with a Hybrid Coupled Ocean-Atmosphere Model. *J. Clim.* 6, Nr.8, 1545-1566.
- Barnston, A. G., H. M. van den Dool, S. E. Zebiak, T. P. Barnett, M. Ji, D. R. Rodenhuis, M. A. Cane, A. Leetmaa, N. E. Graham, C. R. Ropelewski, V. E. Kousky, E. A. O'Lenic, and R. E. Livezey 1994: Long-Lead Seasonal Forecasts -- Where Do We Stand? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 75, 2097-2114.
- Berlage, H. P., 1957: Fluctuations in the general atmospheric circulation of more than one year, their nature and prognostic value. *K. Ned. Meteor. Inst., Meded. Verh.* 69.
- Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.*, 97, 163-172.
- Cane, M. A., 1986: El Niño. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 43-70.
- Flügel, M., 1994: Untersuchungen zu Mechanismus und Vorhersagbarkeit von ENSO mit einem vereinfachten gekoppelten Ozean-Atmosphären Modell. *Dissertation, Universität Hamburg, Fachbereich Geowissenschaften, ISSN 0938-5177.*
- Folland, C., Palmer T., Parker D., 1986: Sahel rainfall and worldwide temperatures, 1901-1985, *Nature*, 320, 6063: 602-607.
- Fraedrich, K., L. M. Leslie, 1987: Combining Predictive Schemes in Short-Term Forecasting. *Mon. Weather Rev.*, 115, 1640-1644.
- Fraedrich, K., N. R. Smith, 1989: Combining Predictive Schemes in Long-Range Forecasting. *J. Clim.*, 2, Nr.3, 291-294.
- Fraedrich, K., K. Müller, 1992: Climate anomalies in Europe associated with ENSO extreme. *Int. J. Climate*, 10, 21-31.
- Glantz, M. H. (ed.) R. W. Katz, N. Nicholls, 1992: Teleconnections linking worldwide climate anomalies. *Cambridge University Press.*
- Goldenberg, S., J. O'Brien, 1981: Time and space variability of the tropical Pacific wind stress. *Mon. Weather Rev.*, 109, 1190-1207.
- Hasselmann, K., 1988: PIPs and POPs: The Reduction of complex dynamical systems using principal interactions and oscillation patterns. *J. Geophys. Res.* 11015-11021.

- Honerkamp, J., 1990: Stochastische Dynamische Systeme: Konzepte numerische Methoden, Datenanalysen. *VCH, ISBN 3-527-27945-8*.
- Ji, M., A. Kumar, A. Leetmaa, 1994: A Multiseason Climate Forecast System at the National Meteorological Center. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 75, Nr. 4, 569-577.
- Latif, M., 1987: Tropical ocean circulation experiments. *J. Phys. Oceanogr.*, 17, Nr. 2, 246-263.
- Latif, M., T. P. Barnett, M. A. Cane, M. Flügel, N. E. Graham, H. von Storch, J.S. Xu, S. E. Zebiak, 1994: A review of ENSO prediction studies. *Clim. Dynamics*, 9, 167-179.
- Latif, M., M. Flügel, 1991: An Investigation of Short-Range Climate Predictability in the Tropical Pacific, *J. Geophys., Res.* 96, Nr. C2, 2661-2673.
- Neelin, J. D., M. Latif, F.-F. Jin, 1994: Dynamics of Coupled Ocean-Atmosphere Models: The Tropical Problem. *Annu. Rev. Mech.*, 26, 617-659.
- Oceanus*, 1984: El Niño. Vol. 27, Nr.2 summer.
- Philander, S. G. H., 1990: El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. *Academic Press*, 289 pp.
- Rasmusson, E. N., T. H. Carpenter 1982: Variations in the tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation / El Niño. *Mon. Weath. Rev.*, 110, 354-384.
- Rasmusson, E. N., J. M. Wallace, 1983: Meteorological aspects of the El Niño / Southern Oscillation. *Science*, 222, 1195-1202.
- Rasmusson, E. N., 1984: El Niño the ocean / atmosphere connection. *Oceanus*, Vol. 27, Nr.2.
- Reynolds, R. W., 1988: A real-time global sea surface temperature analysis. *J. Clim.*, 1, 75-86.
- Ropelewski, C., M. Halpert, 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño / Southern Oscillation. *Mon. Weath. Rev.*, 114, 2352-2362.
- Schopf, P., M. Suarez, 1988: Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 45, 549-566.
- von Storch, H., T. Bruns, I. Fischer-Bruns, K. Hasselmann, 1988: Principal Oscillation analysis of the 30- to 60-day oscillation in a GCM. *J. Geophys. Res.*, 93(D9), 11, 022-11, 036.

- Thompson, P. D. 1976: How to Improve Accuracy by Combining Independent Forecasts. *Mon. Weath. Rev.*, 105, 228-229.
- Walker, G. T., 1924: Correlation in seasonal variations in weather, IX: a further study of world weather. *Mem. India Meteorol. Dep. 24 (Part 9)*, 275-332.
- Wallace, J. M., and R. E. Dickinson, 1972: Empirical orthogonal representation of time series in the frequency domain, I, Theoretical consideration, *J. Appl. Meteorol.*, 11, 887-892.
- Weare, B. C., and J. S. Nasstrom, 1982: Examples of extended empirical orthogonal function analysis. *Mon. Weather Rev.*, 110, 481-485.
- Wright, P. B., 1985: The Southern Oscillation: An ocean-atmosphere feedback system?. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 66, 398-412.
- Wyrtki, K., 1985: Water displacements in the Pacific and the genesis of El Niño cycles. *J. Geophys. Res.*, 90(C4), 7129-7132.
- Xu, J. S., H. von Storch, 1990: Principal oscillation patterns -- Prediction of the state of ENSO. *J. Clim.*, 3, 1316-1329.
- Zebiak, S. E., M. A. Cane, 1987: A model El Niño-Southern Oscillation. *Mon. Weath. Rev.*, 115, 2262-2278.



Hiermit versichere ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und außer der angegebenen Literatur und der Rechenanlage des DKRZ keine anderen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Hamburg, im März 1995



<b>EXAMENSARBEIT Nr. 14</b> März 1992	<b>Windinduzierte interannuale Variabilität in der Warmwassersphäre von 1981 bis 1987</b> <b>Teil II: Fluktuationen im Kohlenstoffkreislauf</b> Arne M. E. Winguth
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 15</b> Dezember 1992	<b>Fernerkundung der optischen Eigenschaften von Seen mit Landsat 5 Thematic Mapper</b> Waltraud Manschke
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 16</b> Juli 1993	<b>Baroklin instabile Wellen der Atmosphäre:</b> <b>Empirisch abgeleitete Moden im Vergleich zu quasi-geostrophischer Theorie</b> Reiner Schnur
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 17</b> September 1993	<b>Messung des Wasserdampfflusses in der konvektiven Grenzschicht mit DIAL und RADAR-RASS</b> Christoph Senff
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 18</b> November 1993	<b>Zur saisonalen Variation des ozeanischen Kohlendioxidpartialdrucks</b> Katharina D. Kurz
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 19</b> Januar 1994	<b>Dynamisch-stochastische Vorhersage-Experimente mit Modellen der allgemeinen Zirkulation für einen Zeitraum von 10 Tagen bis 100 Jahren</b> Ulrich Cubasch
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 20</b> Februar 1994	<b>Deposition radioaktiver Tracer in einem Transportmodell der Atmosphäre</b> Stefan Rehfeld
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 21</b> Februar 1994	<b>Der Einfluß vulkanischen Aerosols und simultaner Temperaturanomalien der tropischen Meeresoberfläche ( El Niño) auf das Klimasystem</b> Ingo Kirchner
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 22</b> Juni 1994	<b>ENSO induzierte Variabilität im Indischen Ozean</b> Andreas Villwock
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 23</b> Juni 1994	<b>Untersuchungen zu Mechanismus und Vorhersagbarkeit von ENSO mit einem vereinfachten gekoppelten Ozean - Atmosphäre - Modell</b> Moritz Flügel
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 24</b> Juli 1994	<b>Nordatlantische Variabilität in einem Ozeanzirkulationsmodell im Zeitbereich von Dekaden</b> Ralf Weiße
<b>EXAMENSARBEIT Nr.25</b> August 1994	<b>Inverse Modellierung des atmosphärischen Methan-Kreislaufs unter Verwendung eines drei-dimensionalen Modells des Transports und der Chemie der Troposphäre</b> Ralf Hein
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 26</b> August 1994	<b>Optimierung eines Seegangmodells mit der Adjungierten Methode</b> Georg Barzel
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 27</b> März 1995	<b>Stabile Wasserisotope im allgemeinen Zirkulationsmodell ECHAM</b> Georg Hoffmann

---

<b>EXAMENSARBEIT Nr. 28</b> Mai 1995	<b>The Atmospheric Response to North Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies in GCM Experiments</b> Viacheslav V. Kharin
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 29</b> Juni 1995	<b>Einbindung der regionalen troposphärischen Chemie in die Hamburger Klimamodellumgebung: Modellrechnungen und Vergleich mit Beobachtungsdaten</b> Bärbel Langmann
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 30</b> Juli 1995	<b>Messung des Ozonflusses in der unteren Troposphäre mit einem neuen Ozon-DIAL-System und einem Radar-RASS</b> Thorsten Schaberl
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 31</b> November 1995	<b>Untersuchungen troposphärischen Ozons mit DIAL</b> Gunther C. Grabbe
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 32</b> November 1995	<b>Die Schneedecke als Komponente des Klimasystems und ihre Modellierung</b> Bettina Loth
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 33</b> Dezember 1995	<b>Der Einfluß des El Niño/Southern Oscillation Phänomens auf die atmosphärische Zirkulation in den mittleren Breiten der Nordhalbkugel: Beobachtungen und Modellsimulationen</b> Wilhelm May
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 34</b> Dezember 1995	<b>DIAL-Messungen von vertikalen Wasserdampfverteilungen Ein Lasersystem für Wasserdampf- und Temperaturmessungen in der Troposphäre</b> Volker Wulfmeyer
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 35</b> Januar 1996	<b>Der Einfluß von Datenassimilation auf ENSO Simulationen und Vorhersagen</b> Martin Fischer
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 36</b> Februar 1996	<b>Bodengebundene Fernerkundung von Eiswolken im nahen Infrarot</b> Margarita Betancor Gothe
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 37</b> März 1996	<b>Turbulenzcharakteristiken von Golfstromtrajektorien in einem quasigeostrophischen Zirkulationsmodell basierend auf Lagrange'schen Vorticitytracern</b> Miguel Zorita Calvo
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 38</b> Mai 1996	<b>Entwicklung eines Kopplungsverfahrens zur Reduzierung der Rechenzeit von Atmosphäre-Ozean-Modellen</b> Reinhard Voß
<b>EXAMENSARBEIT Nr. 39</b> Mai 1996	<b>Kombination von Ensemble-Klimavorhersagen am Beispiel ENSO</b> Sven Marcus Metzger (März 1995)

