

J. LUTERBACHER, H. WANNER, S. BRÖNNIMANN

# 1 Historische Entwicklung der NAO-Forschung

## The history of scientific research on the NAO

### Zusammenfassung

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Nordatlantischen Oszillation (NAO) als Klimaschaukel nahm im 18. Jahrhundert, vorerst noch ohne instrumentelle Messungen, ihren Anfang. Sie wurde im 19. und frühen 20. Jahrhundert auf Studien zu synoptischen Zusammenhängen ausgedehnt und gipfelte in den 1920er Jahren in einer umfassenden statistischen Darstellung. In den folgenden Jahrzehnten änderte sich die Sichtweise hin zu moderneren Ansätzen zur Erklärung der dynamischen Prozesse des Phänomens. Ab Mitte der 1990er Jahre erlebte die NAO-Forschung eine Renaissance, welche sowohl durch den Science Artikel von James Hurrell als auch durch einen stark positiven Trend im NAO-Index zwischen den 1960er und Mitte 1990er Jahren ausgelöst wurde.

### Abstract

The scientific discussion on the North Atlantic Oscillation (NAO) as the climate see-saw in the North Atlantic started in the 18th century, the period with only limited instrumental information. In the 19th and 20th century researchers started to link the phenomenon to changes in the centers of action in the surface pressure. In the 1920s extensive statistical analyses were performed correlating station pressure series from the Northern Hemisphere. In the following decades the main focus was on modern approaches to understand the underlying processes of the phenomenon. From the mid-1990s the NAO research experienced a renaissance mainly due to the Science article of James Hurrell and the strongly positive winter trend in the NAO index between the 1960s and mid 1990s.

### 1 Entdeckung der Klimaschaukel zwischen Grönland und Europa

Dieser Beitrag fasst die wichtigsten Fakten zur historischen Entwicklung der NAO-Forschung zusammen. Einen Überblick von den Anfängen bis zur Gegenwart geben auch die Arbeiten von WALLACE (2000), WANNER et al. (2001) und STEPHENSON et al. (2003).

Die ersten Beschreibungen einer nordatlantischen Klimaschaukel (heute verstanden als Ausdruck der „Nordatlantischen Oszillation“) stammen von skandinavischen Seefahrern. Durch ihre Fahrten nach Grönland waren diese Leute mit den Wetter- und Klimabedingungen im nordatlantisch-europäischen Raum sehr gut vertraut. Die Geschichte Grönlands, seines Klimas sowie der Fauna und Flora wurden durch den Missionar Hans Egede Saabye sehr genau beschrieben (EGEDE 1745, siehe Abbildung 1 in STEPHENSON et al. 2003). In einem seiner Tage-

bücher notierte er, dass „in Grönland alle Winter streng aber, nicht alle gleich sind. Die Dänen haben bemerkt, dass strenge Winter in Dänemark mild in Grönland sind und umgekehrt.“

David Crantz erzählt in seinem 1765 erschienenen Buch mit dem Titel „History of Greenland“ von seinen Beobachtungen über die gegensätzlichen Winter in Grönland und Dänemark (CRANTZ 1765). Es ist sehr wahrscheinlich, dass dieses Phänomen der gegensätzlichen Winter in Grönland und Skandinavien bereits lange Zeit vor Saabye bekannt war.

Die koloniale Besetzung Südwestgrönlands begann 985, als Erik der Rote Thorvaldsson eine Expedition mit 25 Schiffen von Island nach Grönland leitete (HAINE 2008). Nur 14 Schiffe erreichten ihr Ziel, vermutlich wetterbedingt (HAINE 2008). Die regelmäßigen Transatlantik-Überquerungen zwischen Grönland und den nordischen Ländern in der Sommerzeit

von 985 bis rund 1300 lassen eine genaue Kenntnis des Wetters und Klimas vermuten. Die Verbindungen im 14. Jahrhundert waren dann allerdings weniger häufig; zu Beginn des 15. Jahrhundert kamen die Beziehungen schliesslich zum Erliegen (OGILVIE 1998).

Die Winter-Temperaturschaukel zwischen Grönland und dem nördlichen Europa wurde später durch den deutschen Prediger Karl Ludwig Gronau (GRONAU 1811) mit Bezug auf Deutschland weiter beschrieben. Aus Angaben über Meereis, welches zu jener Zeit von grossem Interesse für die Wal- und Robbenindustrie war, hat Gronau die Zusammenhänge zwischen den außergewöhnlichen Wintern in Grönland und Deutschland für die Periode 1709-1800 abgehandelt (Tab. 1-1). Er schrieb dazu: „Merkwürdig ist es, dass die kalten Winter in Grönland mit denen in Deutschland in einem umgekehrten Verhältnisse zu stehen scheinen, wie folgende Zusammenstellung zeigt.“

Einige Jahre später hat dann auch GILBERT (1819) die Klimaschaukel zwischen den beiden Räumen weiter beschrieben. Mit dem Wiederaufleben der deutschen vorreformistischen Protestanten-Kirche (Herrnhuter Brüdergemeine, Evangelische Brüder-Unität, Moravians) im frühen 18. Jahrhundert wurde ein grosses weltweites Missionarsprogramm gestartet, darunter auch in Grönland (1732) und in Labrador (1771). Im Rahmen von Seminarien erhielten die Herrnhutter Missionare im 18. Jahrhundert eine naturwissenschaftliche Ausbildung. Meteorologische Beobachtungen bildeten einen Teil ihrer Aktivitäten, im 19. Jahrhundert dann wurden die Beobachtungen durch europäische Wissenschaftler, darunter auch Wilhelm Heinrich Wilhelm Dove (siehe weiter unten), gefördert. Die ersten Wetterbeobachtungen der Herrnhuter Brüdergemeine in Labrador wurden vom 23. Juli bis 3. September 1765 durchgeführt (DEMARÉE und OGILVIE 2008 und darin enthaltene Referenzen und Quellen).

Jahr	Winter in Grönland	Winter in Deutschland
1709	sehr gelinde	ausserordentlich streng
1740	sehr gelinde	aussergewöhnlich kalt
1746	gelinde	kalt
1756	sehr hart und strenge	sehr gelinde
1758	fast gar kein Winter	sehr kalt
1759	keine grosse Kälte	sehr kalt
1764	grosse Kälte	sehr gelinde
1765	grosse Kälte	gemässigt
1766	sehr gelinde	sehr kalt
1767	gelinde	sehr kalt
1768	gelinde	kalt
1790	kalt	gelinde
1792	sehr gelinde	sehr kalt
1799	ausserordentlich gelinde	ungewöhnlich kalt
1800	desgleichen	ebenfalls

Tab. 1-1: Aussergewöhnliche Winter in Grönland und Deutschland zwischen 1709 und 1800 (aus GRONAU 1811).

DEMARÉE und OGILVIE (2008) geben einen fantastischen Überblick über die Herrnhuter und deren wichtigen Beitrag zu den instrumentellen meteorologischen Beobachtungen in Grönland sowie an der Küste Labradors (Nunatsiavut) zurück bis ins Jahr 1771. Der dänische Missionar Christopher Brasen (1737–1774) hat regelmässige Beobachtungen vom 1. September 1767 bis 22. Juli 1768 (mit Ausnahme der Periode vom 4. bis 24. Oktober 1767) an der Westküste Grönlands (Neu-Herrnhut in der Nähe Godthaabs, Nuuk; Abb. 1-1) durchgeführt (DEMARÉE und OGILVIE 2008 und darin enthaltene Referenzen und Quellen). Die isolierten Missionare konnten den Kontakt zu deren Basen nur durch moravische Schiffe, welche die Stationen jeweils im Sommer besuchten, aufrechterhalten. Die Missionare kehrten von ihrem Dienstort jeweils einmal pro Jahr oder zur Pensionierung in ihre Heimat nach Deutschland zurück. Bei solchen Gelegenheiten wurden Wetterinformationen mittels Briefen ausgetauscht.

Ein anderes Beispiel der oben erwähnten nordatlantischen Klimaschaukel findet sich in anonymen Korrespondenzen (ANONYMOUS 1855 a, b) der Herrnhuter Brüdergemeine. Sie stellten die unterschiedliche Temperatur zwischen Grönland, Deutschland und Dänemark während des Winters 1854/1855 fest. In Neu-Herrnhut (heutige Nuuk-Kommune) wurde folgendes notiert: „Merkwürdig ist es, daß, wie

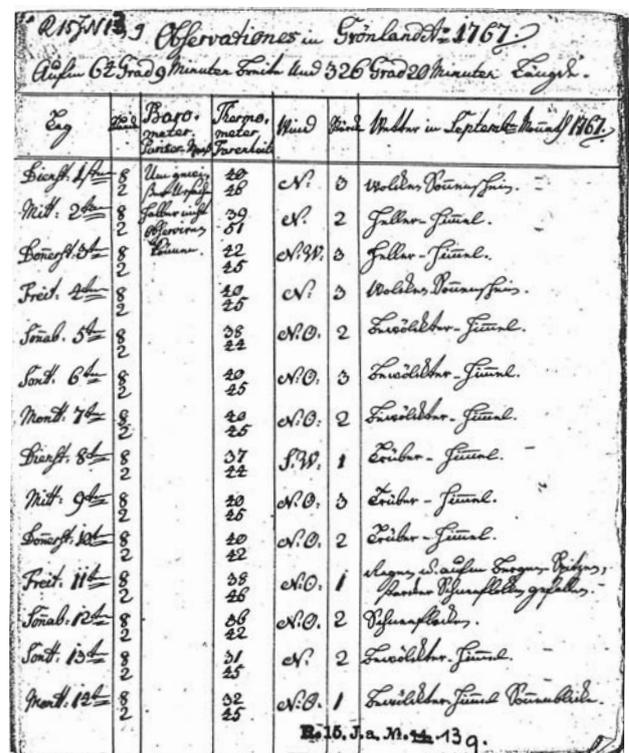


Abb. 1-1: Erste Seite des Manuskriptes R.15.J.a.No.13q von 1767, welches grönländische meteorologische Beobachtungen des dänischen Missionars Christopher Brasen enthält (mit freundlicher Genehmigung der Herrnhuter Brüdergemeine Archiv Deutschland).

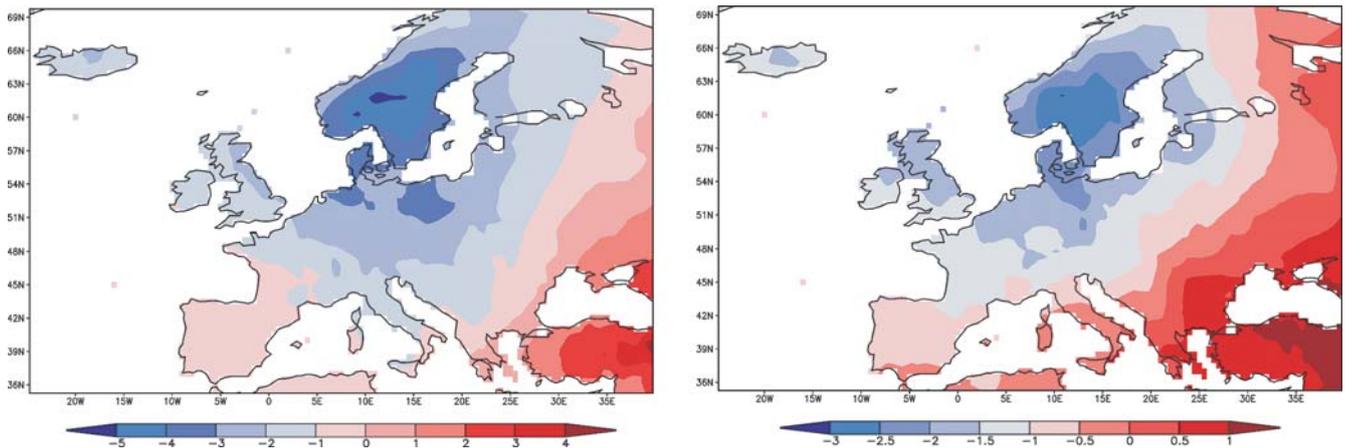


Abb. 1-2: Rekonstruierte Temperaturanomalien (in °C gegenüber der 1961-1990 Referenzperiode) für Winter 1854/1855 (links; aus LUTERBACHER et al. 2004) und Frühling 1855 (rechts; aus XOPLAKI et al. 2005).

wir erfahren, der vergangene Winter 1854/1855 in Deutschland und Dänemark strenger gewesen zu seyn als hier bei uns in Grönland.“ Von der weiter südlich liegenden Station Lichtenfels wurde folgendes berichtet: „Der letzte Winter war hier eigentlich ein milder. ... Wir hatten in Februar und März 1855 bis weilen so schöne warme Tage, dass man versucht war, zu fragen: sind wir denn auch wirklich in Grönland?“

Die Abbildung 1-2 zeigt die rekonstruierten Temperaturanomalien (gegenüber der Referenzperiode 1961-1990) für den Winter 1854/1855 und Frühling 1855 (LUTERBACHER et al. 2004; XOPLAKI et al. 2005). Die in den Berichten erwähnte Kälte zeigte sich in weiten Teilen Europas. Die Temperaturen in Deutschland und Dänemark lagen im Winter 1854/1855 2 °C bis 4 °C tiefer gegenüber der Referenzperiode 1961-1990. Im Frühling lag der Kältepol im Norden Deutschlands sowie im südlichen Skandinavien mit Temperaturanomalien von bis zu 3 °C.

Die Temperaturmessungen der Herrnhuter Brüdergemeine flossen schliesslich auch in das erste Netzwerk der Societas Meteorologica Palatina ein. VINTHER et al. (2006) geben einen Überblick über die instrumentellen Temperaturserien in Grönland und präsentieren neue Ergebnisse von homogenen, praktisch durchgehenden monatlichen bis jahreszeitlichen Reihen zurück bis 1764.

## 2 Erste wissenschaftliche Erklärungsversuche im 19. Jahrhundert

Die aus dem Palatina-Messnetz zur Verfügung stehenden Temperaturmessungen sowie einige zusätzliche lange europäische Reihen wurden im 19. Jahrhundert erstmals von Wissenschaftlern ausgewertet. Damit wurden erste räumlich und zeitlich differenzierte Aussagen zur Klimavariabilität gemacht. Ein Pionier war der Meteorologe Heinrich Wilhelm Dove, der von Alexander von Humboldt 1848 als der Begründer der

Meteorologie bezeichnet wurde. Er führte die Monatsisothermen und thermische Normale ein. Er fand das „Drehungsgesetz der Winde“ und das „Gesetz der Stürme“, empirische Regeln, in denen er die Grundprinzipien für das Wettergeschehen auf der ganzen Erde sah. Er untersuchte 60 Temperaturserien der Nordhemisphäre von maximal 40 Jahren Länge und fand, dass die Anomalien mehr in West-Ost als Nord-Süd-Richtung variieren (DOVE 1839, 1841). In seinen Arbeiten konnte Dove zum ersten Mal zeigen, dass sich die gemessenen Temperaturen im nördlichen Europa im Vergleich zu Sibirien und Nordamerika unterschiedlich verhalten. Er konnte somit die frühen qualitativen Aussagen von Saabye bestätigen. Zehn Tage vor der Eröffnung des 2. Internationalen Meteorologen-Kongresses in Rom, am 4. April 1879, starb in Berlin Heinrich Wilhelm Dove, den die englische Wissenschaftszeitschrift „Nature“ (Heft 19 Nummer 493, Seiten 529-530) in ihrem geschriebenen Nachruf vom 10. April 1879 als „the Father of Meteorology“ bezeichnete. Im Nachruf wird Wilhelm Dove unter anderem mit folgenden Worten gewürdigt: „... His fame rests on the successful inquiries he carried out with a view to the discovery of the laws regulating atmospheric phenomena which apparently are under no law whatever. The work he will be long best known by is his isothermals and isabnormals of temperature for the globe, in which work one cannot sufficiently admire the breadth of view which sustained and animated him as an explorer during the long toilsome years spent in its preparation. Equally characterize by breadth of view, ..., are his various works on winds, the manner of their veering and their relations to atmospheric pressure, temperature, humidity, and rainfall, and the important bearings of the results on the climatologies of the globe; on storms and their connections with the general circulation of the atmosphere; the influence of the variations of temperature on the developments of plants; and the cold weather of May ...to which may be added the valuable system of meteorological observations he gradually organized for Germany, and the many full discussions of these which he published from year to year. ...When

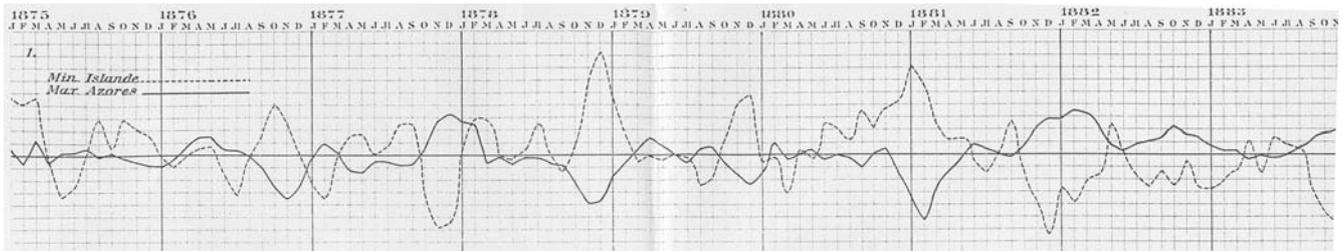


Abb. 1-3: Abweichungen des minimalen Luftdrucks mehrerer Stationen in Island und des maximalen Luftdrucks der Azoren vom langjährigen Mittelwert (geglättet mit einem dreimonatlich übergreifenden Mittel; aus HILDEBRANDSSON 1897).

we consider the conditions in which he found man’s knowledge of weather and the large accessions and developments it received from his hand, the breadth of his views on all matters connected with the science and the well-directed patience, rising into high genius, with which his meteorological researches were pursued, there can be only one opinion, that these give Dove claims, which no other meteorologist can compete with, to be styled “the Father of Meteorology.”

Erwähnenswert ist ebenfalls die Tatsache, dass Dove Heinrich Wild (Schweizer Meteorologe und Physiker, 1833-1902) wegen seiner (richtigen!) Föhntheorie sehr abschätzig behandelte. Mithilfe einer Wetterstation in Jakobshavn (Ilulissat, Grönland) und einer in Wien beschrieb 1890 der berühmte österreichische Klimatologe Julius Hann die Temperaturschwankungen über eine Periode von 42 Jahren (HANN 1890). Er stellte fest, dass in 27 von 42 Jahren die Abweichung der Wintertemperatur vom langjährigen Mittel an den beiden Stationen entgegengesetzt war. Einige sehr kalte Winter in Europa wie beispielsweise 1879/1880 lieferten einen Impuls zur wissenschaftlichen Untersuchung der Ursachen der Variabilität der Wintertemperaturen. In einer wichtigen Arbeit beschrieb TEISSERENC DE BORT (1883) das europäische Klima während unterschiedlicher anomaler Winter (siehe Abbildung 2 in STEPHENSON et al. 2003). Er hat dabei die Position der Druckaktionszentren (Teisserenc de Bort nannte sie „centres d’action“) studiert und konnte fünf verschiedene Typen aufgrund der Position des Azoren- und Russlandhochs sowie zum Teil des Islandtiefs unterscheiden. Er wies darauf hin, dass Einflüsse wie die eurasiatische Schneebedeckung wahrscheinlich für die räumliche Veränderung der Druckaktionszentren verantwortlich sind. Zu jener Zeit waren die Meteorologen und Klimatologen vor allem daran interessiert, das Phänomen zu beschreiben und weniger an der Erklärung der dynamischen Prozesse zu arbeiten.

Um die Wende zum 20. Jahrhundert begannen die Meteorologen, sich Gedanken zu saisonalen Vorhersagen zu machen und studierten statistische Ansätze, um Wetter und Klima besser zu verstehen. Inspiriert durch die Arbeit von Teisserenc de Bort hat HILDEBRANDSSON (1897) die Bodendruck-Zeitserien von verschiedenen Regionen untersucht und eine stark

inverse Beziehung zwischen dem Druck auf Island und den Azoren beschrieben. Er bemerkte auch, dass die Zeitserien von den Azoren und Sibirien „parallel“ verlaufen, jene von Alaska und Sibirien dagegen gegenläufig. Die Abbildung 1-3 zeigt die Abweichungen des minimalen Luftdrucks mehrerer Stationen in Island und des maximalen Luftdrucks der Azoren vom langjährigen Mittelwert (geglättet mit einem dreimonatlich übergreifenden Mittel; aus HILDEBRANDSSON 1897). Die Arbeit von Hildebrandsson war die Vorreiterstudie für alle kommenden Arbeiten, die sich dem Bodendruck von den Azoren und Island, und somit dem Phänomen der „Nordatlantischen Oszillation“ widmeten.

Am Ende des 19. Jahrhunderts haben einige Autoren den Zusammenhang zwischen Ozean und Atmosphäre untersucht. PETTERSSON (1890) konnte zeigen, dass mildere Meeresoberflächentemperaturen in der Nähe von norwegischen Leuchttürmen in engem Zusammenhang mit milden skandinavischen Wintern stehen. Pettersson spekulierte, dass das Klima in Westeuropa in hohem Masse durch den Golfstrom determiniert wird. MEINARDUS (1898) berichtete über interannuelle Fluktuationen im Golfstrom-System, welche für das unterschiedliche Wetter und Klima in Westisland/Grönland und Europa verantwortlich sein könnten. Heutzutage weiss man, dass Meeresoberflächentemperaturen entlang der Küsten durch lokales Windforcing hervorgerufen werden und nicht Ausdruck der Nordatlantischen Oszillation sind. Eine ausführliche Übersicht dieser frühen Theorien zur Klimavariabilität des Nordatlantiks findet sich in HELLAND-HANSEN und NANSEN (1920). Der Beitrag 6 dieses Heftes geht den Wechselwirkungen zwischen der NAO und dem Ozean und Eis nach (KUCHARSKI et al. 2008).

### 3 Deskriptive Korrelationsstudien am Beginn des 20. Jahrhundert

Ein wichtiges Werkzeug für die folgenden statistischen Klimaanalysen war das Konzept der Korrelation, 1877 von Francis Galton entwickelt, aber erst um 1888 publiziert (GALTON 1888). Galton selbst hatte ein großes Interesse an Meteorologie. Er war Gründungsmitglied des „Meteorologischen Komitees“ der Royal Society und zeichnete verantwortlich für den

Aufbau des traditionsreichen British Meteorological Office nach der Gründung durch Admiral Fitzroy. Sir Gilbert WALKER (1909) und Felix EXNER (1913) waren die ersten Wissenschaftler, welche die Korrelationstechnik für klimatologische Fragestellungen angewandt haben. Der Fokus von Walkers Arbeit lag bei der Vorhersage und beim besseren Verständnis des indischen Monsuns und der Nilüberschwemmungen. Felix Exner war dagegen an der außertropischen Zirkulation interessiert. Ausgehend von der Idee, dass das Temperaturgefälle zwischen Äquator und Pol die Stärke der allgemeinen Zirkulation bestimme, jedoch durch die grossen Landmassen gestört sei, korrelierte er den Polardruck (als Mittel von drei maritimen arktischen Stationen) mit zahlreichen Druck- und Temperaturreihen der Nordhemisphäre (siehe WANNER et al. 2001). Durch seine Wahl der Arktis als Aktionszentrum stellte er damit zum ersten Mal die räumliche Struktur dessen dar, was heute auch „Arktische Oszillation, AO“ (THOMPSON und WALLACE 1998) genannt wird (Abbildungen 1-4(a) und 1-4(b)). Exner fand starke entgegengesetzte Korrelationen mit dem Druck in Lugano (Schweiz) und schlug vor: „Man kann direkt die Druckanomalie von Lugano zur Beurteilung des Polardruckes und damit der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre und ihrer Wirkung benutzen“ (Abbildung 1-4(c)). In einer späteren Arbeit analysierte EXNER (1924) Korrelationen mit dem Druck in Island („da nirgends auf der Erde grössere Druckanomalien auftraten“) und fand die heute bekannte Struktur der Nordatlantischen Oszillation, mit dem Azorenhoch als südlichem Aktionszentrum.

Am konsequentesten hat wohl WALKER (1923) die Technik der Korrelationsanalyse auf globale Luftdruckreihen angewandt. Er ging davon aus, dass die Variabilität des globalen Klimas (immer im Kontext der möglichen Vorhersagbarkeit) so komplex sei, dass sie sich nicht aus Basisprinzipien erschließen liesse. Deshalb müssten statistische Konzepte angewendet werden (vgl. auch BRÖNNIMANN und FREI 2008). Walker entwickelte die Methodik weiter und führte statistische Signifikanztests durch, um zufällige Korrelationen zu eliminieren (in den statistischen Wissenschaften ist Walker bekannt für seine Arbeiten zu autoregressiven Prozessen). Seine vorläufige Studie zum „World Weather“ wurde folgendermaßen zusammengefasst: „...and forwards between the Pacific ocean and the Indian ocean; and there are swayings, on a much smaller scale, between the Azores and Iceland and between the areas of high and low pressure in the North Pacific: further, there is a marked tendency for the „highs“ of the last two swayings to be accentuated when pressure in the Pacific is raised and that in the Indian ocean lowered.“

WALKER (1923) bemerkte auch: „the Iceland Azores oscillation is not very closely related with that between the Pacific and Indian oceans“ und schlug vor, dass der interessierte Leser unbedingt die bahnbrechende Arbeit von EXNER (1913) lesen sollte. 1924 dehnte Walker sei-

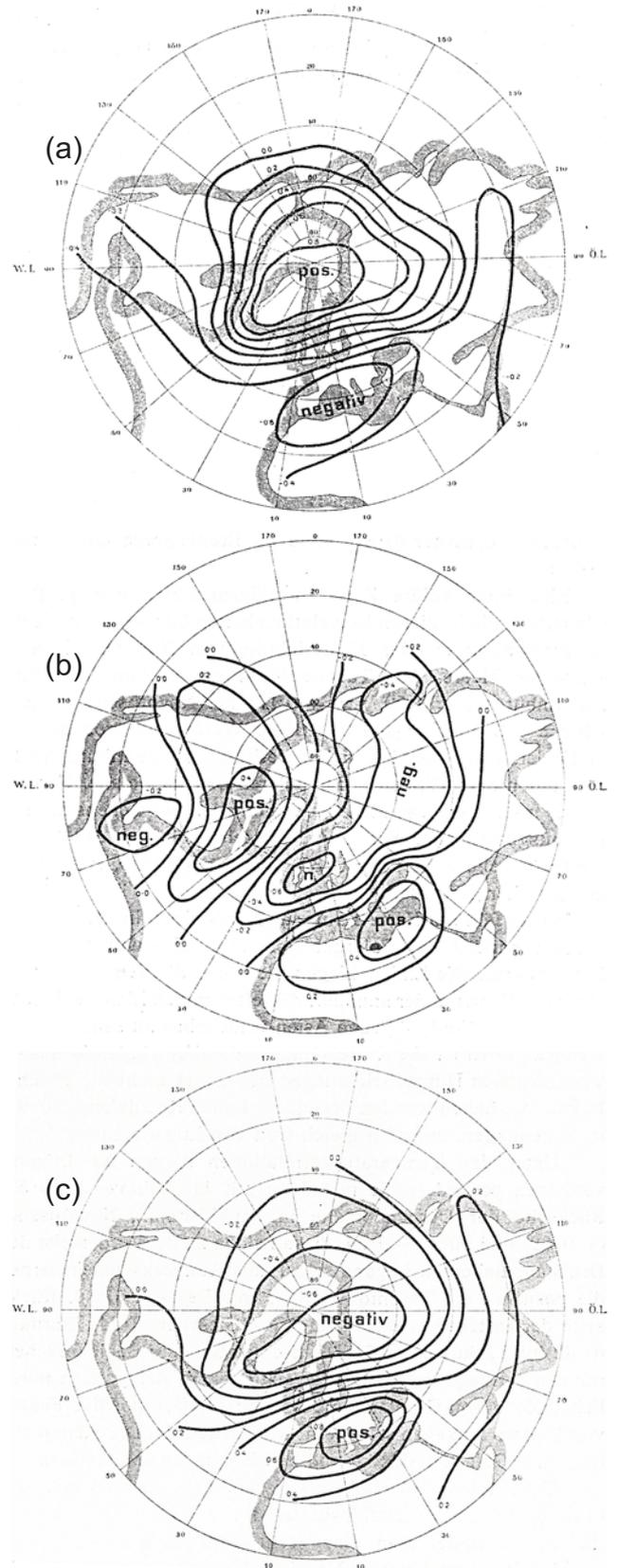


Abb. 1-4: Korrelationskarte zwischen den monatlichen Anomalien des Polardruckes (Mittel von drei Stationen in Nordgrönland, Nordnorwegen und Nordsibirien) und rund 50 Stationsreihen der Nordhemisphäre von 1887 bis 1906 für (a) Druck und (b) Temperatur. (c) zeigt eine Korrelationskarte zwischen den monatlichen Anomalien des Drucks in Lugano (Schweiz) und Stationsdruckreihen der Nordhemisphäre (aus EXNER 1913).

ne Analysen aus und zeigte gleichzeitige und zeitlich verzögerte (lagged) jahreszeitliche Korrelationen zwischen vielen weiteren Druckreihen. WALKER (1924) klassifizierte die Korrelationen in die beiden Gruppen „Southern Oscillation“ und „Northern Oscillation“.

Die „Northern Oscillation“ unterschied er weiter in „North Atlantic Oscillation“ und „North Pacific Oscillation“. Im Gegensatz zu den Arbeiten von PETERSSON (1890) und MEINARDUS (1898) beschrieb Walker die Beziehung zwischen NAO und Golfstrom sowie der Meereisdynamik im Nordatlantik nur vage. Interessant ist auch, dass Walker trotz seiner Bewunderung für Exners Arbeit die Polarregion nicht als „Aktionszentrum“ einschließen wollte.

Ebenfalls im Jahre 1924 publizierte Defant eine Studie zur Zirkulation über dem Nordatlantik (vgl. BRÖNNIMANN und FREI 2008). Er untersuchte monatliche Bodendruckkarten, welche er in Form von Gitterpunkten erfasste und daraus das zonale Mittel über dem Atlantik berechnete. Dabei unterschied er zwei Paare (vier Typen) von meridionalen Druckprofilen, wobei das erste Paar (83 % aller Monate) dem NAO-Muster ähnelte. Das zweite Paar zeigte eine starke Anomalie auf rund 55° N und eine Anomalie mit entgegengesetztem Vorzeichen im subtropischen Bereich. Durch die subjektive Zuordnung jedes Monats zu einem der vier Typen und einer Gewichtung nach Stärke konnte Defant eine jährliche Zeitreihe ableiten, welche mit dem NAO-Index vergleichbar ist. Diese verglich er wiederum mit den ursprünglichen Druckfeldern und daraus abgeleiteten Indizes (zonale und meridionale Druckgradienten) sowie mit anderen Zeitreihen wie beispielsweise der Meereisausdehnung um Island und Vulkanausbrüchen. Defant interpretierte Variationen in seiner Zeitreihe als interne Oszillationen im Ozean-Atmosphäre-System (wobei er den Ozean als von der Atmosphäre beeinflusst betrachtete) mit einer Periodizität von 3 bis 5 Jahren, welche durch vulkanische Ausbrüche angeregt oder gestört werden können. Obwohl Defant mit seinen dynamischen Analysen zu den NAO-ähnlichen Anomalien weiter ging als Exner und Walker, so blieben seine Arbeiten doch eher exploratorisch. Zwei weitere Beispiele des Wissens über den Zusammenhang zwischen der Luftdruckverteilung über dem Nordatlantik und dem Wintercharakter in Europa werden in den beiden auf polnisch abgehandelten Büchern von KLEIN (1915) und MERECKI (1914) beschrieben (siehe auch NOWOSAD 2006). Kleins Buch (1915) beinhaltet einen Abschnitt über die „Milderung“ der Wintertemperatur durch „westliche Seewinde“, die über Europa geführt und mit dem Einfluss des isländischen Minimums und des Azoren-Maximums verbunden sind. MERECKI (1914) stellt im Buch „Klimatologie von Polen“ dar, dass der Luftdruck in Ponta Delgada und Stykkisholmur mit der Lufttemperatur von Wintermonaten in Warschau zusammenhängt (siehe auch NOWOSAD 2006). Andere beschreibende Studien zur Temperaturschaukel zwischen Nord-

europa und Grönland, basierend auf längeren Zeitserien, wurden durch ANGSTRÖM (1935), LOEWE (1937) und DANNMEYER (1948) publiziert. Es war Angström, der im Jahre 1935 den Ausdruck „teleconnection“ zur Beschreibung der Temperaturbeziehung in verschiedenen Regionen als erster erwähnt hat.

Walkers Konzept der NAO war seinerzeit unter zeitgenössischen Meteorologen sehr beliebt und rief nach einem quantitativen Mass zur Beschreibung der Stärke der NAO. WALKER und BLISS (1932) haben den ersten NAO Index berechnet. Dieser Index wurde in einem iterativen Prozess mithilfe von sieben Zeitserien der Temperatur und des Bodendruckes aus Europa und Nordamerika hergeleitet. Sie haben dabei folgende Formel verwendet:

$$\begin{aligned}
 \text{NAO-Index} = & 0,76 (P_{\text{Vienna}}) + 0,86 (T_{\text{Bodö}}) \\
 & + 0,84 (T_{\text{Stornoway}}) + 0,66 (P_{\text{Bermuda}}) \\
 & - 0,8 (P_{\text{Stykkisholmur}}) - 0,84 (P_{\text{Ivigtut}}) \quad (1) \\
 & - 0,7 (T_{\text{Godthaab}}) + 0,72 (T_{\text{Hatteras}} \\
 & + T_{\text{Washington}}) / 2
 \end{aligned}$$

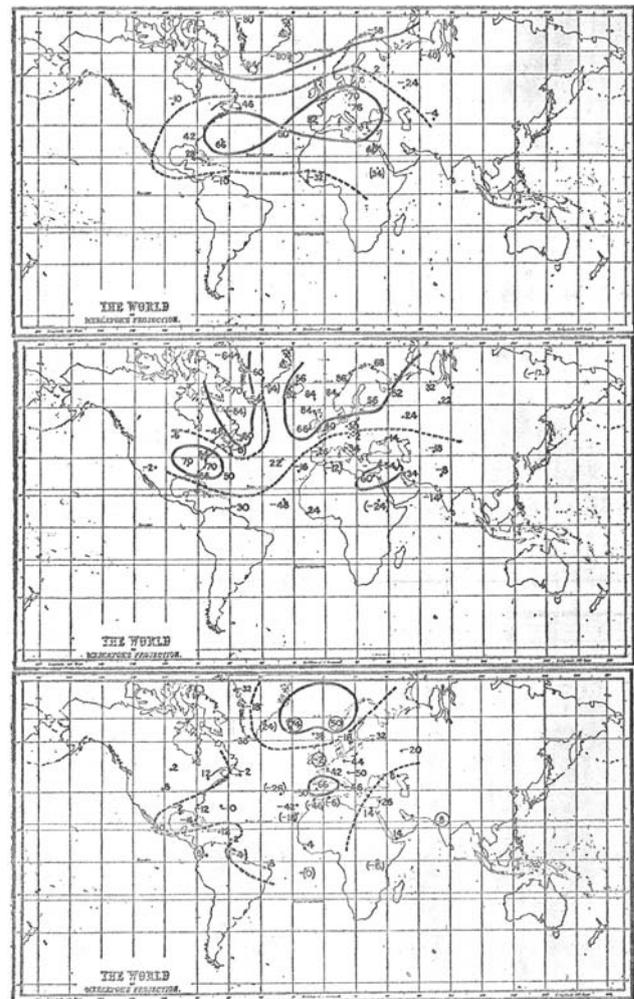


Abb. 1-5: Korrelation zwischen dem Winter-NAOI, berechnet nach WALKER und BLISS (1932), mit dem Bodendruck (oben), der Temperatur (Mitte) und dem Niederschlag (unten). Der Zeitraum zur Korrelationsberechnung schwankt zwischen 17 und 56 Jahren, wobei die längsten Reihen bis 1875 zurückgehen.

$P$  steht für Luftdruck und  $T$  für Lufttemperatur, gemittelt über die Winterperiode Dezember-Februar. Die individuellen Serien wurden standardisiert um eine einheitliche Standardabweichung von 20 zu erhalten. Die Gewichte in der obigen Formel wurden dabei auf iterativem Wege gefunden. Interessanterweise hat sich gezeigt, dass der Azorenluftdruck ein schlechter/ungeeigneter Prädiktor war und aus diesem Grunde von der Berechnung ausgeschlossen wurde (Gewicht von 0,5). Die Abbildung 1-5 zeigt die Korrelation des so abgeleiteten Winter NAO-Index (NAOI) mit dem Bodendruck, der Temperatur und dem Niederschlag (aus WALKER und BLISS 1932). WALLACE (2000) erwähnt in seinem Reviewartikel, dass die NAOI-Ableitung von WALKER und BLISS (1932) als eine iterative Approximation einer Hauptkomponentenanalyse betrachtet werden kann.

#### 4 Moderne Ansätze (ab Ende 1930er Jahre)

Ungefähr zur selben Zeit, als man von der mehr deskriptiven, statistischen Klimatologie und Meteorologie zu mehr prozessorientierten und dynamischen Ansätzen überging, wurden neue Konzepte zur Klimavariabilität im atlantisch-europäischen Raum entwickelt. Eine Reihe von theoretischen Studien zur Interaktion der zonalen Zirkulation mit den Druckaktionszentren wurden durch eine Reihe berühmter Meteorologen publiziert; darunter waren Carl-Gustaf Rossby, Hurd Willett, Jerome Namias und Edward Lorenz (siehe LORENZ 1967). Die Wissenschaftler waren vor allem an einer Verbesserung der Wetterprognosen interessiert und entwickelten die dynamischen Grundlagen der numerischen Vorhersage. ROSSBY et al. (1939) studierten die Struktur und Dynamik der planetaren Wellen im Zusammenhang mit Störungen und leiteten die Abhängigkeit der Stärke der zonalen Zirkulation vom zeitlichen Verhalten der quasi-stationären Zentren her.

Um die hemisphärische zonale Zirkulation bei Vorhandensein von eingebetteten Wirbelstörungen zu untersuchen, wurde ein zonaler Index als das zonale Mittel der Differenz zwischen dem Bodendruck auf  $55^\circ$  N und  $35^\circ$  N berechnet. Für Rossby war klar, dass dies ein Mass für die Stärke des polaren Vortex in der freien Atmosphäre im Norden ist. Aus diesen Arbeiten entstand das Konzept des „zonalen Indexzyklus“, welcher von schwachem Zonalwind in den Mittelbreiten (in einem planetaren Wellenmuster mit grossen Amplituden) übergeht zu starkem Zonalwind (geringe Wellenamplituden) und wieder zurück (ROSSBY und WILLETT 1948). Für eine bestimmte Zeit war Rossbys zonaler Index weit verbreitet und war Inhalt verschiedener klimatologischer Studien. NAMIAS (1950) war vor allem an einer Verbesserung der Prognosegüte interessiert und hat dabei die Bedeutsamkeit der breitengradabhängigen Änderung des zonalen Windes erkannt. LORENZ (1950) schliesslich studierte die Variabilität der mittleren zonalen Zirkulation und der

Oszillationen im Zusammenhang mit atmosphärischen Massenbilanzen. Er hat dabei einen neuen Index eingeführt, definiert als das zonale Mittel des meridionalen Druckgradienten auf  $55^\circ$  N.

In Tat und Wahrheit wurden zu jener Zeit bereits einige zonale Indizes verwendet (KUTZBACH 1970), doch keiner erlangte eine solche Verbreitung (siehe WALLACE 2000, für eine weitergehende Diskussion). Basierend auf der Arbeit von Helland-Hansen und NANSEN (1920, siehe auch oben), hat BJERKNES (1964) den Zusammenhang zwischen den Ozean-Atmosphäre-Interaktionen in Bezug zur Nordatlantischen Klimavariabilität neu definiert. Er wies auf die grosse Bedeutung der Atmosphäre für den Wärmeaustausch hin und diskutierte detailliert die Trends und Anomalien in den atlantischen Meeresoberflächentemperaturen, welche durch den atmosphärischen Antrieb und die ozeanische Zirkulation hervorgerufen werden. BJERKNES (1964) hat dabei die Druckdifferenz zwischen Island und den Azoren als einfaches Mass der Westwindintensität verwendet. Es handelt sich dabei um einen einfachen Nordatlantischen Oszillationsindex, obschon Bjerknnes selbst den Ausdruck „zonal index“ verwendete.

Bereits in den 1950er Jahren hat beispielsweise LORENZ (1951) mittels Hauptkomponentenanalyse die wichtigsten Muster des Bodendrucks berechnet. Es war dann vor allem KUTZBACH (1970), welcher mit dieser deskriptiven Methode Pionierarbeit geleistet hat, um die grossräumige atmosphärische Zirkulation zu studieren. Die Hauptkomponentenanalyse liefert einerseits Ladungsmuster, andererseits Zeitreihen dazugehöriger Zeitexpansionskoeffizienten, welche anderen Zeitserien gegenübergestellt werden können. Viele spätere Studien haben die Hauptkomponentenanalyse auf den grossräumigen nordhemisphärischen Bodendruck oder das Geopotenzial angewandt (z. B. TRENBERTH und PAOLINO 1980, WALLACE und GUTZLER 1981, BARNSTON und LIVEZEY 1987, KUSHNIR und WALLACE 1989, CAYAN 1992 a, b, THOMPSON und WALLACE 1998, VOLODIN und GALIN 1999). Beitrag 3 dieses Heftes (LECKEBUSCH et al. 2008) behandelt die unterschiedlichen instrumentellen NAO-Indizes im Detail.

Ziel dieser Arbeiten der 1980er Jahre war vor allem die Berechnung der dominanten Moden der niederfrequenten atmosphärischen Zirkulation. WALLACE und GUTZLER (1981) beschrieben neben der zonalen symmetrischen globalen Druckschaukel zwischen den polaren und den mittleren Breiten ebenfalls die mehr regionalen Muster der sogenannten Pacific North American (PNA) und Western Atlantic (WA) Druckmuster auf dem 500 hPa-Niveau. BARNSTON und LIVEZEY (1987) zeigten, dass die NAO das einzige niederfrequente Zirkulationsmuster darstellt, welches in jedem Monat des Jahres präsent ist. Die Autoren beschreiben auch die Auswirkungen der NAO auf das eu-

ropäische Klima. Die Vorgänge rund um die NAO wurden nach der Mitte des 20. Jahrhunderts von Europa aus mit Interesse verfolgt, dies insbesondere im Zusammenhang mit den kalten Wintern von 1956 und 1963.

Dennoch ging der Impuls für eine Neubelebung der Forschung von den USA aus. Zum einen war es Harry van Loon vom NCAR, welcher in den 1970er Jahren seinen ersten Doktoranden Jeffrey Rogers zum Studium der NAO anregte (VAN LOON and ROGERS 1978). Die Studien der 1970er Jahre untersuchten die Winter-Temperaturschaukel (siehe auch oben) zwischen Grönland und Nordeuropa (VAN LOON und ROGERS 1978, ROGERS und VAN LOON 1979, MEEHL und VAN LOON 1979). Die Arbeiten zeigten auch signifikante Korrelationen zwischen der Zirkulation über dem Nordatlantik und den Meeresoberflächentemperaturen sowie Zusammenhänge mit den tropischen Regionen und den tropischen Klimasystemen. Die neuen Bestrebungen zum besseren Verständnis der nordatlantischen Klimavariabilität in den 1970er und 1980er Jahren wurden vornehmlich durch die dominante positive NAO-Phase ausgelöst, aber auch durch das Anliegen saisonaler Klimavorhersagen. LAMB und PEPLER (1987) haben das Konzept der NAO auf regionale Klimaprobleme angewandt, nämlich die interannuellen Niederschlagsvariationen in Marokko. Die Idee, dass der NAO-Index durch zwei Punkte bestimmt werden kann, welche die quasipermanenten Druckaktionszentren (Islandtief und Azorenhoch) „optimal“ repräsentieren, wurde von ROGERS (1984) wieder aufgenommen. Er definierte einen NAO-Index als die standardisierte Druckdifferenz zwischen Ponta Delgada (Azoren) minus Reykjavik (Island).

## 5 Die Renaissance der NAO in den 1990er Jahren

Zu Beginn der 1990er Jahre wurde die NAO wieder detaillierter untersucht, vor allem im Zusammenhang mit Ozean-Atmosphäre-Interaktionen. Die NAO wurde in Beziehung gesetzt mit interdekadalen Schwankungen der latenten und sensiblen Wärmeflussanomalien im Nordatlantik sowie der Ozeanzirkulation (CAYAN 1992 a, b, DESER und BLACKMON 1993, KUSHNIR 1994). Harry van Loon war es auch, der James Hurrell anfang der 1990er Jahre den Anstoß zu einer Neubearbeitung der NAO gab (HURRELL 1995, HURRELL und VAN LOON 1997). Ab der Mitte der 1990er Jahre ist die Anzahl der Publikationen über die NAO ‚explodiert‘ (Abbildung 1-6), dies unter anderem durch die Publikation von James Hurrell in der Wissenschaftszeitschrift „Science“ in 1995 (Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation, HURRELL 1995).

Hurrell definierte einen neuen NAO Index aufgrund der standardisierten Druckdifferenz zwischen Lissabon und Stykkisholmur. Dieser Index wurde zum

meistverwendeten NAO-Index in der Klimatologie. Hurrells Paper von 1995 wurde bis dato (Stand Ende Dezember 2008) in referierten Zeitschriften mehr als 2300 mal zitiert. JONES et al. (1997) haben zwei Jahre später einen längeren, instrumentellen Winter-NAOI publiziert, welcher die standardisierte Druckdifferenz zwischen Gibraltar und Reykjavik zurück bis 1821 benutzt. SLONOSKY et al. (2001) haben frühinstrumentelle (Ende 17./Anfang 18. Jahrhundert) Druckdaten von Paris und London verwendet und daraus einen monatlichen NAOI abgeleitet. Eine aktuell laufende Datenerhebung von verschiedenen Archiven wird es bald erlauben, einen praktisch durchgehenden täglichen NAOI mittels dieser beiden Stationen zurück bis ins späte 17. Jahrhundert abzuleiten (Phil JONES, Climatic Research Unit, Norwich, England; persönliche Mitteilung Juni 2008). In einer neueren Arbeit von VINTHER et al. (2003) wurde der Index von JONES et al. (1997) revidiert und aufdatiert. KÜTTEL et al. (2008) kombinieren lange Stationsdruckdaten aus Europa mit Windinformationen von Bordbüchern von Schiffen, die den Nordatlantik im Zeitraum 1750-1850 überquert haben. Dieser Datensatz aus kontinentalen und marinen Druckinformationen erlaubt mittels einer ausgeklügelten statistischen Methodik die Rekonstruktion des nordatlantisch-europäischen Bodendrucks für die letzten gut 250 Jahre. Damit lässt sich auch der längste rein druckbasierte NAOI ableiten. Um die niederfrequente atmosphärische Variabilität im Nordatlantik zu studieren, waren längere Zeitreihen nötig, welche bis in die „kleine Eiszeit“ reichen. Ein Fokus der Forschung der späten 1990er Jahre und am Anfang des 21. Jahrhunderts lag deshalb auf Rekonstruktionen des NAOI mittels langer instrumenteller Reihen in Kombination mit Information aus dokumentarischen oder natürlichen Klimaarchiven (z. B. WHITE et al. 1996, COOK et al. 1998, 2002, APPENZELLER et al. 1998, LUTERBACHER et al. 1999, 2002, CULLEN et al. 2000, GLUECK und STOCKTON 2001, SOURIAU und YIOU 2001, RODRIGO et al. 2001, VINTHER et al. 2003, siehe auch Beitrag 4 dieses Heftes: „Variationen der NAO auf Basis von langen Zeitreihen“).

Über die letzten Jahre wurde heftig über die Definition der NAO diskutiert. Zum einen, wie richtig argumentiert wird, kann eine Indexdefinition aufgrund zweier fixer Punkte die gesamte Variabilität und räumliche Repräsentativität nur unzureichend wiedergeben. WANNER et al. (1997, 2001) und PORTIS et al. (2001) konnten zeigen, dass die Zentren des Islandtiefs und Azorenhochs deutlichen monatlichen und jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen und im Sommer nach Westen wandern. Diesem Umstand haben BARNSTON und LIVEZEY (1987) sowie GLOWIENKA-HENSE (1990) in ihren Resultaten Rechnung getragen und mittels Hauptkomponentenanalyse den gesamten Nordatlantik mitberücksichtigt. Zu Beginn der 1990er Jahre haben Klimamodellierer begonnen, die NAO in ihren Modellen zu untersuchen

(DELWORTH et al. 1993). Detaillierte Informationen zu diesem Themenkreis finden sich in Beitrag 9 dieses Heftes.

John Michael Wallace weckte in Seattle in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre bei seinen Doktoranden Clara Deser und David Thompson das Interesse für die Atmosphärendynamik im Nordatlantikraum, was zu einem intensiven Studium der „Arctic Oscillation“ AO führte (THOMPSON und WALLACE 1998, DESER 2000). In Übereinstimmung mit den NAO-Schwankungen verändern sich die Wintertemperaturen über dem ganzen eurasischen Kontinent vom Atlantik zum Pazifik. Das weist darauf, dass die NAO eng mit einer hemisphärischen Variabilität verbunden ist, die als arktische Oszillation bekannt ist. Die erste Hauptkomponente des winterlichen hemisphärischen Bodendruckes nördlich von 20°N haben THOMPSON and WALLACE (1998) „Arctic Oscillation“ oder „Northern Annular Mode (NAM)“ genannt. Das AO/ NAM-Muster hat große Ähnlichkeit mit der NAO im atlantischen Sektor, ist allerdings zonal symmetrisch mit tiefem Druck über der Arktis und höherem Druck in den Subtropen. Am Ende der 1990er Jahre/Beginn des 21. Jahrhunderts wurden heftige Diskussionen geführt zur Frage und Bedeutung der NAO/AO und was physikalisch und statistisch das „geeigneterere Konzept“ darstellt (zum Beispiel WALLACE 2000, DESER 2000, AMBAUM et al. 2001, THOMPSON et al. 2003).

In neuen Arbeiten von BENEDICT et al. (2004) und WOOLLINGS et al. (2008) wird die Hypothese aufgestellt, wonach die synoptische und niederfrequente Variabilität der NAO als Resultat von Variationen im Auftreten von brechenden Rossby-Wellen in den oberen Schichten über dem Nordatlantik verstanden werden können. Diese brechenden Rossby-Wellen führen zu NAO-Anomalien mit antizyklonaler Brechung und somit zu einem positiven NAO ohne blockierende Situationen, währenddem zyklonales Brechen zur negativen NAO-Phase führt, verbunden mit häufigen Blockierungslagen, allerdings in höheren Breiten und auf der polwärtigen Seite der Storm Tracks (BENEDICT et al. 2004, WOOLLINGS et al. 2008). Dabei werden verschiedene Möglichkeiten diskutiert wie Blocking in den höheren Breiten und die NAO zusammenhängen. Die negative NAO-Phase agiert dabei als Auslöser für die wahrscheinlichere Entwicklung einer persistenten Antizyklone. Dies könnte durch eine Änderung der planetaren Wellen als Antwort zu Oberflächentemperaturabweichungen in Verbindung mit der negativen NAO-Phase hervorgerufen werden. Andererseits wurde argumentiert, dass atlantische Blocking-Episoden die negative NAO-Phase auslösen können (CROCI-MASPOLI et

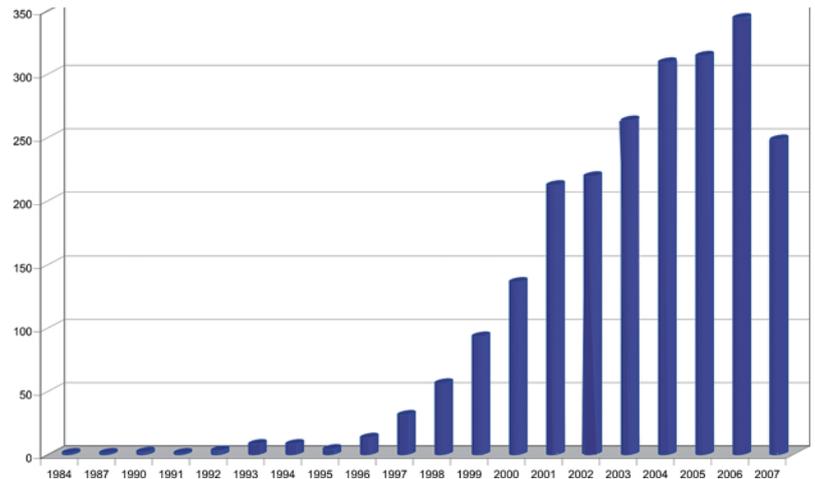


Abb. 1-6: Zeitliche Entwicklung (1984 - 2007) der Anzahl publizierter Publikationen (peer-reviewed), die den Ausdruck „North Atlantic Oscillation“ haben. Quelle: Web of Science bibliographic database (Zugriff: 4. 1. 2008).

al. 2007). Die dritte Möglichkeit besteht darin, dass die negative NAO und die Blocking Episoden in den nördlichen Breiten als zwei unterschiedliche Beschreibungen des selben Phänomens betrachtet werden können.

Ein bedeutender Beitrag an der zunehmenden Anzahl von Publikationen zur NAO am Ende der 1990er Jahre sowie zu Beginn des 21. Jahrhunderts (Abbildung 1-6) wuchs aus dem Bewusstsein der Wissenschaftler in anderen Wissenschaftsdisziplinen, dass die NAO einen geeigneten Parameter darstellt, um wetter- und klimarelevante Einflüsse zu untersuchen und zu erklären. Die NAO stellt einen einfachen Index dar, der die jahreszeitlichen Wetterabläufe „optimal“ zusammenfasst. Im Jahre 2006 stieg die Zahl der Publikationen mit NAO-Erwähnung auf knapp 350 Artikel, also wurde im Durchschnitt an jedem Tag ein Artikel mit NAO-Inhalt publiziert. In den Jahren 2007 und 2008 ist die Anzahl NAO-relevanter Publikationen deutlich zurückgegangen (auch die Anzahl der Beiträge, die sich mit der „Arctic Oscillation“ befassen, ist seit 2005 rückläufig). Ob es sich dabei nur um ein kurzes oder aber ein mittelfristiges Abklingen der NAO Relevanz in den Publikationen handelt, wird sich zeigen. Es könnte durchaus sein, dass ein Trend zu weniger NAO-Studien mit einer allgemeinen „Sättigung der Materie“ zusammenhängt, oder dem nun allgemeinen Bewusstsein, dass die NAO nur einen Bruchteil der Klimavariationen zu erklären vermag, vor allem im Winter dominant ist und es auch andere Moden gibt, welche die Klimavariabilität Europas zum Teil „besser“ beschreiben können. Vielleicht wird nun, mit einer zeitlichen Verzögerung, dem Umstand Rechnung getragen, dass der stark positive winterliche NAO-Trend bis Mitte der 1990er Jahre, der einher ging mit einer markanten Erwärmung auf der Nordhemisphäre, nun gegenläufig ist. Wahrscheinlich wird sich die zukünftige Forschung auch vermehrt allgemeinen Prozessstudien zuwenden.

## 6 Was sagt uns die Geschichte der NAO-Forschung?

Unsere Ausführungen zeigen die unterschiedliche Motivation zum besseren Verständnis der Klimavorgänge im Bereich Nordatlantik/Europa: diagnostische Analysen der rezenten Klimavariabilität, das Interesse an den zugrunde liegenden Prozessen im Klimasystem und der internen Variabilität, der Hoffnung auf zuverlässigere, saisonale Klimavorhersagen sowie der Unterscheidung zwischen niederfrequenter natürlicher Variabilität und menschlichem Einfluss mittels Rekonstruktionen. Die Geschichte der NAO-Forschung sagt uns aber auch, wie sich Menschen langsam an ein Phänomen herantasten, das sie aus der täglichen Erfahrung kennen. Sie zeigt, dass gewisse wissenschaftliche Fragestellungen zyklisch immer wieder bearbeitet werden. Es braucht Köpfe wie Exner, Walker oder van Loon, die einer Frage neugierig nachforschen. Vielleicht wird die Sache damit auch stark ausgereizt und verwehrt so etwas den Blick auf die gesamte relevante Variabilität von Klima-

prozessen? Die NAO als Maß der Zirkulationsvariabilität ist sicherlich wichtig und ihre Karriere war typisch für die Entwicklung der gesamten Meteorologie und Klimaforschung. Wie exakt sie die Prozesse abbildet, ist allerdings eine andere Frage. Diesbezüglich wird man pragmatisch arbeiten und weiter vorangehen müssen.

### Danksagung

Wir danken Dr. Gaston Demarée (Royal Meteorological Institute, Brüssel) und Dr. Oyvind Nordli (Norwegian Meteorological Institute, Oslo) ganz herzlich für wichtige Beiträge. Herzlichen Dank auch an Marcel Küttel (Geografisches Institut der Universität Bern) für die Produktion der Abbildung 1-2. Stefan Brönnimann wurde unterstützt durch den Schweizerischen Nationalfonds (SNF). Jürg Luterbacher wurde im Rahmen des NCCR Climate unterstützt durch den Schweizerischen Nationalfonds CSNF.