

Wolfgang Böhme

Nachweis von speziellen Zusammenhängen zwischen Teilsystemen von komplexen dynamischen Systemen – Beispiel: Southern Oscillation und Witterung in Mitteleuropa

Bearbeitete Fassung des Vortrages, der in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 19.6.2003 gehalten wurde

I Einleitung

Grundsätzlich geht und ging es mir bei den Studien, die zu diesem Vortrag führten, um eine vertiefte, und zum Teil neuartige Analyse und Nutzung von Fernbindungen, die in der Meteorologie zumeist unter dem Begriff „Telekonnektionen“ geführt werden. Eine Fülle solcher Zusammenhänge ist eben unter dem Stichwort „Telekonnektionen/Fernbindungen“ seit Ende des 19. Jahrhunderts (z.B. Blanford 1880, De Bort 1880, Hann 1890, Hildebrandsson 1897) und in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts (u.a. Walker 1924, Ångström 1935) beschrieben worden. Sie betreffen fast durchweg als lineare Beziehungen zu verstehende Korrelationen von meteorologischen Größen in verschiedenen geographischen Regionen. Ein besonderer Schwerpunkt waren und sind die „Fernbindungen“ der südlichen Oszillation (Southern Oscillation) zu fast allen Gebieten der Erde (s.z.B. Bjerknes 1969, Graf 1991). Ganze Bücher sind dieser Thematik gewidmet (u.a. Glantz et al. 1991, Diaz et al. 1992). Die südliche Oszillation (SO) besteht in einer Schwankung der atmosphärischen Zirkulation über dem Südteil des äquatorialen Pazifik, also zwischen Australien und Indonesien einerseits und Südamerika andererseits; sie wird zumeist charakterisiert durch den Southern Oscillation Index (SOI), der im wesentlichen mit der Druckdifferenz Darwin – Tahiti gegeben ist (Walker und Bliss 1932). Während Korrelationen zwischen dem Southern Oscillation Index und meteorologischen Größen in vielen Teilen der Welt sehr deutlich ausgeprägt sind (z.B. Berlage 1957, Rogers 1984), wurden solche Korrelationen zu meteorologischen Zustandsgrößen über Europa (speziell auch für Mitteleuropa) trotz vieler Bemühungen bisher nicht oder nur als sporadische Ausnahmen (z.B. Kiladis und Diaz 1989) gefunden.

Bei der Fortführung von Arbeiten zur Thematik „Anwendung der Methode der Ensemblevorhersage bei komplexen dynamischen Systemen auf statistische Verfahren“ (Böhme 1998 und 1999 sowie Böhme et al. 2001) habe ich im Januar dieses Jahres entdeckt, dass *zwischen strukturellen Eigenschaften* der Zeitreihe der SOI und der Zeitreihe der Abweichungen der Monatsmitteltemperatur Mitteleuropas deutliche *Beziehungen bestehen*, die für langfristige Vorhersagen (über mehr als ein Jahr) dieser beiden Zeitreihen und grundsätzlich für weitere Zeitreihen des atmosphärischen Systems nutzbar sind. Ein wesentlich neuer Schritt besteht hierbei in der Feststellung und Ausnutzung von „parallelen Analogieabständen“ zwischen solchen Reihen.

II Grundlegende Eigenheiten des komplexen atmosphärischen Systems und einige Definitionen

Einige Eigenschaften des atmosphärischen Systems sind dabei zu beachten und erleichtern zum Teil dieses Herangehen. Sie lassen sich einschließlich der zugehörigen Definitionen in fünf Punkte gliedern. Ähnliche Eigenheiten sind aber auch in vielen anderen komplexen natürlichen Systemen zu finden, so dass diese Ausführungen auch in einer Reihe von anderen Fachbereichen von Interesse sein dürften:

(1) Das atmosphärische System (unter Einbeziehung seiner Randbeziehungen) ist ein *deterministisch chaotisches System* (Lorenz 1963). Kleine Abweichungen (in den Anfangsbedingungen, in den treibenden Kräften, in angewandten Parametern und bei den verwendeten numerischen Vorhersageverfahren) können mit der fortschreitenden Zeit zu großen Abweichungen führen (hierzu Kluge 1991 und Böhme 1998). Chaos führt somit zur Begrenzung bzw. Verminderung der Vorhersagbarkeit (zu zunehmender Entropie des Systems); es kann gleichzeitig auch zu Neubildung von Strukturen mit abnehmender Entropie bei Vorhandensein eines verwendbaren Energie-durchsatzes führen (z.B. Gassman 1991, Ebeling 1994, Ebeling und Lanius 2000). Die Theorie komplexer dynamischer Systeme besagt zudem (Takens 1981, s. auch Ott 1993): Bei niedrig-dimensionalen Systemen (also bei Systemen mit einer Dimension ihres Zustands- oder Phasenraumes von etwa 3 oder 4, wie es beim Lorenz-System, Lorenz 1963, der Fall ist) kann jede Zeitreihe einer Zustandseigenschaft, wenn sie nur genügend lang ist, genutzt werden, um wesentliche Eigenschaften der Dynamik des Systems zu erschließen. Das kann in gewisser Näherung auch noch für höherdimensionale Systeme gelten. Da also im Prinzip unterschiedliche Zeitreihen geeignet sind, Besonderheiten des Systems zu erfassen, liegt es wohl nahe und muss es nicht ver-

wundern, dass es eventuell auch relativ komplexe Zusammenhänge struktureller Art zwischen den unterschiedlichen Zeitreihen geben kann.

(2) Die *charakteristischen zeitlichen und räumlichen Dimensionen* von typischen atmosphärischen Strukturen und Prozessen sind miteinander korreliert in dem Sinne, dass kleinere zeitliche Dimensionen mit kleineren räumlichen Strukturen und größere zeitliche Dimensionen mit größeren räumlichen Strukturen verbunden sind, wie zum Beispiel aus der Abb.1 ersichtlich ist, die ich von H. Fortak (1982) übernommen habe.

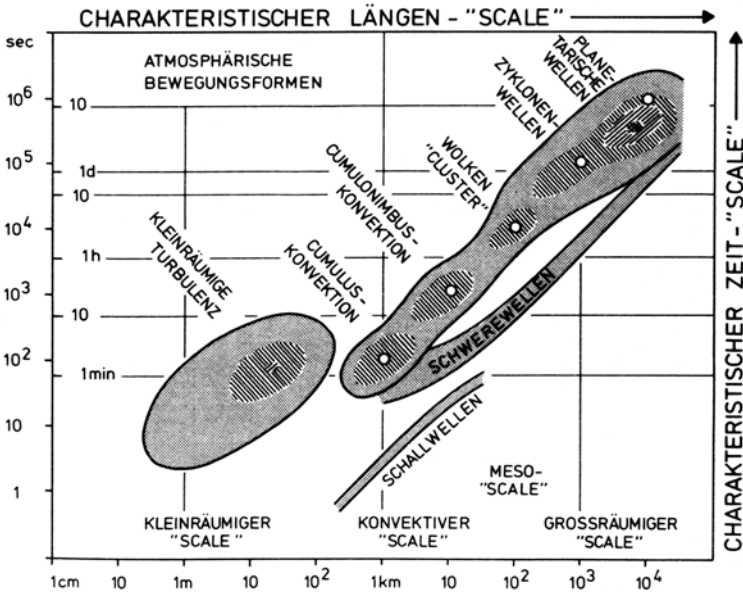


Abb.1: Schematische Darstellung der charakteristischen Längen- und Zeitscales für verschiedene besonders wichtige Bewegungsformen und Prozesse innerhalb der Atmosphäre (nach H. Fortak 1982).

Kurz gesagt: je größer, desto stabiler, desto größer die Lebensdauer. Die kleinräumige Turbulenz hat eine charakteristische Länge von 1 bis 10 m und einen zeitlichen Maßstab von 1 bis 10 Minuten, bei den Schönwettercumuli sind es mehrere hundert Meter und mehrere Minuten, bei einem aus einer Wellenbildung hervorgehenden Tief 1000 km und 2 Tage. Die denkbar großräumigsten Strukturen und Prozesse sind dabei solche von globaler Natur, wie die über die Erdbahnelemente gehenden Einflüsse oder auch die hochreichenden explosiven Vulkanausbrüche. Zu letzteren hatte ich vor etwa 10 Jahren gezeigt

(Böhme 1993 und 1994), dass die globalen Temperaturschwankungen nach solchen Ausbrüchen, trotz ihrer relativ kleinen Amplitude, von denen man denken könnte, dass sie vom allgemeinen Rauschen bald beseitigt würden, jeweils in ihrem Verlauf über mehrere Jahre nachweisbar und auch vorhersagbar sind. Ähnliches gilt wahrscheinlich auch für Störungen oder Besonderheiten der Zirkulation, die eine zeitliche Struktur haben, die sich über sehr große Gebiete erstreckt, wie z.B. die hier behandelten, gleichzeitig auftretenden Strukturen in der „südlichen Oszillation“ und über Mitteleuropa.

(3) Die Vorhersage zukünftiger Zustände in der bzw. der Atmosphäre beruht letztlich auf der Verwendung analoger Fälle aus der Vergangenheit. Bei Langfristvorhersagen, wo es noch keine Alternative der numerischen Lösung von Modellen gibt, ist dies offensichtlich. Bei der kurzfristigeren Vorhersage, wo es solche numerischen Lösungen gibt, kann man das Prinzip dieser Vorhersagen auch auf die *Verwendung von Analoga* zurückführen (Böhme 1965).

Ein Vorteil der Aufdeckung und Verwendung von Analoga besteht darin, dass ihre Verwendung z.B. für Prognosen von (meteorologischen) Elementen möglich ist, die jenseits der Elemente liegen, mit deren Hilfe die Analoga gefunden wurden.

(4) Bei Vorhersagen des Verhaltens komplexer dynamischer Systeme ist es zweckmäßig, worauf unser Mitglied Ebeling (u.a. 1994) mehrfach hingewiesen hat, die *Vorgeschichte des Systems* (also den bekannten vorangehenden Verlauf der Zustandstrajektorie im Phasenraum) zu *berücksichtigen*. Dabei ist es günstig, von einem größeren Ensemble von Belegen für die Vorgeschichte (d.h. von einer größeren Zahl von Projektionen des Phasenraumes auf unterschiedliche niedrigerdimensionale Räume) auszugehen. Hiermit lässt sich auch die Information über das vorangehende Verhalten umfassender berücksichtigen. Bei dem von uns (Böhme 1998 und 1999, sowie Böhme et al. 2001) eingeführten statistischen Ensembleverfahren (später und im folgenden oft einfach als *Ensembleanalysator* bezeichnet) für eine Vorhersage der Prädiktanden in Sextilen werden 135 verschiedene Kombinationen von jeweils 5 Daten als Prädiktoren (größer oder kleiner als der Medianwert) aus einem Zeitraum von 27 Monaten verwendet; sie lassen sich, wie ich schon früher dargelegt habe, in 15 Bedingungskomplexe zusammenfassen. Ein *perfektes Analogon* liegt bei diesem Vorgehen vor, wenn alle 135 Bedingungskombinationen erfüllt sind. Im allgemeinen ist der Perfektionsgrad geringer. – Der Vollständigkeit halber möchte ich noch bemerken, dass die Ergebnisse, die sich bei einer beliebigen Prädiktorenkombination ergeben, nur dann für Vorhersagezwecke berücksichtigt werden, wenn zumindest 4 Analoga für diese Kombination gefunden werden und wenn zugleich die Anzahl der posi-

tiven oder negativen Abweichungen vom Medianwert bei den darin enthaltenen Analoga signifikant überwiegt.

(5) Die auftretenden Analoga können zumindest in zweierlei Weise benannt werden: entweder nach dem aufgetretenen Jahr (J) oder nach dem Abstand des aufgetretenen Jahres vom Vorhersagejahr, d.h. also mit dem *Analogieabstand* (A). Die Benutzung der letzteren Bezeichnung hat u.a. den Vorteil, dass sie beim natürlichen Übergang zum Folgejahr unverändert bleibt. – Für jeden Analogieabstand A wird die Anzahl der Fälle seines signifikanten Auftretens mit Z bezeichnet. Bei jeder Monatsvorhersage werden diejenigen Analogieabstände als *beste Analogieabstände* hervorgehoben, bei denen entweder die zugeordneten Anzahlen Z größer als 9 sind oder die 5 höchsten Werte haben. Außerdem werden noch alle A mit gleich hohem Z mit einbezogen. Zwei in zwei verschiedenen Zeitreihen (unter den jeweils besten Analogieabständen) gleichzeitig auftretende gleiche Analogieabstände werden als „*parallele Analogieabstände*“ bezeichnet. Eine Illustration hierzu gibt im nachfolgenden Abschnitt die Tabelle 1.

III Gleichzeitige Anwendung des Ensembleanalysators auf verschiedene Zeitreihen

$\Delta T (R_1)$

| | | | | | | | | | | | |
|---|----|----------|-----------|----|----|-----------|----|----------|----|----|----|
| A | 10 | <u>5</u> | <u>51</u> | 55 | 29 | <u>11</u> | 4 | <u>8</u> | 28 | 57 | 76 |
| Z | 38 | 31 | 27 | 25 | 22 | 20 | 17 | 17 | 14 | 12 | 12 |

| | | |
|---|------------|-----------|
| A | <u>107</u> | <u>91</u> |
| Z | 12 | 10 |

SOI (R_2)

| | | | | | | | | | | | |
|---|----|-----------|----|-----|------------|----------|----------|----|----|----|----|
| A | 49 | <u>11</u> | 20 | 106 | <u>107</u> | <u>5</u> | <u>8</u> | 56 | 62 | 30 | 88 |
| Z | 26 | 25 | 25 | 24 | 24 | 22 | 20 | 20 | 19 | 18 | 17 |

| | | | | | | | |
|---|----|----|-----------|----|----|-----------|----|
| A | 15 | 77 | <u>91</u> | 89 | 22 | <u>51</u> | 97 |
| Z | 15 | 14 | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 |

Tab. 1: Beste Analogieabstände A zum Januar 2003 für ΔT und SOI mit den Anzahlen Z ihres signifikanten Auftretens. Parallel auftretende Analogieabstände sind unterstrichen.

(1) Der Ensembleanalysator wurde für den Vorhersagemonat Januar 2003 sowohl auf die Zeitreihe R_1 der Abweichung der Monatsmittel der mitteleuro-

päischen Temperatur vom Normalwert ΔT (Baur 1962 und 1975, Pelz et al. 1996 ff) sowie auf die Zeitreihe R_2 des SOI (Bureau of Meteorology, Australia) angewandt.

In der Tabelle 1 sind die besten Analogabstände A mit den Anzahlen Z sowohl für ΔT wie für SOI angeführt: Die parallel auftretenden Analogieabstände sind durch Unterstreichung hervorgehoben. Bei ΔT treten die 6 parallele Analogieabstände in einer Gruppe von insgesamt 13 Fällen bester Analogieabstände auf; sie haben also eine relative Häufigkeit von $6/13 = 0.46$. Bei der zweiten Reihe, der Reihe der SOI, treten die 6 parallelen Analogieabstände bei insgesamt 18 Fällen, also mit einer relativen Häufigkeit von $0,333$ auf. Diese Häufigkeit des Auftretens paralleler Analoga ist signifikant überzufällig. Die Beweisführung kann durch Anwendung der Bernoullischen Formel für Binomialverteilungen erfolgen.

Hierzu zunächst nur soviel: Es wird die Wahrscheinlichkeit für das zufällige gleichzeitige Auftreten eines Analogabstandes in den beiden Zeitreihen benötigt. Diese Wahrscheinlichkeit ist das Produkt der Wahrscheinlichkeiten für das zufällige Auftreten des Analogieabstandes in jeder der beiden Zeitreihen. Wenn man zu jedem Zeitpunkt jeweils nur das beste Analog von den insgesamt 120 möglichen nehmen würde, wäre jede dieser Wahrscheinlichkeiten $1/120$, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines parallelen Analogs $1/120 \times 1/120 = 0.6944 \cdot 10^{-4}$.

Da wir aber eine begrenzte Anzahl von besten Analogen in beiden Zeitreihen zulassen, ist die gesuchte Zufallswahrscheinlichkeit für dieses Ereignis größer, und zwar beträgt sie $0.1625 \cdot 10^{-2}$. Der vergrößernde Faktor ist $13 \times 18 = 234$.

Die Bernoullische Formel stellt nun die Verbindung zwischen der soeben abgeleiteten Wahrscheinlichkeit des (in unserem Fall des zufälligen) Auftretens des Ereignisses und der Häufigkeit des Auftretens in einer Reihe von unabhängigen (zufälligen) Versuchen dar (Details s. z.B. in J.Taubenheim 1969 oder in C.-D.Schönwiese 2000). Aus der Bernoulli-Formel kann insbesondere mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 1% geschlossen werden, dass für eine Zufallsreihe von 90 Fällen parallele Analoga nur 6 mal oder weniger auftreten dürfen. Unsere Beobachtungen ergaben aber schon für eine Stichprobe von circa 15 Analoga 6 mal das Auftreten von parallelen Analoga, was also sehr dafür spricht, dass dieses Ergebnis nicht zufällig ist. – Dass das Auftreten paralleler Analoga nicht zufällig ist, ist eine Seite (die man wissen muss), die andere ist, ob die dann mit diesen Analoga produzierten Vorhersagen einen kleineren mittleren absoluten Fehler aufweisen als Zufallsvorher-

sagen. Zunächst, unter (2), betrachten wir aber erst einmal ein Beispiel einer Vorhersage, ehe wir dann, unter (4), zur Feststellung des mittleren absoluten Vorhersagefehlers eines hinreichend großen Kollektivs von Vorhersagen übergehen.

(2) Benutzt man zum Beispiel die parallelen Analogabstände von 5, 8, 11 und 51 Jahren bei dem erwähnten Fall Januar 2003 und geht man davon aus, dass so weit reichende Besonderheiten der Atmosphäre längere Zeit bestehen könnten, so kann man den Ablauf der 4 Analoga als mögliche individuelle Fälle, ihre Gesamtheit jeweils als eine „Lösungsfahne“ für die Vorhersage von SOI, von ΔT und von ΔR (monatliche Niederschlagsabweichung über Deutschland) ansehen. Dies wird mit der Abb. 2 mit ihren Teilabbildungen a, b, und c illustriert. Der wahrscheinlichste Wert ist dann durch die Medianwerte gegeben, die in den Abbildungen durch ausgefüllte Kreise und ausgezogene Verbindungslinien gekennzeichnet sind. Die ebenfalls mit ausgezogenen Verbindungslinien verbundenen ausgefüllten Rauten zeigen die jeweils eingetretenen Werte an.

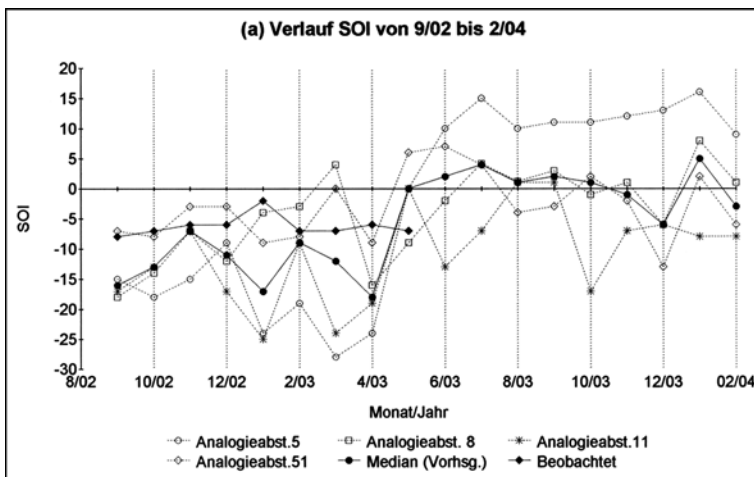


Abb. 2a: Darstellung des Verlaufes des Southern Oscillation Index SOI bei den „parallelen Analogabständen“ von 5, 8, 11 und 51 Jahren als vier potentielle Vorhersagen vom Stichmonat Januar 2003 an durch gestrichelte Linien. – Die Analogieabstände 5, 8, 11 und 51 bedeuten für 2003 die Jahre 1998, 1995, 1992 bzw. 1952.

Die wahrscheinlichste Vorhersage ist dann durch die Medianwerte der vier potentiellen Vorhersagen gegeben, die hier durch ausgefüllte Kreise gekennzeichnet und mit ausgezogenen Geraden verbunden sind. Die ausgefüllten Rauten geben die eingetretenen Werte an, die ebenfalls durch ausgezogene Geraden verbunden sind.

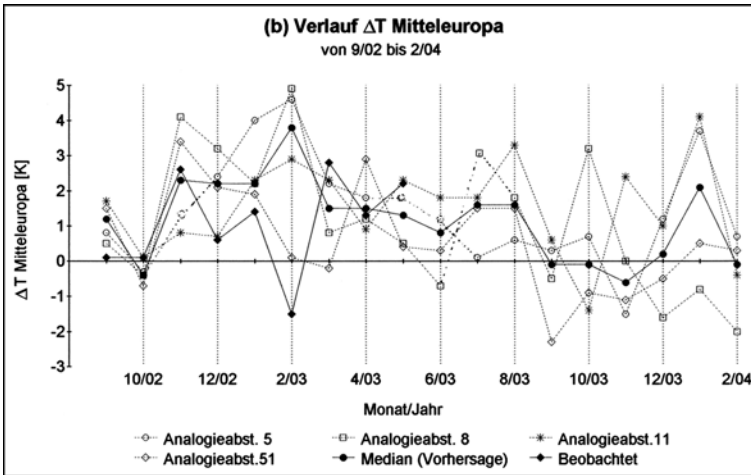


Abb. 2b: Verlauf der Abweichung der mitteleuropäischen Monatsmitteltemperatur ΔT vom lang-jährigen Mittel (sonst wie Abb. 2a).

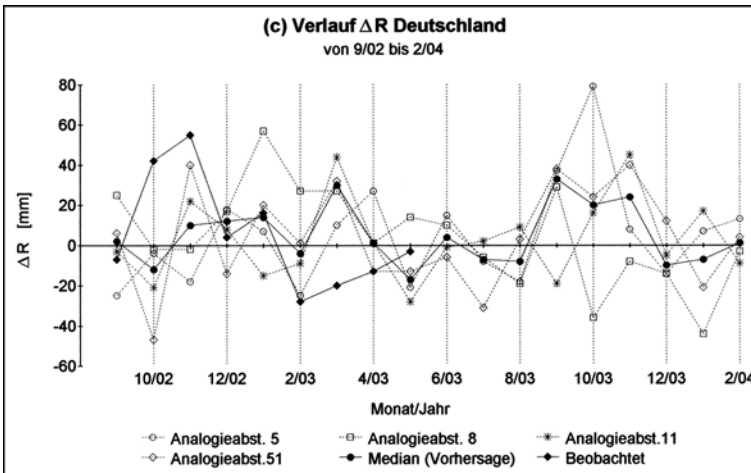


Abb. 2c: Verlauf der Abweichung der Monatsniederschlagssummen Deutschlands ΔR vom lang-jährigen Mittel (sonst wie Abb. 2a).

Ende Januar 2003 wurde, ausgehend von diesen Abbildungen, als Beispiel folgende Aussage getroffen:

„Unter der Voraussetzung, dass diese Analoga Fortbestand haben, können folgende Aussagen getroffen werden:

Zum SOI-Index: Der monatliche SOI-Index bleibt bis einschließlich April 2003 noch negativ, d.h. das mäßige El-Niño-Ereignis dieses Winters dauert bis zum April 2003 an. Dann erfolgt bis etwa zum Juli 2003 ein relativ rascher Übergang zu einem Zeitabschnitt mit Werten um oder über Null (also Übergang zu neutralen Verhältnissen in der SO oder auch einem La Niña-Ereignis). Dieser Zeitabschnitt reicht danach bis zum November 2003. Danach setzen größere Fluktuationen ein, mit negativen Werten im Dezember, höheren im Januar 2004 und niedrigeren im Februar 2004. Möglicherweise nähern wir uns hier der Grenze des Fortbestandes der Analoga und damit der Grenze der Vorhersagbarkeit.

Zur Temperatur (Mitteleuropa): Für den Zeitraum bis August 2003 bleibt die starke Tendenz zu positiven Abweichungen bestehen mit einer mittleren positiven Abweichung von 1.5 K. Zum September hin erfolgt dann ein rascher Übergang zu einem Zeitabschnitt mit normalen bis zu niedrigen Temperaturen, der bis einschließlich Dezember 2003 besteht (im Mittel mit einer Abweichung um 0 K oder wenigen Zehnteln K im negativen Bereich).

Zum Niederschlag (Deutschland): Vom Januar bis einschließlich März überwiegt die Tendenz zu erhöhten Niederschlagsmengen. Vom April bis einschließlich August überwiegt die Tendenz zu Trockenperioden (im Mittel pro Monat mit einem Defizit von 5 bis 10 mm), eine Ausnahme könnte am ehesten der Juni 2003 darstellen. Von September bis November gibt es eine Tendenz zu wesentlich erhöhtem Niederschlag (im Mittel pro Monat 20 bis 30 mm).“

(3) Wenn man die zum Monat Juni 2002 auftretenden parallelen Analogieabstände von 11, 30, 51 und 76 Jahren als Basis verwendet und den Ergebnissen auf der Basis der parallelen Analogieabstände vom Januar 2003 (Abb. 3a bzw. 3b bezüglich SOI bzw. ΔT) gegenüberstellt, so kann man feststellen, dass schon wesentliche Teile der charakteristischen Züge der Abläufe der Vorhersage vom 01 2003 vorhanden sind, bei SOI z. B. der relative scharfe Übergang von April zu Juli 2003. Das heißt, wesentliche Züge der Vorhersage vom Januar 2003 konnten schon ein halbes Jahr früher gefunden werden, obwohl nur 50% der parallelen Analoga vom Januar 2003 schon im Juni 2002 vorhanden waren, nämlich die mit den Abständen von 11 und 51 Jahren.

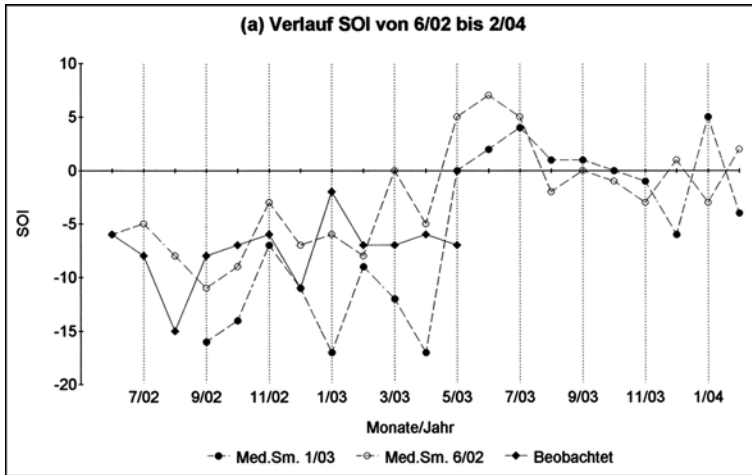


Abb. 3a: Verlauf des SOI-Medianwertes (Med.) der „parallelen Analogieabstände“ 5, 8, 11 und 51 Jahre bzw. 11, 30, 51 und 76 Jahre als wahrscheinliche Vorhersagewerte vom Stichmonat Januar 2003 (Sm. 1/03) bzw. vom Stichmonat Juni 2002 (Sm. 6/02) an im Vergleich mit dem Verlauf der eingetretenen, d.h. beobachteten Werte.

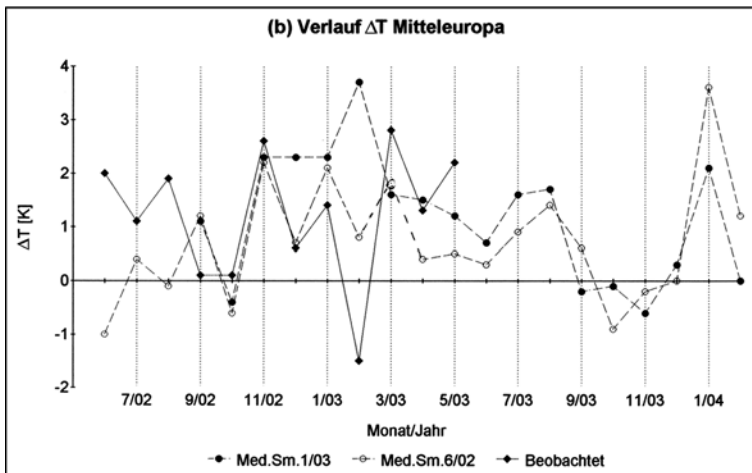


Abb. 3b: Wie Abb. 3a, aber an Stelle der SOI-Werte die mitteleuropäischen Monatstemperaturabweichungen betreffend.

Der eingetretene Verlauf entspricht in beiden Fällen (Abb. 2 und Abb. 3) bei SOI und ΔT über weite Strecken etwa dem Verlauf der Medianwerte der je-

weils 4 parallelen Analoga (bei ΔR ist das weniger klar), obwohl es auch einige deutliche Ausreißer gibt, z.B. hinsichtlich der Temperatur beim Februar 2003. Aber Treffer bei einer einzelnen Vorhersage (auch wenn sie sich wie hier aus Teilvorhersagen über mehrere Monate zusammensetzt) können leicht das Werk des Zufalls sein. Es muß eine größere Zahl von Fällen getestet werden.

(4) Ich habe deshalb aus dem Zeitraum von 1992 bis 2001 achtzehn hinreichend getrennte Stichtermine genommen (so dass verfälschende Persistenzeffekte weitgehend vermieden werden), die als erste Vorhersagemonate nach dem Auftreten neuer Gruppen paralleler Analogieabstände in der Δ - und der SOI-Reihe infrage kommen. Mit den diesen Stichmonaten zugeordneten parallelen Analogieabständen habe ich dann zu jedem Vorhersagemonat jeweils vom 4. Vormonat bis zum 24. Folgemonat aus den Medianwerten der Analoga „Vorhersagen“ nachträglich konstruiert. Das Ergebnis zeigt Abb. 4.

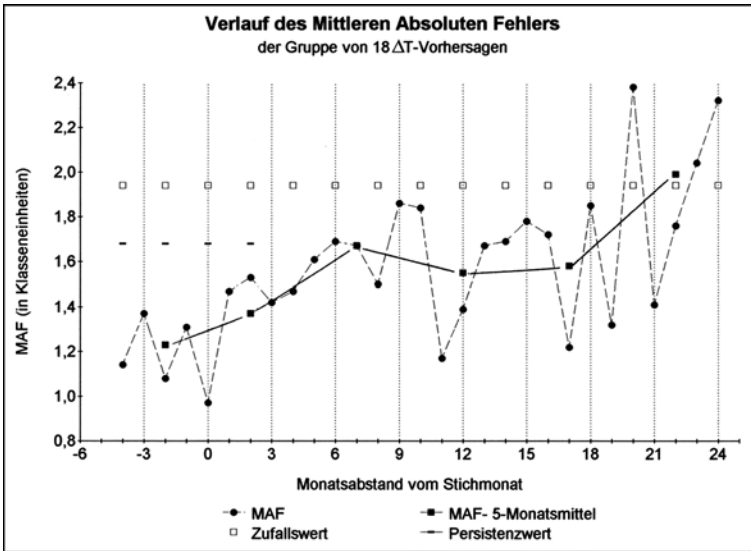


Abb. 4: Die gestrichelte Linie gibt den Verlauf des Mittleren Absoluten Fehlers (MAF) der zu den 18 Stichmonaten gewonnenen Vorhersagen der Monatstemperaturabweichungen (Mediane) aus den jeweilig vorhandenen „parallelen Analogieabständen“ in Abhängigkeit vom Abstand zum Stichmonat. Die ausgezogene Linie verbindet die Mittelwerte der MAF über jeweils 5 Monate. Der MAF von Zufallsvorhersagen der Monatsmitteltemperaturabweichungen in Sextilen ist durch die mit offenen Kästchen markierte lange Horizontale markiert. Die kürzere gestrichelte Horizontale kennzeichnet den MAF einer einmonatigen Persistenzvorhersage.

Die gestrichelte Kurve gibt den Mittleren Absoluten Fehler (MAF) der Vorhersagen für jeden Monat (gemittelt aus den 18 Fällen an), die aus längeren geraden Stücken zusammengesetzte Kurve widerspiegelt den Verlauf der Mittel über jeweils 5 Monate. Die obere, aus leeren Kästchen bestehende Horizontale gibt den MAF einer Zufallsvorhersage (bei Verwendung einer Sextil-Klasseneinteilung), die tiefer gelegene kürzere Horizontale den MAF-Wert einer Persistenzvorhersage für jeweils einen Monat. Die Abbildung zeigt, dass der MAF einer Zufallsvorhersage erst nach etwa 22 Monaten erreicht wird. Bis dahin haben die mit den parallelen Analogieabständen gewonnenen Vorhersagen einen niedrigeren MAF.

(5) Es wurden mit dem Ensembleanalysator parallel zur ΔT -Reihe auch die Reihen der zeitlichen Ableitungen ΔDT und ΔDR sowie die Reihe der Nordatlantischen Oszillation (NAO), die eine Schwankung des Luftdrucks zwischen Südwest-Island und etwa Gibraltar ist, untersucht. Die Reihen der zeitlichen Ableitungen geben gelegentlich Beiträge zum Auftreten von parallelen Analogabständen. Hinsichtlich der Nordatlantischen Oszillation wurden Daten benutzt, die von Jones (Jones, P.D., et al. 1997) bereitgestellt und über das Internet auf dem Laufenden gehalten werden. Der Effekt der NAO-Reihe ist erstaunlich schwach und liefert kaum Beiträge für großräumigere Analogien. Vermutlich kann man aus dem gegensätzlichen Verhalten von SO und NAO schließen, dass die Tropen einen großräumigeren Einfluss bei der Bildung von Analoga und Analogieabständen haben als die höheren Breiten, was wohl nicht nur mit der größeren Fläche, die die Tropen einnehmen, sondern vor allem mit dem größeren Energieumsatz zusammenhängt. Ein eventueller Einfluss der Sonnenaktivität, der durch das Auftreten von entsprechenden Analogieabständen wie z.B. 10, 11, 43, 55, 89 und um 110 Jahre nahegelegt wird, dürfte sich wahrscheinlich auch über die Tropen abwickeln.

IV Weitere Anwendungen und Schlussfolgerungen:

(1) Die genauere Betrachtung der oben erwähnten 18 untersuchten Fälle gibt unter anderem Hinweise, die weiteres prognostisches Potential betreffen, die aber in diesem Beitrag nicht im Detail verfolgt werden, z.T. auch weil das behandelte Material noch nicht umfangreich genug ist:

- Über die aufeinanderfolgenden behandelten Fälle lässt sich, wie schon in III an einem Beispiel erwähnt ist, verfolgen, wie sich bestimmte charakteristische Züge des Ablaufs der Vorhersage (z.B. des SOI und der Monatsmitteltemperatur über Mitteleuropa) mit der Zeit entwickeln.

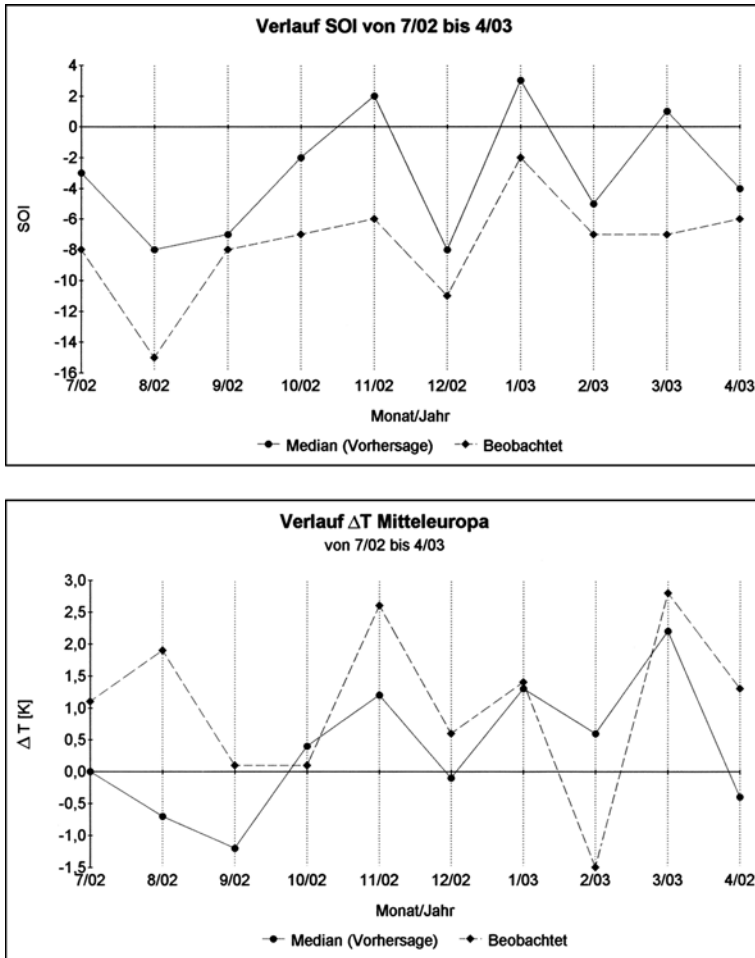


Abb. 5: Ein Zeitabschnitt positiver Korrelation im Winterhalbjahr 2002/2003 zwischen den Verläufen des SOI (oben) und den Abweichungen der mitteleuropäischen Monatsmitteltemperatur ΔT (unten) aus dem Ablauf der „parallelen Analoga“ 90, 12, 32, 1 und 72, die zum Stichmonat Oktober 2001 gefunden wurden.

- Von besonderem Interesse sind dabei sprunghafte positive und negative Änderungen des SOI und das zeitweilige Auftreten einer 2-monatigen Periode sowohl bei SOI wie bei der Temperatur Mitteleuropas über einige Monate hinweg. Das letztere will ich hier an einem Beispiel illustrieren (Abb. 5). Erstaunlicherweise wird mit den parallelen Analogieabständen

vom Oktober 2001, das sind 90, 12, 32, 1 und 73 Jahre, für das Winterhalbjahr 2002/2003 eine hohe positive Korrelation zwischen dem Ablauf des SOI und der mitteleuropäischen Temperaturanomale sowohl für die Vorhersagen wie auch für die eingetroffenen Werte erreicht, und zwar besonders deutlich zwischen Oktober 2002 und Februar 2003. Stärkere El-Niño-Erscheinungen sind in diesem Fall unerwarteter Weise mit niedrigeren Temperaturen in Mitteleuropa verbunden.

- Merkbliche Änderungen des Verlaufs von SOI (insbesondere dauerhafter Wechsel des Vorzeichens) konzentrieren sich auf den Übergang von April zu Mai, relativ hoch ist die Häufigkeit auch bei den Übergängen von Februar zu März und von November zu Dezember. Sehr selten sind merkbliche Änderungen beim Übergang vom Januar zum Februar und beim Übergang vom Juli zum August.
- Es gibt Anzeichen dafür, dass bestimmte Änderungen des SOI mit einer Verzögerung um 4 bis 7 Monate von charakteristischen Änderungen der mitteleuropäischen Temperatur gefolgt werden, zum Beispiel gibt es Fälle, wo der Abbruch des El Niño im Frühjahr von einer Abkühlung in Mitteleuropa etwa 5 Monate später gefolgt wird, womit dann für einige Zeit ein niedrigeres Plateau erreicht wird.
- Parallele Analogieabstände mit einem relativ geringen Abstand oder/und mit einem ganzen Vielfachen des Sonnenfleckenzyklus haben häufig eine relativ hohe Vorhersagegüte.

(2) In diesem Abschnitt möchte ich noch ein wahrscheinlich weiteres wichtiges Ergebnis vorstellen. Da bisher verschiedentlich gezeigt werden konnte (siehe auch Böhme 1998 und 1999 sowie Böhme et al. 2001), dass sich die mit Hilfe der Anwendung der Ensemblemethode auf statistische Verfahren festgestellten Analogien für die mehrmonatige Vorhersage der mitteleuropäischen Mitteltemperatur eignen, war es naheliegend, zu versuchen, erkannte Analoga (als Analogieabstände) auch für mittelfristige Witterungsvorhersagen über einige 10-Tagebereiche bis zu etwa 2 Monaten anzuwenden. Ich hatte dies bisher schon mehrfach ohne wesentlichen Erfolg versucht.

Das Problem, das dabei zum Hindernis wird, besteht darin, dass eine große Anzahl gleichberechtigter Analoga aus dem Ablauf der mitteleuropäischen Witterung über die (jeweils) letzten 5 Tage (im folgenden der Kürze halber Witterungsanaloga bzw. Witterungsanalogieabstände genannt) angegeben werden kann, von denen viele nur kurzen Bestand, einige wenige aber eine lange Lebensdauer haben. Welche sind es aber, die eine solche Eigenschaft haben? Die Antwort liegt jetzt schon nahe.

Zuvor halte ich es der Klarheit halber für zweckmäßig, einige Erläuterungen zur Bestimmung der Witterungsanaloge einzuflechten. Diese Witterungsanaloge können z.B. auf folgender Basis objektiv bestimmt werden: In Betracht gezogen werden über die 5 einzelnen Tage die „3 Elemente“ Temperatur, Niederschlag und Großwetterlage. Die Bewertung der Ähnlichkeit wird für jedes Element auf objektive Weise vorgenommen, wobei die Einzelheiten hier jetzt nicht aufgeführt werden. Bei voller Ähnlichkeit bringt jedes Element für einen Tag den Wert 1 ein. Wenn die volle Ähnlichkeit bei allen 3 Elementen über 5 Tage besteht, ist die Ähnlichkeit maximal und hat den Wert 15; natürlich lässt sich das auch in Prozent ausdrücken.

Nachdem es nunmehr aus theoretischen Gründen und mit der gesammelten Erfahrung von parallelen Analogieabständen bei verschiedenen Monats-Zeitreihen aus unterschiedlichen Regionen sicher erscheint, dass vor allem weiträumig verbreitet auftretende Analogieabstände stabil sind und eine relativ hohe Lebensdauer haben, müssten jetzt Fortschritte bei der Lösung dieser Aufgabe zu erreichen sein. Dass es so ist, kann tatsächlich gezeigt werden, wenn man die oben erwähnten Witterungsanaloge mit den parallelen Analogien der SOI und der mitteleuropäischen Monatstemperaturzeitreihen vergleicht: Diejenigen Witterungsanomalien sind auszuwählen und für die längerfristige Witterungsvorhersage zu nutzen, die auch bei den beiden genannten Monatsdatenreihen über einige Monate hin auftreten. *Diese Witterungsanalogien können als großräumig gestützte Witterungsanalogien bezeichnet werden (gA).* Der Vergleich der relativen Häufigkeit der gA zur Gesamtzahl der aufgetretenen Witterungsanomalien oberhalb eines bestimmten (von Fall zu Fall unterschiedlichen) Ähnlichkeitswerts erweist sich als signifikant größer als die durch Zufall zu erwartende Häufigkeit.

Diese Aussagen werden im folgenden an einem Beispiel erläutert. Das Beispiel umfasst die 12 Fälle von 5-Tagezeiträumen der Monate April und Mai 2003. Für den April waren die folgenden 9 parallelen Analogieabstände 5, 8, 10, 11, 22, 29, 43, 51 und 55 Jahre gültig, für den Mai kamen noch die Analogieabstände 1 und 4 Jahre hinzu. Für die erste Pentade des April traten unter den 23 Fällen von Witterungsanalogen 3 auch als parallele Analogieabstände, d.h. als großräumig gestützte Witterungsanalogien (nämlich 55, 29 und 22; 55 dabei mit dem Ähnlichkeitswert 15) auf. Die relative Häufigkeit betrug $3/23 = 0.130$. Wir können wieder das Prinzip der im Abschnitt III (1) vorgenommenen Abschätzungen verwenden: Danach durfte bei einer Anzahl von 30 oder weniger Fällen bei einer zugelassenen Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 oder weniger Prozent gerade noch ein Mal ein paralleles Analogon auf-

treten. Wir haben hier aber 3, so dass es sehr wenig wahrscheinlich ist, dass es sich um Zufall beim Auftreten der parallelen Analoga handelt. Bei den 12 Fällen von April und Mai 2003 ergab sich im Mittel für das Auftreten von Analoga, die auch unter den parallelen Analoga vorkamen, also als großräumig gestützt zu bezeichnen sind, ein Durchschnittswert von 3,67 Fällen mit einer Streuung s von 1,23 Fällen. Die Vertrauensgrenzen des Durchschnitts der 12 Werte für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% sind dann 2,53 und 4,37 Fälle. Der Durchschnitt des Auftretens paralleler Analoga liegt also mit hoher Wahrscheinlichkeit deutlich höher als 2. Damit wird unterstützt, dass die ausgewiesenen g_A für Witterungsvorhersagen infrage kommen:

Zum Beispiel ergab sich zum 30.4.2003 unter Verwendung der großräumig gestützten Analogieabstände 1, 5, 10, 11, 22 und 55 Jahre die Aussage für den Berliner Raum:

„Unter der Voraussetzung, dass die gegenwärtigen großräumig gestützten Analogien bestehen bleiben, wird die gegenwärtige meist relativ warme und antizyklonale Witterung mit südlicher Komponente etwa bis zum 9.Juni (Pfingsten) fort dauern, etwas häufiger treten Niederschläge vom 24. Mai an auf. Um Pfingsten findet der Übergang zu einer kühleren und feuchteren Westwetterlage statt, die dann vom 23.Juni an über eine Nordlage zu einer schwachgradientigen Lage über Mitteleuropa (anfangs eher Hoch Mitteleuropa, später eher Tief Mitteleuropa) führt“.

(3) Nun noch einige Empfehlungen für weitere Arbeiten (unter Berücksichtigung von Vorschlägen in der Diskussion zu diesem Vortrag):

- a) Zunächst sollte ein größeres Kollektiv solcher Witterungsvorhersagen geschaffen bzw. betrachtet werden, um den Gewinn an Information abzuschätzen, der mit den Vorhersagen unter Nutzung der großräumig gestützten Witterungsanalogien erhältlich ist.
- b) K. Lanius schlug vor, dass die vorgestellte Methode zur Untersuchung der Auswirkung der Südlichen Oszillation als weiterer Test auf meteorologische Zeitreihen aus Gebieten, in denen eine klassische Auswirkung der SO bekannt ist, angewandt werden sollte.
- c) K. Bernhardt schlug vor, dass die verwendeten Zeitreihen einer Wavelet-Analyse oder einer Maximum-Entropie-Spektralanalyse unterzogen werden, unter anderem um zu klären, ob die gefundenen parallelen Analoga sich auch mit diesen Methoden finden lassen.
- d) Die Ergebnisse lassen es geraten erscheinen, vordringlich zu prüfen, ob parallele Analogien auch zwischen der Sonnenaktivität und irdischen Zirkulationsvorgängen bestehen.

e) Die nachgewiesene Existenz von parallelen Analogieabständen in der Erdatmosphäre und ihre hohe praktische Bedeutung stellen eine Herausforderung an die weitere Entwicklung numerischer Wetter- und Klimamodelle dar. Mit Lösungen von zukünftigen Modellen sollte ebenfalls die Existenz paralleler Analogieabstände in unterschiedlichen, mit solchen Modellen gewonnenen Zeitreihen nachweisbar sein.

f) Aus den anfangs gegebenen grundsätzlichen Überlegungen zum Verhalten der Atmosphäre als ein komplexes dynamisches System und aus den Erfahrungen, die an praktischen Anwendungsbeispielen gesammelt wurden, kann man folgern, dass das Auftreten paralleler Analoge auch in anderen komplexen dynamischen Systemen mit Selbstorganisation für prognostische Aussagen genutzt werden kann, wenn das System nur ausgedehnt genug und eine Kopplung der Teilsysteme vorhanden ist.

Literatur

- Ångström, A., 1953: Teleconnections of climate changes in present time. *Geografiska Annaler*, 17, 242–258.
- Baur, F., 1962: Abweichungen der Monatsmittel der Temperatur Mitteleuropas. -In Linke: *Meteorologisches Taschenbuch Neue Ausgabe I*, Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig, 740–745.
- Baur, F., 1975: Abweichungen der Monatsmittel der Temperatur Mitteleuropas vom 210jährigen Mittelwert 1761–1970 in °C. Als Beilage zur Berliner Wetterkarte des Instituts für Meteorologie der Freien Universität Berlin 76/75, Tabelle 1 vom 24.6.1975.
- Berlage, H.P., 1957: Fluctuations in the general atmospheric circulation of more than one year, their nature and prognostic value. *Mededlingen en Verhandelingen Nr. 69*, Koninklijk Meteorologische Instituut, Nederlande.
- Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review* 97, 163–172.
- Blanford, H.F., 1880: On the barometric seesaw between Russia and India. *Nature* Nr.21.
- Böhme, W., 1965: Statistische Methoden in der atmosphärischen Dynamik und der Wettervorhersage. *Zeitschrift für Meteorologie*, Band 17, Supplementheft, 53–62.
- Böhme, W., 1993: Untersuchungen zur Reaktion des Klimasystems auf große vulkanische Eruptionen mittels Phasenebenen-Darstellungen. *Meteorol. Zeitschrift N.F.* 2, 76–80.
- Böhme, W., 1994: Comparison study of the response of the climate system to major Volcanic eruptions and El Niño events. In: Grasman, J., van Straten, G. (Hrsg). *Predictability and nonlinear modelling in natural sciences and economics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 65–85.

- Böhme, W., 1998: Atmosphärische Zirkulation und Chaos. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 24, Heft 5, 151–182.
- Böhme, W., 1999: Anwendung der Methoden der Ensemblevorhersage bei komplexen dynamischen Systemen auf statistische Verfahren. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 30, 145–151.
- Böhme, W., Enke, W., und Witt, A., 2001: Ein Zugang zur Langfristvorhersage mittels Nutzung von Ensembles unterschiedlicher Projektionen des Phasenraumes? Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologische Tagung 18. bis 21. September 2001. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik, Heft Nr. 27/Publ.-Nr. 399.
- Bureau of Meteorology, Australia: Southern Oscillation Index 1876 to present. <http://www.bom.gov.au/climate/current/sointml.shtml>.
- De Bort, T., 1880: Étude sur les causes qui de'terminant la circulation de l'atmosphère. Ass. Franc. pur l'Ado. des Sci., Congress de Reims, Nr.44.
- Diaz, H.F. und Markgraf, V. (Hrsg.), 1992: El Niño, historical and paleoclimatic aspects of the southern oscillation. Cambridge University Press, 476 S.
- Ebeling, W., 1994: Entropie, Vorhersagbarkeit und nichtlineare Dynamik. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Heft 1 / 2, 33–50.
- Ebeling, W., und Lanius, K., 2000: Zur Vorhersagbarkeit komplexer Prozesse. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 42, Heft 7, 5–26.
- Fortak, H., 1982: Meteorologie. Dietrich-Reimer Verlag, Berlin, 294 S.
- Gassmann, F., 1991: Chaos und Ordnung in natürlichen Systemen. In K.Hutter (Hrsg.): Dynamik umweltrelevanter Systeme. Springer-Verl. Berlin Heidelberg New York, 369–420.
- Glantz, M.H., Katz, R.W. und Nicholls, N. (Hrsg.), 1991: Teleconnections linking worldwide climate anomalies. Cambridge University Press, 535 S.
- Graf, H.-F., 1991: Telekonnektionen und el Niño/Südliche Oszillation (ENSO). In Hupfer, P. (Hrsg.). Das Klimasystem der Erde. Akad. Verlag, Berlin, 145–156.
- Hann, J., 1890: Zur Witterungsgeschichte von Nordgrönland, Westküste. Meteorologische Zeitschrift 7, 109–115.
- Hildebrandsson, H.H., 1897: Quelques recherches sur les centres d'action de l'atmosphère. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, Nr.29, 33 S.
- Jones, P.D., Jonsson, T. und Wheeler, D., 1997: Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. Int. J. Climatol 17, 1433–1450.
http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm
- Kiladis, G.S. und Diaz, H.F., 1989: Global climatic anomalies associated with extremes of the Southern Oscillation. Journal of Climate, 2, 1069–1090.
- Kluge, J., 1991: Die Bjerknes'sche und die Schmauß'sche Auffassung des Problems der Wettervorhersage aus heutiger Sicht. Zeitschrift für Meteorologie 42, 65–75.
- Lorenz, E., 1963: Deterministic nonperiodic flow. J. Atm. Sci.20, 130–141.
- Ott, E., 1993: Chaos in dynamical systems. Cambridge University Press.

- Pelz, J., Rüge, U. und Schlaak, P., 1996(ff): Zur Fortführung der von F. Baur im Jahre 1975 veröffentlichten Temperaturreihe für Mitteleuropa ab 1761 und der Niederschlagsreihe für Deutschland westlich der Oder ab 1851. Beilage zur Berliner Wetterkarte des Instituts für Meteorologie der Freien Universität Berlin 50/96 vom 30.4.1996, 3 S.
- Rogers, J.C., 1984: The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Monthly Weather Review* 112, 1999–2015.
- Schönwiese, C.-D., 2000: *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Verlag Gebrüder Bornträger Berlin und Stuttgart, insbesondere S.67–72.
- Takens, F., 1981: Detecting strange attractors in turbulence. In: *Dynamical Systems and Turbulence*. Springer-Verlag Berlin 366–381.
- Taubenheim, J., 1969: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig, insbesondere S. 27–34.
- Walker, G.T., 1924: Correlation in seasonal variations of weather, IX: A further study of world weather. *Memoirs of the Indian Meteorological Department*, 24, 275–332.
- Walker, G.T. und Bliss, E.W., 1932: World weather V. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, IV, 53–84.