

Die Halbjahreswelle im Luftdruck auf der Südhalbkugel: Beobachtung und Simulation

1 Das Phänomen

Über großen ozeanischen Gebieten in den mittleren und polaren Breiten der Südhalbkugel wird die saisonale Variation des Luftdrucks nicht von der jährlichen, sondern von der halbjährlichen Schwingung dominiert. Dies wird in Abbildung 1 demonstriert, in der langjährig gemittelte Jahressgänge an den Positionen einiger atlantischer und pazifischer Wetterschiffe, von Inselpositionen in den südlichen Ozeanen und von Stationen am Rande der Antarktis gezeigt werden.

An den nordhemisphärischen Wetterschiffpositionen in mittleren Breiten (Abb. 1a) wird die saisonale Variation, abgesehen von zufälligen Monat-zu-Monat-Fluktuationen, im wesentlichen durch die jährliche Schwingung beschrieben, mit minimalen Druckwerten im Nordwinter, d. h. Dezember – Februar, und maximalen Druckwerten im Nordsommer. Die jährlichen Druckkurven der südhemisphärischen Stationen (Abb. 1b) dagegen werden durch zwei Maxima und zwei Minima geprägt. In den mittleren Breiten (Chatham, New Amsterdam und Gough Islands) treten maximale Druckwerte in den Übergangsjahreszeiten auf und Druckminima in den Extremjahreszeiten. In polaren Breiten (Argentine Island, Mawson) ist die Situation umgekehrt: minimale Werte im Herbst und Frühling, maximale im Sommer und Winter.

Die hemisphärische Darstellung der Amplitude, der Phase und des prozentualen Anteils der durch die halbjährliche Schwingung erklärten Varianz des mittleren Jahressgangs des auf Meeressniveau reduzierten Bodendruckes (SLP) – im folgenden kurz: erklärte Varianz – in Abbildung 2 zeigt eine klare Struktur: Die Halbjahreswelle tritt auf mit lokalen Amplitudenmaxima von 2 bis 3 hPa über den Mitten der Ozeane in etwa 45°S und am Rande der Antarktis mit Maxima bis zu 4 hPa (Abb. 2a). Maximale Werte werden über den Ozeanen im März und September beobachtet und in polaren Breiten im Juni und Dezember (Abb. 2c).

In weiten Gebieten der mittleren und polaren Breiten beschreibt die Halbjahreswelle mehr als 50% der Varianz des langjährig gemittelten Jahressgangs (Abb. 2b). Die maximalen Werte sind größer als 70%. Längs des Phasensprungs bei etwa 60°S kann der Halbjahreswelle nur ein geringer Anteil der Varianz zugeordnet werden.

Der der Halbjahreswelle zugeordnete Varianzanteil auf der Nordhalbkugel (SHEA 1986; SANTER 1988) ist in der Regel kleiner als 10%. Ausnahmen sind lokale Maxima mit bis 50% im subtropischen Atlantik, und ein Gebiet über dem westlichen Nordpazifik mit 70 und mehr Prozent erklärter Varianz (Abb. 3). Regional kann dieser Effekt von Bedeutung sein, aber wir beschränken uns im folgenden auf die Südhemisphäre.

Neben der „punktweisen“ Beschreibung der Halbjahreswelle auf der Südhalbkugel gibt es noch eine „synoptische“ Interpretation. Das Jahresmittel der südhemisphärischen Zirkulation ist geprägt von Antizyklonen über den östlichen subtropischen Ozeanen und von einer Antizyklone über der Antarktis sowie von einem annähernd zonal-symmetrischen subpolaren Trog (Abb. 4). In der saisonalen Variation dieses Troges manifestiert sich die Halbjahreswelle: Zweimal im Jahr intensiviert sich der Trog unter Südwärtsverlagerung seines Minimums, zweimal

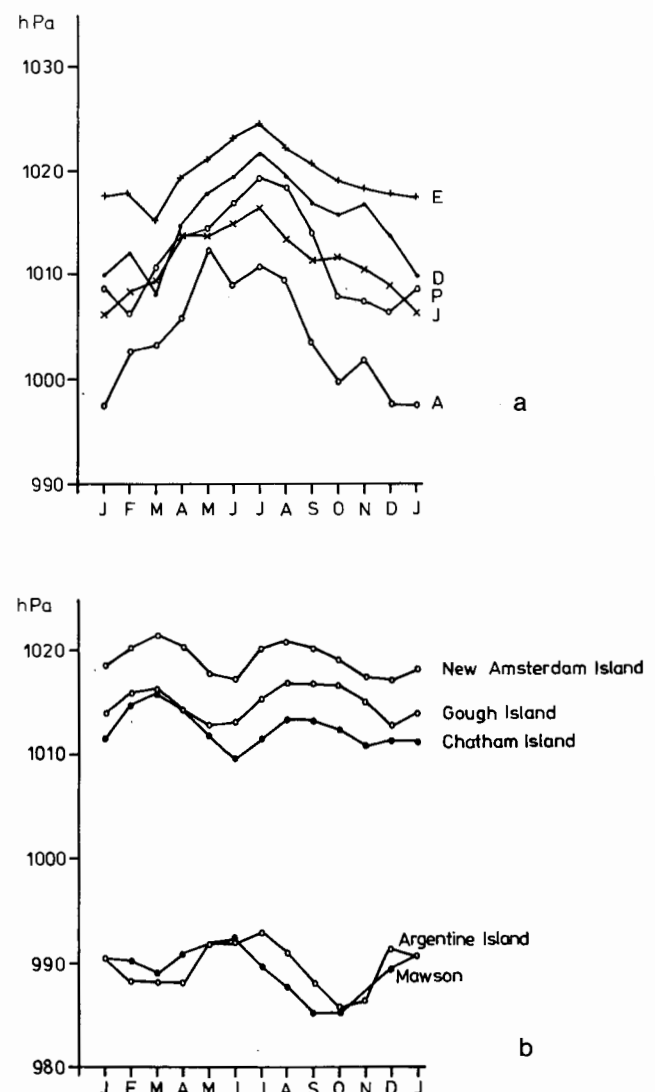


Abb. 1: Langjährig gemittelte Jahressgänge des Bodendruckes an ausgewählten Positionen. a) Nordhalbkugel: Wetterschiffpositionen A (62°N, 33°W), D (44°N, 41°W), E (35°N, 48°W), J (52°N, 25°W) und P (50°N, 145°W). b) Südhalbkugel: Chatham Island (52°S, 169°E), New Amsterdam Island (38°S, 77°E), Gough Island (40°S, 9°W) sowie Argentine Island (65°S, 64°W) und Mawson (67°S, 62°E).

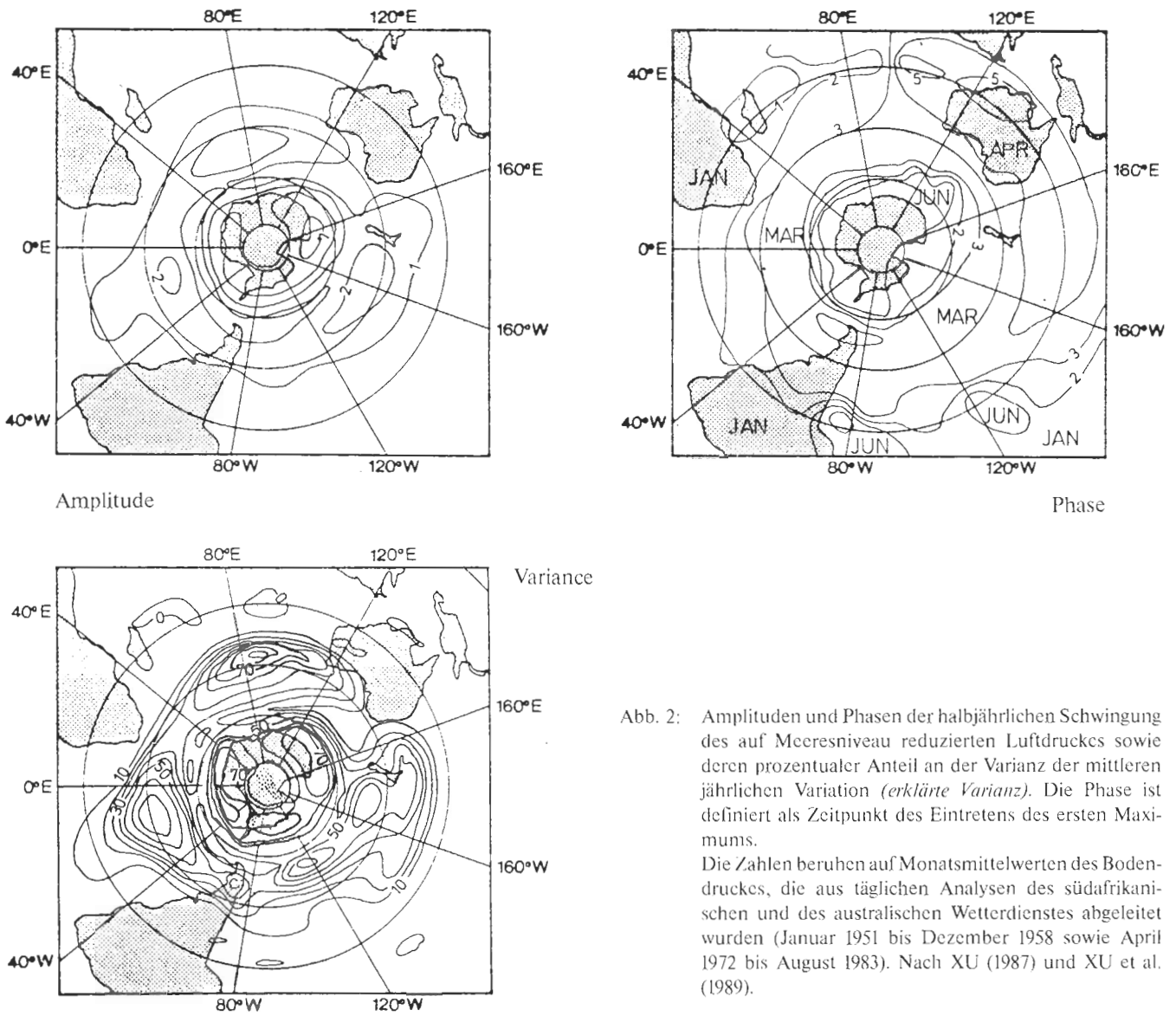


Abb. 2: Amplituden und Phasen der halbjährlichen Schwingung des auf Meeresniveau reduzierten Luftdruckes sowie deren prozentualer Anteil an der Varianz der mittleren jährlichen Variation (*erklärte Varianz*). Die Phase ist definiert als Zeitpunkt des Eintretens des ersten Maximums. Die Zahlen beruhen auf Monatsmittelwerten des Bodendruckes, die aus täglichen Analysen des südafrikanischen und des australischen Wetterdienstes abgeleitet wurden (Januar 1951 bis Dezember 1958 sowie April 1972 bis August 1983). Nach XU (1987) und XU et al. (1989).

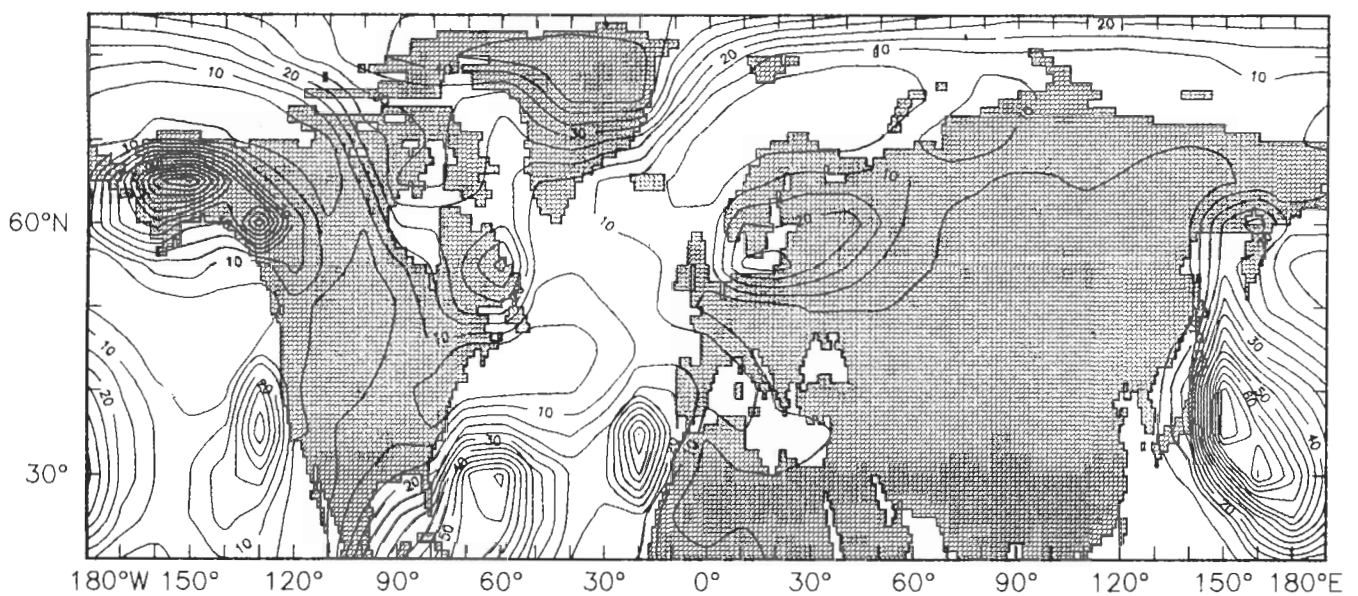


Abb. 3: Erklärte Varianz der Halbjahreswelle des auf Meeresniveau reduzierten Luftdruckes auf der Nordhalbkugel. Die Zahlen beruhen auf Daten des Britischen Wetterdienstes. Nach SANTER (1988).

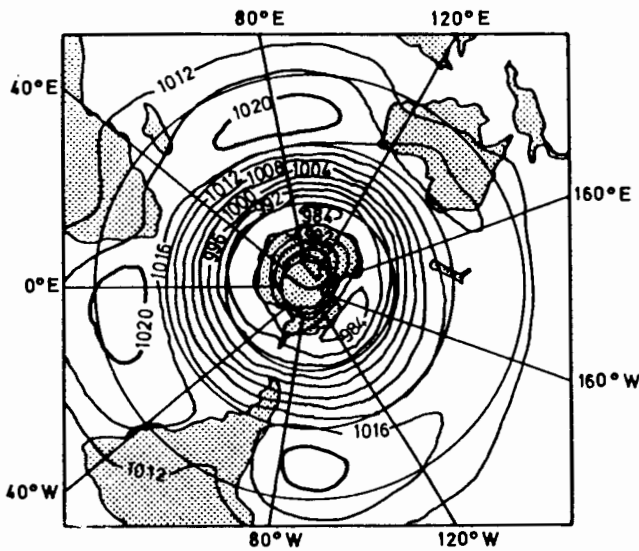


Abb. 4: Jahresmittel des Bodendrucks auf der Südhalbkugel. Nach XU (1987).

wird er abgeschwächt bei gleichzeitiger Nordwärtsverlagerung (Abb. 5). Diese meridionale Wanderung des Troges geht einher mit einer systematischen Veränderung des Druckgradienten und damit der Zonalkomponente des geostrophischen Windes nördlich und südlich des Troges: Während der Übergangsjahreszeiten (in Abbildung 5 durch das Symbol „*“ angedeutet) ist der Westwind polwärts maximal, während der Extremjahreszeiten (Symbol: „o“) (VAN LOON 1967, 1972 b, c; VAN LOON und ROGERS 1984 b) äquatorwärts maximal.

Die Dominanz der Halbjahreswelle über die Jahreswelle wird besonders klar, wenn man langjährige Mittel betrachtet. Eine Fourieranalyse der Daten einzelner Jahre ergibt relativ stärkere Beiträge der Jahreswelle, deren Phase allerdings von Jahr zu Jahr erheblich schwankt, so daß ihr Beitrag im längjährigen Mittel klein bleibt. Die Phase der Halbjahreswelle dagegen ist frei von derart starken Schwankungen (VAN LOON und ROGERS 1984a, b).

Mit der Höhe nimmt der Beitrag der Halbjahreswelle im Massenfeld ab. Im 500-hPa-Niveau wird in der Regel weniger als 10% der saisonalen Variation des extratropischen Geopotentials durch die halbjährliche Schwingung erklärt. Über einem kleinen Teil der Antarktis werden lokal größere Werte erreicht (nicht gezeigt; s. VAN LOON 1972 b u. XU 1987).

Die Halbjahreswelle erscheint auch im Bodenwindfeld und wird daher dem oberen Ozean aufgeprägt. Während des FGGE-Experiments 1979 wurde eine größere Anzahl driftender Bojen im Antarktischen Zirkumpolarstrom ausgesetzt, deren Verdriftung von LARGE und VAN LOON (1988) auf saisonale Variationen untersucht wurde. Sie fanden eine starke halbjährliche Welle in der Bojendrift mit maximalen Amplituden von einigen cm/s und eine halbjährliche meridionale Auslenkung des Antarktischen Zirkumpolarstromes. In den Sonnenwendmonaten liegt dieser näher und in den Monaten der Tag- und Nachtgleiche weiter vom Äquator entfernt als im Jahresmittel.

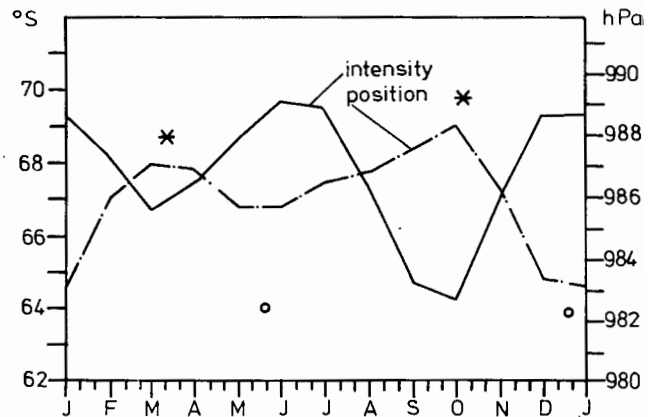


Abb. 5: Jährliche Variation der Intensität und der meridionalen Lage des subpolaren Troges des auf Meeresniveau reduzierten Luftdruckes. Während der mit „*“ bzw. „o“ markierten Phasen wird die Zonalkomponente des geostrophischen Windes polwärts bzw. äquatorwärts des subpolaren Troges intensiviert. Nach XU (1987) und XU et al. (1989).

Auch in einer 4 Jahre langen Zeitserie des Massentransportes durch die Drake-Straße, der von WHITWORTH und PETERSON (1985) aus Messungen der Druckdifferenz zwischen beiden Ufern abgeschätzt wurde, läßt sich eine deutliche Halbjahreswelle mit Amplituden in der Größenordnung von mehreren Sverdrup ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) erkennen. Zwar hat die Jahreswelle in einzelnen Jahren eine wesentlich größere Amplitude, jedoch ist die Phase von Jahr zu Jahr recht veränderlich, so daß sich ihr Anteil im langjährigen Mittel weitgehend heraushebt.

2 Die Erklärung von VAN LOON

Ein plausibler Erklärungsversuch für die Erscheinung der südhemisphärischen Halbjahreswelle wurde 1967 von van LOON veröffentlicht. Demnach hat man die Änderung des Bodendrucks im Zusammenhang mit Änderungen des meridionalen troposphärischen Temperaturgradienten zu sehen (Abb. 6).

Im Herbst und Frühling beobachtet man zwischen 50°S und 65°S Maxima und in den Extremjahreszeiten Sommer und Winter Minima des meridionalen Temperaturgradienten. Die Amplitude dieser Schwankung beträgt maximal 0.16 K/Breitengrad, womit sie von gleicher Größenordnung wie die Amplitude der jährlichen Schwingung dieser Größe ist. Die durch die Halbjahreswelle erklärte Varianz ist über weite Strecken in dem Gebiet zwischen 50°S und 65°S größer als 50% (nicht gezeigt; s. XU et al. 1989).

Der starke meridionale Temperaturgradient in den Übergangsmoaten ist verbunden mit verstärkter barokliner Instabilität und daraus resultierender Zyklogenese, die sich im Monatsmittel darstellt als eine Absenkung des Bodendrucks - d. h.: als eine Intensivierung und Südwärtsverlagerung des subpolaren Troges. In den Extremjahreszeiten dagegen ist der Grundzustand weniger baroklin instabil. Der subpolare Trog ist dann weniger stark und äquatorwärts verlagert.

An dieser Stelle ergibt sich eine interessante Konsequenz für die Wechselwirkung der Zyklonen mit dem Meereisrand. Die Häufigkeit der Zyklonen zeigt eine halbjährige Variation, der Eisrand aber wird fast ausschließlich durch eine jährliche Schwingung beschrieben. Es erscheint daher vernünftig zu postulieren, daß die meridionale Lage des Eisrandes und die Häufigkeit von subpolaren Zyklonen kaum miteinander verknüpft sind (VAN LOON 1967).

Die halbjährliche Variation des meridionalen Temperaturgradienten führt VAN LOON zurück auf ungleichmäßige Erwärmungen und Abkühlungen der Ozeanoberfläche und des Kontinentaleises. Der saisonale Gang der Ozeanoberflächentemperatur wird fast vollständig durch eine Jahreswelle beschrieben. Diese Größe nimmt ihre Extreme bis zwei Monate nach den Strahlungsextremen an, also ungefähr Ende Februar und August, was auf die thermische Trägheit des Ozeans zurückzuführen ist. Die Oberflächentemperatur des Antarktischen Eises dagegen weicht in charakteristischer Weise von einer (harmonischen) Jahreschwingung ab: Es gibt zwar ein Minimum im Winter und ein Maximum im Sommer. Das Sommermaximum tritt fast gleichzeitig mit dem Strahlungsmaximum ein, das Winterminimum aber erst am Ende der Polarnacht (*kernloser Winter*). Die Abkühlung von Sommer zum Winter geschieht verhältnismäßig langsam von Januar bis September, dagegen geht die Erwärmung von September bis Dezember recht schnell vonstatten. Diese breitenabhängige Temperaturänderung führt in der Troposphäre zu minimalen Nord-Süd-Temperaturgegensätzen in den Extremmonaten und zu maximalen Gegensätzen im März und Oktober.

3 Simulation

Modelle der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation (GCMs) erheben den Anspruch, die wesentlichen Elemente der atmosphärischen Zirkulation als Resultat interner Dynamik und externer Zwangsbedingungen nachzubilden.

Diese an vielen Instituten vorgehaltenen Modelle sind historisch aus Wettervorhersagemodellen hervorgegangen, wobei naturgemäß besonderer Wert auf die mittleren Breiten der Nordhemisphäre gelegt wurde, weil die führenden Wetterdienste sich in diesem Gebiet der Erde befinden. Insofern ist es nicht verwunderlich, daß viele dieser im Klimamodus (im Gegensatz zum Vorhersagemodus) eingesetzten GCMs erfolgreicher bei der Simulation der nordatlantischen Aktionszentren Islandtief und Azorenhoch sowie des winterlichen Aläutentiefs sind als bei der Simulation des südhemisphärischen subpolaren Troges. Systematische Untersuchungen zum Erfolg von GCMs auf der Südhalbkugel gibt es kaum, und die halbjährliche Welle, die nicht einfach als Reaktion auf Gebirge und Land-See-Verteilung verstanden werden kann, ist bisher gar nicht behandelt worden.

Wir haben versucht, diese Lücke zu schließen und vier der führenden GCMs auf ihre Fähigkeit untersucht, die südhemisphärische Zirkulation und deren halbjährliche Variation nachzuempfinden (XU 1987; STORCH u. XU 1987; XU et al. 1989): das in Hamburg installierte *T21-Modell* des EZMW (*T21*; FISCHER 1987), das Modell des kanadischen Wetterdienstes (CCC; BOER et al. 1984), das *Climate Community Model* des National Center for Atmospheric Research (NCAR; MEEHL 1988) und das Modell des Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL; MANABE u. HAHN 1981).

Diese Modelle sind verschieden erfolgreich in der Simulation der gemittelten südhemisphärischen Zirkulation, wie Abbildung 7 anhand der Januarmittel des auf Meeressniveau reduzierten Bodendrucks (im folgenden kurz: Bodendruck) demonstriert. In den meisten Modellrechnungen entwickeln sich korrekterweise Antizyklonen über den subtropischen Ozeanen und über der Antarktis, die durch einen subpolaren Trog getrennt sind. Der mit dem subpolaren Trog verbundene Meridionalgradient des Bodendruckes wird aber von allen Modellen außer dem des CCC z. T.

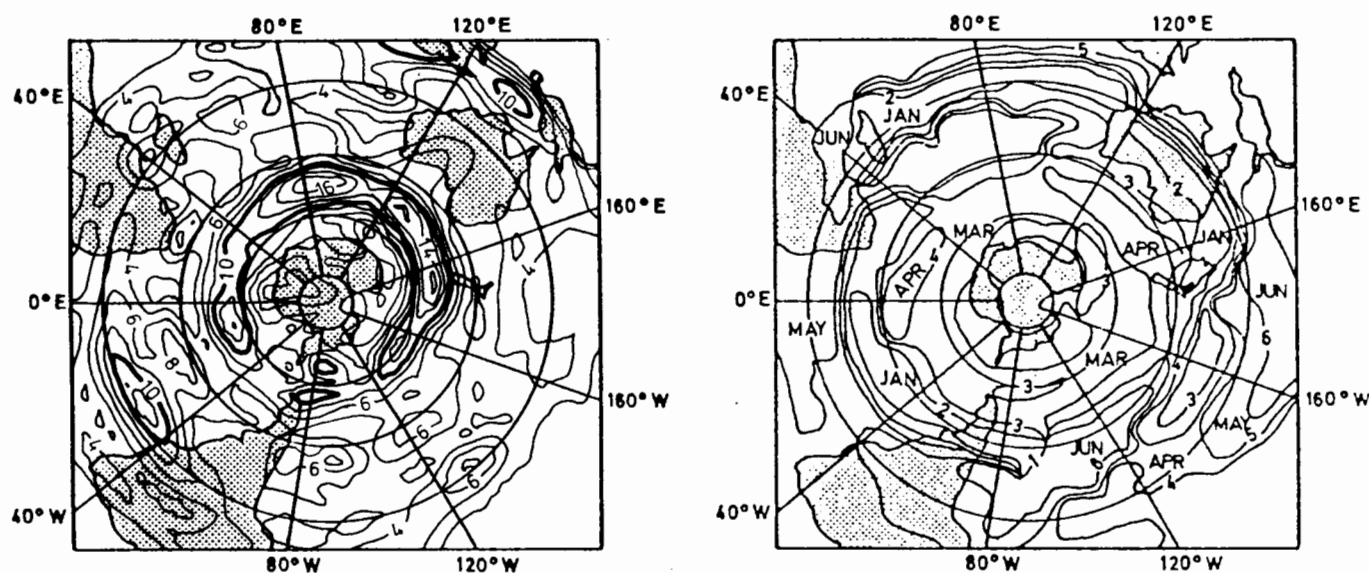


Abb. 6: Amplituden (li.) und Phasen (re.) der halbjährlichen Welle des meridionalen Temperaturgradienten im 500 hPa Niveau. Einheiten der Amplitude: $10^{-2} \text{K}/^\circ \text{Breitengrad}$. Die Abbildung beruhen auf Monatsmittelwerten der 500 hPa Temperatur, die für den Zeitraum April 1972 bis August 1983 vom australischen Wetterdienst zusammengestellt wurden. Nach XU (1987) und XU et al. (1989).

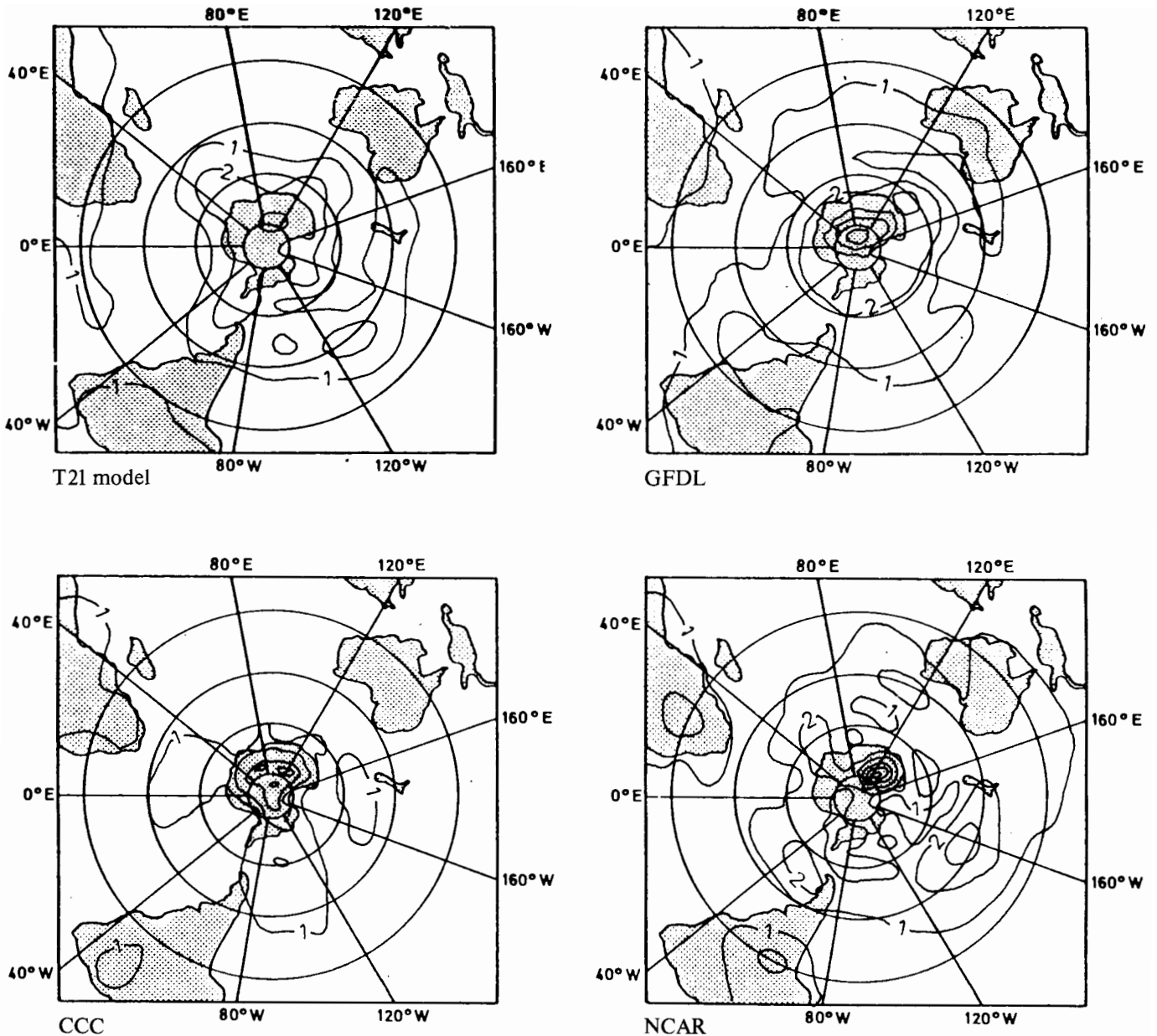


Abb. 8: Amplituden der Halbjahreswelle des auf Meeresniveau reduzierten Luftdruckes in den Simulationen mit dem T21-, dem CCC-, dem NCAR- und dem GFDL GCM. Einheiten: hPa. (T21 = Hamburger Version des ECMWF Modells; CCC = Canadian Climate Centre, Toronto; NCAR = National Center for Atmospheric Research, Boulder; GFDL = Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton).

empfunden. Die drei sekundären Maxima über den Ozeanzentren längs 40°S werden nur teilweise von den Modellen simuliert. Das charakteristische Phasenmuster (Abb. 2) mit Maxima im März äquatorwärts von 60°S und Maxima im Juni polwärts von 60°S erscheint nur sehr schwach im GFDL Modell.

4 Historie

Nach VAN LOON (1967) findet man Hinweise auf die südhemisphärische Halbjahreswelle in der Literatur seit Mitte der 30er Jahre, wobei auch deutsche Autoren einen erheblichen Anteil beigetragen haben: REUTER (1936), MEINARDUS (1938), WAHL (1942), VOWINCKEL (1955), SCHWERDTFEGER und PROHASKA (1956a, b), HOF-

MEYR (1962) und SCHWERDTFEGER (1962). Seit Ende der 50er Jahre konnte das Bild aufgrund der seit dieser Zeit zuverlässiger und vollständiger werdenden Analysen immer genauer gezeichnet werden. Gerade die internationalen Großexperimente IGY und FGGE haben zu einer Verbesserung unserer Kenntnisse von der südhemisphärischen Zirkulation geführt. Die 1972 von der *American Meteorological Society* veröffentlichte Monographie *Meteorology of the Southern Hemisphere* mit ihren Beiträgen von VAN LOON (1972a, b, c) über das Erscheinungsbild der Halbjahreswelle in der Temperatur-, Druck- und Windverteilung kann auch heute noch als Standardwerk angesehen werden.

Literatur

- BOER, G.; N. A. McFARLANE; R. LAPRISE, 1984: The climatology of the Canadian Climate Centre General Circulation Model as obtained from a five-year simulation. – *Atmosphere-Ocean* 22, S. 430–473.
- FISCHER, G., 1987: Climate Simulations with the ECMWF T21-model in Hamburg. – Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Large Scale Atmospheric Modelling Report 1.
- HOFMEYR, W. L., 1957: Atmospheric sea-level pressure over the antarctic. – *Meteorology of the Antarctic*, Weather Bureau, Pretoria, S. 51–70.
- LARGE, W. G.; H. VAN LOON 1988: Large scale, low frequency motions of the 1979 FGGE drifting buoy array and of the winds on the Southern Hemisphere. – *J. Phys. Oceanogr.* (im Druck).
- MEEHL, G. A., 1988: The annual cycle at mid- and high latitudes: observations and GCM simulations. – eingereicht bei *Mon. Wea. Rev.*
- MEINARDUS, W., 1938: Klimakunde der Antarktis. *Handbuch der Klimatologie*, IV, Berlin, Gebr. Bornträger, 133 S.
- REUTER, F., 1936: Die synoptische Darstellung der halb-jährlichen Druckwelle. – *Veröff. Geophys. Inst. Univ. Leipzig* 7, S. 257–295.
- SANTER, B., 1988: Validation of sea-level pressure simulated by the ECMWF T21 model for the Northern Hemisphere. – *Climate Simulations with the ECMWF T21 Model in Hamburg, Part II: Climatology and Sensitivity Experiments* (Ed.: H. v. STORCH), Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Large Scale Atmospheric Modelling Report 4.
- SCHWERDTFEGGER, W., 1962: Die halb-jährige Periode des meridionalen Temperaturgradienten in der Troposphäre und des Luftdruckes am Boden im Südpolargebiet, ihre Erscheinung und kausale Zusammenhänge. – *Beitr. Phys. Atmos.* 35 S. 234–244.
- SCHWERDTFEGGER, W.; F. PROHASKA, 1956a: Der Jahresgang des Luftdruckes auf der Erde und seine halb-jährige Komponente. – *Met. Rdschau* 9, S. 33–43.
- SCHWERDTFEGGER, W.; F. PROHASKA, 1956b: The semiannual pressure oscillation, cause and effects. – *J. Meteor.* 13, S. 217–218.
- SHEA, D. J. 1986: Climatological Atlas: 1950–1979, Surface air temperature, precipitation, sea level pressure, and sea-surface temperature (45°S–90°N). – NCAR Technical Note 269+STR.
- STORCH, H. v.; J. XU 1987: Southern Hemisphere: Comparison with observed sea level pressure. – *Climate Simulations with the ECMWF T21-model in Hamburg* (Ed.: G. FISCHER), Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Large Scale Atmospheric Modelling Report 1.
- VAN LOON, H., 1967: The half-yearly oscillation in middle and high southern latitudes and the coreless winter. – *J. Atmos. Sci.* 24, S. 472–486.
- VAN LOON, H., 1972a: Temperature in the Southern Hemisphere. – In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Ed.: C. W. NEWTON, AMS Meteorological Monographs 13/35, S. 25–58.
- VAN LOON, H., 1972b: Pressure in the Southern Hemisphere. – In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Ed.: C. W. NEWTON, AMS Meteorological Monographs 13/35, S. 59–86.
- VAN LOON, H., 1972c: Wind in the Southern Hemisphere. – In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Ed.: C. W. NEWTON, AMS Meteorological Monographs 13/35, S. 25–58.
- VAN LOON, H.; J. C. ROGERS, 1984a: The yearly wave in pressure and zonal geostrophic wind at sea level on the Southern Hemisphere and its interannual variability. – *Tellus* 36 A, S. 348–354.
- VAN LOON, H.; J. C. ROGERS, 1984b: Interannual variations in the half-yearly cycle of pressure gradients and zonal wind at sea level on the Southern Hemisphere. – *Tellus* 36 A, S. 76–86.
- VOWINCKEL, E., 1955: Southern Hemisphere weather map analysis of five-year mean pressures. – *Notos* 4, S. 17–50 u. S. 2024–2160.
- WAHL, E., 1942: Untersuchungen über den jährlichen Luftdruckgang. – *Veröff. Meteor. Inst. Univ. Berlin* 4, S. 59f.
- WHITWORTH, Y. III; u. R. G. PETERSON, 1985: Volume transport of the Antarctic Circumpolar Current from bottom pressure measurements. – *J. Phys. Oceano.* 15, S. 810–816.
- XU, J.-S., 1987: Klimatologie der Südhalbkugel. – Diplomarbeit, Meteorologisches Institut der Universität Hamburg.
- XU, J.-S., H. V. STORCH; H. VAN LOON, 1989: The performance of four spectral GCMs in the Southern Hemisphere: The January and July climatology and the semiannual wave. – Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report 24 (auch eingereicht bei *J. Climate*).

15 K. O. MÜNNICH, R. JAENICKE Luftchemische Untersuchungen an der Georg-von-Neumayer-Station

1 Einleitung

Der antarktische Kontinent ist von den anderen Kontinenten weit entfernt und nahezu völlig von Eis bedeckt. Dadurch ergibt sich die weltweit einzigartige Situation, daß es dort für die allermeisten Beimengungen der Luft in absehbarer Entfernung keine Quellen gibt. Weil viele Störeinflüsse wegfallen, sind hier luftchemisch einfachere Verhältnisse zu erwarten als anderenorts. Darüberhinaus ist das polare Eis ein zeitlich wohlgeordnetes Archiv, in dem auch die Luftbeimengungen in überschaubarer Weise gespeichert werden bzw. dort ihre Spuren hinterlassen. Wenn

man also die einzelnen Transferfunktionen aus der Atmosphäre ins Eis kennt, kann man aus der Analyse der Substanzen im Eis die entsprechenden Konzentrationen in der Atmosphäre, eventuell auch für vergangene Zeitperioden, rekonstruieren. Diese Möglichkeit stimuliert das Interesse an luftchemischen Beobachtungen in der Antarktis, aber auch an der Untersuchung der Transfer- bzw. der Depositionsprozesse.

Eben weil aber die Quellen der meisten Luftbeimengungen sehr weit entfernt liegen, sind die Konzentrationen von solchen Stoffen, die aus der Luft vergleichsweise schnell ent-