

## **Klimasystem und Wasserkreislauf**

**Christoph Schär**

Institut für Atmosphäre und Klima

ETH Zürich

<http://www.iac.ethz.ch/people/schaer>



**TEIL 3**

### **Variabilität und Vorhersage**

## **TEIL 3: Variabilität und Vorhersage**

---

**Kapitel 10. Einführung**

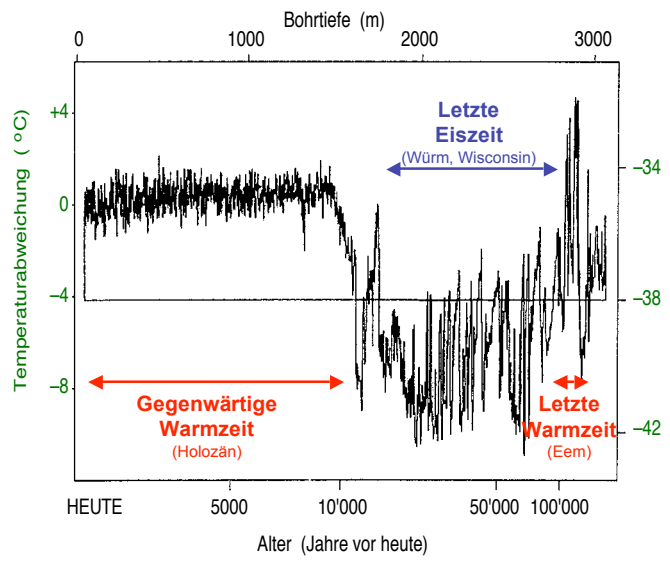
**Kapitel 11. Mechanismen von Variabilität**

**Kapitel 12. Beispiele Interannueller Variabilität**

**Kapitel 13. Wettervorhersage**

**Kapitel 14. Saisonale Vorhersage**

### Variabilität: Jahrzehnte bis Jahrtausende



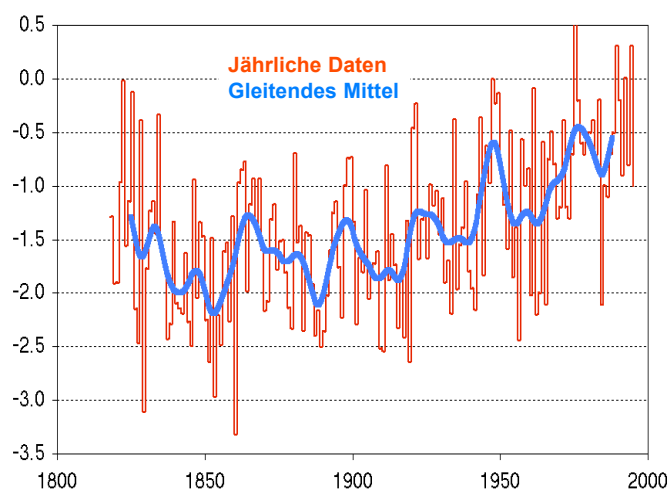
Temperaturinformation aus einem Eisbohrkern von Grönland

- Hauptursache der Schwankungen:**
- Eiszeiten: Bahnelemente der Erde
  - Schwankungen in letzter Eiszeit: Wechselwirkungen zwischen Meereis und Ozean

Schär, ETH Zürich

(GRIP Eisbohrkern, Uni Bern)

### Variabilität: Zeitskala Jahre bis Jahrhunderte



Jahresmitteltemperatur Grosser St. Bernhard 1818-1995 [°C]

- Hauptursache der Schwankungen und Trends:**
- Solare Variabilität
  - Vulkanische Variabilität
  - interne Variabilität
  - Klimaänderung

Schär, ETH Zürich

(Wanner, Uni Bern)

## Extreme Sommer der Vergangenheit

### Februar bis Dezember 1540: "Mittelmeerklima"

- 6 Niederschlagstage von Mitte März bis Ende September
- mancherorts zweite Baumbüte im September
- An Weihnachten wird in Schaffhausen im Rhein gebadet
- "Der Rhyn ward so klein, dass man under Basel zuo Rhywyler dadurch reyten mochte." ...

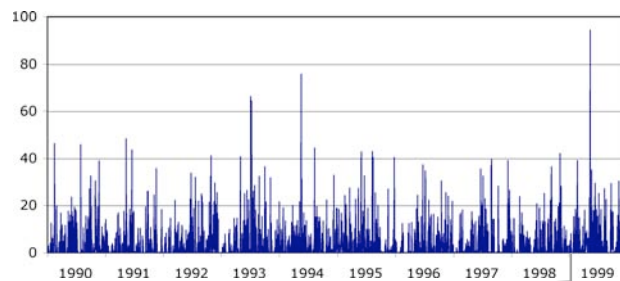
### Juni bis Oktober 1816: "Jahr ohne Sommer"

- 52 Niederschlagstage von Juli bis September
- Neuenburger-, Murten und Bielersee bildeten zusammenhängenden Wasserspiegel
- Häufig Sommerschnee bis auf 1000 m hinunter
- Weinerträge betrug 1% des damaligen Durchschnitts

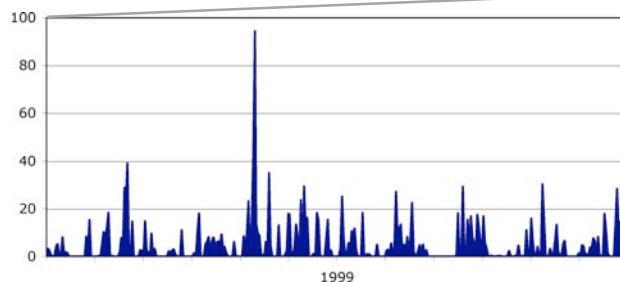
Schär, ETH Zürich

(Pfister, Universität Bern)

## Variabilität: Zeitskala Tage bis Wochen



Niederschlag Zürich  
[mm/d]

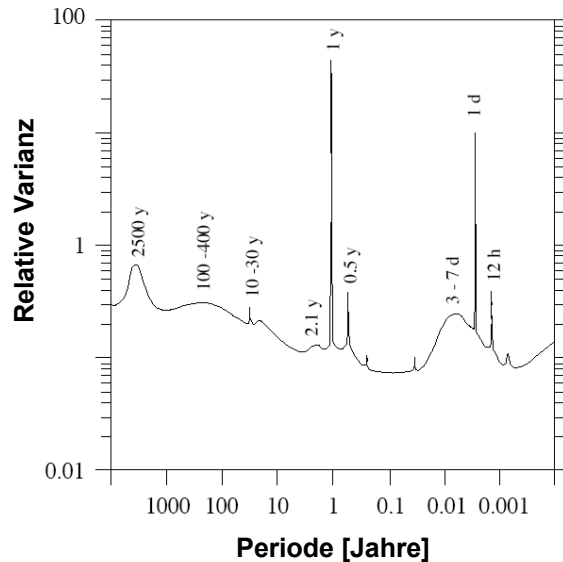


Hauptursache:  
Wechsel von Hoch- und  
Tiefdruckgebieten

Schär, ETH Zürich

(Daten: MeteoSchweiz)

## Spektrum der Variabilität



Fourierspektrum einer hypothetischen, sehr langen Zeitreihe (in Realität: zusammengesetzt aus Spektren zahlreicher Zeitreihen).

Bänder mit hoher Variabilität haben bestimmte Ursachen:

- 1d: Tagesgang
- 12h, 8h, 6h, etc: Harmonische des Tagesganges
- 3-7d: Tiefdruckgebiete
- 1y: Jahresgang
- 2.1y: El Nino
- 10-30y: Ozeanvariabilität

Schär, ETH Zürich

(Peixoto and Oort 1992)

## TEIL 3: Variabilität und Vorhersage

Kapitel 10. Einführung

**Kapitel 11. Mechanismen von Variabilität**

**Kapitel 12. Beispiele Interannueller Variabilität**

**Kapitel 13. Wettervorhersage**

**Kapitel 14. Saisonale Vorhersage**

Schär, ETH Zürich

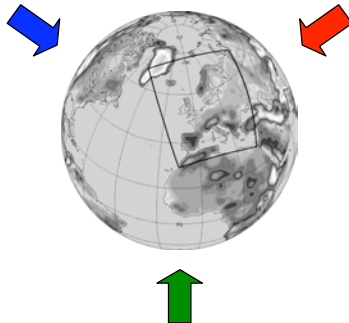
## Ursachen von Klimavariabilität

### Externer Klimaantrieb

- Intensität der Sonne •
- Vulkanausbrüche •
- Geometrie der Erdbahn •

### Anthropogener Klimaantrieb

- Emission von Treibhausgasen •
- Emission von Aerosolen (Feinstaub) •
- Landnutzungsänderungen •
- Ozonloch •



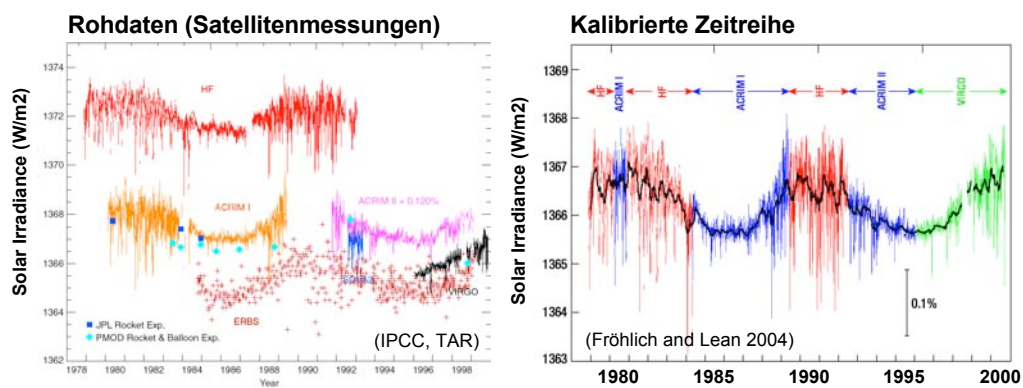
### Interne Variabilität

- interne „Schwingungen“ des Klimasystems •

Schär, ETH Zürich

## Solarer Klimaantrieb 1978-2000

**Extraterrestrische Solarkonstante**  
(Energieinput durch Sonneneinstrahlung)

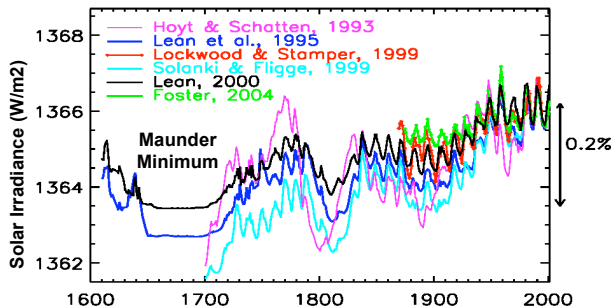


Daten zeigen:

- Signal des 11-jährigen Sonnenflecken-Zyklus (entspricht ca 0.1%)
- keinen systematischen Trend über die letzten 25 Jahre

Schär, ETH Zürich

## Solarer Klimaantrieb 1600-2000



Rekonstruktionen der Solarkonstanten (aus Sonnenfleckenzahl und <sup>10</sup>Be-Messungen)

Daten zeigen:

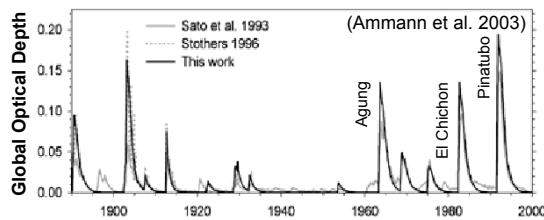
- Zunahme der Einstrahlung 1720-1770 und seit 1820
- erklärt Erwärmung nach der kleinen Eiszeit (mehrere Kaltphasen im Zeitraum 1600-1900)
- kann Erwärmung seit 1945 nicht erklären



“Reverend Robert Walker skating on Duddingston Loch”  
Gemälde von Henry Raeburn, ca. 1790, Schottland

Schär, ETH Zürich

## Vulkanischer Klimaantrieb

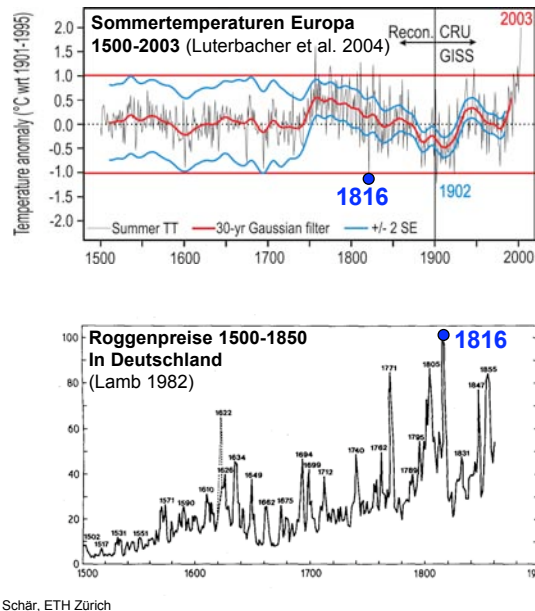


Vulkanausbrüche befördern Staub in die Atmosphäre:

- reduziert Sonneneinstrahlung
- Verweilzeit in Troposphäre: Tage
- Verweilzeit in Stratosphäre: Jahre



## Folgen der Tambora-Eruption in Europa



**Kaltnasser Sommer 1816:**  
**“Jahr ohne Sommer”,**  
**katastrophale Ernteausfälle,**  
**Nahrungsmittelknappheit,**  
**Emigration, ...**

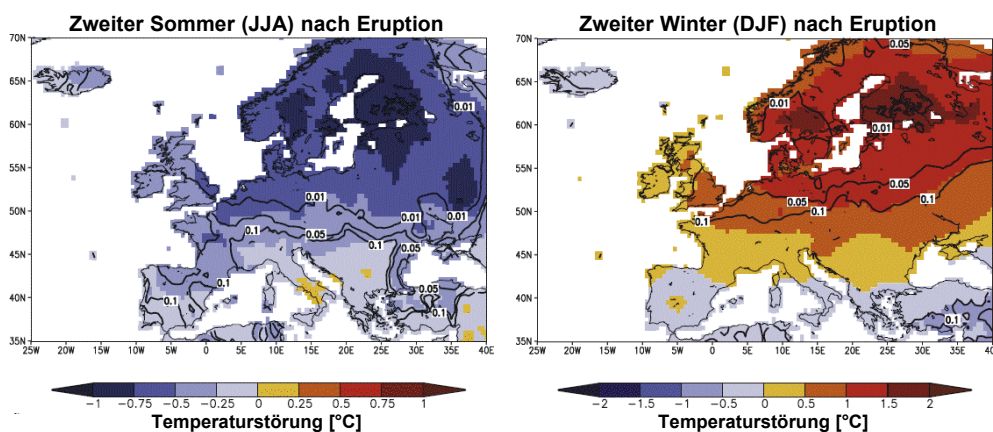
Europe, still recuperating from the Napoleonic Wars, suffered from food shortages. Food riots broke out in Britain and France and grain warehouses were looted.

The violence was worst in landlocked Switzerland, where famine caused the government to declare a national emergency. Huge storms, abnormal rainfall with floodings of the major rivers of Europe (including the Rhine) are attributed to the event, as was the frost setting in during August 1816.

(Wikipedia, October 2007)

## Auswirkungen von Vulkanen auf Europa

Komposit von 15 grossen Vulkanausbrüchen

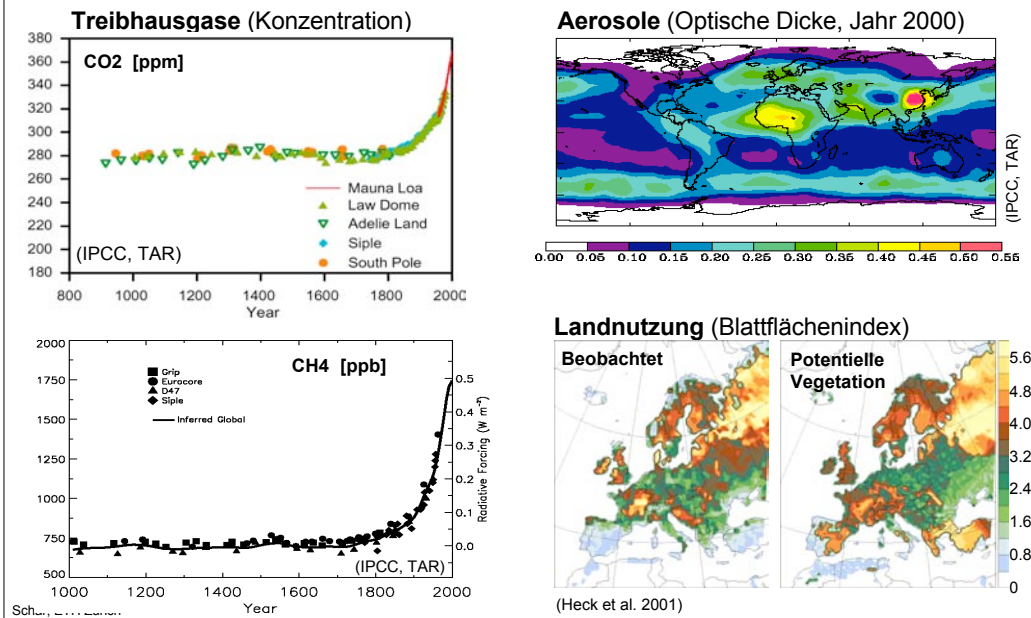


- Sommer werden empfindlich kälter
- Winter werden wärmer (unerwartete Reaktion, bedingt durch Störung der Nordatlantischen Oszillation)

Schär, ETH Zürich

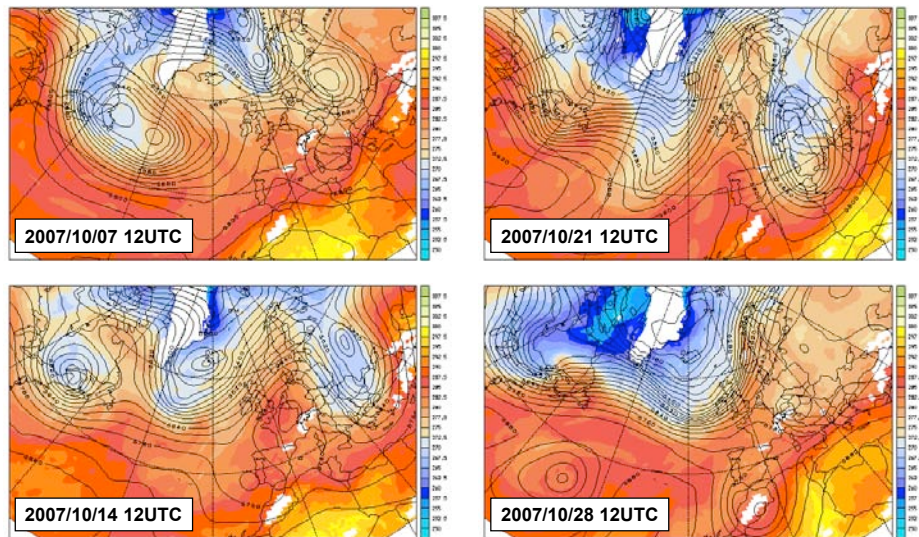
(Fischer et al., GRL, 2007)

## Anthropogener Klimaantrieb



## Interne Variabilität in der Atmosphäre

500 hPa (5.5 km) Geopotential, 850 hPa (1.5 km) Temperatur

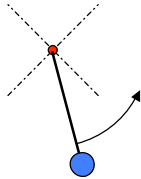


Atmosphärische Zirkulation ist von grosser interner Variabilität gekennzeichnet

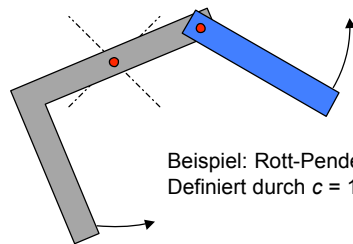
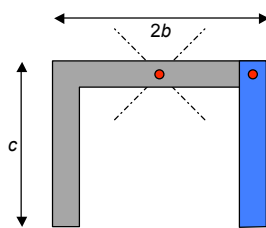


## Interne Variabilität in einfachen dynamischen Systemen

Ein Pendel beschreibt eine periodische Bewegung



Ein Doppelpendel kann sehr komplexe Bewegungen erzeugen



Einfaches Beispiel eines chaotischen Systems.

Beispiel: Rott-Pendel  
Definiert durch  $c = 1.558 b$

Schär, ETH Zürich

## Chaos-Theorie mit dem Lorenz-System

### Deterministic Nonperiodic Flow<sup>1</sup>

EDWARD N. LORENZ

Massachusetts Institute of Technology

(Manuscript received 18 November 1962, in revised form 7 January 1963)

#### ABSTRACT

Finite systems of deterministic ordinary nonlinear differential equations may be designed to represent forced dissipative hydrodynamic flow. Solutions of these equations can be identified with trajectories in phase space. For those systems with bounded solutions, it is found that nonperiodic solutions are ordinarily unstable with respect to small modifications, so that slightly differing initial states can evolve into considerably different states. Systems with bounded solutions are shown to possess bounded numerical solutions. A simple system representing cellular convection is solved numerically. All of the solutions are found to be unstable, and almost all of them are nonperiodic. The feasibility of very-long-range weather prediction is examined in the light of these results.

JAS, 20 (1963), 130-141



Edward N. Lorenz, 1917-  
Prof. für Meteorologie  
am MIT, Boston

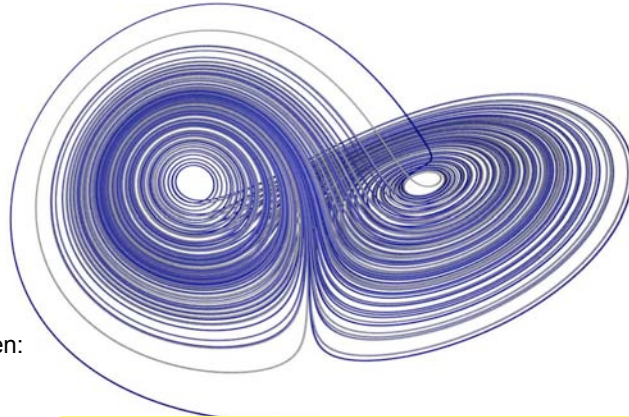
Deterministisches Chaos:

- Eigenschaft eines nichtlinearen dynamischen Systems.
- Verursacht durch grosse Sensitivität auf Anfangsbedingungen.
- Das Verhalten des Systems erscheint zufällig, aber das System ist deterministisch, im Sinne dass sein Verhalten durch die Anfangsbedingungen vollständig bestimmt ist.

Schär, ETH Zürich

(siehe auch: James Gleick: *Chaos: making a new Science*. Minerva, London)

## Lorenz Attraktor



### **Das Lorenz-Modell:**

Ein einfaches dynamisches System mit chaotischem Verhalten:

$$\dot{X} = -\sigma X + \sigma Y$$

$$\dot{Y} = -XZ + rX - Y$$

$$\dot{Z} = XY - bZ$$

Variablen:  $X, Y, Z$

Parameter:  $\sigma = 10, r = 28, b = 8/3$

### **Schmetterlings-Effekt:**

Lorenz: "Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil set off a Tornado in Texas?"

Eine minimale Störung zur Zeit  $t=0$  kann zu einer späteren Zeit grosse Auswirkungen haben.

Dieser Effekt impliziert fundamentale Grenzen für die Vorhersagbarkeit von Systemen.

Schär, ETH Zürich

25

## TEIL 3: Variabilität und Vorhersage

Kapitel 10. Einführung

Kapitel 11. Mechanismen von Variabilität

**Kapitel 12. Beispiele Interannueller Variabilität**

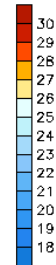
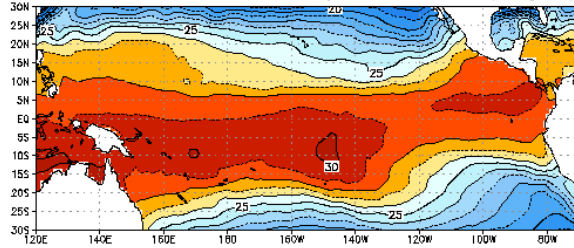
Kapitel 13. Wettervorhersage

Kapitel 14. Saisonale Vorhersage

Schär, ETH Zürich

# El-Niño

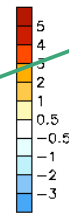
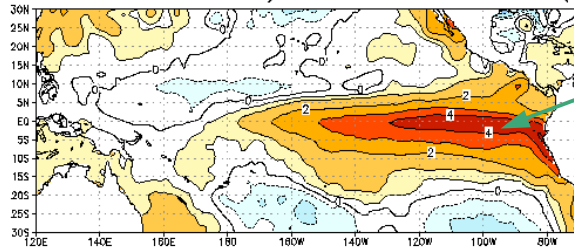
December 1997–February 1998 SST (deg C)



**SST**  
**DJF 1997/98**

SST = sea-surface temperature  
Anomalie = Abweichung vom langjährigen Mittel

December 1997–February 1998 SST Anomalies (deg C)



**SST Anomalie**  
**DJF 1997/98**

Charakteristische El-Niño SST-Störung zur Weihnachtszeit

CLIMATE PREDICTION CENTER/NCEP

Schär, ETH Zürich

# Auswirkungen von El-Niño



**Indonesien (El-Niño 1997/98)**  
**Trockenheit**

**Südamerika (El-Niño 1997/98)**  
**Starkniederschläge**

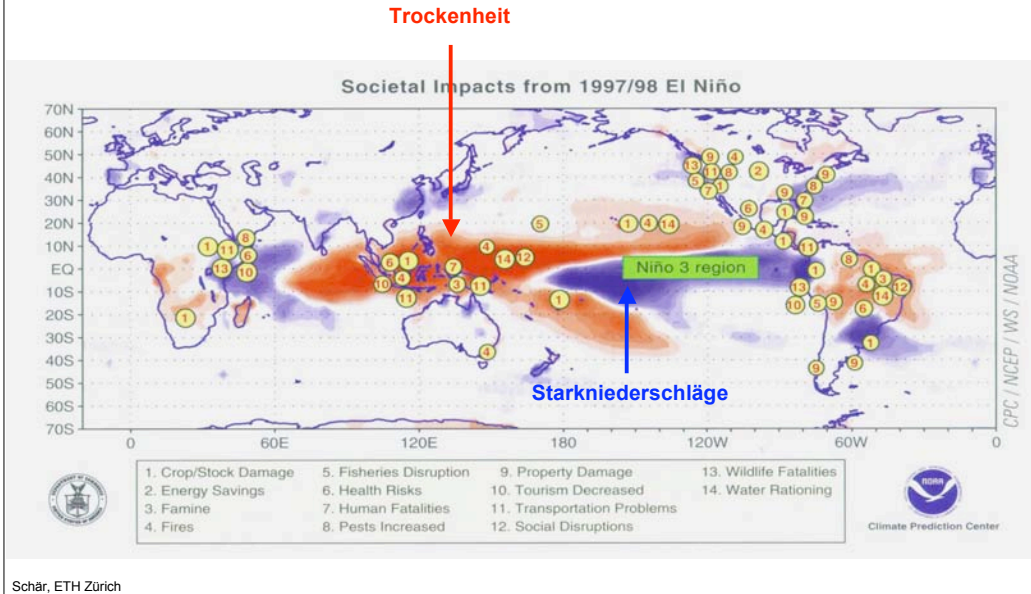


**Telekonnektion:**

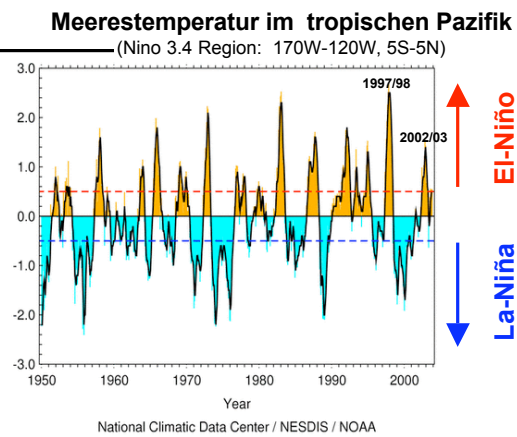
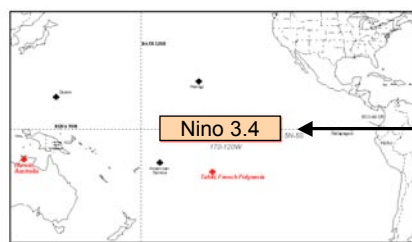
Eine Klimastörung an einem Ort steht in einer Beziehung zu einer (anderen) Klimastörung an einem ganz anderen Ort

Schär, ETH Zürich

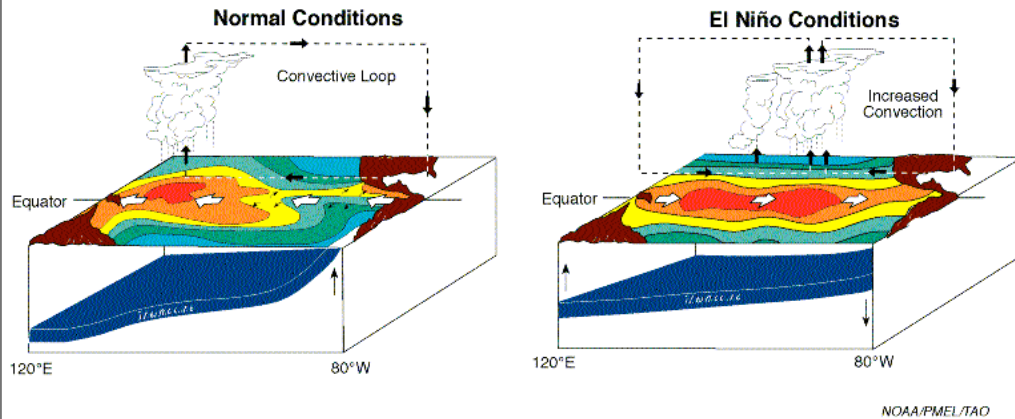
# Auswirkungen von El-Niño



# El-Niño Zeitreihe



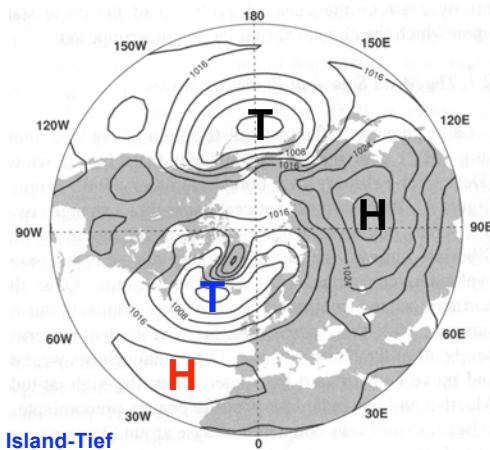
## El-Niño-Southern-Oscillation (ENSO) Mechanismus



Schär, ETH Zürich

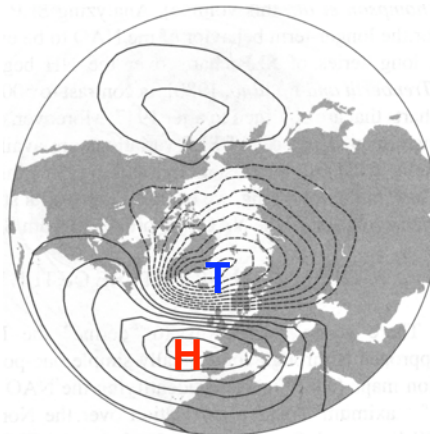
## Nord-Atlantische Oszillation (NAO)

Mittlerer Bodendruck DJF



Island-Tief  
Azoren-Hoch

Variabilität Bodendruck DJF  
EOF-Analyse

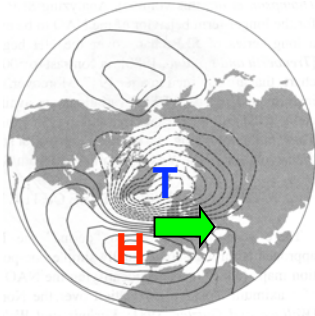


Ein grosser Teil der Variabilität (ca 37%)  
kann durch ein einziges Pattern (NAO)  
erklärt werden.

Schär, ETH Zürich

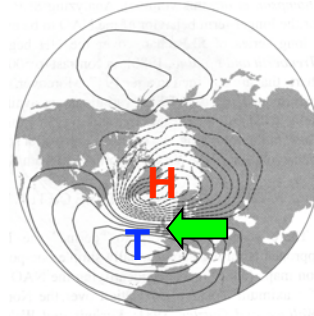
## NAO: positive und negative Phase

### NAO +



Abweichung vom Mittel

### NAO -

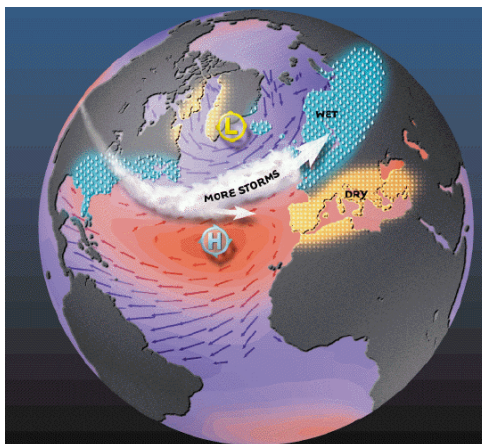


**NAO-Pattern mit positivem Vorzeichen:**  
 Starkes Azoren-Hoch,  
 Starkes Island-Tief,  
 Starke zonale Strömung,  
 Druckdifferenz Azoren – Island gross

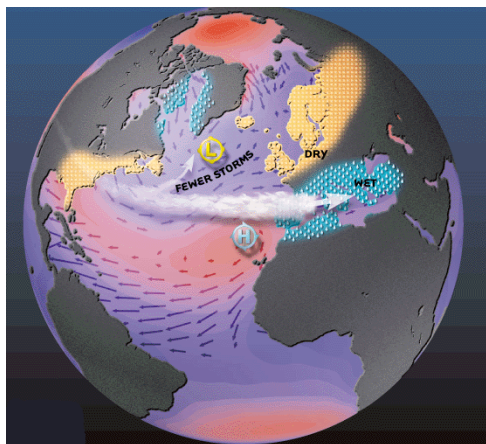
**NAO-Pattern mit negativem Vorzeichen:**  
 Schwaches Azoren-Hoch,  
 Schwaches Island-Tief,  
 Schwache zonale Strömung,  
 Druckdifferenz Azoren – Island klein

## Nord-Atlantische Oszillation

### positive Phase

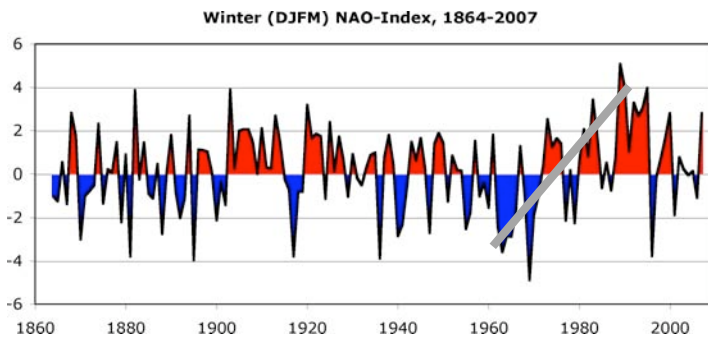


### negative Phase



**Telekonnektion:** Das Klima an einem Ort steht in einer Beziehung zum Klima an einem ganz anderen Ort

## Nord-Atlantische Oszillation: Winter-Zeitreihe



Normierte  
Druckdifferenz  
zwischen  
Azoren und Island

Starke Zunahme  
zwischen 1960-1990,  
Rekordwert 1989,  
ab 1996 wieder  
Normalisierung

## TEIL 3: Variabilität und Vorhersage

Kapitel 10. Einführung

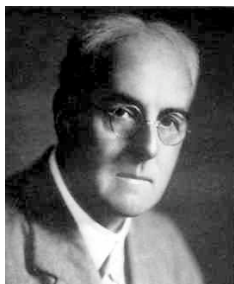
Kapitel 11. Mechanismen von Variabilität

Kapitel 12. Beispiele Interannueller Variabilität

**Kapitel 13. Wettersvorhersage**

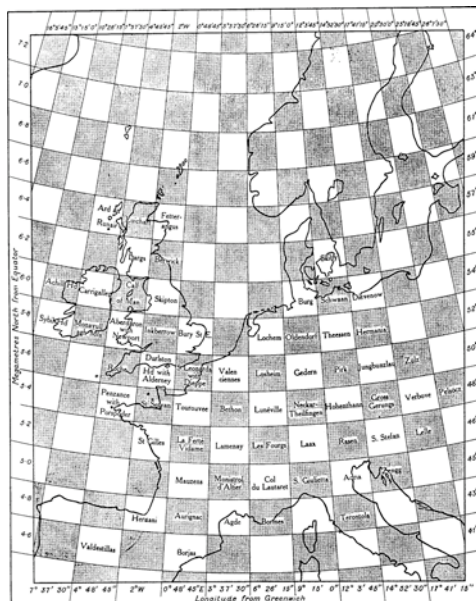
**Kapitel 14. Saisonale Vorhersage**

## Lewis F. Richardson (1922)



Erste Formulierung  
der atmosphärischen  
Gleichungen auf  
einem Rechengitter.

*“If the coordinate chequer were  
200 km square in plan, ... 64'000  
computers would be needed to  
race the weather. In any case, the  
organisation indicated is a central  
forecast-factory.”*



## Grundlegende Idee

### Wettervorhersage (einige Tage in die Zukunft)

- ist mathematisch gesehen ein *Anfangswertproblem* (Vilhelm Bjerknes, 1905)
- braucht Beobachtungen zum Anfangszeitpunkt

### Saisonale Vorhersage (einige Monate in die Zukunft)

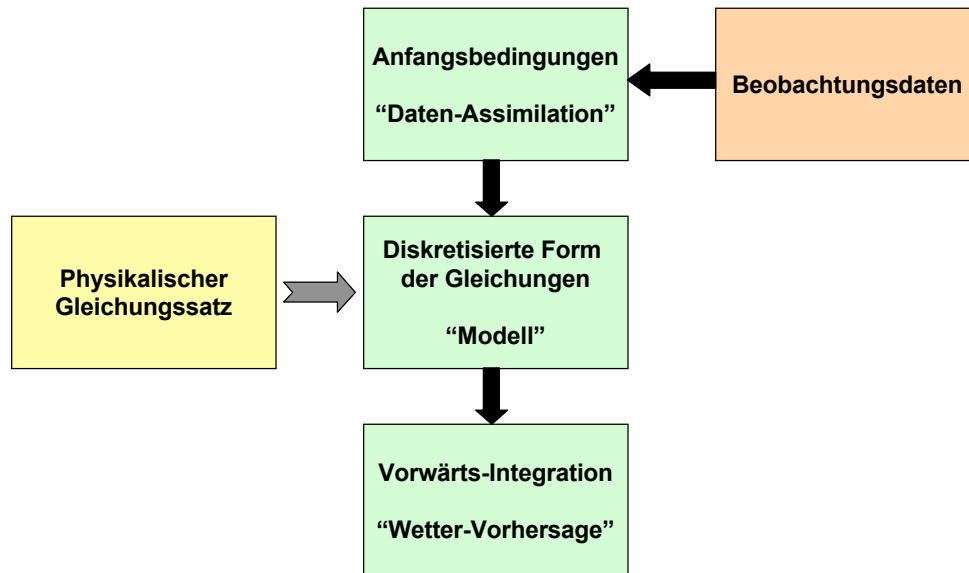
- einige der Anfangswerte sind wichtig (z.B. Ozeanzustand), aber nicht alle

### Klimavorhersage (einige Jahrzehnte in die Zukunft)

- ist verwandt mit einem *Randwertproblem*
- Information über den Anfangszustand geht “vergessen”
- Klimaantrieb (Solarkonstante, Treibhausgasgehalt der Atmosphäre, etc) entspricht den Randwerten



## Zutaten für Wettervorhersagen



Schär, ETH Zürich

## “Euler Gleichungen” in Kartesischen Koordinaten

Impulsgleichung  $\frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x$        $\frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + F_z$$

mit  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$

Zustandsgleichung  $p = \rho RT$

Thermodynamische Gleichung  $\frac{DT}{Dt} - \frac{1}{c_p \rho} \frac{Dp}{Dt} = H$

Kontinuitätsgleichung  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} + \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} = 0$

Gleichungen für Wasserdampf und Wolkenwasser  $\frac{Dq_{vap}}{Dt} = S_{vap}$        $\frac{Dq_{cld}}{Dt} = S_{cld}$

Extern spezifizierte Grössen  $(F_x, F_y)/\rho$        $H/c_p$

Schär, ETH Zürich

## Diskretisierung: Kontinuum => Rechengitter

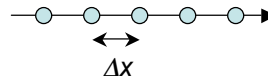
kontinuierlich

diskretisiert

schematisch

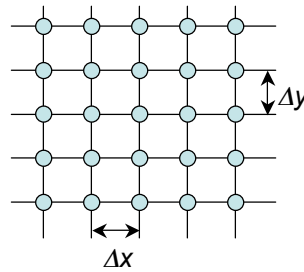
$T(x)$

$T(x_i)$  mit  $x_i = i\Delta x$



$T(x, y)$

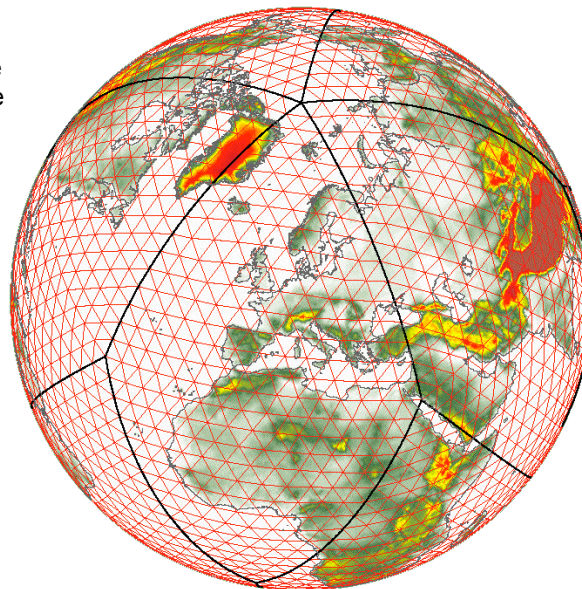
$T(x_i, y_j)$  mit  $x_i = i\Delta x$ ,  $y_j = j\Delta y$



Schär, ETH Zürich

## Beispiel: Globales Gitter des Deutschen Wetterdienstes

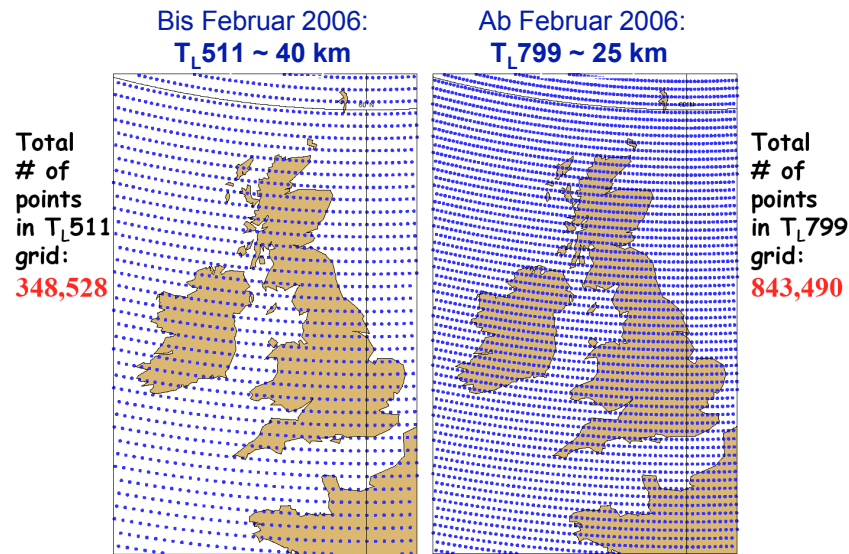
Dieses Gitter wird konstruiert indem ein Ikosaeder auf die Erde projiziert wird, jedes der Dreiecke wird anschliessend verfeinert.



Schär, ETH Zürich

(German Weather Service, DWD)

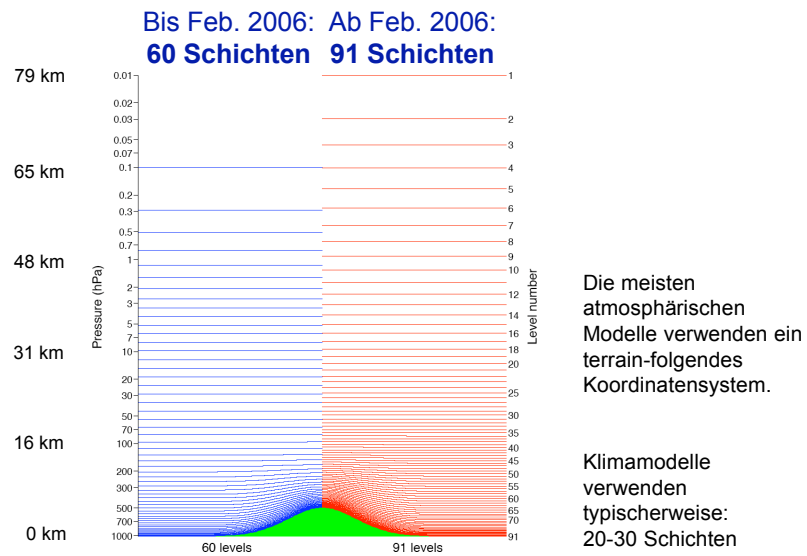
## Beispiel: ECMWF Model – horizontale Diskretisierung



Schär, ETH Zürich

(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)

## Beispiel: ECMWF Model – vertikale Diskretisierung

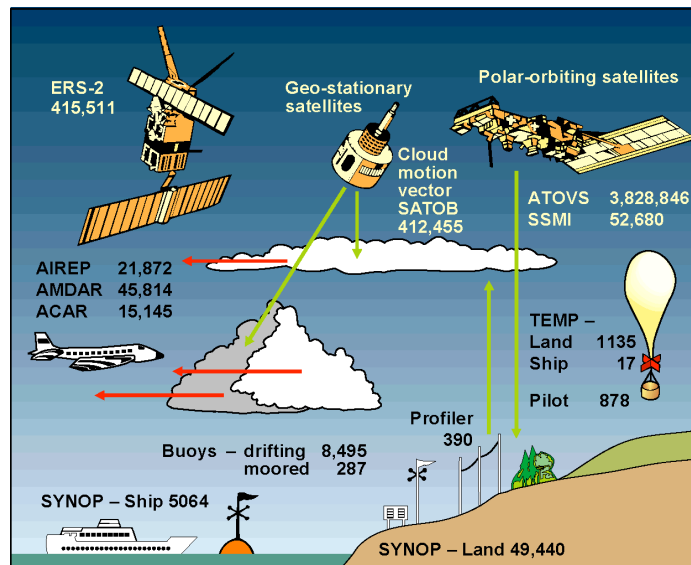


Schär, ETH Zürich

(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)

# Datenquellen zur Bestimmung des Anfangszustandes

24 hour summary of observations received at ECMWF, 18 March 2000



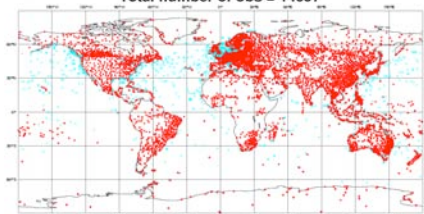
(ECMWF 2001)

# Globale Beobachtungssysteme – Übersicht

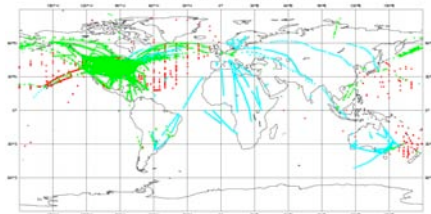
ECMWF Data Coverage - TEMP  
13/MAR/2001; 00 UTC  
Total number of obs = 570



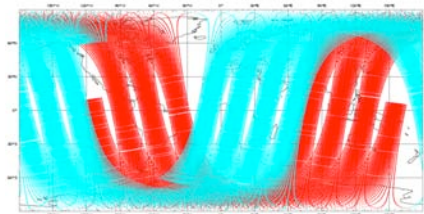
ECMWF Data Coverage - SYNOP/SHIP  
13/MAR/2001; 00 UTC  
Total number of obs = 14057



ECMWF Data Coverage - AIRCRAFT  
13/MAR/2001; 00 UTC  
Total number of obs = 21595



ECMWF Data Coverage - ATOVS  
13/MAR/2001; 00 UTC  
Total number of obs = 158189



## ECMWF

60

### European Centre for Medium-Range Weather Forecasts



Internationale Organisation mit Sitz in Reading (UK)

Gegründet 1975 (CH = Gründungsmitglied), operationell seit 1979

Getragen durch die meisten der Europäischen Wetterdienste (plus Türkei):  
19 Member States, 10 Co-operating States, WMO, EUMETSAT, JRC/EU, etc.  
Gegenwärtig in einer Phase der Erweiterung (EU-Osterweiterung).

Ursprünglich primär Mittelfrist-Vorhersage (Tag 3-10), jetzt viele andere Aufgaben

Ist seit mehreren Jahren das weltweit erfolgreichste  
Wettervorhersage-Zentrum

Budget 2004: 26.4 Mio £, davon ca 6 Mio £ für Computer



Schär, ETH Zürich

61

## Operational forecasts at the ECMWF

---

### **deterministic forecast to +10 days (from 00 and 12 UTC):**

- 25 km horizontal resolution ( $T_L799$ )
- 91 levels
- uses a 4D-Var data assimilation system

### **probabilistic ensemble forecast to +15 days (ensemble with 50 members):**

- 50 km horizontal resolution ( $T_L399$ ), 62 levels, up to day 10
- 80 km horizontal resolution ( $T_L255$ ), 62 levels, from day 10 to 15

### **extended-range ensemble prediction system to +30 days (ensemble):**

- with a coupled ocean-atmosphere model

### **seasonal forecasting to +6 months (ensemble):**

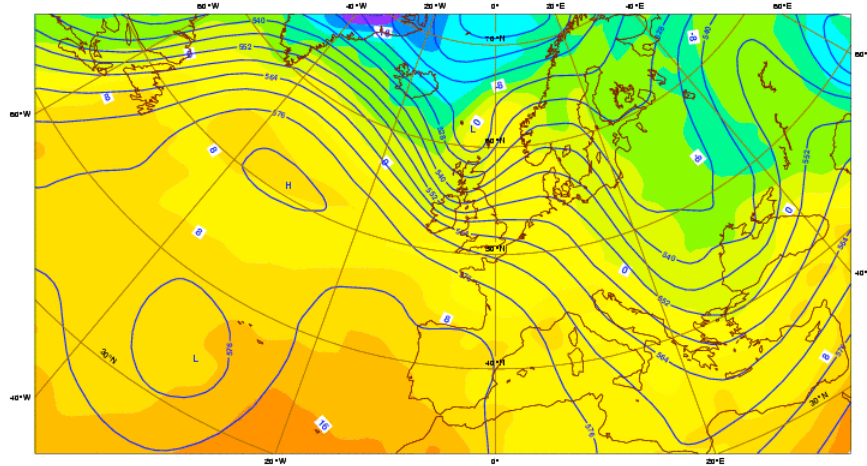
- atmospheric model with 320 km ( $T_L63$ ) resolution, 30 levels
- coupled to ocean model HOPE with  $0.5^\circ$ - $2^\circ$  resolution, 20 levels

Schär, ETH Zürich

## Beispiel: 108h-Vorhersage für 8. November, 12 UTC

Konturen: 500 hPa (~Druckverteilung 5.5 km)  
Farbe: 850 hPa Temperatur (1.5 km)

Sunday 4 November 2007 00UTC ©ECMWF Forecast t+108 VT: Thursday 8 November 2007 12UTC  
850 hPa Temperature / 500 hPa Geopotential



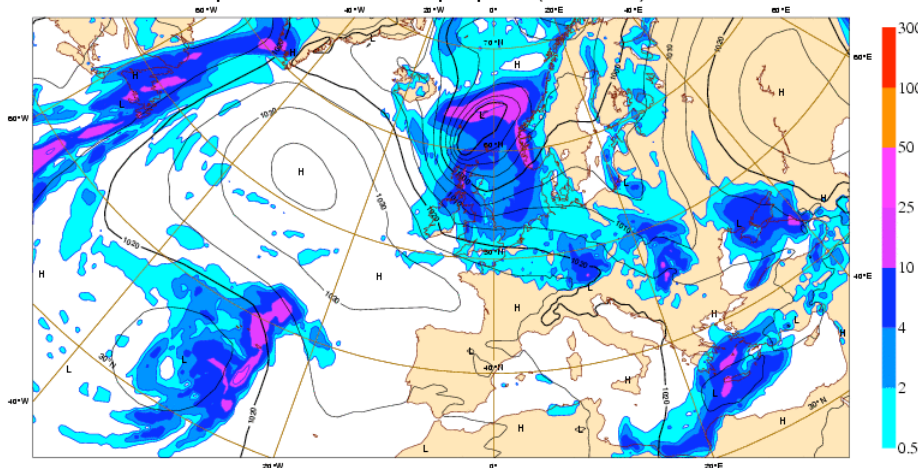
Schär, ETH Zürich

(ECMWF)

## Beispiel: 108h-Vorhersage für 8. November, 12 UTC

Konturen: Bodendruck  
Farbe: Niederschlag (06-18 UTC)

Sunday 4 November 2007 00UTC ©ECMWF Forecast t+108 VT: Thursday 8 November 2007 12UTC  
Surface: Mean sea level pressure / 12hr Accumulated precipitation (VT-6h/VT+6h)

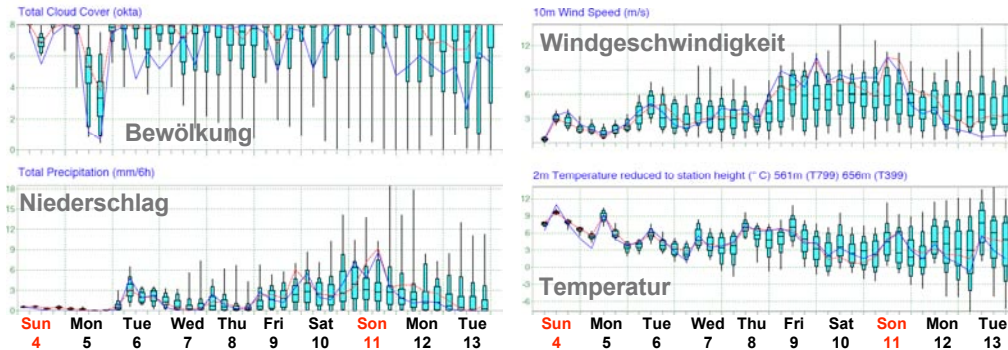


Schär, ETH Zürich

(ECMWF)

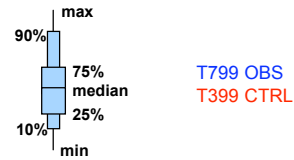
# Wahrscheinlichkeits-Prognose vom 4. Nov. 2007 (Zürich)

EPS Meteorogram  
 Zurich (439m) 47.42° N 8.75° E  
 Deterministic Forecast and EPS Distribution Sunday 4 November 2007 00 UTC



**Wahrscheinlichkeitsprognose durch Ensemble-Vorhersage-System:**

- 50 Simulationen
- leicht unterschiedliche Anfangsbedingungen
- ergibt Aussage über Zuverlässigkeit

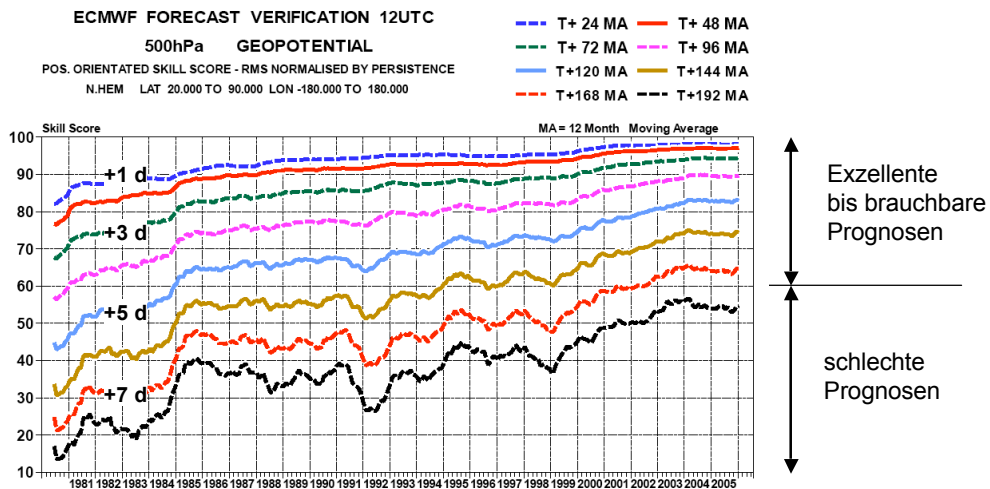


Schär, ETH Zürich

(ECMWF)

# Qualität der Globalen Wettervorhersage

**Skill-Scores für die Nordhemisphäre basierend auf der Zirkulation auf 500 hPa (5.5 km) für verschiedene Vorhersagezeiten**



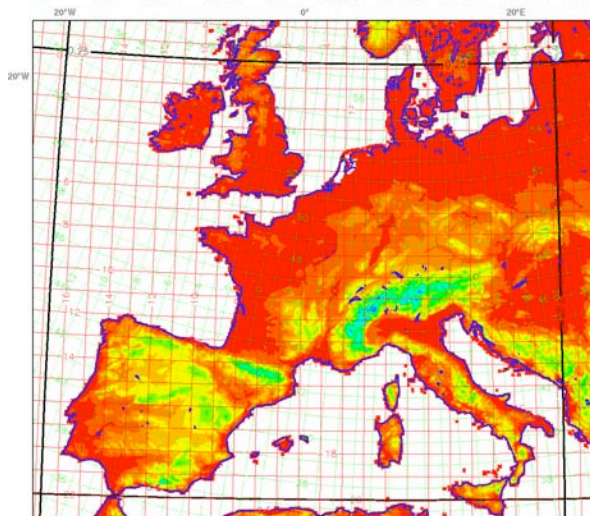
Schär, ETH Zürich

(ECMWF 2006, TM 504, Richardson et al.)

## Operationelles Modell der MeteoSchweiz (COSMO/aLMo)

Orography of the LM with 7km resolution and 385x325 grid points domain  
Land-Sea mask, rotated and absolute latitudes and longitudes

0 400 800 1200 1600 2000 2400 2800 3200 3489.2



LM Modell des Deutschen  
Wetterdienstes (COSMO  
Konsortium)

Horizontale Auflösung:  
7 km, 385x325 Gitterpunkte

Zwei tägliche Läufe bis +72h  
(um 00 und 12 UTC)

Datenassimilation unter  
Verwendung der Nudging-  
Technik

Modell wird an den Rändern  
durch globale Vorhersagen  
(ECMWF) angetrieben

(MeteoSwiss)

Schär, ETH Zürich

## TEIL 3: Variabilität und Vorhersage

Kapitel 10. Einführung

Kapitel 11. Mechanismen von Variabilität

Kapitel 12. Beispiele Interannueller Variabilität

Kapitel 13. Wettervorhersage

**Kapitel 14. Saisonale Vorhersage**

Schär, ETH Zürich



## Kapitel 13. Saisonale Vorhersage

Unter Saisonalen Vorhersagen (Jahreszeitenvorhersagen) versteht man Prognosen mit **Laufzeiten von einigen Monaten**.

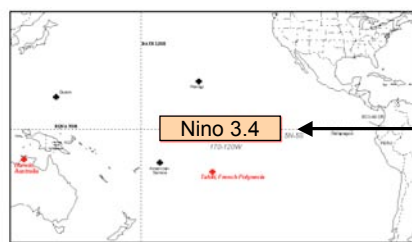
Saisonale Vorhersagen sind in den Tropen seit einigen Jahren sehr erfolgreich, wichtig z.B. für die **Planung** der landwirtschaftlichen Produktion.

Erstellung saisonaler Prognosen benötigt ein **gekoppeltes Modell** (Atmosphäre, Ozean, Meereis)

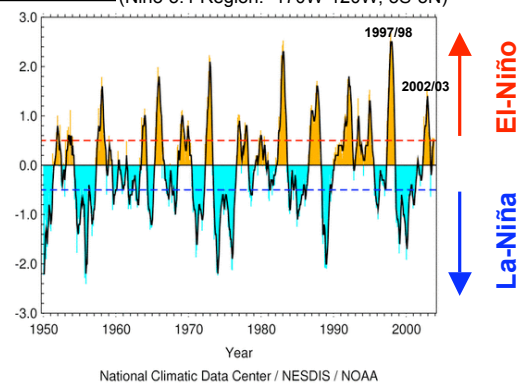
Um Unsicherheiten abzuschätzen werden zahlreiche Prognosen gemacht (Ensemble oder Monte-Carlo Verfahren) => **Wahrscheinlichkeitsaussage**

Saisonale Vorhersagen sind in den **mittleren Breiten** sind nur selten aussagekräftig.

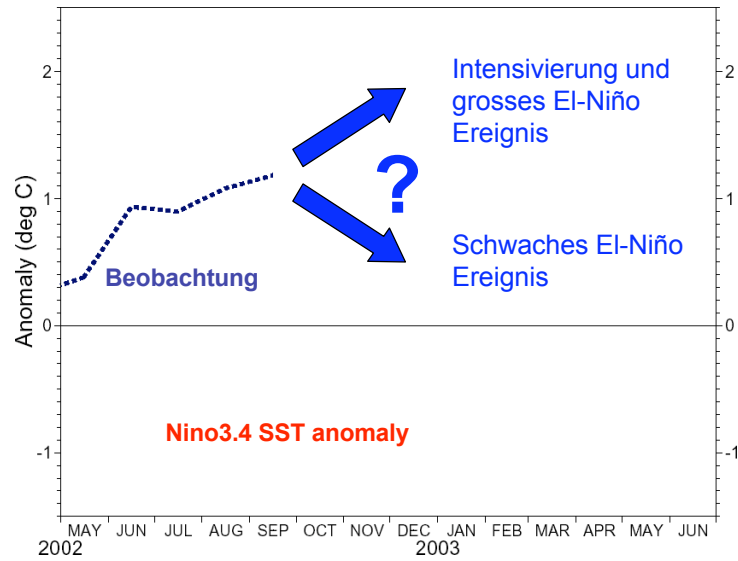
## El-Niño Zeitreihe



**Meerestemperatur im tropischen Pazifik**  
(Nino 3.4 Region: 170W-120W, 5S-5N)

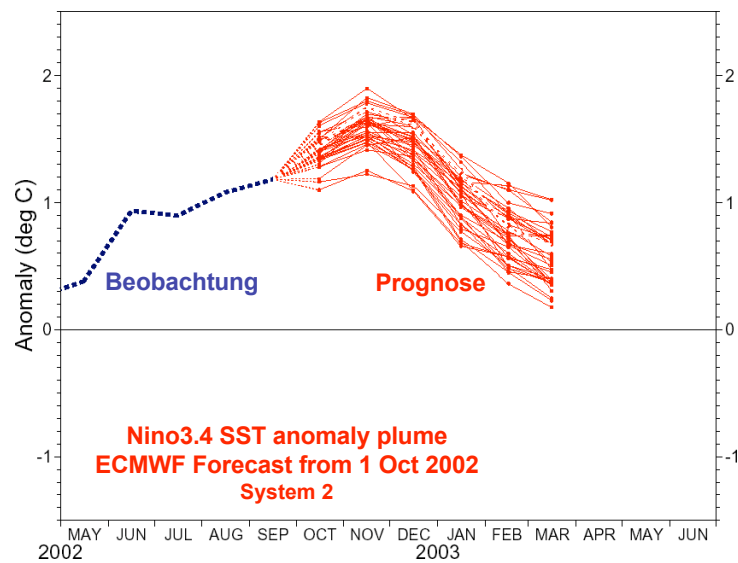


## Vorhersage des 2002/03 El-Niño



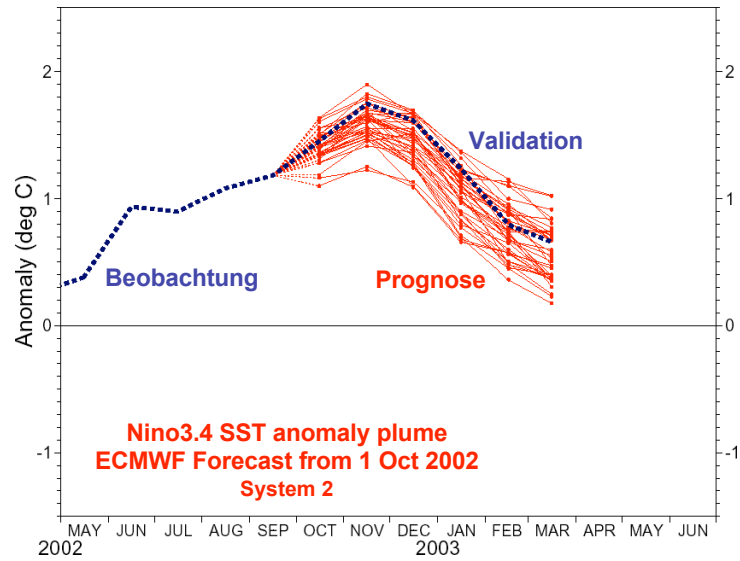
Schär, ETH Zürich

## Vorhersage des 2002/03 El-Niño



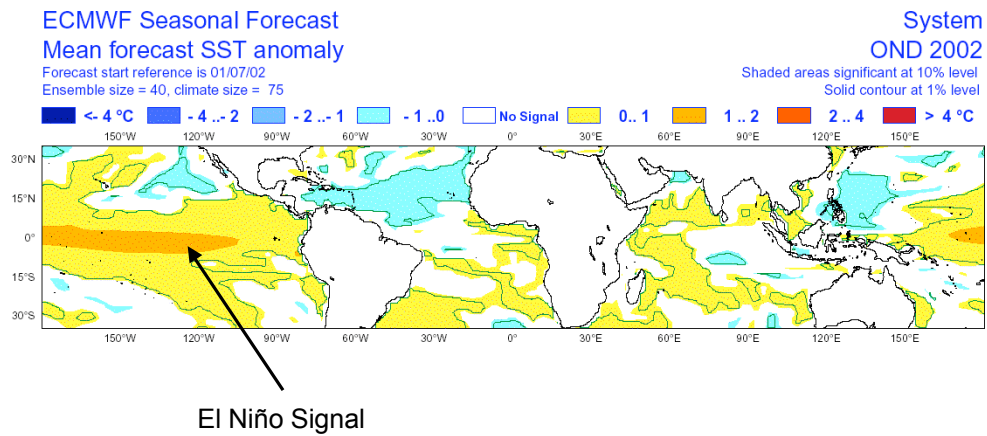
Schär, ETH Zürich

### Vorhersage des 2002/03 El-Niño



Schär, ETH Zürich

### Vorhersage des 2002/03 El-Niño



Schär, ETH Zürich

## Vorhersage des 2002/03 El Niño

ECMWF Seasonal Forecast

Mean precipitation anomaly

Forecast start reference is 01/07/02

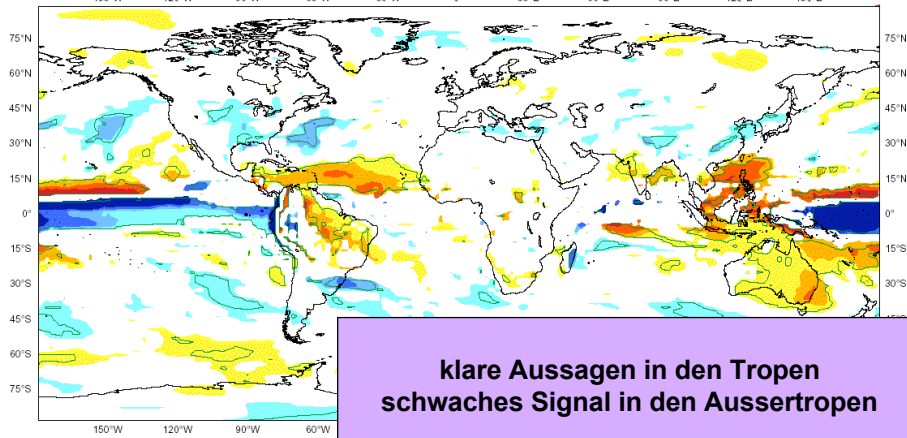
Ensemble size = 40, climate size = 75

System

OND 2002

Shaded areas significant at 10% level

Solid contour at 1% level

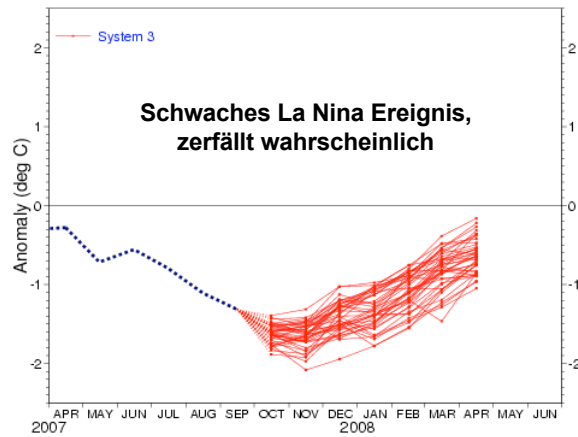


Schär, ETH Zürich

## Vorhersage für Winter 2007/2008

NINO3 SST anomaly plume  
ECMWF forecast from 1 Oct 2007

Monthly mean anomalies relative to HCEP adjusted Olv2 1971-2000 climatology



Forecast issue date: 15 Oct 2007

ECMWF

Schär, ETH Zürich

# Vorhersage für die nächsten Monate

## Prognostizierte Temperatur-Anomalien DJF

EUROSIP multi-model seasonal forecast

ECMWF/Met Office/Météo-France

Mean 2m temperature anomaly

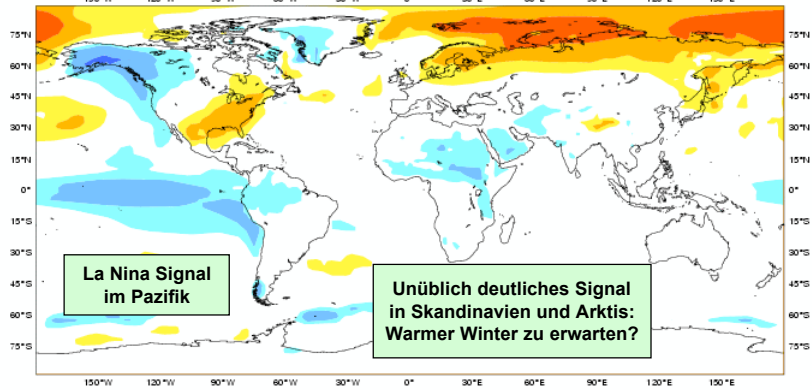
DJF 2007/08

Forecast start reference is 01/10/07

No significance test applied

Variance-standardized mean

■ < -4 °C  
 ■ -4 .. -2  
 ■ -2 .. -1  
 ■ -1 .. -0.5  
 ■ -0.5 .. 0.5  
 ■ 0.5 .. 1  
 ■ 1 .. 2  
 ■ 2 .. 4  
 ■ > 4 °C



Forecast issue date: 15/10/2007

ECMWF

Schär, ETH Zürich