

Langzeitige Variabilität des Wellenenergiepotenzials in der Nordsee

Masterarbeit

Institut für Physiogeographie und Umweltwandel

Departement Umweltwissenschaften

Universität Basel

GKSS-Forschungszentrum

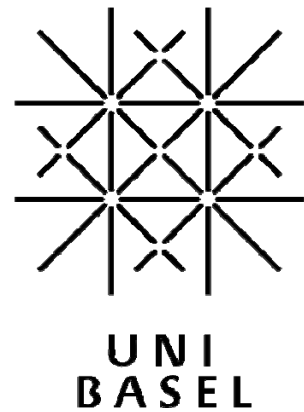
Institut für Küstenforschung

Geesthacht

Janina Elisabeth Marx

Matr.-Nr.: 06-075-006

März, 2010



Langzeitige Variabilität des Wellenenergiepotenzials in der Nordsee

Masterarbeit

für den Masterstudiengang
Geographie mit dem Vertiefungsmodul Meteorologie

zur Vorlage am
Institut für Physiogeographie und Umweltwandel
Departement Umweltwissenschaften
Universität Basel

Eingereicht von:

Janina Elisabeth Marx

Matr.-Nr.: 06-075-006

März, 2010

Betreuer:

Dr. Ralf Weisse – GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht

Prof. Dr. Nikolaus Kuhn – Universität Basel

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Janina Elisabeth Marx, geboren am 09.08.1983 in Filderstadt, erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die hier vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet.

Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Janina Marx – Hamburg, März 2010

Zusammenfassung

Bis zum Jahr 2020 soll in Deutschland der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch auf 30% erhöht werden. Eine der regenerativen Energiequellen ist die Wellenenergie. Das theoretische Potenzial der Wellenenergie aller Ozeane wird auf 1-10 TW geschätzt und stellt somit ein riesiges, bisher nahezu ungenutztes Energiepotenzial dar. Die Forschung und Entwicklung der Nutzung dieser Energiequelle stehen jedoch noch im Anfangsstadium und ihr kommt in Deutschland bisher noch keine grosse Bedeutung in der Stromerzeugung zu.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem theoretischen Wellenenergiepotenzial in der Nordsee südlich von 56° N. Unter dem theoretischen Potenzial versteht man das theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot einer erneuerbaren Energiequelle.

Bei einer energetischen Betrachtung der Meereswellen stellen die signifikante Wellenhöhe (m), die Wellenperiode (s) und die Energieflüsse (kWm^{-1}) wichtige Parameter dar. Da für maritime Gebiete aber nur selten räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Messreihen existieren, kommt Daten aus numerischen Modellen vor allem in Küstengebieten grosse Bedeutung zu. Solche Daten sind im coastDat-Datensatz des Institutes für Küstenforschung am GKSS-Forschungsinstitut zusammengefasst.

Soll die Wellenenergie an einem bestimmten Ort genutzt werden, so ist die Kenntnis über das dort herrschende Wellenklima essentiell. Nicht nur die Höhe des Energiegewinnes kann so abgeschätzt werden, sondern auch die verschiedenen technischen Systeme können an das herrschende Wellenklima angepasst werden. Des Weiteren spielen bei der Wellenenergienutzung innerjährliche Variabilitäten eine wesentliche Rolle, da beispielsweise Wartungen und Installationen von Wellenenergiewandlern nicht unter jeden Bedingungen durchgeführt werden können. Ausserdem kann überprüft werden, ob das jahreszeitlich schwankende Wellenenergieangebot dem ebenfalls jahreszeitlich schwankenden Stromverbrauch entspricht.

Neben der zeitlichen Variabilität, die mit verschiedenen atmosphärischen Prozessen in Verbindung gebracht werden kann, spielt die Kenntnis über die räumliche Variabilität der Wellenenergie eine bedeutende Rolle. Mit ihrer Hilfe können Gebiete mit hohen und solche mit geringen Schwankungen im Energieangebot identifiziert werden.

Ferner interessiert bei einer geplanten Nutzung der Wellenenergie die Entwicklung der für die Energiebetrachtung relevanten Parameter in der Zukunft. Die Wellenenergie reagiert, wie viele andere erneuerbare Energiequellen auch, empfindlich auf Klimaveränderungen. Mit Hilfe von Szenarien, die auf verschiedenen Annahmen bezüglich der Emissionen basieren, können mögliche zukünftige Entwicklungen für die Zukunft aufgezeigt werden. Da Szenarien nie die tatsächliche zukünftige Entwicklung zeigen, sondern nur eine mögliche, ist es sinnvoll mehrere Szenarien zu betrachten.

Eine der wichtigsten erneuerbaren Energiequellen stellt die Windenergie dar. Sie wird häufig in Offshore-Windparks gewonnen. Wie bei vielen anderen regenerativen Energiequellen auch, besteht jedoch das Problem, dass Fluktuationen in der Energiebereitstellung bestehen. In Zeiten, in denen keine Windenergie zur Verfügung steht, muss die Versorgungslücke mit Hilfe anderer Energiequellen geschlossen werden. Daher bestehen Überlegungen, die Offshore-Windenergie mit der Wellenenergie zu kombinieren. Neben einer Verstärkung der Stromeinspeisung der Windenergie können weitere Synergieeffekte, wie die Nutzung eines gemeinsamen Netzanschlusses und gemeinsamer Tiefseekabel, existieren.

Das in dieser Arbeit betrachtete theoretische Wellenenergiepotenzial kann nur in den seltensten Fällen ganz ausgeschöpft werden. Da die Nordsee für die verschiedensten Bedürfnisse vom Menschen genutzt wird, bestehen Nutzungskonflikte. Bevor die Wellenenergie also tatsächlich an einem Ort gewonnen werden kann, müssen diese Nutzungskonflikte analysiert werden. Des Weiteren ist der Einsatz von Wellenenergiewandlern nicht überall ökonomisch oder technisch sinnvoll. Das in dieser Arbeit betrachtete theoretische Potenzial wird somit durch weitere Potenziale, wie beispielsweise das ökologische, das technische, das ökonomische und das soziale eingeschränkt. Die Schnittmenge aus allen Potenzialen wird als erwartetes Potenzial bezeichnet und kann das theoretische Potenzial stark einschränken.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xiii
Formelverzeichnis	xiii
Abbildungsverzeichnis Anhang	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xiv
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeiner Kontext	1
1.2 Das Arbeitsumfeld	2
1.3 Zielsetzung der Masterarbeit	2
1.4 Gliederung der Arbeit	3
2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes	5
2.1 Geographische und geologische Grundlagen	5
2.2 Klimatologische und ozeanographische Grundlagen	7
2.2.1 Nordatlantische Oszillation	8
2.2.2 Ozeanische Zirkulationen in der Nordsee	11
3 Grundlagen zum Seegang	14
3.1 Seegang	14
3.1.1 Begriffsdefinitionen	14
3.1.2 Erregende und rücktreibende Kräfte.....	16
3.1.3 Windwellen und Seegang	17
3.1.4 Orbitalbewegung.....	19
3.2 Berechnung der Wellenenergie	20
3.2.1 Abschätzung der nutzbaren Energieflüsse	21
3.2.2 Dissipation der Wellenenergie	22
3.3 Technische Nutzung der Wellenenergie	23
3.3.1 TAPCHAN-System.....	24
3.3.2 OWC-System	25
3.3.3 Pelamis	26

4	Datengrundlage und Analyse Tools	27
4.1	CoastDat-Datensatz.....	27
4.1.1	Hindcast-Wellenmodell	28
4.1.2	Szenarien.....	31
4.2	Unsicherheiten von Modelldaten	35
4.2.1	Wellenmodelle	35
4.2.2	Regionale Klimaszenarien.....	36
4.3	Analyse Tools	37
5	Klimatologie der Nordsee 1958-2007	38
5.1	Ergebnisse	38
5.1.1	Mittlere signifikante Wellenhöhen jährlich und saisonal	39
5.1.2	Mittlere Perioden jährlich und saisonal.....	42
5.1.3	Mittlere Energieflüsse jährlich und saisonal	47
5.2	Diskussion der Ergebnisse.....	50
5.2.1	Räumliches Muster	50
5.2.2	Zeitliches Muster.....	54
5.2.3	Saisonalitäten	57
5.3	Bedeutung für die Nutzung der Wellenenergie.....	61
6	Langzeitige Variabilität	65
6.1	Die EOF-Analyse.....	66
6.2	Ergebnisse	69
6.2.1	EOF-Analyse der langjährigen mittleren signifikanten Wellenhöhe	69
6.2.2	EOF-Analyse der mittleren saisonalen signifikanten Wellenhöhe.....	73
6.2.3	EOF-Analyse der langjährigen mittleren Wellenenergieflüsse	75
6.2.4	EOF-Analyse der mittleren saisonalen Wellenenergieflüsse	77
6.2.5	Gemeinsame EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe und der mittleren Windgeschwindigkeit	80
6.2.6	Gemeinsame EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe und der Perioden..	82
6.3	Diskussion der Ergebnisse.....	84
7	Szenarien	85
7.1	Ergebnisse	85
7.1.1	Vergleich von Szenario- und Hindcastdaten	86
7.1.2	Änderungen in der mittleren signifikanten Wellenhöhe	88

7.1.3	Änderungen in der mittleren Periode.....	90
7.1.4	Änderungen im mittleren Wellenenergiefluss.....	90
7.2	Diskussion der Ergebnisse.....	91
8	Synergien mit Offshore Wind.....	94
8.1	Kreuzkorrelationsanalyse.....	95
8.2	Die Standorte.....	96
8.2.1	Alpha Ventus.....	97
8.2.2	H2-20.....	98
8.2.3	Horns Rev.....	99
8.3	Ergebnisse.....	100
8.3.1	Kreuzkorrelationsanalyse Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe.....	101
8.3.2	Kreuzkorrelationsanalyse Windenergie und Wellenenergie.....	102
8.3.3	Kreuzkorrelationsanalyse verschiedener Standorte.....	104
8.4	Diskussion der Ergebnisse.....	106
9	Einschränkung des theoretischen Potenzials.....	109
9.1	Theoretisches Wellenenergiepotenzial und Nutzungskonkurrenzen.....	111
9.2	Diskussion der Ergebnisse.....	113
10	Diskussion und Schlussfolgerung.....	115
11	Literaturverzeichnis.....	120
12	Anhang.....	A

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	LÄNDERGRENZEN UND WASSERTIEFEN IN DER NORDSEE.....	7
ABBILDUNG 2	GROSSRÄUMIGE ATMOSPHERISCHE ZIRKULATION.....	8
ABBILDUNG 3	DRUCK- UND WINDVERTEILUNG ÜBER DEM NORDATLANTIK FÜR POSITIVE (LINKS) UND NEGATIVE (RECHTS) NAO-ZUSTÄNDE IM WINTER	10
ABBILDUNG 4	ÄNDERUNG DES NAO-INDEX ZWISCHEN 1900-2005 IM WINTER (DEZEMBER-MÄRZ).....	10
ABBILDUNG 5	GRUNDLEGENDE PHYSIKALISCHE PROZESSE IN DER NORDSEE.....	12
ABBILDUNG 6	ALLGEMEINE ZIRKULATION DER NORDSEE	13
ABBILDUNG 7	KENNGRÖSSEN EINER WELLE.....	16
ABBILDUNG 8	AMPLITUDENSPEKTRUM DER OBERFLÄCHENWELLEN (HYPOTHETISCH) ZUR WELLENKLASSIFIKATION	17
ABBILDUNG 9	ORBITALBEWEGUNG IN VERSCHIEDENEN WASSERTIEFEN.....	19
ABBILDUNG 10	TAPCHAN-SYSTEM	25
ABBILDUNG 11	OWC-SYSTEM.....	25
ABBILDUNG 12	PRINZIP VON PELAMIS.....	26
ABBILDUNG 13	DARSTELLUNG DES KONSISTENTEN METEOROLOGISCH-OZEANISCHEN HINDCASTS FÜR DEN ZEITRAUM 1948-2007 FÜR DIE SÜDLICHE NORDSEE	31
ABBILDUNG 14	DIE VIER SRES SZENARIEN-GRUPPEN.....	33
ABBILDUNG 15	DARSTELLUNG DER ANTREIBENDEN UND GENERIERTEN DATENSÄTZE.....	35
ABBILDUNG 16	10- UND 50-JÄHRIGE MITTELWERTE DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M).....	40
ABBILDUNG 17	MITTLERE SAISONALE SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE (M) 1958-2007	41
ABBILDUNG 18	10- UND 50-JÄHRIGE MITTELWERTE DER T_{M2} -PERIODE (S).....	43
ABBILDUNG 19	MITTLERE SAISONALE T_{M2} -PERIODE (S) 1958-2007	44
ABBILDUNG 20	10- UND 50-JÄHRIGE MITTELWERTE DER PEAK-PERIODE (S)	45
ABBILDUNG 21	MITTLERE SAISONALE PEAK-PERIODE (S) 1958-2007	46
ABBILDUNG 22	10- UND 50-JÄHRIGE MITTELWERTE DER ENERGIEFLÜSSE (kWm^{-1}).....	48
ABBILDUNG 23	MITTLERE SAISONALE WELLENENERGIEFLÜSSE (kWm^{-1}) 1958-2007	49
ABBILDUNG 24	VERLAUF DER JÄHRLICHEN MITTLEREN WINDGESCHWINDIGKEIT (ms^{-1}) UND DER JÄHRLICHEN MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M) AN DER STATION ALPHA VENTUS (54° N, 6,6° E). 51	51
ABBILDUNG 25	10- UND 50-JÄHRIGE MITTELWERTE DER WINDGESCHWINDIGKEIT (ms^{-1}).....	53
ABBILDUNG 26	GLEITENDES VIERJÄHRIGES MITTEL DER WINDGESCHWINDIGKEIT UND DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE AN DER STATION ALPHA VENTUS (54° N, 6,6° E). DAS VIERJÄHRIGE GLEITENDE MITTEL DER EINZELNEN JAHRE WIRD AUS DEN JAHRESMITTELWERTEN VON T-2, T-1, T UND T+1 BERECHNET ...	55
ABBILDUNG 27	VERLAUF DES NAOI UND DER ANOMALIEN DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE UND DER WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION ALPHA VENTUS (54° N, 6,6° E)	56
ABBILDUNG 28	MITTLERE KENNWERTE FÜR DIE VERSCHIEDENEN JAHRESZEITEN AN DER STATION ALPHA VENTUS (54° N, 6,6° E) ZWISCHEN 1958-2007	58
ABBILDUNG 29	MITTLERE SAISONALE WINDGESCHWINDIGKEITEN (ms^{-1}) 1958-2007.....	59

ABBILDUNG 30	ZONALE WINDVERHÄLTNISSE AUF DER NORDHALBKUGEL IM WINTER (LINKS) UND IM SOMMER (RECHTS)	61
ABBILDUNG 31	MITTLERES 95%-QUANTIL DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE 1958-2007.	62
ABBILDUNG 32	QUOTIENT DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE UND DES 95%-QUANTILS DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE.	63
ABBILDUNG 33	BEISPIEL FÜR EOF-KOEFFIZIENTEN (ROTE ACHSEN).....	68
ABBILDUNG 34	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE	71
ABBILDUNG 35	VERLAUF DES NAOI (DJF) UND DER ERSTEN PC DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE	72
ABBILDUNG 36	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M) FÜR DIE EINZELNEN JAHRESZEITEN (1958-2007).	75
ABBILDUNG 37	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE (kWm^{-1}) ZWISCHEN 1958-2007 77	
ABBILDUNG 38	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SAISONALEN WELLENENERGIEFLÜSSE.....	79
ABBILDUNG 39	GEMEINSAME EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M) UND DER MITTLEREN WINDGESCHWINDIGKEIT (ms^{-1})	81
ABBILDUNG 40	GEMEINSAME EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M) UND DER T_{M2} -PERIODE (s) (1958-2007)	83
ABBILDUNG 41	LINKS: KONTROLLSZENARIEN (1961-1990); RECHTS: HINDCASTDATEN (1961-1990)....	88
ABBILDUNG 42	KLIMAWANDELSIGNAL DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE IN M FÜR DAS WRE-A-SZENARIO (LINKS) UND DAS WRE-B-SZENARIO (RECHTS). DAS KLIMAWANDELSIGNAL WURDE NACH FORMEL 5 BERECHNET (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).	89
ABBILDUNG 43	PROZENTUALE VERÄNDERUNG DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE LAUT WRE-A-SZENARIO IM VERGLEICH ZUM KONTROLLSZENARIO WRE-C	89
ABBILDUNG 44	KLIMAWANDELSIGNAL DER MITTLEREN T_{M2} -PERIODE IN S FÜR DAS WRE-A-SZENARIO (LINKS) UND DAS WRE-B-SZENARIO (RECHTS). DAS KLIMAWANDELSIGNAL WURDE NACH FORMEL 5 BERECHNET (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).	90
ABBILDUNG 45	KLIMAWANDELSIGNAL DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE IN kWm^{-1} FÜR DAS WRE-A-SZENARIO (LINKS) UND DAS WRE-B-SZENARIO (RECHTS). DAS KLIMAWANDELSIGNAL WURDE NACH FORMEL 5 BERECHNET (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG).	91
ABBILDUNG 46	PRINZIP DER KREUZKORRELATION.....	96
ABBILDUNG 47	UNGEFÄHRE LAGE DER UNTERSUCHTEN OFFSHORE-WINDPARKS	97
ABBILDUNG 48	OBEN: VERLAUF DER MITTLEREN WELLENHÖHE (M) (BLAU) UND DER MITTLEREN WINDGESCHWINDIGKEIT (ms^{-1}) (GRÜN) AN DER STATION ALPHA VENTUS (54° N , $6,6^\circ \text{ E}$). UNTEN: VERLAUF DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE (kWm^{-1}) (BLAU) UND DER MITTLEREN WINDENERGIE (Wm^{-2}) (GRÜN) AN DER STATION ALPHA VENTUS.....	98
ABBILDUNG 49	OBEN: VERLAUF DER MITTLEREN WELLENHÖHE (M) (BLAU) UND DER MITTLEREN WINDGESCHWINDIGKEIT (ms^{-1}) (GRÜN) AN DER STATION H2-20 ($55,7^\circ \text{ N}$, $4,1^\circ \text{ E}$). UNTEN: VERLAUF DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE (kWm^{-1}) (BLAU) UND DER MITTLEREN WINDENERGIE (Wm^{-2}) (GRÜN) AN DER STATION H2-20.....	99

ABBILDUNG 50	OBEN: VERLAUF DER MITTLEREN WELLENHÖHE (M) (BLAU) UND DER MITTLEREN WINDGESCHWINDIGKEIT (ms^{-1}) (GRÜN) AN DER STATION HORNS REV ($55,5^\circ \text{ N}$, $7,8^\circ \text{ E}$). UNTEN: VERLAUF DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE (kWm^{-1}) (BLAU) UND DER MITTLEREN WINDENERGIE (Wm^{-2}) (GRÜN) AN DER STATION HORNS REV	100
ABBILDUNG 51	ERGEBNISSE DER KREUZKORRELATIONSANALYSE DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M) UND DER WINDGESCHWINDIGKEIT (ms^{-1}) AN DER STATION ALPHA VENTUS (OBEN) ($\sim 54^\circ \text{ N}$, $6,6^\circ \text{ E}$), H2-20 (MITTE) ($\sim 55,7^\circ \text{ N}$, $4,1^\circ \text{ E}$) UND HORNS REV (UNTEN) ($\sim 55,5^\circ \text{ N}$, $7,8^\circ \text{ E}$).....	102
ABBILDUNG 52	ERGEBNISSE DER KREUZKORRELATIONSANALYSE DER WELLEN- UND WINDENERGIE AN DER STATION ALPHA VENTUS (OBEN) ($\sim 54^\circ \text{ N}$, $6,6^\circ \text{ E}$), H2-20 (MITTE) ($\sim 55,7^\circ \text{ N}$, $4,1^\circ \text{ E}$) UND HORNS REV (UNTEN) ($\sim 55,5^\circ \text{ N}$, $7,8^\circ \text{ E}$).....	104
ABBILDUNG 53	OBEN: KREUZKORRELATIONSANALYSE DER WINDENERGIE (V4) AN DER STATION H2-20 UND DER WELLENENERGIE (P4) AN DER STATION ALPHA VENTUS. UNTEN: KREUZKORRELATIONSANALYSE DER WINDENERGIE (V4) AN DER STATION H2-20 UND DER WELLENENERGIE (P4) AN DER STATION HORNS REV.	105
ABBILDUNG 54	OBEN: ERGEBNIS DER KREUZKORRELATIONSANALYSE DER WINDENERGIE (V4) AN DER STATION H2-20 UND DER WINDENERGIE (V4) AN DER STATION ALPHA VENTUS. UNTEN: ERGEBNIS DER KREUZKORRELATIONSANALYSE DER WELLENENERGIE (P4) DER STATION H2-20 UND DER WELLENENERGIE (P4) DER STATION ALPHA VENTUS.	106
ABBILDUNG 55	POTENZIALBEGRIFFE	110
ABBILDUNG 56	50-JÄHRIGES MITTEL (1958-2007) DER WELLENENERGIEFLÜSSE (kWm^{-1}) IN DER NORDSEE ZWISCHEN $3-9^\circ \text{ E}$ UND $53-56^\circ \text{ N}$	112
ABBILDUNG 57	NUTZUNGSKONKURRENZEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	113

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1	ÜBERBLICK ÜBER VERSCHIEDENE IM COASTDAT-DATENSATZ ENTHALTENE MODELLE UND IHRE EIGENSCHAFTEN.....	28
TABELLE 2	PROJIZIERTE MITTLERE VERÄNDERUNGEN DER SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (Hs), DER T _{M2} -PERIODE UND DER WELLENENERGIEFLÜSSE (P4) DES WRE-A UND WRE-B-SZENARIOS.	93

Formelverzeichnis

FORMEL 1	BERECHNUNG DES NAOI.....	9
FORMEL 2	BERECHNUNG DER WELLENENERGIEDICHTE.....	20
FORMEL 3	BERECHNUNG DES WELLENENERGIEFLUSSES.....	21
FORMEL 4	FORMEL ZUR NORMALISIERUNG VON DATEN.....	69
FORMEL 5	BERECHNUNG DES KLIMAWANDELSIGNALS	86
FORMEL 6	BERECHNUNG DER WINDENERGIE.....	95

Abbildungsverzeichnis Anhang

ANHANG I	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN T _{M2} -PERIODE FÜR DEN ZEITRAUM 1958-2007	A
ANHANG II	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN PEAK-PERIODE FÜR DEN ZEITRAUM 1958-2007.....	B
ANHANG III	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE DER FRÜHLINGSMONATE (MÄRZ, APRIL, MAI) 1958-2007.....	C
ANHANG IV	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE FÜR DIE SOMMERMONATE (JUNI, JULI, AUGUST) 1958-2007	D
ANHANG V	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE FÜR DIE HERBSTMONATE (SEPTEMBER, OKTOBER, NOVEMBER) 1958-2007.....	E
ANHANG VI	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE FÜR DIE WINTERMONATE (DEZEMBER, JANUAR, FEBRUAR) 1958-2007	F
ANHANG VII	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE FÜR DIE FRÜHLINGSMONATE (MÄRZ, APRIL, MAI) 1958-2007.....	G
ANHANG VIII	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE FÜR DIE SOMMERMONATE (JUNI, JULI, AUGUST) 1958-2007	H
ANHANG IX	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE FÜR DIE HERBSTMONATE (SEPTEMBER, OKTOBER, NOVEMBER) 1958-2007.....	I
ANHANG X	EOF-ANALYSE DER MITTLEREN WELLENENERGIEFLÜSSE FÜR DIE WINTERMONATE (DEZEMBER, JANUAR, FEBRUAR) 1958-2007.....	J
ANHANG XI	ZWEITER TEIL DER GEMEINSAMEN EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M) UND DER MITTLEREN WINDGESCHWINDIGKEIT (MS ⁻¹).....	K

ANHANG XII	DRITTER TEIL DER GEMEINSAMEN EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M) UND DER MITTLEREN WINDGESCHWINDIGKEIT (MS^{-1}).....	L
ANHANG XIII	ZWEITER TEIL DER GEMEINSAMEN EOF-ANALYSE DER MITTLEREN SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (M) UND DER T_{M2} -PERIODE (S).....	M

Abkürzungsverzeichnis

H_S	SIGNIFIKANTE WELLENHÖHE (M)
P_4	WELLENENERGIEFLUSS (KWM^{-1})
T_P	PEAK-PERIODE (S)
T_{M2}	T_{M2} -PERIODE (S)
T_{M1}	T_{M1} -PERIODE (S)
V	WINDGESCHWINDIGKEIT (MS^{-1})
V_4	WINDENERGIE (WM^{-2})
WASSERTIEFE	D
WELLENLÄNGE	L

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird der allgemeine Kontext der vorliegenden Masterarbeit erläutert und das Arbeitsumfeld kurz beschrieben. Ausserdem werden die Zielsetzung und die Gliederung der Masterarbeit vorgestellt.

1.1 Allgemeiner Kontext

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erkannte man, dass fossile Brennstoffe nicht nur endlich, sondern auch schädlich für die Umwelt sind. Diese Erkenntnis führte zu einem vermehrten Interesse an erneuerbaren Energien (McCORMICK 2001:3187). Bis Ende der 1980er Jahre basierte die Stromerzeugung aus regenerativen Energien in Deutschland hauptsächlich auf Wasserkraftanlagen. Dank des Stromeinspeisungsgesetzes aus dem Jahr 1990, des Erneuerbaren Energiengesetzes aus dem Jahr 2000 und dessen Nachfolgegesetzes aus dem Jahr 2004 konnte der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Deutschland stark erhöht werden (BMU 2007:4ff). Den grössten Aufschwung erlebte dabei die Windenergie, aber auch die Biomasse- und Photovoltaiknutzung wurden ausgebaut. Im Jahr 2008 konnten bereits ~15% des Bruttostromverbrauchs Deutschlands durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Bis zum Jahr 2020 soll der Anteil der regenerativen Energien am Bruttostromverbrauch auf 30% und bis zum Jahr 2050 auf 50% ausgebaut werden. Den grössten Beitrag dazu soll die Windenergie leisten. Der Solarenergie, der Wasserkraft, der Geothermie und der Biomasse kommt aber auch eine wesentliche Bedeutung zu (BMU 2007:4ff).

Eine weitere erneuerbare Energiequelle stellt die Meeresenergie dar. In der vorliegenden Arbeit wird speziell die Wellenenergie behandelt. Dieser kommt bisher keine grosse Bedeutung in der Stromerzeugung in Deutschland zu. Zum einen steht die Forschung und Entwicklung der Nutzung der Wellenenergie noch im Anfangsstadium und zum anderen wird das ausschöpfbare Potenzial in der deutschen Nord- und Ostsee als gering eingeschätzt. Allerdings wurden in den letzten Jahren weltweit Pilotprojekte gestartet, die viel versprechende Innovationen zur Folge haben. Neben Systemen, welche die Wellenenergie in Strom umwandeln, gibt es Anlagen, die das Meerwasser entsalzen (McCORMICK 2001:3187). Anlagen zur Gewinnung der Wellenenergie können zudem in Kombination mit Küstenschutzmassnahmen oder Windkraftanlagen eingesetzt werden. Bei der ersten

Kombination reflektiert, bzw. dissipiert die auftreffende Energie nicht nur, sondern wird dem Meer entnommen und in Strom umgewandelt. Dies hat eine Verbesserung des Küstenschutzes zur Folge und könnte die Wellenenergienutzung ökonomisch attraktiver machen (KALTSCHMITT 2006:591). Durch eine Kombination von Offshore-Windkraftanlagen und Anlagen zur Nutzung der Meeresenergie könnten eine Verstärkung der Einspeisung der Windenergie erreicht und Kosten für Infrastruktur gespart werden.

Je nach Quelle liegt das Potenzial der globalen Wellenenergie zwischen 1-10 TW. Diese Zahl allein macht deutlich, wie riesig das bis heute noch nahezu ungenutzte Energiepotenzial der Ozeane ist (THORPE 2007:556).

1.2 Das Arbeitsumfeld

Die vorliegende Masterarbeit wurde am GKSS-Forschungszentrum im Institut für Küstenforschung in Geesthacht geschrieben. Das im Jahre 1956 gegründete GKSS-Forschungsinstitut ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren und beschäftigt in Geesthacht bei Hamburg und in Teltow bei Berlin rund 800 Mitarbeiter. Unter dem Motto „Wissen schafft Nutzen“ wird in den Bereichen Küsten- und Materialforschung sowie der Regenerativen Medizin geforscht. Das Institut für Küstenforschung, das von Prof. Dr. Hans von Storch geleitet wird, ist in Geesthacht angesiedelt und in zwei Bereiche (Operationelle Systeme, Systemanalyse und Modellierung) aufgeteilt. Diese sind wiederum in jeweils acht Abteilungen gegliedert und beinhalten eine gemeinsame Abteilung (Institutslogistik und -organisation). Eine dieser Abteilungen ist die Abteilung für Küstenklima, welcher Dr. Ralf Weisse vorsteht. Diese Masterarbeit wurde in der Abteilung Küstenklima unter der externen Betreuung von Herrn Dr. Ralf Weisse und der universitären Betreuung von Prof. Dr. Nikolaus J. Kuhn vom Geographischen Institut, Departement Umweltwissenschaften, Physiogeographie und Umweltwandel, der Universität Basel geschrieben.

1.3 Zielsetzung der Masterarbeit

Hauptziel dieser Arbeit ist eine Analyse der Variabilität des **theoretischen** Wellenenergiepotenzials in der Nordsee südlich von 56° N. Unter dem theoretischen

Potenzial versteht man laut PIOT (2006:2) das theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot in einer bestimmten Region und zu einem bestimmten Zeitpunkt oder in einem bestimmten Zeitraum. Ausgewertet werden die für die Wellenenergiebetrachtung relevanten Parameter: die **signifikante Wellenhöhe**, die **Peak-** und die **T_{m2}-Periode** und die **Wellenenergieflüsse**. Die Untersuchungen beziehen sich auf die Zeiträume 1958-2007, 1961-1990 und 2071-2100. Es soll u.a geprüft werden:

- 1) wie sich das mittlere Wellenklima zwischen 1958-2007 entwickelt hat,
- 2) durch welche zeitliche und räumliche Variabilität das Wellenklima zwischen 1958-2007 gekennzeichnet ist,
- 3) wie sich das Wellenklima in der Zukunft (2071-2100) verändern könnte und ob die verwendeten Szenariendaten sinnvoll sind,
- 4) ob Synergieeffekte mit Offshore Wind bestehen und
- 5) welche Bedeutung die erhaltenen Ergebnisse für eine tatsächliche Nutzung der Wellenenergie haben. Diese Betrachtung erfolgt aus rein theoretischer Sicht.

Zu beachten ist, dass sich diese Arbeit nur mit dem **theoretischen Potenzial** der Wellenenergie beschäftigt. Lediglich im letzten Kapitel wird vorgestellt, wie das theoretische Potenzial durch die weiteren Potenziale (wie ökologisches, ökonomisches, technisches, etc.) eingeschränkt werden kann. Ziel dieser Arbeit ist also eine Darstellung des theoretischen Wellenenergiepotenzials und nicht der tatsächlich nutzbaren Wellenenergie. Eine ganzheitliche Analyse der tatsächlich nutzbaren Energie würde den Umfang dieser Arbeit sprengen. Diese wird deshalb nur ansatzweise dargestellt und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die Masterarbeit ist in vier Teile gegliedert. Im ersten Teil werden das bearbeitete Themengebiet und die Rahmenbedingungen der Arbeit vorgestellt.

Im zweiten Teil dieser Arbeit, der Kapitel 2 bis 4 umfasst, werden die wichtigsten Grundlagen dargelegt. Zunächst werden das Untersuchungsgebiet präsentiert und dessen geographische, geologische, klimatologische und ozeanographische

Besonderheiten vorgestellt (Kapitel 2). In einem zweiten Schritt wird auf die Eigenschaften der Meereswellen, auf die Berechnung deren Energie und ihre technische Nutzung eingegangen (Kapitel 3). Ausserdem werden in Kapitel 4 die verwendeten Daten vorgestellt und die Vor- und Nachteile von Modelldaten diskutiert.

Der dritte Teil dieser Arbeit stellt die gewonnenen Ergebnisse vor und interpretiert diese in Hinblick auf eine mögliche Nutzung der Wellenenergie. Hierbei wird zunächst das mittlere Wellenklima zwischen 1958-2007 analysiert (Kapitel 5). Das Wellenklima wird anhand verschiedener Variablen, die für die energetische Betrachtung der Meereswellen bedeutend sind, untersucht. Hierzu zählen die signifikante Wellenhöhe, die Peak-Periode, die T_{m2} -Periode und die Wellenenergieflüsse. Da die Kenntnis über die räumliche und zeitliche Variabilität der Wellenenergie von grosser Bedeutung ist, wird diese daran anschliessend betrachtet (Kapitel 6). Ausserdem wird anhand von zwei verschiedenen Szenarien, die auf unterschiedlichen Treibhausgasemissionen basieren, die mögliche zukünftige Entwicklung des Wellenklimas vorgestellt (Kapitel 7). Die Analyse basiert auf Szenarien-Daten der Jahre 2071-2100. Um die Qualität der verwendeten Daten zu überprüfen und als Referenz zur Abschätzung der Klimaänderungssignale wird zusätzlich ein Kontrollzeitraum (1961-1990) betrachtet. Da es Überlegungen gibt, die Nutzung von Wind- und Wellenenergie zu kombinieren, wird in Kapitel 8 zudem auf mögliche Synergieeffekte eingegangen.

Im vierten Teil der vorliegenden Arbeit werden die gewonnenen Ergebnisse zusammengefasst und interpretiert. Die Interpretation erfolgt im Hinblick auf eine tatsächliche Nutzung der Wellenenergie. Hierbei wird zunächst dargestellt, wie das theoretische Potenzial durch die übrigen Potenziale eingeschränkt wird (Kapitel 9).

Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 10. Dieses enthält eine die ganze Arbeit umfassende Diskussion.

2 Charakterisierung des Untersuchungsgebietes

Dieses Kapitel stellt die grundlegenden geographischen, geologischen, klimatologischen und ozeanographischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes vor. Da bei einer tatsächlichen Nutzung der Wellenenergie in der Nordsee zahlreiche Nutzungskonflikte bestehen (z.B. zwischen der Schifffahrt und Offshore-Windparks), ist ein umfassendes Verständnis des gesamten „Systems Nordsee“ notwendig. Das primäre Ziel dieser Arbeit ist jedoch eine Darstellung des theoretischen Potenzials, weshalb auf die begrenzenden Faktoren einer tatsächlichen Nutzung der Wellenenergie nur kurz eingegangen wird. Die ganzheitliche Untersuchung der Auswirkungen der Wellenenergienutzung auf den Fischfang, das marine Leben, die Küsten, den Tourismus, etc. ist Aufgabe des integrierten Küstenzonenmanagements (SCHWARTZ 2005:1064).

2.1 Geographische und geologische Grundlagen

Die Nordsee ist ein Randmeer des Nordatlantischen Ozeans und befindet sich auf dem kontinentalen Schelf Nordwesteuropas (MICHAELSEN 1998:1). Die Nordsee wird umgeben von einer der dichtest besiedelten und höchst industrialisierten Regionen der Welt. Begrenzt wird sie im Westen durch Grossbritannien, im Nordosten durch Norwegen, im Osten durch Dänemark, im Südosten durch Deutschland, im Süden durch die Niederlande und im Südwesten durch Frankreich und Belgien. Sie weist zusammen mit den Flussmündungen und den Fjorden eine Oberfläche von etwa 750.000 km² und ein Volumen von etwa 94.000 km³ auf (OSPAR 2000:6).

Die Nordsee ist nach Norden und nach Südenwesten hin geöffnet (siehe Abbildung 1). Die südliche Nordsee ist über eine schmale Verbindung, die Strasse von Dover, mit dem Ärmelkanal verbunden und im nördlichen Bereich öffnet sie sich trichterförmig zum nordöstlichen Atlantik hin. Ausserdem existiert am östlichen Ende eine schmale Verbindung zur Ostsee (HOWARTH 1994:6). Traditionell wird die Nordsee in fünf Regionen unterteilt: Die südliche Nordsee mit der Southern Bight und der Deutschen Bucht, die Zentralnordsee, die nördliche Nordsee, die Norwegische Rinne und das Skagerrak. Das Kattegat wird als Übergangszone zwischen Nord- und Ostsee angesehen (OSPAR 2000:6). Die Küsten der Nordsee sind stark gegliedert, neben Watt- und Dünenküsten, treten felsige Steil- oder Gebirgsküsten auf (LOZAN

1990:13). Die Nordsee ist ein relativ flaches Schelf- oder Randmeer mit maximalen Tiefen von 50 m in der südlichen Nordsee und von 200 m in der nördlichen Nordsee. Die mittlere Tiefe beträgt 70 m. Eine Ausnahme stellt die Norwegische Rinne dar, welche bis zu 700 m tief ist (ASPELIEN 2006:17).

Geologisch gesehen handelt es sich bei der Nordsee um ein sehr altes Schelfmeer, das bereits im Zechstein (~180 Millionen Jahre vor heute) von Wasser überflutet war. Aufgrund der zahlreichen Vorstösse und Rückzüge des Wassers konnten sich über 6000 m mächtige Sedimentschichten ablagern (LOZAN 1990:12). Da weite Bereiche des heutigen Nordseebodens während der letzten Eiszeit in Europa vor etwa 15000 Jahren oberhalb des Meeresspiegels lagen, ist die heutige Unterwassertopographie noch stark von der glazialen Vereisung gekennzeichnet. Es kam unter anderem zur Bildung der Norwegischen Rinne und der Doggerbank (OSPAR 2000:7). Seit dem Rückgang der Vereisung Nordeuropas haben Ausdehnung und Tiefe der Nordsee bis ~2000 v. Chr. ständig zugenommen. Die Strasse von Dover entstand erst vor etwa 4000 Jahren und das Wattenmeer existiert in seiner heutigen Ausdehnung erst wenige Jahrhunderte. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass „die heutige Nordsee – bezogen auf erd- und entwicklungsgeschichtliche Zeiträume – noch sehr jung ist. Ein geologisch-physikalisches Gleichgewicht ist bisher nicht erreicht worden“ (LOZAN 1990:12).

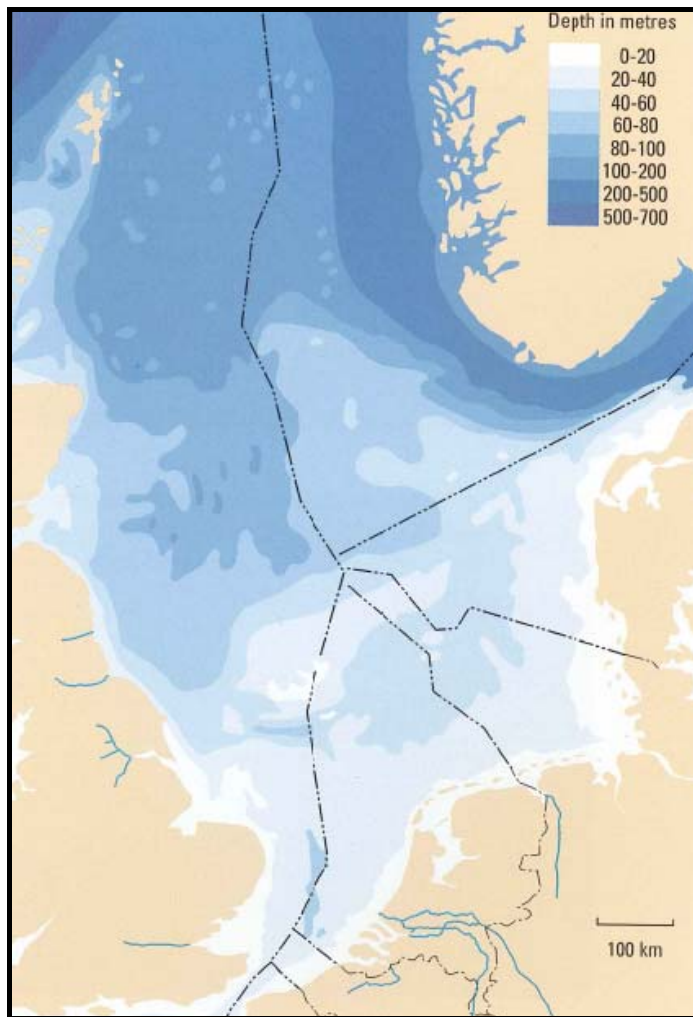


Abbildung 1 Ländergrenzen und Wassertiefen in der Nordsee (Quelle: SÜNDERMANN 2002:11).

2.2 Klimatologische und ozeanographische Grundlagen

„Die Atmosphäre ist der Motor, der die Entwicklung des ozeanographischen Zustands der Nordsee wesentlich antreibt und steuert“ (LOEWE 2009:36). Die Interpretation von ozeanographischen Zuständen setzt daher Kenntnisse über Vorgänge in der Atmosphäre voraus, sodass im folgenden Text zunächst auf diese eingegangen wird. Zu beachten ist, dass nur ein kleiner für diese Arbeit essentieller Teil der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationen beschrieben wird. Eine genaue Einführung wird beispielsweise in KLOSE (2008), WEISSE (2010), MALBERG (2007) oder HÄCKEL (2008) gegeben.

Die Nordsee befindet sich in der gemäßigten Zone, in welcher das Klima durch die grossskalige Westwindzirkulation geprägt ist (OSPAR 2000:21). Abbildung 2 zeigt das Zustandekommen dieser Zirkulation. Die Luft steigt in der subpolaren

Tiefdruckrinne ($\sim 60^\circ\text{N}$ und S) auf, bewegt sich in den oberen Schichten in Richtung niedrigere Breiten und sinkt in den Hochs der Subtropen ($\sim 30^\circ\text{N}$ und S) wieder ab. „In den unteren Schichten ist folglich im Mittel eine Ausgleichsströmung von den Subtropen zu den Tiefs der subpolaren Tiefdruckrinne, z.B. vom Azorenhoch zum Islandtief, vorhanden“ (MALBERG 2007:269). Die theoretisch von Süden nach Norden (Nordhalbkugel), bzw. von Norden nach Süden (Südhalbkugel) wehenden Winde werden aufgrund der Corioliskraft auf der Nordhalbkugel nach rechts und auf der Südhalbkugel nach links abgelenkt (HÄCKEL 2008:265).

Bei dieser Zirkulation handelt es sich um eine thermisch indirekte, auch genannt rein dynamische Zirkulation, die als Ferrel-Zirkulation bezeichnet wird. Man spricht von einer rein dynamischen Zirkulation, da die Luft, induziert von den benachbarten Zirkulationen, in der kühleren Region aufsteigt und in der wärmeren absinkt.

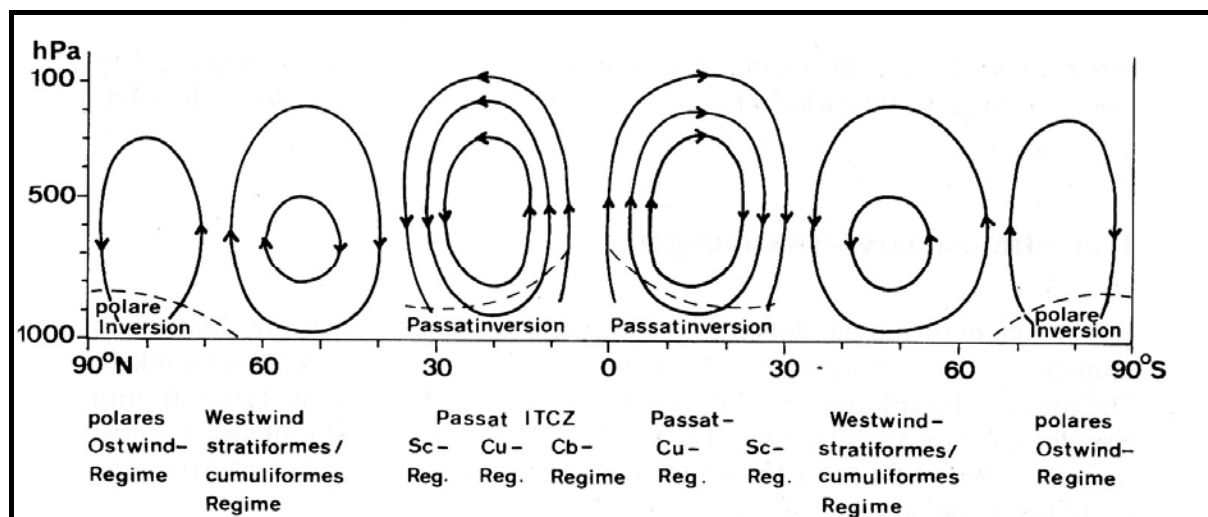


Abbildung 2 Grossräumige atmosphärische Zirkulation (Quelle: MALBERG 2007:269).

Die Stärke und Andauer des Westwindes, welcher Tiefdruckgebiete Richtung Osten transportiert, variiert mit der Zeit (OSPAR 2000:21). Grund hierfür ist die Nord-Atlantische Oszillation.

2.2.1 Nordatlantische Oszillation

Unter der Nordatlantischen Oszillation (NAO) versteht man eine meridionale Luftdruckschaukel zwischen dem Islandtief und dem Azorenhoch, welche einer sieben bis neunjährigen Schwankung unterliegt (LOEWE 2009:37). Um diese zu

beschrieben wurde der NAO-Index (NAOI) eingeführt. Es ist anzumerken, dass viele verschiedene Definitionen bestehen. Formel 1 zeigt eine mögliche, bei welcher der NAOI aus dem monatlichen Luftdruckunterschied auf Meeresebene zwischen der Station Ponta Delgada (Azoren), bzw. Lissabon (Portugal) und Stykkisholmur (Island) berechnet wird (HURRELL in KLOSE 2008:290):

$$NAOI = \frac{\left(p - \bar{p} \right)_{Lissabon}}{\sigma_{Lissabon}} - \frac{\left(p - \bar{p} \right)_{Stykkisholmur}}{\sigma_{Stykkisholmur}}$$

Formel 1 Berechnung des NAOI (Quelle: HURRELL in KLOSE 2008:290).

Während das Azorenhoch in seiner Intensität von Jahr zu Jahr nur geringe Schwankungen aufweist, ist das Islandtief von starken Intensitätsschwankungen gekennzeichnet. Somit ist der Wechsel zwischen starken und schwachen meridionalen Druckunterschieden hauptsächlich auf das Islandtief zurückzuführen (MALBERG 2007:343). Vor allem in der kalten Jahreszeit hat die NAO eine grosse Fernwirkung, welche von Zentral-Nordamerika bis in den Ural reicht und die atmosphärische Variabilität über der Nordsee dominiert (LOEWE 2009:37). „Sind beide Druckzentren kräftig ausgebildet, existiert eine straffe Westströmung über dem Atlantik mit der die Tief- und Hochdruckgebiete der gemässigten Breiten rasch ostwärts ziehen“ (KLOSE 2008:291). Diese Situation entspricht einem positiven NAO-Index (vgl. Abbildung 3). Ist das Islandtief jedoch schwach ausgebildet, so ist die Westwindströmung über dem Nordatlantik ebenfalls schwächer und man spricht von einem negativen NAO-Index (MALBERG 2007:343). Starke, bzw. schwache Westwinde haben wiederum Einfluss auf verschiedene Prozesse wie den Wassertransport durch Strömungen, die vertikale Mischung des Wasserkörpers, die Wärmestromdichte und die Wolkenbedeckung (OSPAR 2000:18).

Laut HURRELL (1995:677) sind die bodennahen zonalen geostrophischen Westwinde über dem Nordatlantik in Wintern mit einem hohen NAO-Index über 8 ms^{-1} stärker als in Wintern, die durch einen niedrigen NAO-Index gekennzeichnet sind. Abbildung 4 zeigt den Verlauf des NAO-Index zwischen 1900 und 2005 für die Wintermonate Dezember bis März. Diese macht deutlich, dass neben der saisonalen

Variabilität des NAOI auch grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren existieren. Während zwischen 1900 und 1930 positive Werte dominierten, war der Zeitraum zwischen den frühen 1940ern und den frühen 1970ern von abnehmenden NAO-Indexwerten gekennzeichnet. Seit 1980 ist wiederum ein positiver Trend zu verzeichnen, der nach ca. 1990 wieder rückläufig wird. In den Jahren 1983, 1989 und 1990 traten die höchsten NAO-Indexwerte auf, die seit Beginn der Aufzeichnungen (1864) gemessen wurden (HURRELL 1995:676).

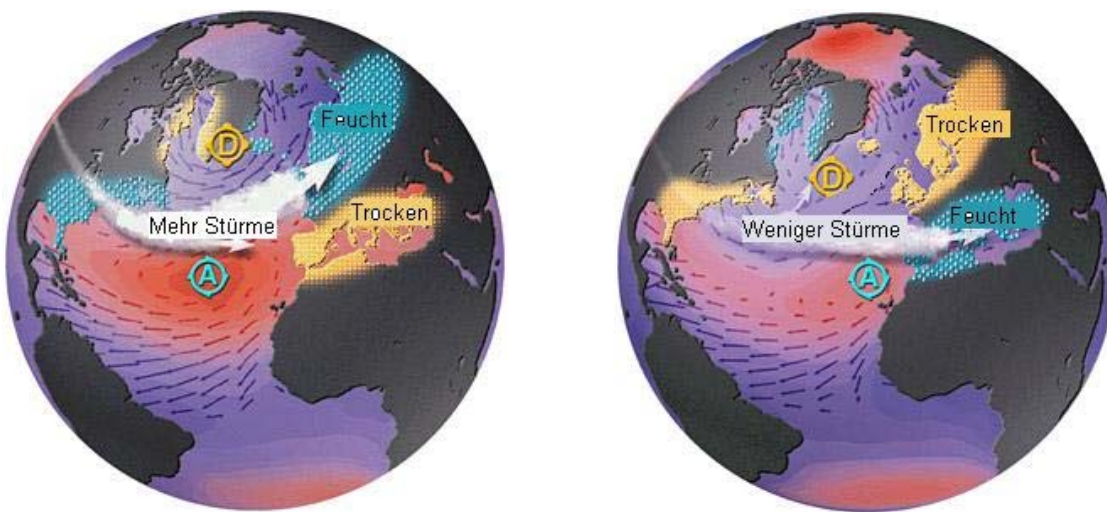


Abbildung 3 Druck- und Windverteilung über dem Nordatlantik für positive (links) und negative (rechts) NAO-Zustände im Winter. (Quelle: verändert nach www.aviso.oceanobs.com).

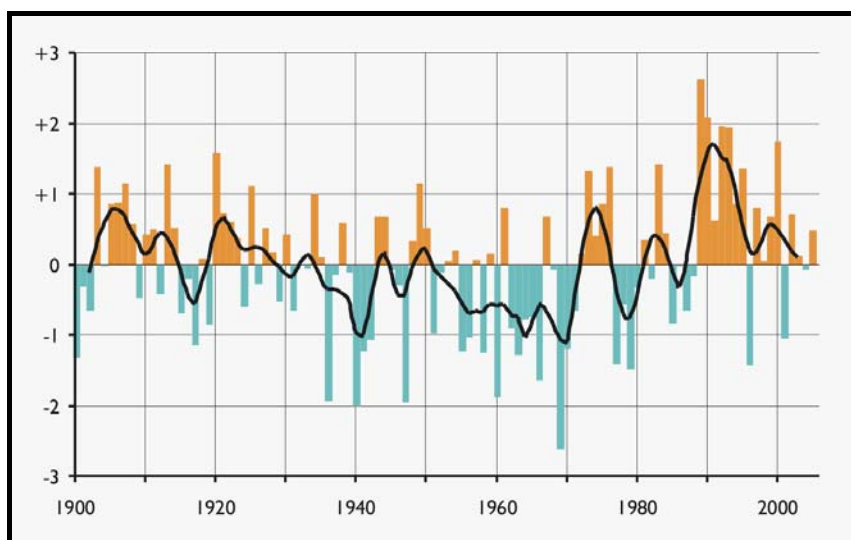


Abbildung 4 Änderung des NAO-Index zwischen 1900-2005 im Winter (Dezember-März) (Quelle: www.hamburger-bildungsserver.de a).

2.2.2 Ozeanische Zirkulationen in der Nordsee

Abbildung 5 zeigt die grundlegenden physikalischen Prozesse in der Nordsee. Von grosser Bedeutung ist die Gezeitenenergie, welche die Nordsee über das nördliche Ende vom Nordatlantik und durch den Ärmelkanal erreicht (ASPELIEN 2006:17). Die Gezeiten bewirken eine starke Durchmischung des Wasserkörpers und machen einen Grossteil der kinetischen Energie der Nordsee aus (SIMPSON 1994:2).

Neben den Gezeiten haben Zirkulationen einen wichtigen Einfluss auf Ozeane. In der Ozeanographie wird grundsätzlich zwischen der windgetriebenen und der dichtegetriebenen Zirkulation unterschieden. Zu beachten ist, dass die Summe dieser beiden Zirkulationsarten nicht der beobachteten Zirkulation entsprechen muss. Während die windgetriebene Zirkulation an der Wasseroberfläche dominiert, zeigt die dichtegetriebene Zirkulation ihre grösste Wirkung in der Tiefe. Die windgetriebene Zirkulation entsteht durch die Impulsübertragung von der Atmosphäre auf die oberen Wasserschichten (WEISSE 2010:8ff). Die dichtegetriebenen Zirkulationen entstehen zum einen durch Temperaturunterschiede, die hauptsächlich durch die Erwärmung und Abkühlung des oberflächennahen Wassers bedingt sind. Zum anderen führen Unterschiede im Salzgehalt des Wassers, die vor allem durch den Zufluss von Süsswasser aus Flüssen entstehen, zu unterschiedlichen Dichtegehalten und somit zu Zirkulationen des Meerwassers (SIMPSON 1994:3). Einen grossen Beitrag hierzu leistet der Rhein (siehe Abbildung 5).

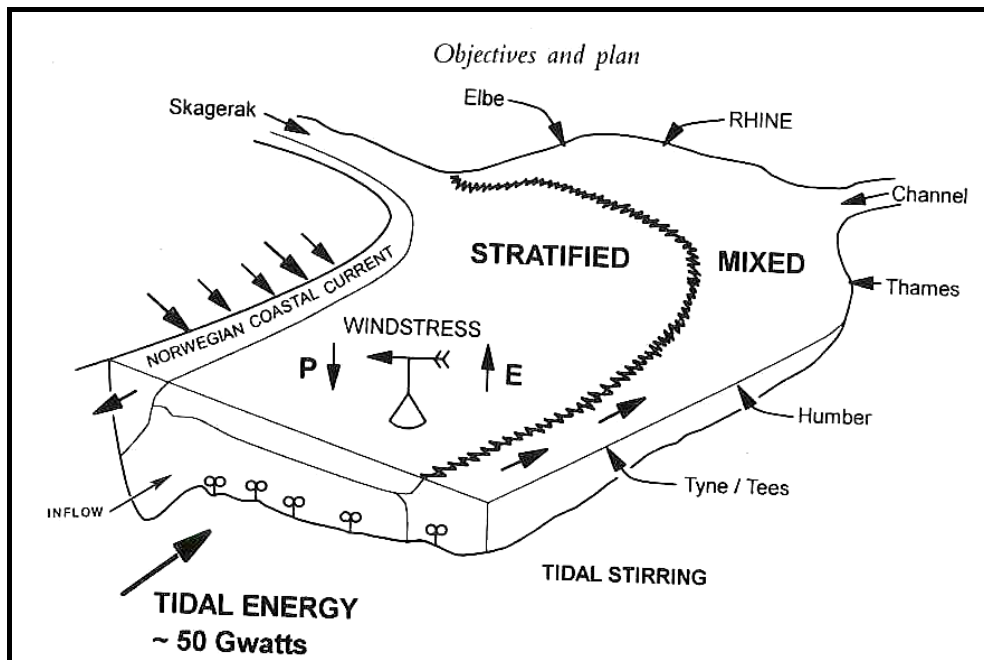


Abbildung 5 Grundlegende physikalische Prozesse in der Nordsee (Quelle: SIMPSON 1994:3).

Abbildung 6 zeigt, dass die Hauptströmungen in der Nordsee zyklonal, also gegen den Uhrzeigersinn, zirkulieren. Der Hauptteil der Zirkulation findet in der nördlichen Nordsee statt. In diesem Bereich fließen die Hauptwassermassen in Form von zwei Strömen in die Nordsee. Einen verhältnismässig geringen Beitrag liefert der Ärmelkanal mit weniger als 10% des gesamten Einflusses. Die einströmenden Wassermassen werden grösstenteils ostwärts geleitet und nur ein kleiner Teil strömt entlang der Küste Grossbritanniens Richtung Süden. Die einströmenden Wassermassen werden durch ausströmende kompensiert. Der Hauptteil des ausströmenden Wassers gelangt entlang der Norwegischen Küste zurück in den Nordatlantik (OSPAR 2000:14).

Nach OSPAR (2000:15) verstärken Westwinde die zyklonale Zirkulation, während aus Osten kommende Winde diese abschwächen oder auch eine Umkehrung der Zirkulationsrichtung bewirken können.

Bis auf wenige Ausnahmen, wie die Strömungen vor der Küste Norwegens, fließen die Ströme mit einer Geschwindigkeit von wenigen cm s^{-1} (SIMPSON 1994:3). Daher dauert es 1-3 Jahre, bis das gesamte Wasser der Nordsee einmal komplett ausgetauscht ist (SÜNDERMANN 2002:12).

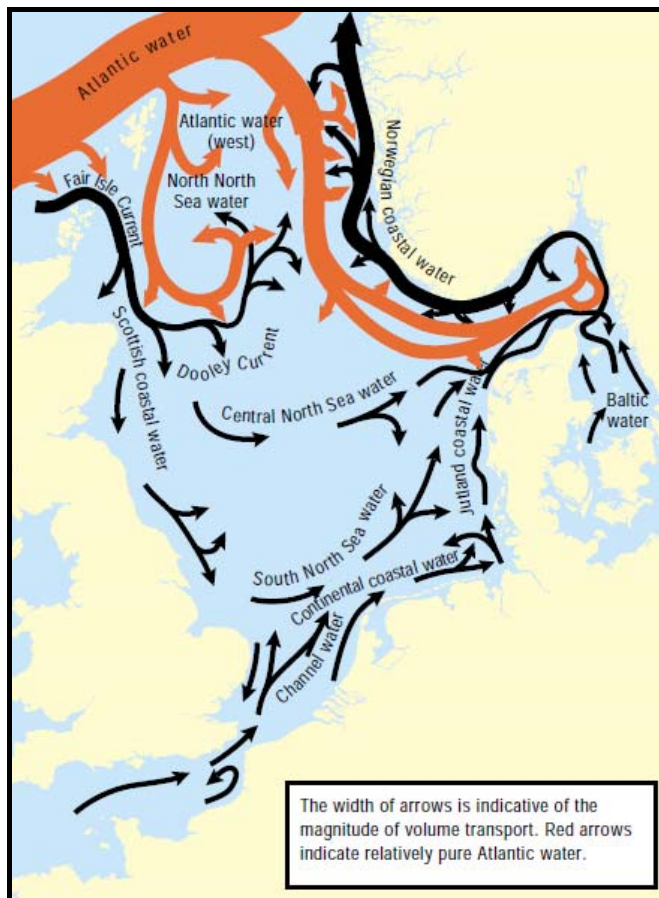


Abbildung 6 Allgemeine Zirkulation der Nordsee (Quelle: OSPAR 2000:11 nach TURRELL 1992).

3 Grundlagen zum Seegang

Im Meer ist genügend Energie in Form von Strömungen, Wellen, Salz- und Temperaturgradienten vorhanden, um den weltweiten Energieverbrauch zu befriedigen. Bis jetzt wurde diese riesige Energiequelle kaum erforscht und nur ein verschwindend geringer Teil des heutigen Energieverbrauchs wird durch das Meer geliefert (PELC 2002:471).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Energiepotenzial der oberflächennahen, durch Wind erzeugten Wellen. Diese werden zur Abgrenzung von anderen Wellenarten (z.B.: Wellen an internen Grenzflächen) auch als Seegang bezeichnet. Im folgenden Text wird genauer auf diesen eingegangen.

3.1 Seegang

Bereits Aristoteles (384-322 v. Chr.) beschäftigte sich mit dem Thema Welle und schloss auf einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Wind und dem Vorkommen von Wellen (BROWN 1989:7). Jedoch sind bis heute noch nicht alle Prozesse im Zusammenhang mit der Entwicklung von Wellen vollkommen verstanden (YOUNG 1999b:1). Dies liegt einerseits daran, dass die Eigenschaften der Meereswellen über lange Zeit hinweg nur schwer zu beobachten waren und daher nur räumlich und zeitlich gering aufgelöste direkte Messwerte existieren. Erst in den letzten Jahren konnten mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Messreihen entstehen (HASSELMANN in KOMEN 1994:381). Andererseits basieren die mathematischen Modelle auf vereinfachten Annahmen, da die Wellenbewegungen der Meeresoberfläche sehr komplex sind (FAIZAL 2009:164ff).

Trotz dieser Kritikpunkte ist festzuhalten, dass die Dynamik der Ozeane heutzutage sehr genau modelliert werden kann (vgl. Kapitel 4).

3.1.1 Begriffsdefinitionen

Wie bei anderen Wellen auch (z.B.: Elektromagnetische Wellen), unterscheidet man bei Meereswellen zwischen verschiedenen Kenngrößen (vgl. Abbildung 7):

- Als **Wellenlänge** wird der Abstand in Metern zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenbergen oder Wellentälern bezeichnet (BROWN

1989:7). Die Wellenlänge ist ein wichtiges Mass, um die verschiedenen Wellentypen zu klassifizieren. Je länger die Wellenlänge ist, desto schneller pflanzt sich eine Welle fort.

- Misst man die Anzahl der Wellenberge, bzw. Wellentäler, die innerhalb von einer Sekunde einen festen Punkt passieren, spricht man von der **Wellenfrequenz** (1/s) (GARRISON 2009:201). Die **Peak-Wellenfrequenz** ist die Frequenz, die sich auf den Peak eines Wellenspektrums bezieht (WEISSE 2010:103).

- Unter der **Wellenperiode** (s) wird die Zeit verstanden, die zwischen den Durchgängen zweier gut ausgeprägter Wellenberge, bzw. Wellentäler an einem festen Punkt vergeht (BRAUNER 2003:19). Hierbei wird unterschieden zwischen der Peak-Periode und der T_m -Periode. „Die **Peak-Periode T_p** ist die Periode des absoluten spektralen Energiemaximums. Die **mittlere Periode T_m** ist die mittlere Periode aller Auslenkungen der Wasseroberfläche“ (MAI 2004:19). Sie wird auch als **T_{m1} -Periode** bezeichnet. Des Weiteren existiert der Begriff der **T_{m2} -Periode**, welche in etwa der Zero-Down-Crossing-Periode entspricht (WEISSE 2010:103). Diese wird mit Hilfe des Zero-Down-Crossing-Verfahrens bestimmt. „Hierbei wird als Beginn einer Welle der Zeitpunkt festgelegt, zu dem die Teilchen zum ersten Mal unter den mittleren Wasserspiegel absinken, als Endzeitpunkt und Beginn der folgenden Welle die Wiederholung dieses Vorgangs, nachdem zwischenzeitlich ein deutliches Minimum und ein deutliches Maximum erreicht wurden,“ (GRAW 1995:4-7). Vergleiche hierzu auch Abbildung 7.

- Die **Wellenhöhe** (m) ist die Differenz zwischen Wellenkamm und Wellental (BRAUNER 2003:18). Einen weiteren wichtigen Begriff stellt die **signifikante Wellenhöhe** dar. Darunter versteht man die „mittlere gemessene Höhe des höchsten Drittels aller Wellen aus einer Seegangsregistrierung“ (BRAUNER 2003:18). Die signifikante Wellenhöhe entspricht in etwa der Wellenhöhe, die ein erfahrener Beobachter als vorherrschende Wellenhöhe bezeichnen würde

(WEISSE 2010:102). Bei den in dieser Arbeit verwendeten modellierten Daten zur Wellenhöhe handelt es sich stets um die signifikante Wellenhöhe.

- Die Hälfte der Wellenhöhe entspricht der **Amplitude** (m) (BROWN 1989:7).
- Unter der **Steilheit** einer Welle versteht man den Quotienten aus der Wellenhöhe und der Wellenlänge (BROWN 1989:7). Die Steilheit nimmt zu, wenn Seegang in Flachwasserbereiche einläuft. Hat die Steilheit jedoch den Wert von etwa $1/7$ erreicht, bricht die Welle. Hierbei ist zu beachten, dass die Wellen in der Natur meist eine viel geringere Steilheit als den theoretischen Wert von $1/7$ aufweisen (BRAUNER 2003:18).

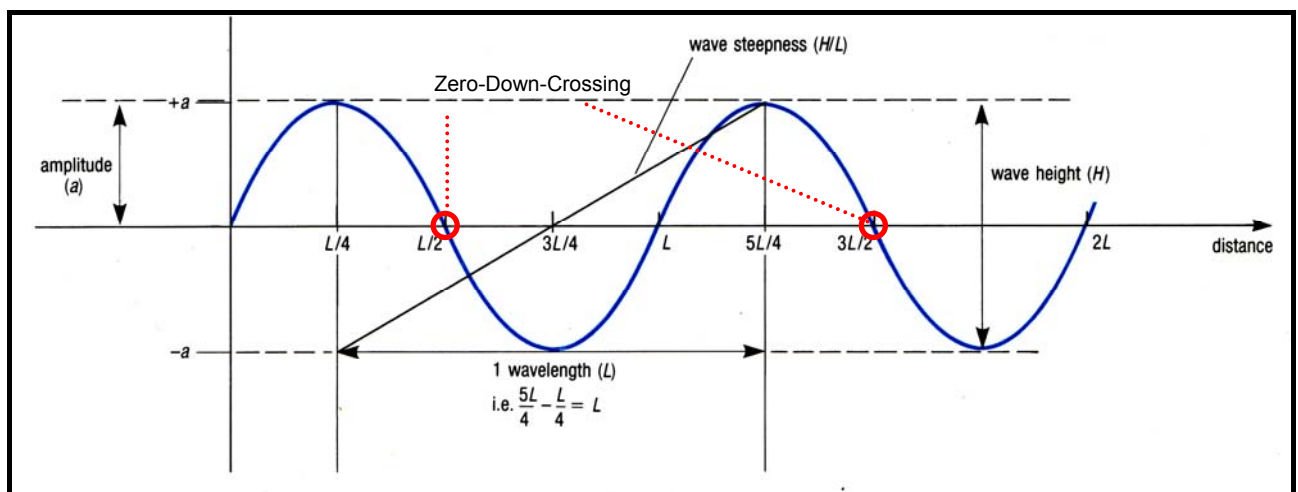


Abbildung 7 Kenngrößen einer Welle (Quelle: verändert nach BROWN 1989:7).

3.1.2 Erregende und rücktreibende Kräfte

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen drei erregenden Kräften, die Oberflächenwellen erzeugen können (vgl. Abbildung 8). Wie oben bereits erwähnt, lassen **Gezeitenkräfte** Gezeitenwellen entstehen. Ihre Kraft kann beispielsweise mit Hilfe von Gezeitenkraftwerken genutzt werden. Eine zweite erregende Kraft stellen **Erdbeben**, welche zu verheerenden Flutkatastrophen führen können, dar. Die dabei entstehenden Wellen werden als Tsunamis bezeichnet. Ausserdem lassen die räumlich und zeitlich veränderlichen **Wind- und Luftdruckfelder** Kapillar- und Schwerewellen entstehen (DIETRICH 1975:331ff).

Neben den erregenden Kräften existieren die rüctreibenden Kräfte (vgl. Abbildung 8). Für den Seegang relevant sind hierbei die Schwerkraft und die Oberflächenspannung.

Rüctreibende Kräfte versuchen, aus der Ruhelage bewegte Teilchen wieder in ihre Ausgangslage zurückzutreiben. Da diese Teilchen aber meist über diese hinausschiessen, entsteht eine oszillierende Bewegung um die Ruhelage (DIETRICH 1975:330). Die Oberflächenspannung hat nur für ganz kurze Wellen Bedeutung und führt zur Bildung von Kapillarwellen. Die Schwerkraft „(...) greift an allen Wasserteilchen an und versucht, die Meeresoberfläche und die Flächen gleicher Dichte eben zu halten, wenn keine Strömungen vorhanden sind“ (DIETRICH 1975:331). Diese Kraft wirkt auf alle sich vertikal bewegenden Wasserteilchen.

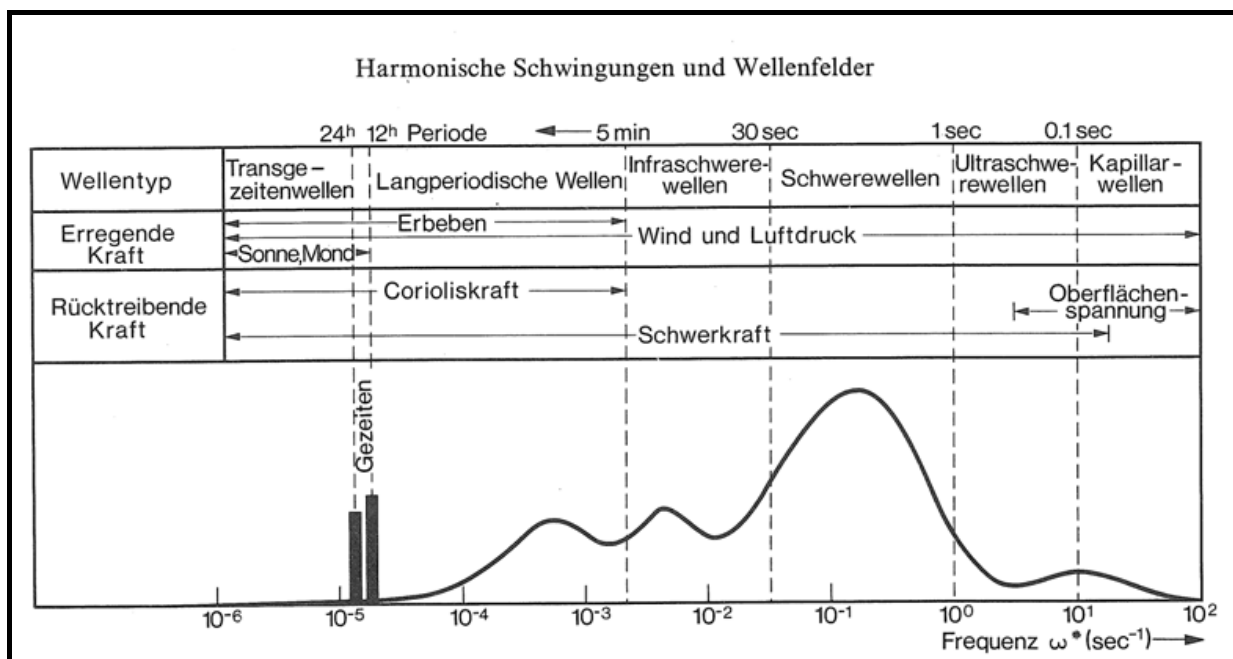


Abbildung 8 Amplitudenspektrum der Oberflächenwellen (hypothetisch) zur Wellenklassifikation (Quelle: DIETRICH 1975:333).

3.1.3 Windwellen und Seegang

Wie entstehen durch Wind erzeugte Wellen? Dazu bemerkte Benjamin Franklin im Jahre 1774: „Air in motion, which is wind, is passing over the smooth surface of the water, may rub, as it were, upon that surface, and raise it into wrinkles, which, if the wind continues, are the elements of future waves“ (BROWN 1989:10). Windwellen sind, wie oben bereits erwähnt, Schwerewellen, welche unterschiedliche Formen annehmen können. Die Gestalt der Wellen hängt grössten Teils von der

Windgeschwindigkeit, der Winddauer, der Wassertiefe und dem Fetch ab. BRAUNER (2003:21) definiert den Fetch als „Anlaufstrecke des Windes auf dem Wasser.“

Der oberflächennahe Wind schiebt aufgrund der Reibung Wasserteilchen an, sodass die oberflächennahe Wasserschicht beschleunigt wird. Diese Beschleunigung erfolgt jedoch nicht gleichmässig und erzeugt daher Turbulenz. Durch Auf- und Abwärtsbewegungen versucht die Wasseroberfläche diese Druckunterschiede auszugleichen. Das hat zur Folge, dass der Wind wiederum stärkere Druckunterschiede erzeugt und die Ungleichförmigkeit der Wasseroberfläche vergrössert. Mit der Zeit können sich durch diese Vorgänge immer höhere Wellen bilden, deren maximale Höhen jedoch begrenzt sind (vgl. Kapitel 3.2.2).

BRAUNER (2003:17ff) unterscheidet grundsätzlich zwischen zwei Arten des Seegangs. Unter der **Windsee** versteht man den Seegang, der durch den am Ort herrschenden Wind angeregt und aufrechterhalten wird. Gekennzeichnet ist die Windsee durch spitze Wellenkämme und ungleichmässige Einzelwellen. Einen zweiten Seegangstyp stellt die **Dünung** dar. Diese ist länger als die Windseewelle, hat eine rundere Form und weist einen grösseren Abstand zwischen den einzelnen Wellenbergen auf. Dünung entsteht aus einer ehemaligen Windsee, die aus ihrem Entstehungsgebiet herausgelaufen ist oder bei nachlassenden Windgeschwindigkeiten (BRAUNER 2003:22). Bei diesem Prozess verschwinden zunächst die kurzwelligen Seegangsanteile und die langwelligen Dünungsanteile bleiben. Laut FALNES (2007:187) weist die Windsee in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit Wellenlängen von wenigen Metern bis 500 m auf. Die typischen Wellenlängen einer Dünung hingegen liegen zwischen 100-500 m (FALNES 2007:187).

Des Weiteren bestehen zwei Spezialfälle: Eine **Kreuzsee** kann beispielsweise dadurch entstehen, dass Dünung und Windsee aus verschiedenen Richtungen aufeinander zu laufen und sich überlagern. Im Einzelfall können hierbei riesige Wellen entstehen. Den zweiten Spezialfall stellt die **Grundsee**, die durch steile und hohe Wellen gekennzeichnet ist, dar. Sie entsteht dadurch, dass die Wellenbewegung über Untiefen und bei abnehmender Wassertiefe an den Küsten bis zum Meeresboden durchgreift und die Dynamik des Seegangs verändert (BRAUNER 2003:17).

Es kann also zusammengefasst werden, dass sich der Seegang aus einer Vielzahl sich überlagernder Einzelwellen zusammensetzt, welche unterschiedliche Wellenperioden, -längen und -höhen aufweisen. Der Seegang besitzt somit ein Wellenspektrum, bei welchem die verschiedenen Wellenanteile unterschiedlich stark zur Gesamtenergie der Welle beitragen (GRAW 1995:5-1ff).

3.1.4 Orbitalbewegung

Bei der Betrachtung von Meereswellen in tiefem Wasser kann leicht der Eindruck entstehen, dass es sich um massive, sich fortbewegende Objekte handelt. Der erste Eindruck trügt jedoch, da zwar Energie transportiert wird, aber keine Masse. Diese Wellenart wird als Oszillationswelle bezeichnet (GARRISON 2009:200). Wenn sich die Wellen an das Ufer annähern, wandeln sie sich von **Oszillations-** zu **Translationswellen**, wobei es zu einem Massenfluss Richtung Ufer kommt. Dieser wird durch Rückströmungen ausgeglichen (ZEPP 2004:261).

Bei Oszillationswellen vollführen die einzelnen Wasserpartikel vertikal kreisförmige Bewegungen um einen Ruhepunkt. Diese Orbitalbewegungen setzen sich in tiefem Wasser bis in eine Wassertiefe d von der Hälfte der Wellenlänge L durch (vgl. Abbildung 9). Unterhalb dieser Tiefe wird das Wasser nicht beeinflusst. Im Übergangsbereich ($L/2 > d > L/20$) und Flachwasserbereich ($d < L/20$) sind orbitale Partikelbewegungen bis zum Meeresboden hin zu beobachten (siehe Abbildung 9). Der Durchmesser dieser Orbitalbewegungen nimmt mit zunehmender Tiefe ab (GRAW 1995:4-1ff). Während die Wasserpartikel im Tiefwasserbereich eine kreisförmige Bewegung vollziehen, werden die Orbitalbahnen im Übergangs- und Flachwasserbereich mit zunehmender Tiefe zu Ellipsen verformt, sodass die horizontale Bewegung grösser ist als die vertikale (FAIZAL 2009:165).

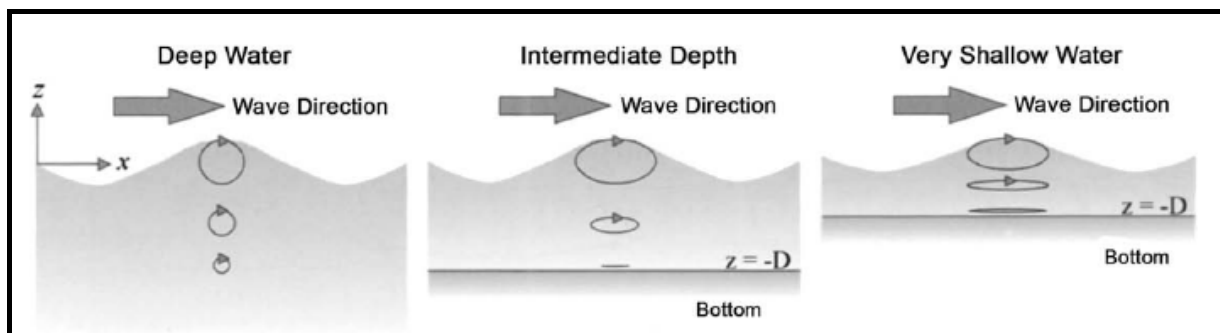


Abbildung 9 Orbitalbewegung in verschiedenen Wassertiefen. D ist die Wassertiefe in Metern (Quelle: FAIZAL 2009:164).

3.2 Berechnung der Wellenenergie

Die Meeresoberfläche ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Wellen unterschiedlicher Länge, Amplitude, Frequenz und Fortbewegungsrichtung. Um diese komplexe, zeitlich und räumlich hoch variable Oberfläche beschreiben zu können, müssten die Eigenschaften jeder einzelnen Welle erfasst werden. Da dies in der Realität nur schwer möglich ist, wird „mit verschiedenen Wellentheorien (...) versucht, auf unterschiedliche Art Näherungslösungen für die Wellenkontur und das Geschwindigkeitspotenzial zu entwickeln“ (GRAW 1995:4-9). Es existieren zahlreiche Wellentheorien, auf die aus Umfangsgründen hier jedoch nicht genauer eingegangen werden kann. Anhand dieser Wellentheorien kann die Wellenenergiedichte E pro m^2 Meeresoberfläche berechnet werden (FALNES 2007:187):

$$E = \rho g H_s^2 / 16 \quad [J / m^2]$$

Formel 2 Berechnung der Wellenenergiedichte (Quelle: FALNES 2007:187).

Hierbei sind $\rho = 1030$ die Dichte des Meereswassers in kgm^{-3} , $g = 9,81$ die Schwerebeschleunigung in ms^{-2} und H_s die signifikante Wellenhöhe in m.

Die gespeicherte Energie besteht zu gleichen Teilen aus kinetischer und potentieller Energie. Die kinetische Energie entsteht durch die oszillierenden Wasserteilchen und die potentielle Energie aufgrund der vertikalen Auslenkung der Teilchen vom mittleren Wasserspiegel. Letztere entspricht der Arbeit, die verrichtet werden müsste, um Wasser gegen die Schwerkraft von der Höhe des Wellentals auf die Höhe des Wellenberges zu heben (FALNES 2007:187). Formel 2 zeigt, dass die gesamte Energie proportional zum Quadrat der Wellenhöhe ist, sodass sowohl die kinetische, als auch die potentielle Energie mit ansteigender Wellenhöhe zunehmen (FAIZAL 2009:165).

Soll die Wellenenergie genutzt werden, so ist es wichtig, den Energiefluss P zu kennen. Dieser ist definiert als „die Energie, die je Wellenperiode in Fortschrittsrichtung durch einen Querschnitt übertragen wird, der sich aus der Einheitskammbreite und dem Abstand der Wellenkronen zur Wellensohle bildet“

(GRAW 1995:5ff). Zur Berechnung des Energieflusses existieren ebenfalls zahlreiche Formeln, die beispielsweise in GRAW (1995) genauer erläutert werden. Zu beachten ist, dass die Formeln zunächst nur für Einzelwellen gelten. Der Energiefluss realer Wellen kann unter verschiedenen Annahmen über das Seegangsspektrum aus den Parametern signifikante Wellenhöhe H_s und mittlere Periode T_z näherungsweise berechnet werden (GRAW 1995:5-12):

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi \cdot 0,95} H_s^2 \cdot 1,15 T_z \left(1 + \frac{2k_z d}{\sinh(2k_z d)} \right) \tanh(k_z d) \quad [W/m]$$

$$\rho = 1030 \quad [kg/m^3]$$

$$g = 9,81 \quad [m/s^2]$$

$$H_s = \text{signifikante Wellenhöhe} \quad [m]$$

$$T_z = \text{mittlere Periode} \quad [s]$$

$$k_z = \text{Wellenzahl} = \frac{2\pi}{L}$$

$$L = \text{Wellenlänge} \quad [m]$$

$$d = \text{Wassertiefe} \quad [m]$$

Formel 3 Berechnung des Wellenenergieflusses (Quelle: GRAW 1995:5-12).

In dieser Arbeit werden Daten aus dem coastDat-Datensatz ausgewertet (siehe Kapitel 4), welcher unter anderem stündliche Werte für die signifikante Wellenhöhe und die T_{m2} -Periode enthält. Letztere entspricht der Periode T_z näherungsweise und wird daher zur Berechnung des Energieflusses verwendet.

3.2.1 Abschätzung der nutzbaren Energieflüsse

Um eine Idee über die Grösse der Energieflüsse von Meereswellen zu bekommen, werden im Folgenden die Energieflüsse zweier weiterer erneuerbarer Energiequellen dargelegt. Da global gesehen grosse Unterschiede in den Energieflüssen existieren, werden die für Deutschland geltenden Werte verwendet. Die solaren Energieflüsse sind am Äquator am grössten und nehmen zu den Polen hin ab. Laut GRAW (1998:6) beträgt die mittlere tägliche Einstrahlungssumme der **Sonnenenergie** etwa 2,3 kWh

pro Quadratmeter und Tag. Dies entspricht einem täglichen Energiefluss von 100 Wm^{-2} . Unter idealisierten Bedingungen sind 10 m^2 Fläche notwendig, um 1 kW Strom zu erzeugen (GRAW 1998:6).

Der Energiefluss der **Windenergie** in 10 m Höhe beträgt bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von etwa $4,5 \text{ ms}^{-1}$ ebenfalls etwa 100 Wm^{-2} . Die benötigte Grundfläche für die Nutzung der Windenergie ist jedoch geringer, sodass 2 m^2 Grundfläche zur Erzeugung von 1 kW Strom ausreichen. Die mittleren Energieflüsse der **Wellenenergie** treten in einer noch stärker konzentrierten Form auf. „Setzt man für die Gebäudeabmessung quer zur Küste rund 10 m an (etwa die Wellenlänge im Küstenbereich), ergibt sich eine Gebäudegrundfläche von 1 m^2 pro Kilowatt installierter Kraftwerksleistung“ (GRAW 1998:6).

3.2.2 Dissipation der Wellenenergie

Die Dissipation von Wellenenergie ist ein komplexes und noch nicht vollkommen verstandenes Phänomen. Unter dem Begriff der Dissipation wird im Allgemeinen die „unwiderrufliche Abgabe einer hochwertigen Energieart (...) an ein Wärmereservoir, normalerweise die Umgebung (Energieentwertung)“, bezeichnet (SCHLICHTING 1983:2). Ein bekanntes Beispiel hierfür wäre Reibung.

Grundsätzlich unterscheidet man in der Ozeanographie zwischen drei Dissipationsarten:

1. Durch den Energietransfer vom Wind auf die Wellen kommt es zu einer Zunahme der Wellenamplitude und -steilheit. Wird ein kritischer Wert (vgl. Kapitel 3.1.1) erreicht, so bricht die Welle. Diese Form des Energieverlustes ist charakteristisch für das offene Meer und für Tiefwasserbedingungen (WEISSE 2010:100). Im Englischen wird dieser Prozess als White-Capping bezeichnet (YOUNG 1999b:77).
2. Bewegen sich Wellen vom tiefen ins flache Wasser, so kann die Dissipation von Wellenenergie in unterschiedlichen Weisen auftreten. Zu diesen Wellen-Untergrund-Interaktionen zählen der Transport von Material des Meeresbodens, die Perkolation (wenn Wasser in den Boden sickert) und die Bodenreibung (ZHENG 2004:1083).

3. Die dritte Form der Wellenenergiedissipation tritt in sehr flachem Wasser auf und ist wahrscheinlich einer der am wenigsten verstandenen Dissipations-Prozesse (JANSSEN 2007:711). „Bei einer bestimmten Wellenperiode und Wassertiefe haben die von der Welle bewegten Wasserteilchen an der Oberfläche plötzlich eine höhere Geschwindigkeit als die Welle selbst: die Teilchen „überholen“ die Wellenkontur“ (GRAW 1995:4-7). Dies hat zur Folge, dass die Welle bricht, sich Schaumkronen bilden und ein Teil der Energie durch Turbulenz verloren geht (GRAW 1995:5-15ff). „Wave breaking is a nonlinear phenomenon and plays an important role in transferring wave energy, momentum, heat, and mass into the water body in the surf zone“ (HUANG 2009:733).

3.3 Technische Nutzung der Wellenenergie

Bereits seit mehr als zwei Jahrhunderten suchen Forscher nach Möglichkeiten, die Kraft der Wellen zu nutzen. Nach dem Ersten Weltkrieg liess das Interesse an regenerativen Energien jedoch stark nach, da Erdöl zur wichtigsten Energiequelle wurde. Seitdem bekannt ist, dass diese Energiequelle jedoch nicht nur endlich, sondern auch umweltschädlich ist und seitdem der globale Klimawandel in aller Munde ist, wurde verstärkt im Bereich der erneuerbaren Energiequellen geforscht. Als Pionier der Wellenenergienutzung gilt der Japaner Yoshio Masuda, der bereits in den 1940ern Wellenenergieapparate entwickelte und testete. Zu nennen sind ausserdem zwei weitere europäische Wissenschaftler, Stephen Salter und Kjell Budal, sowie ein amerikanischer Wissenschaftler, Michael E. McCormick. Sie sind massgeblich dafür verantwortlich, dass die Nutzungsmöglichkeiten der Wellenenergie erforscht und vorangetrieben wurden (FALNES 2007:186). Inzwischen existieren mehr als 1000 verschiedene Patente, welche Möglichkeiten zur Nutzung der Wellenenergie vorschlagen. „(...) and several have demonstrated the potential for commercially viable electricity generation“ (PELC 2002:475).

Die Anforderungen an Wellenenergiewandler sind hoch. Diese sollen nicht nur einen optimalen Wirkungsgrad aufweisen, sondern auch betriebssicher sein, da die Wartung der Systeme zeitweise über Wochen hinweg aufgrund des Wetters unmöglich ist. Unter dem Wirkungsgrad wird die „erzeugte Energie als Anteil der am Bauwerk eintreffenden Wellenenergie“ (GRAW 1995:7-7) verstanden. Ausserdem

müssen die Geräte, die beispielsweise auf eine Nutzung von Wellen mit 1 m Höhe ausgelegt sind, auch „Jahrhundertwellen“ mit einer Höhe von z.B. 10 m überstehen (KALTSCHMITT 2006:592).

Wie bereits erwähnt, existiert eine Vielzahl an Wellenenergiewandlern, deren vollständige Darstellung den Umfang dieser Arbeit sprengen würde. Um trotzdem einen Einblick in die Möglichkeiten der Wellenenergieumwandlung zu bekommen, werden im folgenden Text drei wichtige Systeme kurz vorgestellt.

3.3.1 TAPCHAN-System

Beim TAPCHAN (Tapered channel wave energy conversion device) wird das Wasser über einen ansteigenden und spitz zulaufenden Kanal (TAPered CHANnel) in ein höher gelegenes Becken geleitet (vgl. Abbildung 10). Mit Hilfe einer konventionellen Niederdruckturbine strömt das Wasser gleichmässig aus dem Sammelbecken ins Meer zurück (GRAW 2006:5). Dieses Wellen- oder Brandungsenergiekraftwerk benötigt zwar viel Platz und kann nur einen kleinen Teil der anfänglich im tiefen Wasser zur Verfügung stehenden Wellenenergie nutzen. Jedoch sind die empfindlichen Bestandteile des Gerätes nicht dem offenen Meer ausgesetzt und die ganze Anlage ist vom Land aus zugänglich. „Ein wesentlicher Vorteil eines derartigen Wellen- oder Brandungsenergiekraftwerks mit einem spitz zulaufenden Einlaufkanal anstelle einer zu den Wellenkämmen parallelen, geraden Überlaufkante ist, dass praktisch alle Wellen irgendwann die notwendige Höhe erreichen, um über die Wände hinweg das erhöht liegende Becken zu füllen“ (KALTSCHMITT 2006:593).

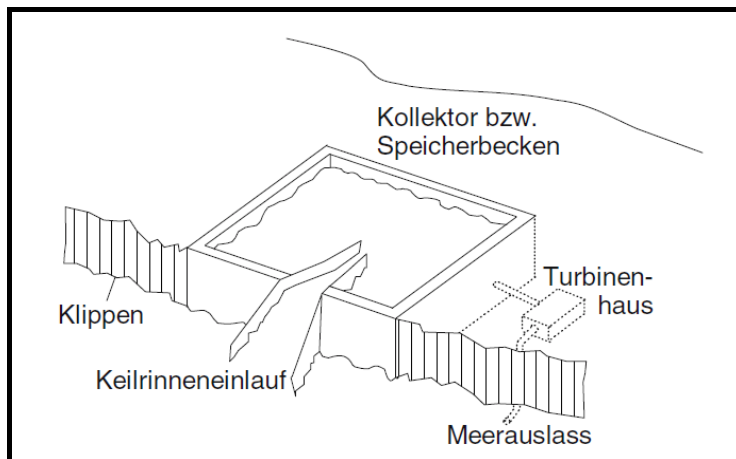


Abbildung 10 TAPCHAN-System (Quelle: KALTSCHMITT 2006:593).

3.3.2 OWC-System

Das OWC-System (Oscillating Water Column), welches meist am Meeresboden oder an einer Steilküste verankert wird, ist eines der am intensivsten erforschten Wellen- bzw. Brandungsenergiekraftwerke. Das System besteht aus zwei Öffnungen, wobei eine unterhalb und eine oberhalb des Wasserspiegels liegt (vgl. Abbildung 11). Das Wasser dringt durch die untere Öffnung in die Kammer ein und bewegt sich mit der Frequenz der Wellen auf und ab. Dadurch wird die Luft über der Wassersäule durch die zweite Öffnung „ein- und ausgeatmet“ (KALTSCHMITT 2006:595) und eine Turbine angetrieben. Diese Turbine wandelt die oszillierende Bewegung der Luftsäule in eine regelmässige Drehung um, sodass elektrische Energie erzeugt werden kann (GRAW 2006:7).

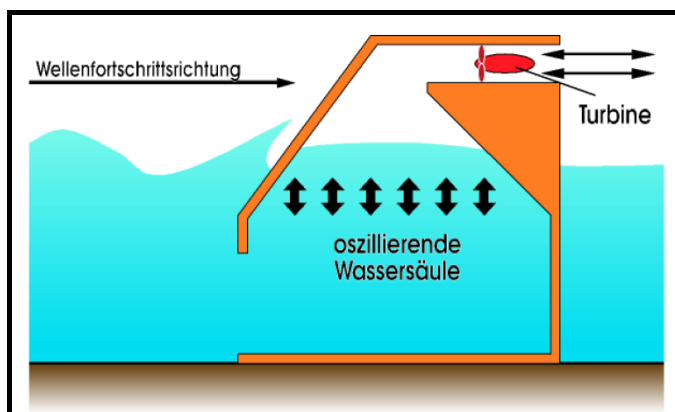


Abbildung 11 OWC-System (Quelle: GRAW 1998:8).

3.3.3 Pelamis

Ein weiteres System zur Wellenenergiegewinnung, das eine Weiterentwicklung des von Masuda im Jahre 1985 entwickelten Cockerell-Flosses darstellt, ist Pelamis (siehe Abbildung 12). Aufgrund des schlangenhaften Aussehens, trägt das System den Namen einer Meeresschlange. Aufgebaut ist es aus gelenkig gekoppelten Segmenten, die durch Hydraulikaggregate miteinander verknüpft sind. Bei kleinen Wellen verformt sich dieses Gerät stark und durch grosse taucht es hindurch. Dies verhindert, dass das System durch grosse Wellen zerstört wird (GRAW 2006:11). Bei gemässigtem Wellengang verformt sich das Gerät stark horizontal und die Hydraulikaggregate wandeln diese Ausgleichsbewegung in nutzbare Energie um. Neben Pelamis existieren noch viele weitere schwimmende Wellenenergiewandler, die sich in der Art der Verankerung, der Bewegungsart und Energieerzeugung unterscheiden (GRAW 2006:11).

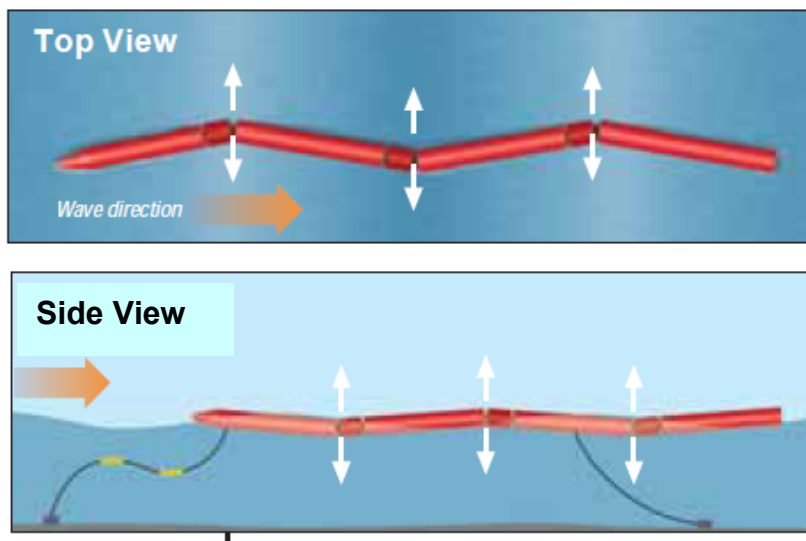


Abbildung 12 Prinzip von Pelamis (Quelle: WWW.PELAMISWAVE.COM).

4 Datengrundlage und Analyse Tools

Für Anwendungen im Küsten- und Offshorebereich werden häufig langjährige und hoch aufgelöste marine und atmosphärische Daten benötigt. Ihre Anwendung finden sie unter anderem im Schiffsdesign, im Küstenschutz, bei der Modellierung von Ölrisiken, bei der Planung von Offshore-Windparks sowie bei der Entwicklung und dem Einsatz von Wellenenergiewandlern. Speziell im marinen Bereich existiert jedoch nur eine geringe Anzahl an Beobachtungen. Diese beschränken sich auf wenige Messstationen, sind häufig aufgrund von sich ändernden Messmethoden, Messinstrumenten, etc. inhomogen und weisen meist keine langen Messzeiträume auf (WEISSE 2007b:161). Speziell in Küstengebieten, die häufig an einem Mangel an direkten Messwerten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung leiden, kommt numerischen Modellen eine grosse Bedeutung zu.

Im folgenden Text wird ein für den Küstenbereich wichtiger Datensatz, der coastDat-Datensatz, vorgestellt.

4.1 CoastDat-Datensatz

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen aus dem coastDat-Datensatz des Institutes für Küstenforschung des GKSS-Forschungszentrums in Geesthacht. Dieser Datensatz basiert auf verschiedenen nationalen und internationalen Projekten (WASA, HIPOCAS, STOWASUS, PRUDENCE) und beinhaltet, wie der Name schon vermuten lässt, Daten für Küstengebiete. Hierbei handelt es sich nicht um beobachtete Daten, sondern um Ergebnisse numerischer Modelle, welche mit direkten Messwerten angetrieben werden (WWW.COASTDAT.DE a).

Numerische Modelle haben den Vorteil, dass sie auch für Gebiete, für die keine oder nur wenige Messwerte vorliegen, Daten liefern. Die Beobachtungsdaten sind jedoch unerlässlich, da mit ihrer Hilfe die Qualität der modellierten Daten überprüft werden kann (HASSELMANN in KOMEN 1994:60). Unterteilt ist der coastDat-Datensatz in drei Gruppen (WWW.COASTDAT.DE c):

1. Atmosphäre und Stofftransporte in der Atmosphäre (z.B.: Oberflächennaher Wind, Luftdruck über NN),

2. Seegang (z.B.: Wellenperiode und Wellenhöhe),
3. Ozean und ozeanischer Transport (z.B.: Meeresspiegel, Gezeiten).

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen aus der Gruppe „Seegang“. Tabelle 1 zeigt unter anderem die für diese Arbeit wichtigen Hindcasts und Szenarien des coastDat-Datensatzes.

Tabelle 1 Überblick über verschiedene im coastDat-Datensatz enthaltene Modelle und ihre Eigenschaften.

Model time span	Name (model reference, setup reference)	Model area	Grid distance	Forcing data
Reconstructions				
Atmosphäre 1948–2007	REMO (Jacob and Podzun 1997; Feser et al. 2001)	Western Europe/adjacent seas	0.5° × 0.5°	NCEP–NCAR reanalyses
Waves 1948–2007	WAM (WAMDI Group 1988; Weisse and Günther 2007)	North East Atlantic, North Sea south of 56°N	Two nested grids 50 km × 50 km, 5 km × 5 km	Near-surface wind fields from REMO reconstruction
Tide surge 1958–2002	TELEMAC2D (Hervouet and Haren 1996; Weisse and Pluess 2006)	North Sea	Unstructured grid 5 km–80 m (coastal areas)	Near-surface wind and pressure fields from REMO reconstruction
Climate scenario simulations				
Waves 1961–1990, 2071–2100	WAM (WAMDI Group 1988; Grabemann and Weisse 2008)	North East Atlantic, North Sea	Two nested grids 50 km × 50 km, 5 km × 5 km	Near-surface wind fields from RCAO (Räisänen et al. 2004)
Tide surge 1961–1990, 2071–2100	TRIM (Casulli and Stelling 1998; Woth et al. 2006)	North Sea	10 km × 10 km	Near-surface wind and pressure fields and from RCAO (Räisänen et al. 2004)

(Quelle: WEISSE 2009:850).

4.1.1 Hindcast-Wellenmodell

Unter Hindcasts versteht man „eine retrospektive Analyse oder Reanalyse des Zustandes eines dynamischen Systems mit Hilfe eines numerischen Modells. (...) Hindcasts werden manchmal auch als Rekonstruktionen bezeichnet“ (WWW.COASTDAT.DE b). Um Verwirrungen zu vermeiden, wird im folgenden Text nur von Hindcasts gesprochen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Daten des Wellenmodells WAM ausgewertet. Dabei handelt es sich um eines der bekanntesten und best getesteten Wellenmodelle (YOUNG 1999b:218), von welchem zahlreiche regionale Versionen existieren (KOMEN 1994:16). Wellenmodelle werden im Allgemeinen dazu verwendet

zeitliche und räumliche Variabilitäten von Schwerewellen an der Meeresoberfläche zu simulieren. Zu beachten ist, dass diese Modelle nicht die Eigenschaften einzelner Wellen, sondern statistische Eigenschaften des Seegangs beschreiben (WEISSE 2010:96). „In other words (...), these models are not designed to describe short-term variations within a given sea state, but to represent the longer variation between different sea states“ (WEISSE 2010:96). Vergleiche der Modelldaten mit den beobachteten Daten zeigen, dass das Wellen-Hindcast das Wellen-Klima der Nordsee der vergangenen Jahrzehnte vernünftig simuliert (WEISSE 2007b:161ff). Auf die Grenzen und Fähigkeiten der Modelle wird in Kapitel 4.2 genauer eingegangen.

Abbildung 13 zeigt, wie die verwendeten Daten generiert wurden. In einem ersten Schritt wurde die NCEP/NCAR globale Reanalyse in Verbindung mit der Spectral Nudging Methode dazu eingesetzt, das regionale Atmosphärenmodell REMO anzutreiben. In dieser Version wird das Modell als SN-REMO bezeichnet (MEINKE in WEISSE 2007b:164). Dieses deckt einen Grossteil Europas und die angrenzenden Meere ab (vgl. Tabelle 1). Das Modell wurde ursprünglich für den Zeitraum 1958-2002 mit einer Auflösung von 50 km * 50 km aufgesetzt und später auf einen 60-jährigen Zeitraum (1948-2007) ausgeweitet (WEISSE 2009:850ff).

Bei der NCEP/NCAR Reanalyse handelt es sich um ein globales Atmosphären Hindcast, das vom National Centre for Environmental Prediction, Washington, USA (NCEP) und dem National Centre for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA (NCAR) entwickelt wurde (SOARES 2002:1). Dieses weist eine räumliche Auflösung von etwa 210 km * 210 km auf (WEISSE 2007b:164).

Spectral Nudging bedeutet, dass das regionale Modell nach der Initialisierung nicht nur an den Rändern, sondern auch im Innern des Modellgebietes Informationen aus den Antriebsdaten erhält. „Der klassische Antrieb eines regionalen Klimamodells erfolgt durch eine einmalige Initialisierung des angetriebenen regionalen Modells mit den benötigten Antriebswerten und durch die Bereitstellung und Übergabe von Randwerten durch die Antriebsdaten (...). D.h. nach erfolgter Initialisierung erhält das regionale Modell nur noch Informationen über die lateralen Ränder“ (BENKEL 2008:2). Genaueres über die Spectrale Nudging Methode ist beispielsweise in BENKEL (2008) und WEISSE (2010) zu finden.

Im Rahmen des HIPOCAS-Projektes (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe) wurde mit Hilfe der oberflächennahen

Windfelder aus dem SN-REMO Modell zum einen ein Hindcast-Sturmflutmodell (rechts Abbildung 13) und zum anderen ein Hindcast-Wellenmodell (links Abbildung 13) angetrieben (Soares 2002:2). Die Modellausgabewerte wurden jeweils stündlich gespeichert, sodass ein hoch aufgelöster, konsistenter atmosphärisch-ozeanischer Datensatz der Nordsee der letzten 60 Jahre entstehen konnte (WEISSE 2007a:2ff). „Datensätze werden als konsistent bezeichnet, wenn die Datenparameter keine offensichtlichen Konflikte aufweisen, d.h. die Parameter physikalisch plausibel sind“ (WWW.COASTDAT.DE b)

Ebenfalls im Rahmen des HIPOCAS-Projektes wurden mit Hilfe des WAM Modells ein feines und ein grobes Raster erstellt (siehe Abbildung 13). Das grobe Raster weist eine Auflösung von 50 km * 50 km auf und deckt die ganze Nordsee und grosse Teile des nordöstlichen Nordatlantiks ab. Ausserdem bezieht es beobachtete Meereisbedingungen des Norwegischen Meteorologischen Institutes mit ein. Das feine Raster weist eine Auflösung von etwa 5,5 km * 5,5 km auf und schliesst die Nordsee südlich von 56° N mit ein (WEISSE 2007b:161ff). Bei diesem Modelldurchlauf wurde das Modell im Flachwassermodus betrieben, da es sich bei der Nordsee um ein relativ flaches Schelfmeer handelt (vgl. Kapitel 2.1).

In der vorliegenden Arbeit werden Daten des hoch aufgelösten Modelldurchlaufs des Wellenmodells WAM für den Zeitraum vom 01.01.1958 bis zum 30.11.2007 ausgewertet. Die Daten liegen in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde und einer räumlichen Auflösung von etwa 5,5 km * 5,5 km vor. Diese decken die Nordsee zwischen 3° W und 10,5° E und 51° N und 56° N ab. Ausgewertet werden die für die **Energiebetrachtung** relevanten Daten zur **signifikanten Wellenhöhe** (m), zu den mittleren **Energieflüssen** (kWm^{-1}), zur **Peak-** und zur **T_{m2}-Periode** (s).

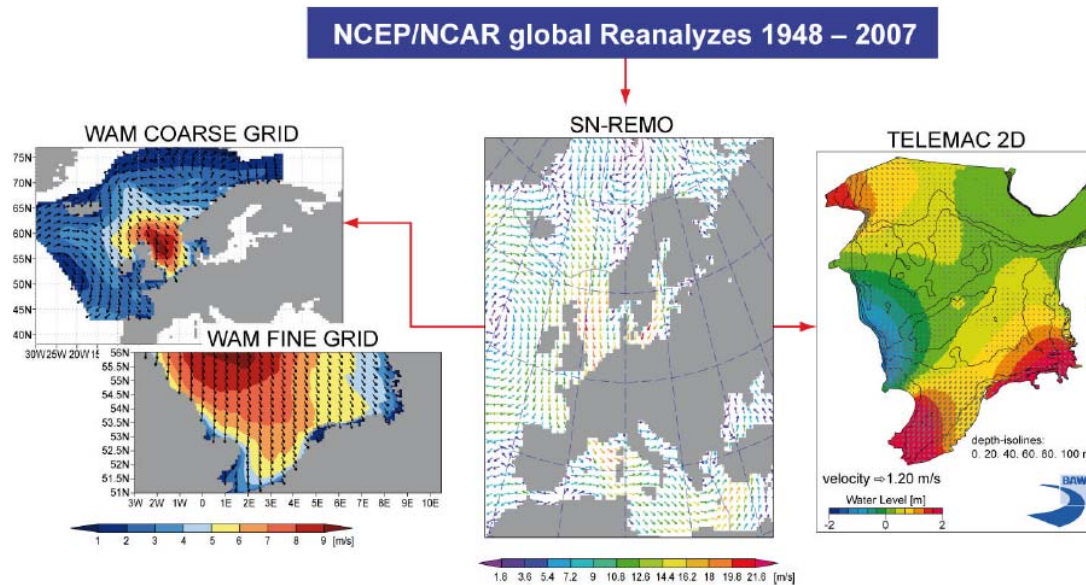


Abbildung 13 Darstellung des konsistenten meteorologisch-ozeanischen Hindcasts für den Zeitraum 1948-2007 für die südliche Nordsee (Quelle: WEISSE 2007b:162).

4.1.2 Szenarien

Szenarien stellen ein viel verwendetes Instrument der Klimawissenschaften dar und werden beispielsweise dazu eingesetzt, um den Einfluss von zunehmenden Treibhausgaskonzentrationen der Atmosphäre auf das Klima darzustellen. Grundsätzlich beantworten sie die Frage „was passiert, wenn...“, wobei meist mehrere Szenarien betrachtet werden, um die Unterschiede zwischen möglichen zukünftigen Zuständen darzustellen. Zu beachten ist, dass Szenarien nicht die wahrscheinlichsten, sondern nur mögliche zukünftige Entwicklungen zeigen (MÜLLER 2004:144ff).

Nicht zu verwechseln sind Szenarien mit **Vorhersagen** (engl.: forecasts) und **Projektionen** (engl.: projections). Vorhersagen basieren auf Bedingungen, die zur Zeit der Vorhersage bekannt sind. Ausserdem gehen sie von physikalischen oder anderen Prozessen aus, die zu einer Veränderung des aktuellen Zustandes führen. Da einerseits die aktuellen Bedingungen meist nicht exakt erfasst werden können und andererseits die verschiedenen Prozesse noch nicht vollkommen verstanden sind, sind die Vorhersagen nicht immer zuverlässig. Aus diesem Grund werden Vorhersagen meist mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Begriffen getätigt. Ein bekanntes Beispiel für Vorhersagen stellen die des Wetters dar (PITTOCK 2009:44).

„Projections are sets of future conditions, or consequences, based on explicit assumptions, such as scenarios“ (PITTOCK 2009:44). Ein Beispiel für eine Projektion wäre die Aussage: “if the concentration of greenhouse gases in the atmosphere is increased by about 1% each year, then the global mean temperature will rise by about 3° C in the next hundred years” (MÜLLER 2004:92).

Viel diskutierte und weltweit bekannte Szenarien stellen die des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dar. Im Jahre 1988 wurde das IPCC durch die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet (www.mpimet.mpg.de). Das Ziel ist anthropogene Einflüsse auf das Klima zu identifizieren und den Regierungen zu helfen, Entscheidungen bezüglich des globalen Klimawandels zu treffen (PITTOCK 2009:43).

Im IPCC Special Report on Emission Szenarios (SRES) sind eine Reihe solcher Szenarien veröffentlicht (vgl. Abbildung 14). Ein grundsätzlicher Unterschied dieser Szenarien besteht darin, ob sich die gesellschaftliche Entwicklung in Zukunft stärker an ökonomischen oder ökologischen Werten orientieren wird (KAPPAS 2009:181). Die vom IPCC verwendeten mit „A“ bezeichneten Szenarien (A1FI, A1B, A1T, A2) orientieren sich eher an einer ökonomischen, die mit „B“ bezeichneten Szenarien (B1, B2) eher an einer ökologischen Entwicklung. Darüber hinaus wird zwischen eher global ausgerichteten Szenarien (Bezeichnung mit der Ziffer „1“; A1FI, A1B, B1) und eher regional ausgerichteten Szenarien (Bezeichnung mit der Ziffer „2“; A2, B2) differenziert. Zusätzlich wurde die A1 Szenarienfamilie in drei Gruppen unterteilt, die sich aufgrund ihrer technologischen Ausrichtung unterscheiden. Dabei basiert das A1FI Szenario auf einer intensiven Nutzung fossiler Energieträger, das A1T Szenario auf einer überwiegender Nutzung nichtfossiler Energiequellen und das A1B Szenario auf einem ausgewogenen Mix aus fossilen und regenerativen Energiequellen (KAPPAS 2009:181).

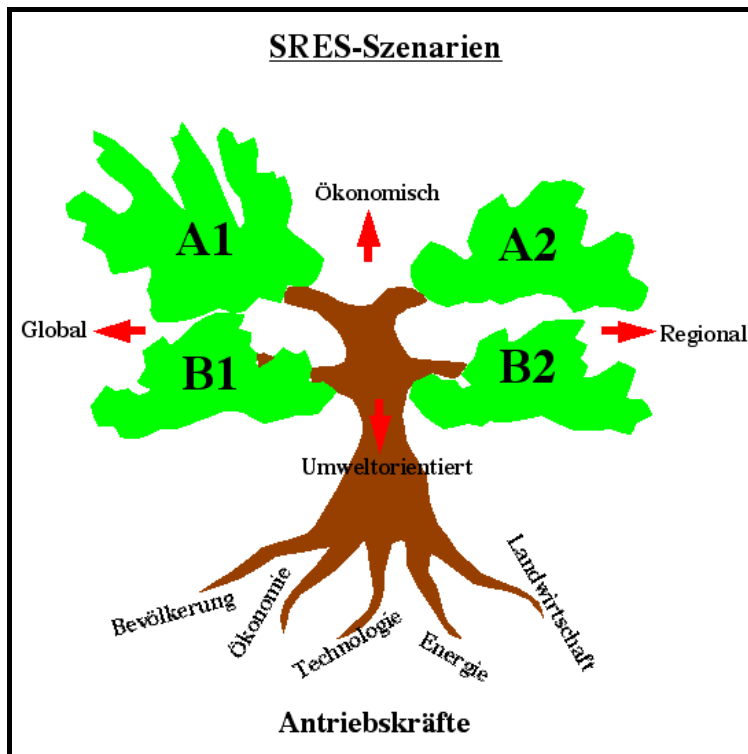


Abbildung 14 Die vier SRES Szenarien-Gruppen (Quelle: WWW.HAMBURGER-BILDUNGSSERVER.DE b).

Auch für Küstengebiete, die häufig dicht besiedelt sind und in denen etwa die Hälfte der Weltbevölkerung lebt, sind diese Szenarien von grosser Bedeutung. Die Küstengebiete werden durch den globalen Klimawandel mit einem möglichen Meeresspiegelanstieg, einer möglichen Zunahme von Stürmen und Sturmflutereignissen und einer möglichen Veränderung der Häufigkeit von Extremereignissen konfrontiert (WATSON 1997:4). Diese Veränderungen treffen den Menschen nicht nur direkt, sondern auch indirekt, da es beispielsweise zu Engpässen in der Versorgung oder zur Beschädigung von Infrastruktur kommen kann. Ebenso gefährdet wie die Küstengebiete sind Offshore-Aktivitäten wie Schiffsverkehr, Offshore-Windparks und Anlagen zur Wellenenergiegewinnung.

Diese Arbeit analysiert im Kapitel 7 mögliche zukünftige Veränderungen im Wellenklima zwischen 2071 und 2100. Ausserdem wird zur Kontrolle der Qualität des eingesetzten Modells und als Referenz zur Bestimmung des Klimaänderungssignals ein 30-jähriger Kontrollzeitraum betrachtet (1961-1990). Abbildung 15 zeigt wie die verwendeten Daten generiert wurden. Um Unsicherheiten in den Modellen zu berücksichtigen, wurden im Rahmen des PRUDENCE Projektes (Prediction of

Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) zwei verschiedene globale Zirkulationsmodelle, HadAM3H (H) und ECHAM4/OPYC3 (E), verwendet. Ausserdem wurden zwei unterschiedliche Szenarien des IPCC, A2 (A) und B2 (B), in Betracht gezogen, um eine Idee über mögliche zukünftige Entwicklungen bei unterschiedlich starken Emissionen zu bekommen. Um die zukünftigen oberflächennahen Windfelder zu simulieren wurde das regionale atmosphärisch-ozeanische RCAO Modell (Rossby Centre regional Atmosphere-Ocean model) verwendet (siehe Tabelle 1). Randbedingungen lieferten die beiden genannten globalen Zirkulationsmodelle. Die Daten über das mögliche zukünftige Wellenklima der Nordsee erhielt man aus dem bereits beschriebenen Wellenmodell WAM. Dieses wurde mit Hilfe der Windfelder in 10 m Höhe aus dem RCAO Modell angetrieben. Dieser Prozess lieferte also vier verschiedene Datensätze zum Wellenklima zwischen 2071-2100 (WRH-A, WRH-B, WRE-A, WRE-B) und zwei Kontrolldatensätze für den Zeitraum 1961-1990 (WRH-C, WRE-C).

Um eine Idee über mögliche zukünftige Entwicklungen zu bekommen, werden im Rahmen dieser Arbeit die Datensätze aus zwei verschiedenen Szenarien ausgewertet. Die Entscheidung fiel auf die auf lokalen Lösungen basierenden Szenariengruppen A2 und B2, da in der vorliegenden Arbeit ein klar definiertes Gebiet betrachtet wird. Neben dem WRE-A- und dem WRE-B-Datensatz wird der Kontrolldatensatz WRE-C analysiert. Sowohl beim A2-, als auch beim B2-Szenario liegt das Gewicht auf lokalen Lösungen, wobei der Grundbaustein beim A2-Szenario die Ökonomie und beim B2-Szenario wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit darstellt.

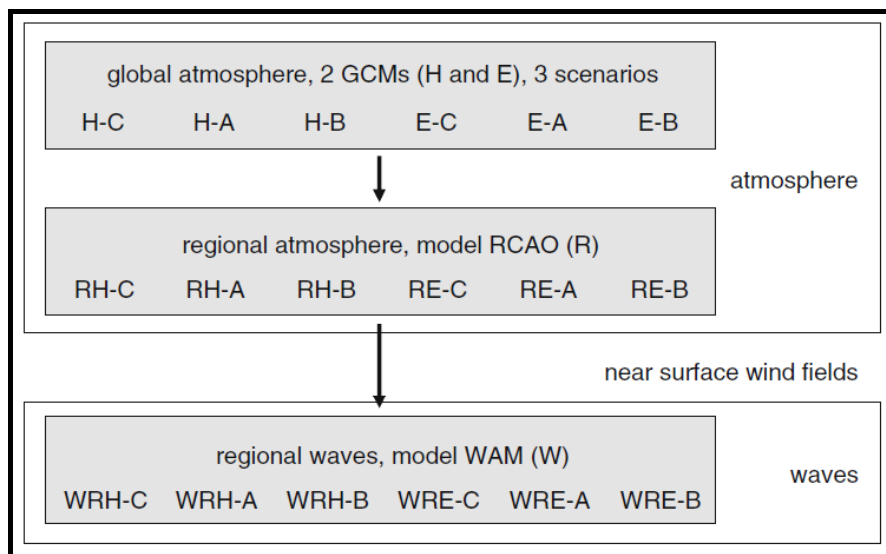


Abbildung 15 Darstellung der antreibenden und generierten Datensätze. C=control scenario; A=emission scenario A2; B=emission scenario B2; GCMs=Global Circulation Models; H=HadAM3H; E=ECHAM4/OPYC3; R=RCAO; W=WAM (Quelle: GRABEMANN 2008:202).

4.2 Unsicherheiten von Modelldaten

Ebenso wie Insitu-Messungen und beobachtete Daten von Schiffen (Voluntary Observing Ship data, VOS), weisen Daten aus numerischen Modellen Vor- und Nachteile auf. Insitu-Messungen und VOS-Daten sind meist nur in geringer räumlicher Auflösung und für kurze Beobachtungszeiträume verfügbar, für die Validation von Modellen aber unerlässlich. Numerische Modelle haben hingegen den Vorteil, dass sie auch für Gebiete, in denen keine Messungen vorhanden oder möglich sind, Daten liefern (YOUNG 1999a:932). Der Hauptkritikpunkt an numerischen Modellen ist, dass diese die Wirklichkeit nie exakt darstellen können, da sie immer auf mehr oder weniger vereinfachten Annahmen basieren (HAVER 1983:93).

Im folgenden Text wird speziell auf die Unsicherheiten von Wellenmodellen und auf die Problematik von regionalen Klimaszenarien, in Hinblick auf Kapitel 7, eingegangen.

4.2.1 Wellenmodelle

Numerische Modelle zur Modellierung von Windwellen weisen laut KOMEN in LIU (2002:95) zwei grundsätzliche Fehlerquellen auf.

Wellenmodelle werden, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, mit Hilfe von **Windfeldern** angetrieben. „Therefore one of the most important elements in a

successful wave prediction is an accurate representation of the wind field (LIU 2002:85). Ein Fehler von 10% in den antreibenden Windfeldern würde zu einer Fehlerquote von 20% in den modellierten Wellenhöhen und zu einem 20-50%igen Fehler in der Wellenenergie führen (PILAR 2008:861).

Eine weitere Fehlerquelle stellen die **zugrunde liegenden physikalischen Modellannahmen** dar. Die ersten Wellen-Modelle beispielsweise basierten auf einfachen empirischen Beziehungen zwischen mittleren Wellenparametern (z.B. signifikante Wellenhöhe, Peak-Periode), und Windeigenschaften (z.B. Windgeschwindigkeit, -dauer, Fetch). Das WAM Modell der dritten Generation hingegen basiert auf viel komplexeren physikalischen Grundlagen. Neben den antreibenden Windfeldern, bezieht es die Dissipation durch White-Capping (vgl. Kapitel 3.2.2) und nicht lineare Wellen-Wellen-Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten des Wellenspektrums mit ein (YOUNG 1999b:218ff).

Im Laufe der Jahre wurden die Modelle immer weiterentwickelt, sodass das WAM Modell heute eines der best getesteten Wellenmodelle der Welt ist (YOUNG 1999b:218). Eine ausführliche Beschreibung und Validierung der in dieser Arbeit verwendeten Seegangsrechnungen findet man in WEISSE und GÜNTHER (2007) und GRABEMANN und WEISSE (2008).

4.2.2 Regionale Klimaszenarien

In Kapitel 7 wird auf die möglichen zukünftigen Veränderungen der für die Energiebetrachtung relevanten Parameter eingegangen (Signifikante Wellenhöhe, Peak-Periode, T_{m2} -Periode, Energiefluss). Die dort verwendeten Daten stammen aus dem WAM Modell, das mit Hilfe von Windfeldern des regionalen Klimamodells RCAO angetrieben wird. Wie oben erklärt, stellen die antreibenden Windfelder eine bedeutende Fehlerquelle in Wellenmodellen dar. Daher ist die Kenntnis über die Unsicherheiten des antreibenden regionalen Klimamodells ebenfalls von Bedeutung.

Zu den Quellen der Unsicherheit zählen:

- a) die **Sampling-Unsicherheit**. Diese entsteht dadurch, „dass das modellierte Klima immer aus einer begrenzten Anzahl von Modell-Jahren geschätzt werden muss“ (ARL 2009:7).

- b) Ungenauigkeiten in den **regionalen Klimamodellen**.
- c) die Unsicherheiten in den **zukünftigen Emissionen**. Diese entstehen durch die Wahl der unterschiedlichen IPCC SRES Emissionsszenarien (IPCC 2007:873).
- d) „die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den **globalen Klimamodellen**, deren Ergebnisse als Randbedingungen für regionale Klimamodelle dienen“ (ARL 2009:7).

Abschliessend ist zu sagen, dass die Grösse der jeweiligen Unsicherheit nur schwer aufzudecken ist. Mit Hilfe verschiedener Methoden kann diese jedoch abgeschätzt werden. Eine ausführliche Beschreibung hierzu ist beispielsweise in ARL (2009) zu finden.

4.3 Analyse Tools

Die in vorigem Kapitel vorgestellten Daten wurden mit Hilfe verschiedener Anwendungen ausgewertet und dargestellt. Die stündlichen Werte der einzelnen Variablen wurden mittels Fortran (FORmula TRANslation) analysiert. Fortran ist die erste höhere Programmiersprache und geht auf John W. Backus, einem Programmierer bei IBM, zurück. Seit dem Beginn der Entwicklung von Fortran (1954-1957) wurde die Programmiersprache kontinuierlich weiterentwickelt, verbessert und standardisiert. Höhere Programmiersprachen dienen dazu, dem Rechner in einer für Menschen verständlichen Form Anweisungen zu geben. Die Sprache muss eine eindeutige Syntax und Semantik aufweisen (WWW.SRV.RZ.UNI-BAYREUTH.DE).

Sämtliche erhaltenen Ergebnisse wurden anhand des Tools GrADS (Grid Analysis and Display Systems) dargestellt. GrADS ist im Internet frei verfügbar und bietet eine grosse Bandbreite an Möglichkeiten, Daten verschiedenster Formate zu visualisieren (WWW.IGES.ORG).

5 Klimatologie der Nordsee 1958-2007

„Climate is by definition the synthesis of weather conditions in a given area, characterized by long-term statistics (...) of the meteorological elements in that area” (STERL 2005:971). Das Wort Klima stammt aus dem Griechischen und bedeutet „sich neigen”. Damit war ursprünglich die Neigung der Erdoberfläche gegen die Sonne gemeint, also die „Abhängigkeit des durchschnittlichen Wettergeschehens vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlung“ (MALBERG 2007:271). Während der Begriff Klima früher hauptsächlich in Verbindung gebracht wurde mit Prozessen in der oberflächennahen Atmosphäre, erfuhr dieser in den letzten Jahrzehnten eine starke Erweiterung. Da man erkannte, dass nicht nur die Atmosphäre, sondern auch die Hydrosphäre, die Kryosphäre, die Biosphäre und die Lithosphäre einen grossen Einfluss auf das Klima haben, verbindet man heute mit diesem Begriff ein ganzes „Klimasystem“ (WEISSE 2010:2ff).

Um das Klima eines Ortes hinreichend beschreiben zu können, wird ein Zeitraum von 30 Jahren als sinnvoll angesehen. Innerhalb von 30 Jahren können einerseits die wesentlichen Zustände erfasst werden, und andererseits werden signifikante Trends nicht zu stark durch Mittelungen geglättet. Um verschiedene Klimaperioden miteinander vergleichen zu können, wird die Klimanormalperiode 1961-1990, bzw. 1931-1960 verwendet (MALBERG 2007:272).

Laut BIGG (2003:1127) ist das Meer eine sehr wichtige Komponente im Klimasystem. Dieses absorbiert nicht nur mehr als 97% der solaren Strahlung, die in einem Winkel von kleiner 50° auf den Ozean einfällt, sondern liefert 85% des Wasserdampfes der Atmosphäre. Ausserdem absorbiert und emittiert es für den natürlichen Treibhauseffekt relevante Gase. In den vergangenen Jahrzehnten wurde dem Einfluss des Meeres auf das Klima immer mehr Beachtung geschenkt und atmosphärisch-ozeanisch gekoppelten Modellen wurden wichtiger (BIGG 2003:1127).

5.1 Ergebnisse

Um die Wellenenergie in einer bestimmten Region nutzen zu können, sind Kenntnisse über das dort herrschende Wellenklima fundamental. Langjährigen Mittelwerten kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu (ÖZGER 2009:1700). In

diesem Kapitel werden die 10- und 50-jährigen ganzjährigen und saisonalen Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe, der T_{m2} -Periode, der Peak-Periode und der mittleren Energieflüsse vorgestellt, interpretiert und mit bekannten Prozessen in Verbindung gebracht. Die Analyse basiert auf Stundenwerten der verschiedenen Parameter.

Bei der folgenden Interpretation der Karten ist zu beachten, dass aufgrund der Genauigkeit des Modells (siehe Kapitel 4) nur ungefähre Angaben über die räumliche Verteilung der Werte gemacht werden können. Folgende Abbildungen sollen also nur einen Überblick über das räumliche Muster verschiedener Variablen geben. Um genauere Aussagen über einen Punkt bestimmter Breitenkreis- und Längengradlage machen zu können, müssen weitere Auswertungen durchgeführt werden. Solche Analysen werden in Kapitel 8 am Beispiel von drei Offshore-Windparks vorgestellt.

5.1.1 Mittlere signifikante Wellenhöhen jährlich und saisonal

Abbildung 16 zeigt die signifikanten Wellenhöhen des Untersuchungsgebietes gemittelt über 10 (Teilabb. 1-5), bzw. 50 Jahre (Teilabb. 6). Betrachtet wird zunächst Teilabbildung 6.

Die mittleren signifikanten Wellenhöhen des Zeitraums 1958-2007 zeigen ein typisches räumliches Muster. Sie sind im offenen Meer am höchsten und nehmen zu den Küsten annähernd halbkreisförmig auf ~1,2 m ab. Eine Ausnahme im Bereich der Küsten stellt der nördlichste Bereich der Ostküste Grossbritanniens dar. Hier sind die Wellenhöhen im Mittel 1,2-1,4 m hoch. Im offenen Meer (bei etwa 56° N und zwischen 1 und 6° E) werden im langjährigen Mittel signifikante Wellenhöhen von über 2 m erreicht. Nördlich der west- und ostfriesischen Inseln (zwischen Texel (~53,5° N, 4,49° E) und Wangerooge (~53,47° N, 7,54° E)) liegen die mittleren Höhen zwischen 1,2 und 1,4 m. Auffällig ist ausserdem die bereits erwähnte halbkreisförmige, landwärts gerichtete Abnahme der mittleren signifikanten Wellenhöhen. Diese Halbkreisform wird jedoch zwischen 2 und 4° E durch eine Auslenkung in Richtung Ärmelkanal gestört. Diese Auslenkung ist ab etwa 53° N gut erkennbar und prägt sich in Richtung Südwest immer deutlicher aus.

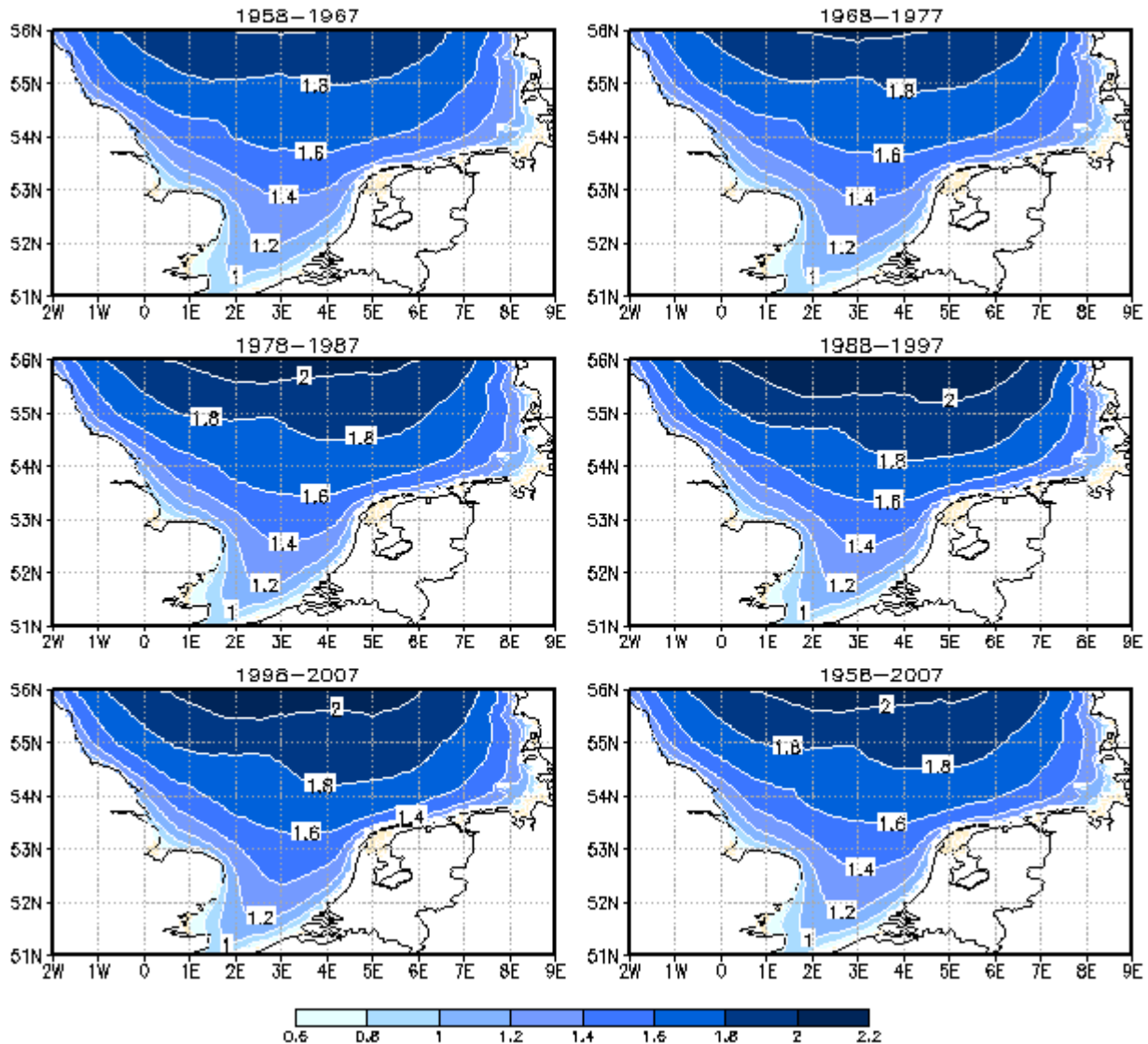


Abbildung 16 10- und 50-jährige Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe (m) (Quelle: eigene Darstellung).

Betrachtet man die zehnjährigen Mittelwerte (Teilabb. 1-5), so lassen sich in weiten Bereichen der Nordsee Zunahmen der mittleren signifikanten Wellenhöhen zwischen 1958 und 1997 feststellen. Während im ersten Jahrzehnt zwischen 55 und 56° N und etwa 0 und 7° E mittlere Höhen kleiner 2 m vorherrschen, ist dieser Bereich im vierten Jahrzehnt (Teilabb. 4) von Wellenhöhen grösser 2 m gekennzeichnet. Der Mittelwert des Zeitraums 1998-2007 weist eine leichte Abnahme der Wellenhöhen grösser 2 m auf (Teilabb. 5). Diese liegen aber noch über den mittleren Werten der ersten drei Zeiträume (Teilabb. 1-3). Die mittleren signifikanten Wellenhöhen kleiner 2 m stimmen in ihrer Verteilung etwa mit dem

Muster des vorhergehenden Zeitraums 1988-1997 überein. An den Küsten bleiben die langjährigen mittleren signifikanten Wellenhöhen der einzelnen Jahrzehnte nahezu unverändert.

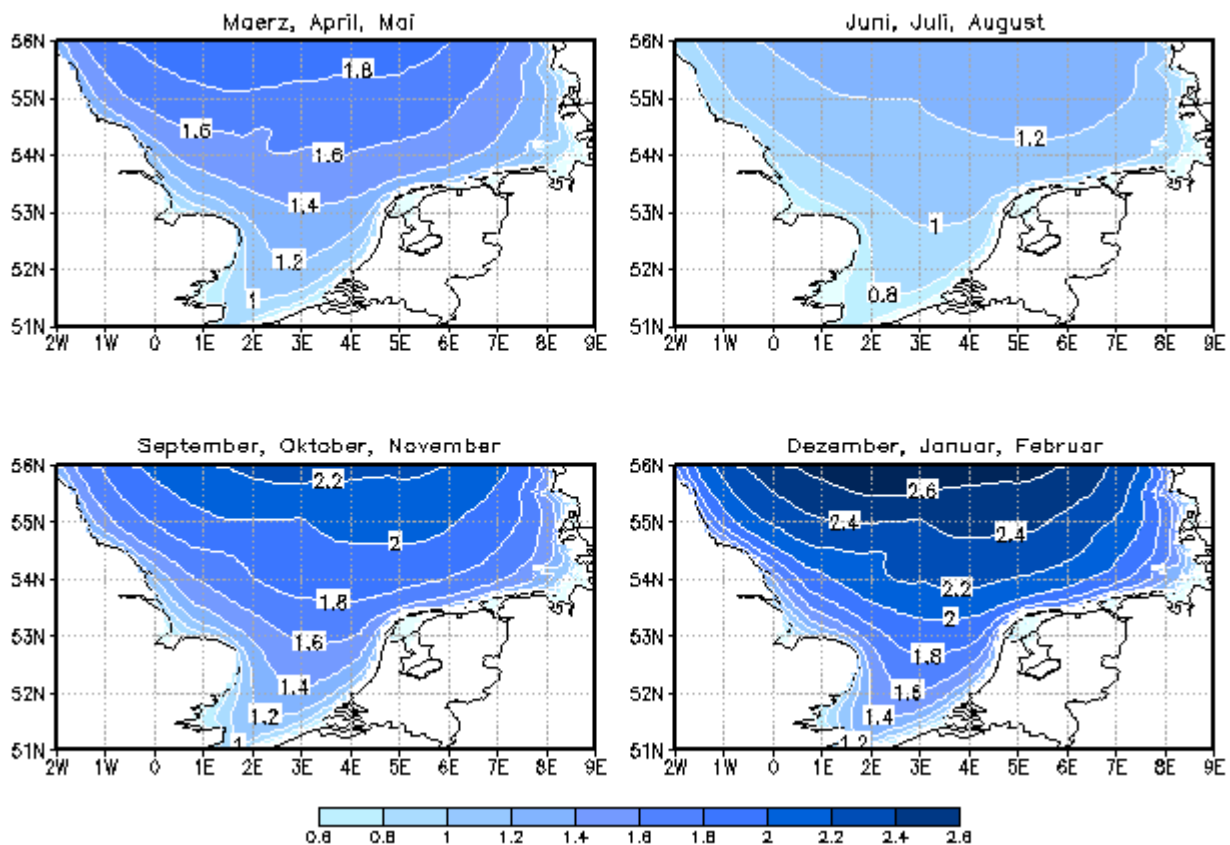


Abbildung 17 Mittlere saisonale signifikante Wellenhöhe (m) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

Um ein präziseres Bild über die jahreszeitlichen Variationen der signifikanten Wellenhöhe zu bekommen, werden im folgenden Text die 50-jährigen Mittelwerte der Jahreszeiten Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON) und Winter (DJF) genauer betrachtet. Abbildung 17 zeigt, dass die kleinsten mittleren Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet im Sommer auftreten. Im offenen Meer herrschen maximale mittlere Wellenhöhen kleiner 1,4 m und an den Küsten kleiner 0,8 m. Eine Ausnahme stellt hierbei der nördlichste Bereich der Ostküste Grossbritanniens dar. Hier sind, ebenso wie nördlich der west- und ostfriesischen Inseln, maximale Wellenhöhen von 1 m anzutreffen. Im Herbst nehmen die mittleren signifikanten Wellenhöhen im offenen Meer um beinahe das Doppelte zu (vgl. Teilabb. 3), sodass im nördlichsten Bereich des Untersuchungsgebietes Maximalwerte von kleiner 2,4 m erreicht

werden. In grossen Bereichen der Küste steigen die Werte auf bis zu 1,2 m an, im nördlichsten Bereich der Ostküste Grossbritanniens und nördlich der Inseln sogar auf bis zu 1,4 m. In den Wintermonaten nehmen die mittleren signifikanten Wellenhöhen weiter zu. Nördlich von 55° N und zwischen 0 und 6° E treten mittlere Höhen zwischen 2,6-2,8 m auf (Teilabb. 4). An den Küsten steigen die Werte auf durchschnittlich 1,4 m. Nördlich der Inseln und im nördlichsten Bereich des Westrandes des Untersuchungsgebietes liegen die Werte bei kleiner 1,8 m. Im Frühling nehmen die mittleren signifikanten Wellenhöhen im gesamten Untersuchungsgebiet wieder ab. Am stärksten ist die Abnahme im offenen Meer zu erkennen. Hier sinken die mittleren Höhen auf kleiner 2 m, liegen aber trotzdem noch über den durchschnittlichen signifikanten Wellenhöhen im Sommer. An den Küsten sind mittlere Höhen von kleiner 1 m, nördlich der Inseln von kleiner 1,2 m und im nördlichsten Bereich der Ostküste Grossbritanniens von kleiner 1,4 m anzutreffen.

5.1.2 Mittlere Perioden jährlich und saisonal

Abbildung 18 zeigt die zehnjährigen Mittelwerte der T_{m2} -Periode (Teilabb.1-5) des Zeitraums 1958-2007 und den langjährigen Mittelwert 1958-2007 (Teilabb. 6) im Untersuchungsraum. Bei der Betrachtung der Teilabbildung 6 fällt auf, dass das Muster der mittleren T_{m2} -Periode grosse Ähnlichkeit mit der oben besprochenen Verteilung der mittleren signifikanten Wellenhöhe aufweist. Die Werte sind im mittleren nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes am grössten und nehmen zu den Küsten hin annähernd halbkreisförmig ab. Die T_{m2} -Periode liegt im langjährigen Mittel (vgl. Teilabb. 6) an der Ostküste Grossbritanniens zwischen 4 und 4,5 s und an der Westküste Deutschlands und Dänemarks bei kürzer 4 s. Nördlich der west- und ostfriesischen Inseln sind mittlere Werte zwischen 4 und 4,5 s anzutreffen. Vergleichbar mit der mittleren signifikanten Wellenhöhe weist die mittlere T_{m2} -Periode ab etwa 54° N eine Ausstülpung nach Süden auf. Diese prägt sich Richtung des Ärmelkanals immer deutlicher aus. Im offenen Meer zwischen ~55 und 56° N und zwischen ~0 und 6° E sind im langjährigen Mittel Werte zwischen 5 und 5,5 s anzutreffen.

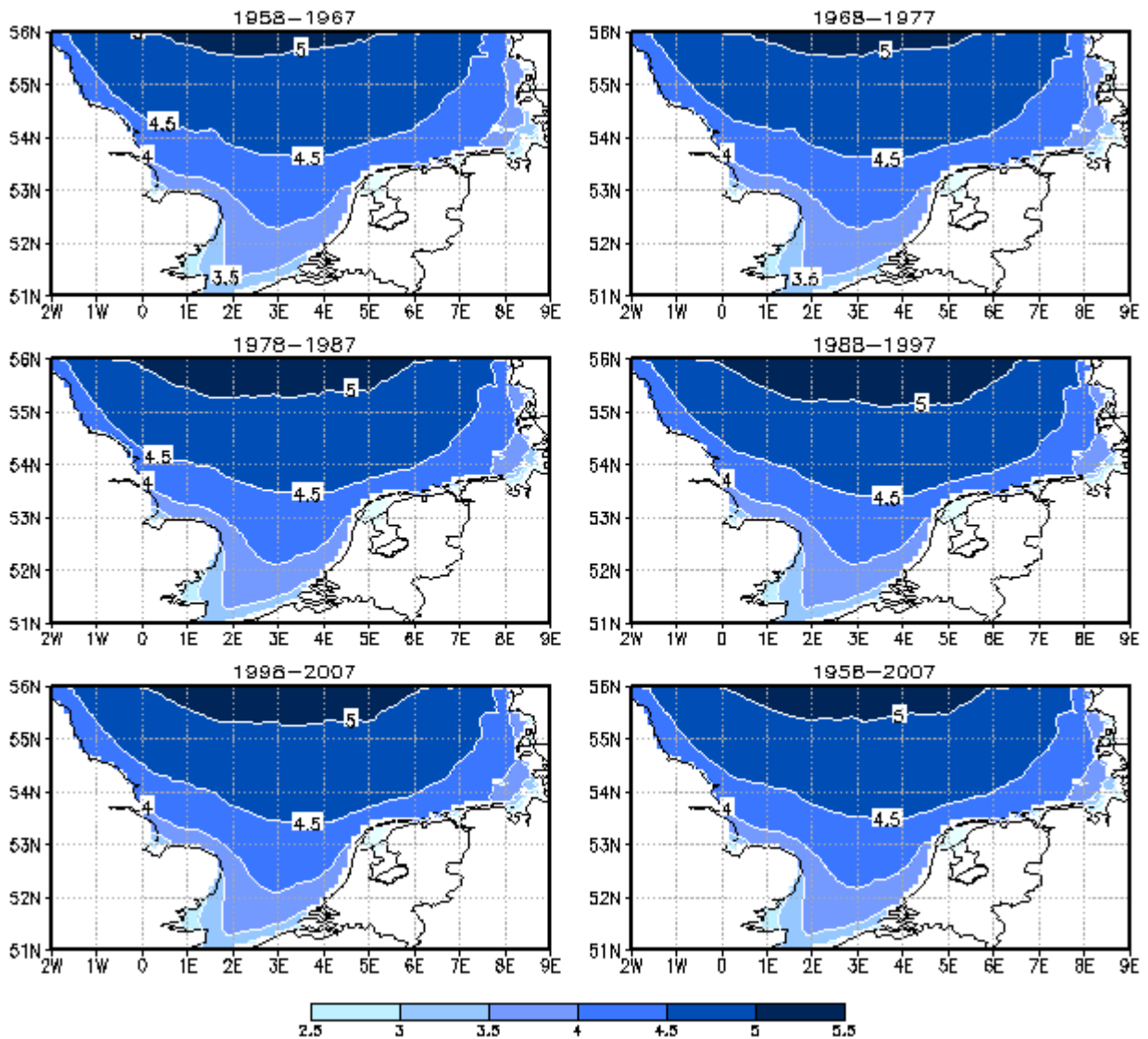


Abbildung 18 10- und 50-jährige Mittelwerte der T_{m2} -Periode (s) (Quelle: eigene Darstellung).

Bei einem Vergleich der zehnjährigen Mittelwerte (Teilabb. 1-5) wird deutlich, dass die mittlere T_{m2} -Periode im Zeitraum 1988-1997 ihre Maximalwerte erreicht. Der Bereich mit einer mittleren T_{m2} -Periode von länger 5 s dehnt sich zwischen dem ersten Zeitraum (1958-1967) und dem vierten (1988-1997) deutlich halbkreisförmig aus. Im letzten Zeitraum (1998-2007) ist eine geringe Abnahme der T_{m2} -Perioden länger 5 s festzustellen. Auffällig ist ausserdem, dass die Bereiche mit mittleren T_{m2} -Perioden kleiner 5 s nur geringen Schwankungen unterlegen sind. An den Küsten sowie nördlich der Inseln weisen die einzelnen zehnjährigen Mittel der T_{m2} -Periode dieselben Werte auf.

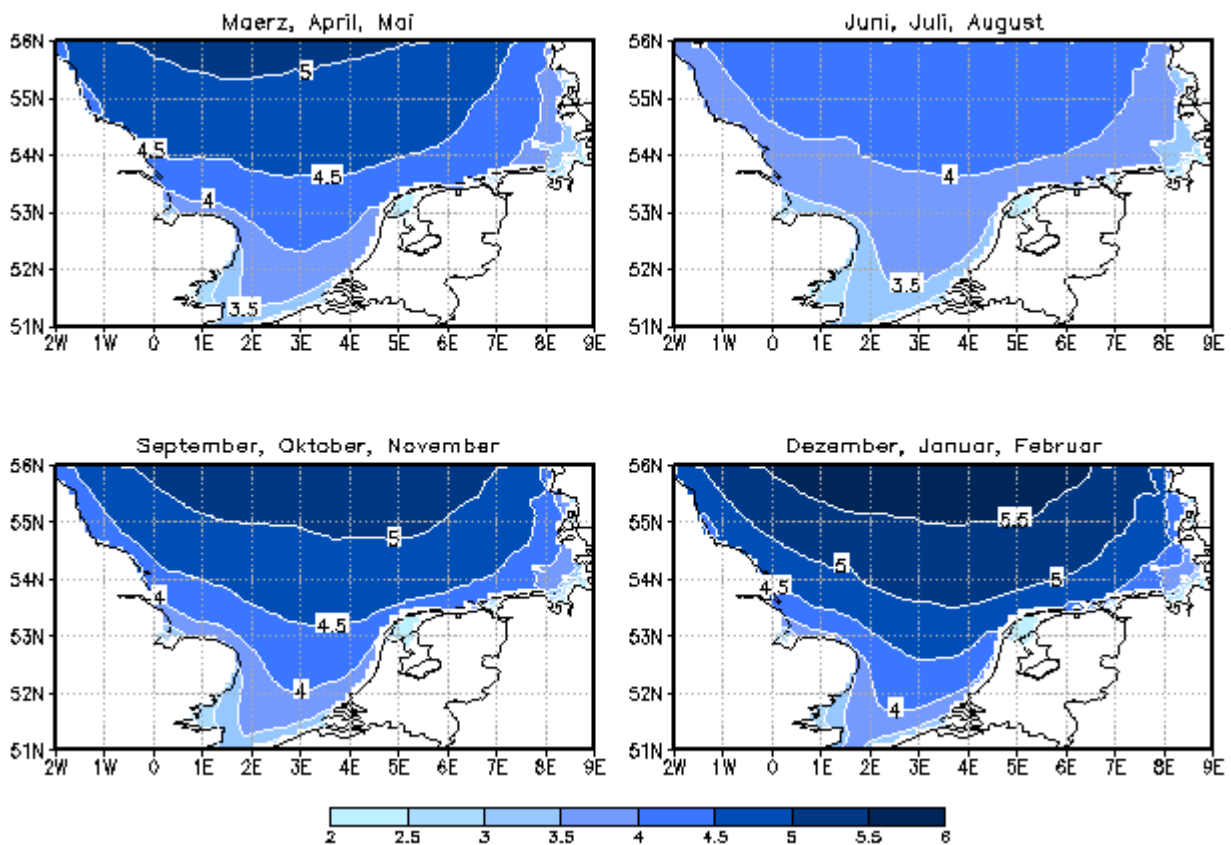


Abbildung 19 Mittlere saisonale T_{m2} -Periode (s) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

Betrachtet man die saisonalen Schwankungen der mittleren T_{m2} -Periode (siehe Abbildung 19), so ist zu erkennen, dass die kleinsten Werte im gesamten Untersuchungsgebiet im Sommer und die grössten im Winter auftreten. Zwischen ~ 55 und 56° N und ~ 0 und 6° E sind die mittleren Perioden im Winter um 1,5 s länger als im Sommer. An den Küsten beträgt die Differenz zwischen Winter und Sommer nur etwa 0,5 s. In den Herbstmonaten (vgl. Teilabb. 3) sind auf dem offenen Meer in oben genanntem Gebiet mittlere T_{m2} -Perioden kürzer 5,5 s anzutreffen. An den Küsten liegen die mittleren T_{m2} -Perioden bei kürzer 4 s, bzw. im nördlichsten Bereich des Westendes des Untersuchungsgebietes und seewärts der west- und ostfriesischen Inseln bei kürzer 4,5 s. Im Frühling (vgl. Teilabb. 1) liegen die mittleren T_{m2} -Perioden zwischen denen des Sommers und denen des Herbstes. Im offenen Meer liegen die Werte zwischen $\sim 1^\circ$ W und 5° E und nördlich von 55° N bei kleiner 5,5 s und an den Küsten bei kleiner 4 s. Eine Ausnahme bildet der nördlichste Bereich der Ostküste Grossbritanniens mit mittleren T_{m2} -Perioden von kleiner 4,5 s.

Abbildung 20 zeigt die zehnjährigen Mittel der Peak-Periode zwischen 1958 und 2007 (Teilabb. 1-5) und das 50-jährige Mittel desselben Zeitraums (Teilabb. 6). Im langjährigen Mittel (vgl. Teilabb. 6) weist die Peak-Periode Maximalwerte zwischen 8 und 9 s bei etwa 56° N und zwischen $2-4^\circ$ E auf. Die geringsten Werte sind an der Westküste Dänemarks und Deutschlands und im südlichsten Bereich des Ärmelkanals anzutreffen. Die Peak-Periode weist, mit Ausnahme des oben erwähnten nördlichsten Bereichs, nördlich von 53° N und westlich von 6° E mittlere Werte von 7 s auf.

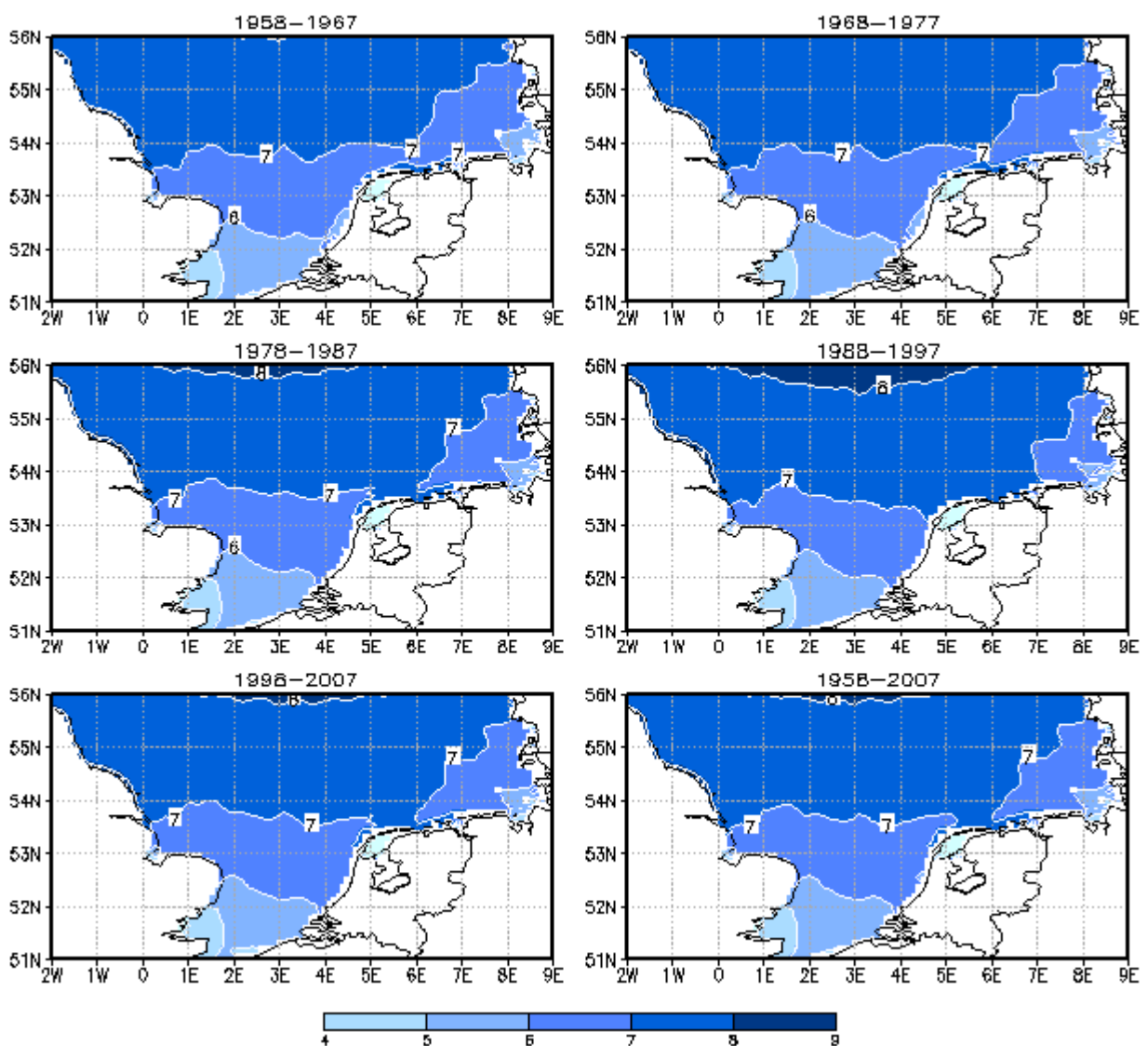


Abbildung 20 10- und 50-jährige Mittelwerte der Peak-Periode (s) (Quelle: eigene Darstellung).

Vergleicht man die zehnjährigen Mittelwerte der Teilabbildungen 1-5 miteinander, zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der mittleren signifikanten Wellenhöhe und der

T_{m2} -Periode. Die Länge der Peak-Periode nimmt in den ersten vier Jahrzehnten im gesamten Untersuchungsgebiet etwas zu, um im darauf folgenden Jahrzehnt wieder etwas abzunehmen.

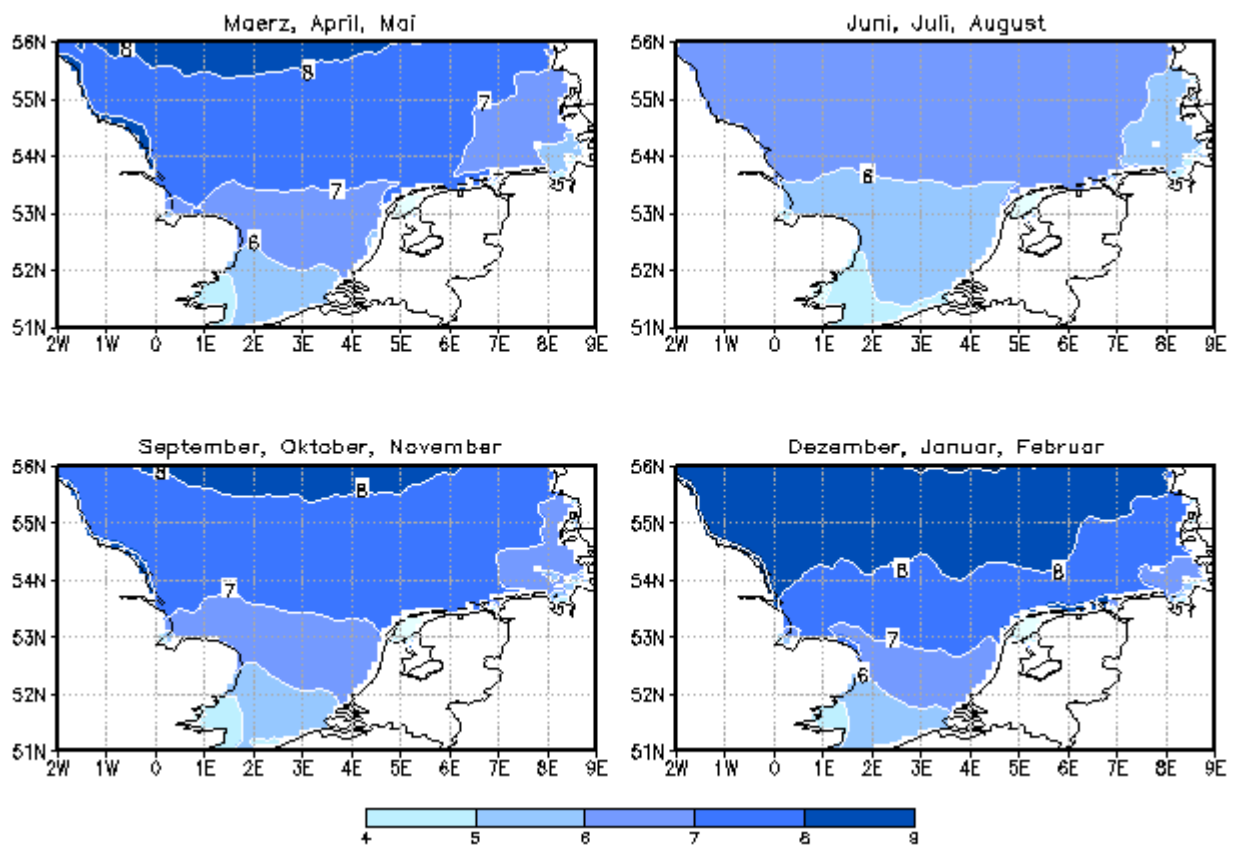


Abbildung 21 Mittlere saisonale Peak-Periode (s) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

Bei Betrachtung der saisonalen Karten der mittleren Peak-Periode des Zeitraums 1958-2007 (vgl. Abbildung 21) zeigt sich folgendes Bild: Die höchsten Werte der mittleren Peak-Periode sind in den Wintermonaten (Teilabb. 4) und die niedrigsten in den Sommermonaten (Teilabb. 2) anzutreffen. Die Sommermonate sind gekennzeichnet durch geringe räumliche Unterschiede in der Peak-Periode. Sowohl in weiten Bereichen der Küste, als auch in der Region nördlich von $\sim 53^\circ$ N und nördlich der west- und ostfriesischen Inseln sind Peak-Perioden mit Maximalwerten von 7 s anzutreffen. Vor der Westküste Dänemarks und Deutschlands und südlich von 53° N liegt die mittlere Peak-Periode bei kürzer 6 s und erreicht im südwestlichsten Bereich des Ärmelkanals ihren Minimalwert von kürzer 4 s. Im Herbst (vgl. Teilabb. 3) ist der oben erwähnte Bereich nördlich von $\sim 53^\circ$ N gekennzeichnet durch mittlere Peak-Perioden länger 7 s. Eine Ausnahme stellt ebenfalls die Region

vor der Westküste Dänemarks und Deutschlands dar. Hier liegen die mittleren Peak-Perioden bei 6-7 s. Die geringsten Peak-Perioden mit Werten zwischen 4-5 s sind im süd-westlichsten Bereich des Untersuchungsgebietes anzutreffen.

Im Winter treten die höchsten mittleren Werte des gesamten Jahres auf. Bei $\sim 56^\circ$ N und zwischen ~ 2 und 5° E liegen die mittleren Peak-Perioden bei kürzer 10 s. Ausserdem sind weite Bereiche nördlich von 54° N durch hohe Werte von grösser 8 s gekennzeichnet. Eine Ausnahme stellt wiederum der östlichste Teil des Untersuchungsgebietes dar. Hier liegen die mittleren Peak-Perioden zwischen 6-8 s.

Das Muster der mittleren Peak-Periode im Frühling hat bis auf kleinräumige Schwankungen starke Ähnlichkeiten zu dem im Herbst. Die längsten mittleren Peak-Perioden sind nördlich von 55° N und die kürzesten im süd-westlichen Bereich des Ärmelkanals anzutreffen. Eine Besonderheit im Frühling stellt ein schmaler Streifen mit mittleren Werten zwischen 7-8 s vor dem nördlichen Teil der Ostküste Grossbritanniens dar.

5.1.3 Mittlere Energieflüsse jährlich und saisonal

Wie in Kapitel 3.2 gezeigt wurde, wird der mittlere Energiefluss der Wellen unter anderem unter Verwendung der Grössen signifikante Wellenhöhe und T_{m2} -Periode berechnet. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die mittleren Energieflüsse ähnliche Muster aufweisen wie die genannten Parameter.

Abbildung 22 zeigt die zehnjährigen Mittel der Energieflüsse im Zeitraum 1958-2007 (Teilabb. 1-5) und den langjährigen Mittelwert im selben Zeitraum (Teilabb. 6). Im fünfzigjährigen Mittel liegen die Energieflüsse an den Küsten kleiner 9 kWm^{-1} und im offenen Meer bei etwa 56° N und zwischen 3 und 5° E werden Maximalwerte von grösser 24 kWm^{-1} erreicht. Die Abnahme der Energieflüsse erfolgt wie bei den anderen Parametern annähernd halbkreisförmig vom offenen Meer in Richtung Küsten und Ärmelkanal. Unterbrochen wird dieses Muster wiederum durch eine Ausdehnung Richtung Ärmelkanal. Diese Ausbeulung ist ab 53° N deutlich zu erkennen.

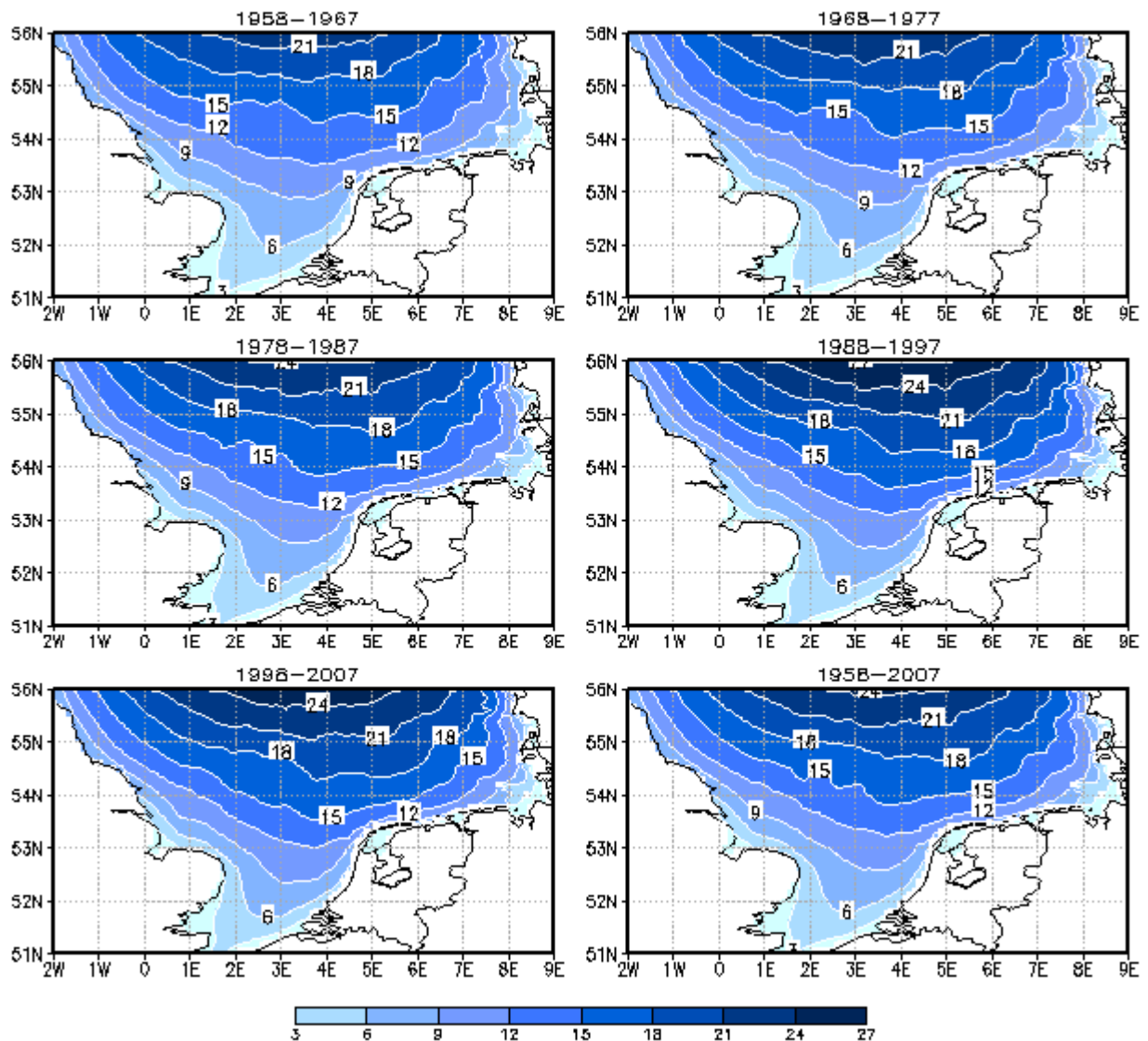


Abbildung 22 10- und 50-jährige Mittelwerte der Energieflüsse (kWm^{-1}) (Quelle: eigene Darstellung).

Zwischen dem ersten (1958-1967) und dem vierten (1988-1997) Jahrzehnt ist eine Zunahme der mittleren Energieflüsse zu verzeichnen. Das letzte Jahrzehnt (vgl. Teilabb. 5) ist durch eine geringe Abnahme der mittleren Energieflüsse gekennzeichnet.

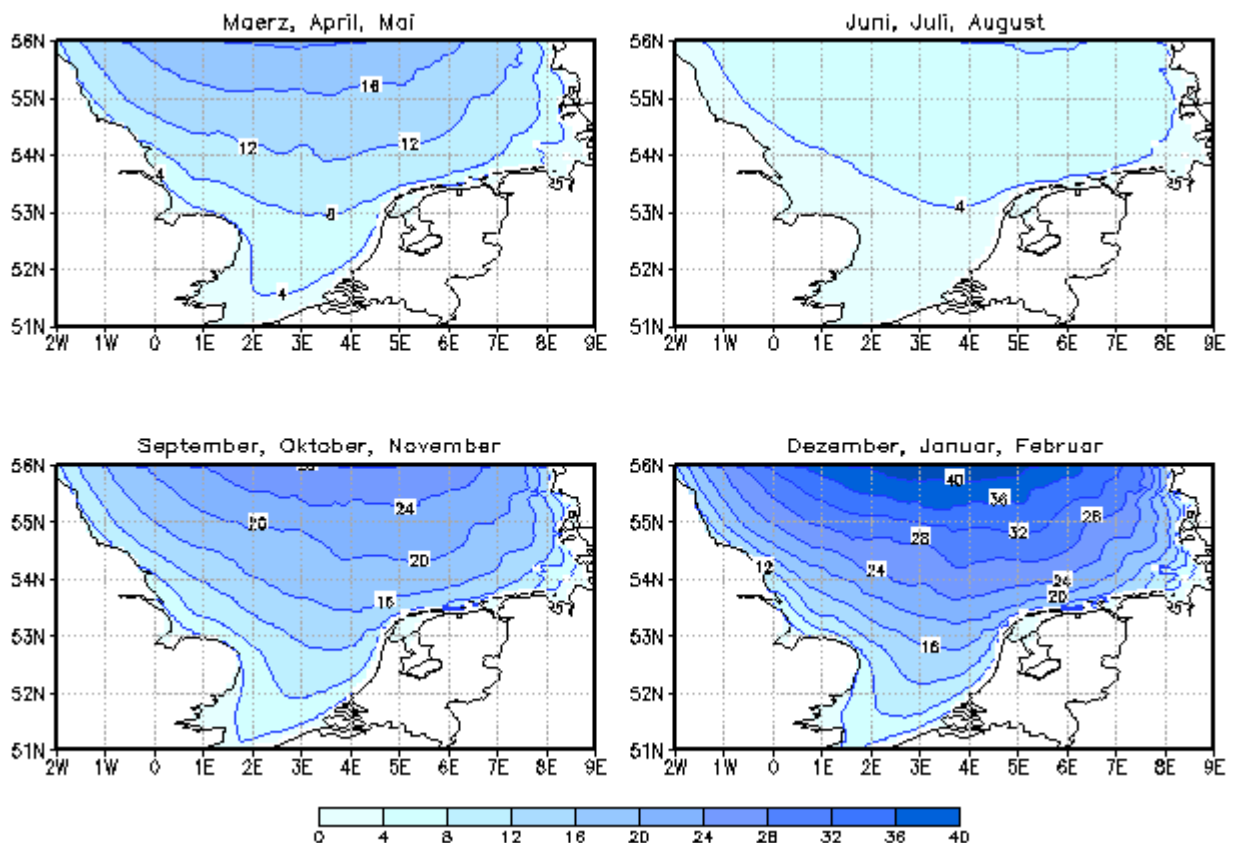


Abbildung 23 Mittlere saisonale Wellenenergieflüsse (kWm^{-1}) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 23 zeigt die saisonalen Muster der mittleren Energieflüsse im Zeitraum 1958-2007. In den Sommermonaten (vgl. Teilabb. 2) sind die mittleren Energieflüsse im gesamten Untersuchungsgebiet gering. Die Werte liegen bei kleiner 4 kWm^{-1} an den Küsten und nördlich der west- und ostfriesischen Inseln und in grossen Bereichen nördlich von 53° N bei über 4 kWm^{-1} . Bei $\sim 56^\circ \text{ N}$ und zwischen $4\text{-}6^\circ \text{ E}$ sind mittlere Werte von grösser 8 kWm^{-1} anzutreffen. Im Herbst (vgl. Teilabb. 3) sind die Unterschiede zwischen Küste und offenem Meer grösser. Am West- und Ostrand des Untersuchungsgebietes liegen die mittleren Energieflüsse bei unter 8 kWm^{-1} und vor den oben genannten Inseln bei maximal 12 kWm^{-1} . Die mittleren Energieflüsse nehmen von den Küsten zum offenen Meer hin annähernd halbkreisförmig zu und erreichen nördlich von 55° N und zwischen ~ 1 und 7° E Maximalwerte von 28 kWm^{-1} . Im Winter (vgl. Teilabb. 4) ist ein weiterer Anstieg der mittleren Energieflüsse zu verzeichnen. Am nördlichen Ende des Untersuchungsgebietes sind die Werte etwa 10mal so hoch wie im Sommer. Vor der Ostküste Grossbritanniens liegen die

mittleren Energieflüsse bei kleiner 12 kWm^{-1} , vor der Westküste Dänemarks und Deutschlands bei kleiner 16 kWm^{-1} und nördlich den Inseln bei maximal 20 kWm^{-1} .

Im Frühling (vgl. Teilabb. 1) ist eine Abnahme der mittleren Energieflüsse zu verzeichnen, wobei die Werte unter denen des Herbstes, aber über denen des Sommers liegen. Am Ostrand des Untersuchungsgebietes liegen die mittleren Energieflüsse bei unter 4 kWm^{-1} und am Westende unter 12 kWm^{-1} . Ein grosser Bereich des Ärmelkanals südlich von 52° N ist gekennzeichnet durch mittlere Energieflüsse unter 4 kWm^{-1} . Bei $\sim 56^\circ \text{ N}$ und zwischen ~ 2 und 4° E sind mittlere Flüsse von unter 24 kWm^{-1} anzutreffen. Das Gebiet nördlich der west- und ostfriesischen Inseln weist durchschnittliche Energieflüsse von kleiner 8 kWm^{-1} auf.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die oben beschriebenen Variablen weisen sowohl im langjährigen, als auch im zehnjährigen Mittel alle ein ähnliches räumliches Muster auf. Die Werte nehmen vom offenen Meer zu den Küsten und von Norden nach Süden hin ab. Die Abnahme erfolgt bei allen Variablen annähernd halbkreisförmig mit einer Ausstülpung in Richtung Ärmelkanal. Für eine mittlere signifikante Wellenhöhe von 2 m sind im Mittel T_{m2} -Perioden mit einer Länge von 5-5,5 s und Peak-Perioden mit einer Länge von 7-8 s charakteristisch. Signifikante Wellenhöhen an den Küsten von kleiner 1 m weisen mittlere T_{m2} -Perioden kürzer 4 s und mittlere Peak-Perioden von 4-7 s auf. Saisonal können bei den verschiedenen Variablen ebenfalls gleiche Schwankungen beobachtet werden.

5.2.1 Räumliches Muster

Die oben besprochenen Variablen weisen alle ein ähnliches Muster auf. Die Werte nehmen von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin ab. Die Höhe und Gestalt der Wellen ist, wie in Kapitel 3.1.3 erwähnt, vor allem abhängig von der **Windgeschwindigkeit**, der **Winddauer**, dem **Fetch** und der **Unterwassertopographie**.

Abbildung 24 zeigt zur Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen den Jahresmitteln der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe den Verlauf dieser beiden Parameter an der Station Alpha Ventus. Hierbei handelt es sich um einen Offshore-Windpark mit den ungefähren Koordinaten 54° N und $6,6^\circ \text{ E}$. In

Kapitel 8.2 wird noch genauer auf diesen eingegangen. Wie vermutet zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen Jahren mit stärkeren mittleren Winden und höheren Wellen und umgekehrt. Die Korrelation zwischen beiden Zeitreihen beträgt 0,88.

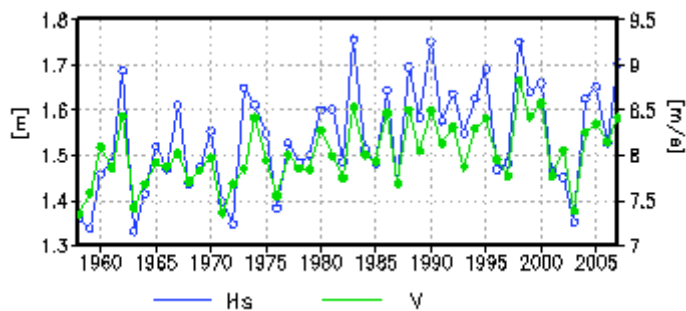


Abbildung 24 Verlauf der jährlichen mittleren Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) und der jährlichen mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) an der Station Alpha Ventus (54° N , $6,6^\circ \text{ E}$). Die Korrelation zwischen beiden Zeitreihen beträgt 0,88 (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 25 zeigt das räumliche Muster der mittleren **Windgeschwindigkeit** in 10 m ü. NN im gesamten Untersuchungsgebiet. Betrachtet man das langjährige Mittel (Teilabb. 6) der Windgeschwindigkeit, ist zu erkennen, dass das Muster dem der oben besprochenen Variablen ähnelt. Die höchsten Werte mit grösser $8,5 \text{ ms}^{-1}$ treten in der nördlichen Nordsee auf und die geringsten in der südlichen Nordsee und zu den Küsten hin. Die abnehmenden Werte in Richtung Küsten treten in Folge der Rauigkeitsunterschiede zwischen Wasser und Land auf. Die grössere Rauigkeit der Landflächen gegenüber dem Wasser führen zu einer Abnahme der Windgeschwindigkeit. Dies hat zur Folge, dass weniger Energie vom Wind auf das Wasser übertragen wird und kleinere Wellenhöhen vorherrschen.

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, liegt die Nordsee in der Westwindzone zwischen dem Islandtief und dem Azorenhoch. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass häufig Tiefdruckgebiete Richtung Osten transportiert werden und nur selten blockierende Hochdruckgebiete auftreten. Die vorherrschende Windrichtung ist West, es können jedoch auch Winde aus allen anderen Richtungen auftreten (KOREVAAR 1990:21). Die nach Süden hin abnehmenden Windgeschwindigkeiten können dadurch erklärt werden, dass der südliche Teil weitgehende von Landmassen umgeben ist. Aus Westen, Osten und Süden kommender Wind wird also von den vorlagernden

Landmassen abgeschwächt. Die nördliche Nordsee ist hingegen nach Norden hin geöffnet, sodass aus Nordwesten kommende Winde einen sehr langen **Fetch** besitzen. BACON (1991:548) bestätigt diese Vermutung: „(...) the North Sea is a partially enclosed sea that is fetch-limited in all directions except the north, so that local meteorological conditions have more dominant effect on wave conditions, than in the open ocean“. Wenn die **Winddauer** bei vorherrschenden Nordwestwinden auch noch lang genug ist, können sich sehr hohe Wellen ausbilden. Auswertungen zur Andauer der Winde haben aber ergeben, dass der Nordwestwind meist nicht lange anhält (KOREVAAR 1990:26). Dies hat zur Folge, dass das durch Nordwestwinde ausgelöste Wellenwachstum durch die geringe Winddauer eingeschränkt wird. Für die anderen Windrichtungen stellt meist der geringe Fetch den limitierenden Faktor dar (KOREVAAR 1990:26).

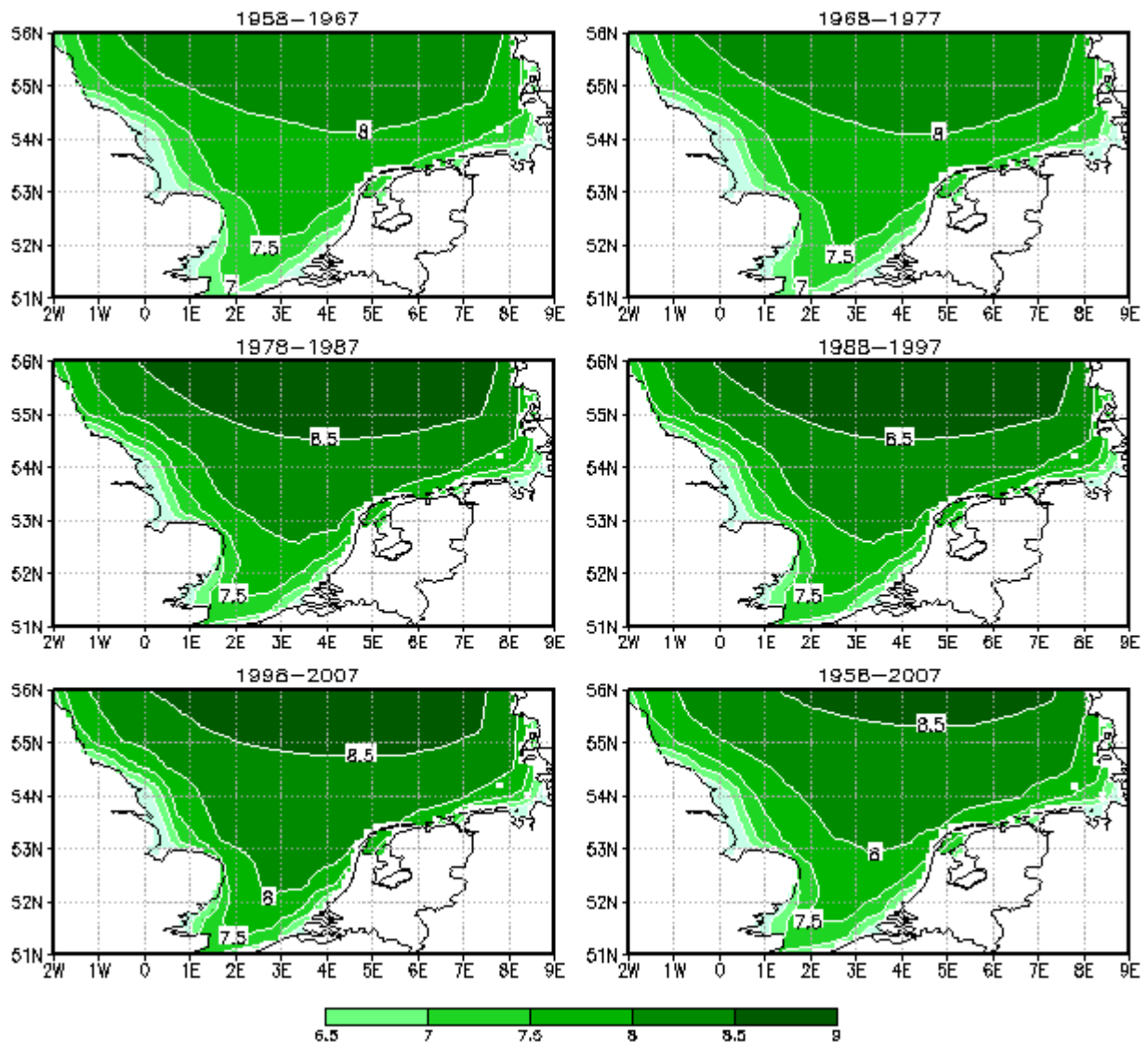


Abbildung 25 10- und 50-jährige Mittelwerte der Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) (Quelle: eigene Darstellung).

Die zu den Küsten und nach Süden hin abnehmenden Werte der signifikanten Wellenhöhe lassen sich ausserdem anhand der bathymetrischen Struktur der Nordsee erklären (vgl. Abbildung 1). Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, nimmt die **Wassertiefe** der Nordsee von Norden (Maximaltiefe 200 m) nach Süden (Maximaltiefe 50 m) und vom offenen Meer zu den Küsten hin ab. Wie in Kapitel 3.1.4 gezeigt, ist die maximale Wellenhöhe unter anderem abhängig von der in einem Gebiet vorherrschenden mittleren Wassertiefe. Ist die Wassertiefe d grösser als die Hälfte der Wellenlänge L ($d > L/2$), so greifen die Orbitalbewegungen der Wellen nicht bis zum Untergrund durch. Herrschen jedoch Übergangs- ($L/2 > d > L/20$)

oder Flachwasserbedingungen ($d < L/20$) greifen die Wellenbewegungen bis auf den Untergrund durch und die Wellen wandeln sich schliesslich von Oszillations- in Translationswellen (vgl. Kapitel 3.1.4). Die von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin abnehmenden mittleren signifikanten Wellenhöhen sind somit zu grossen Teilen Ergebnis der von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin abnehmenden Wassertiefe der Nordsee.

Die Ausstülpung des halbkreisförmigen Musters in Richtung Ärmelkanal, die bei den langjährigen Mittelwerten der signifikanten Wellenhöhe, der Energieflüssen und der T_{m2} -Periode deutlich ab $\sim 53^\circ$ N zutage tritt, ist auch bei den 10- und 50-jährigen Mittelwerten der Windgeschwindigkeit zu erkennen. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Ausstülpung nicht aufgrund der Unter-, sondern der Überwassertopographie zustande kommt. Aus Nord, Nordwest und Nordost kommende Winde werden durch den in der südlichen Nordsee enger werdenden Abstand zwischen den Landmassen kanalisiert und erfahren dadurch eine Verstärkung. Nach MALBERG (2007:352) „führt nach den Gesetzen der Physik bei einer kontinuierlichen Strömung ein eingeeengter Strömungsquerschnitt zu einer entsprechend erhöhten Strömungsgeschwindigkeit“. Die höheren Windgeschwindigkeiten haben, wie oben gezeigt, höhere Wellenhöhen und somit grössere Wellenenergieflüsse zur Folge. Gleichzeitig werden aus Süden und Südwesten kommende Winde im Ärmelkanal kanalisiert, sie breiten sich nach der Aufweitung der Landmassen aus und erfahren dadurch eine Abschwächung.

Es ist also festzuhalten, dass die räumlichen Muster der signifikanten Wellenhöhe, der Wellenenergieflüsse und der anderen Parameter im Untersuchungsgebiet vor allem Ergebnis des Zusammenwirkens von der bathymetrischen Struktur, der Windgeschwindigkeit, dem Fetch und der Winddauer sind.

5.2.2 Zeitliches Muster

Zeitlich gesehen weisen die in Kapitel 5 besprochenen Variablen die gleiche Entwicklung auf. Die 10-jährigen Mittelwerte zeigen eine Zunahme in den einzelnen Jahrzehnten zwischen 1958 bis 1997 (Teilabb. 1-4) und eine Abnahme im darauf folgenden Jahrzehnt (Teilabb. 5). Abbildung 25 zeigt, dass die 10-jährige mittlere Windgeschwindigkeit dieselbe Entwicklung durchmacht. Während die nördliche Nordsee im ersten betrachteten Jahrzehnt (1958-1967) im Mittel

Windgeschwindigkeiten von kleiner $8,5 \text{ ms}^{-1}$ aufweist, betragen diese im vierten Jahrzehnt (1988-1997) kleiner 9 ms^{-1} . Betrachtet man Abbildung 26, die den zeitlichen Verlauf des gleitenden 4-jährigen Mittels von Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe für die Station Alpha Ventus darstellt, ist zu erkennen, dass die Windgeschwindigkeit und die Wellenhöhe ab Beginn des betrachteten Zeitraums zugenommen haben, um etwa 1990 einen Peak aufweisen und danach wieder abnehmen.

Zahlreiche Studien bestätigen diese Entwicklung für das Gebiet der Nordsee. Einig sind sie sich jedoch nicht darüber, woher diese herrührt und ob es sich bei der Zunahme der Windgeschwindigkeit und der Wellenhöhe um einen Trend handelt.

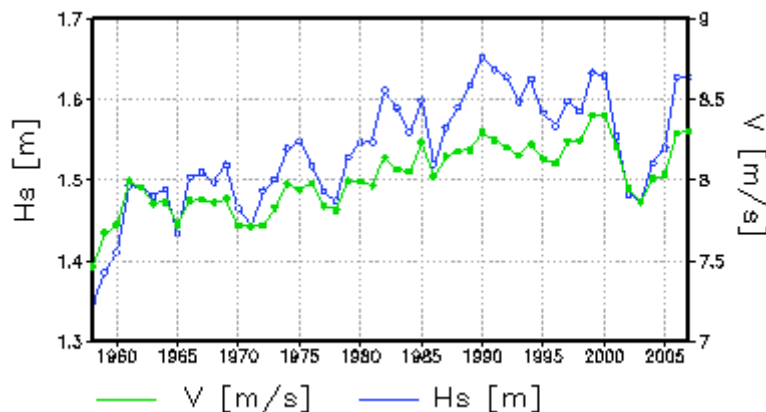


Abbildung 26 Gleitendes vierjähriges Mittel der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe an der Station Alpha Ventus (54° N , $6,6^\circ \text{ E}$). Das vierjährige gleitende Mittel der einzelnen Jahre wird aus den Jahresmittelwerten von $t-2$, $t-1$, t und $t+1$ berechnet (Quelle: eigene Darstellung).

FURNES (1992:252) argumentiert beispielsweise, dass Veränderungen in der mittleren Windrichtung über der Nordsee zu einer Zunahme des Fetches und somit zu einem Anstieg der Wellenhöhen führen können. BACON (1993: 433) hingegen führt die Zunahme der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe auf eine Intensivierung der atmosphärischen Zirkulation zurück. Laut YOUNG (1999a:937) hat der Fetch einen geringeren Einfluss auf das Wachstum der Wellen als die Windgeschwindigkeit und die Winddauer.

Im folgenden Text soll die oben genannte Argumentation von BACON (1993) mit Hilfe von Zeitreihen der Station Alpha Ventus und dem NAO-Index (vgl. Kapitel 2.2.1) nachvollzogen werden. Da in der Nordseeregion Verstärkungen und

Abschwächungen der Zonalzirkulation normalerweise auf das Winterhalbjahr beschränkt sind (LÖWE 2009:37), werden nur die Monate Dezember bis Februar betrachtet.

Der in Abbildung 27 dargestellte NAO-Index für die Monate Dezember, Januar und Februar, wurde anhand der von der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) zur Verfügung gestellten monatlichen NAO-Werte berechnet. Die verwendeten Daten sind unter der im Anhang angegebenen Adresse zu finden (<ftp.cpc.ncep.noaa.gov>).

Bei den Zeitreihen der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe handelt es sich um Anomalien für die Monate Dezember, Januar und Februar. MACKAY (2009:5) versteht unter Anomalien: „(...) the difference between the individual and climatological monthly means (...)“. In diesem Fall bedeutet das, dass von dem jährlichen Mittelwert der Monate Dezember, Januar, Februar, der 50-jährliche Mittelwert dieser Monate subtrahiert wurde.

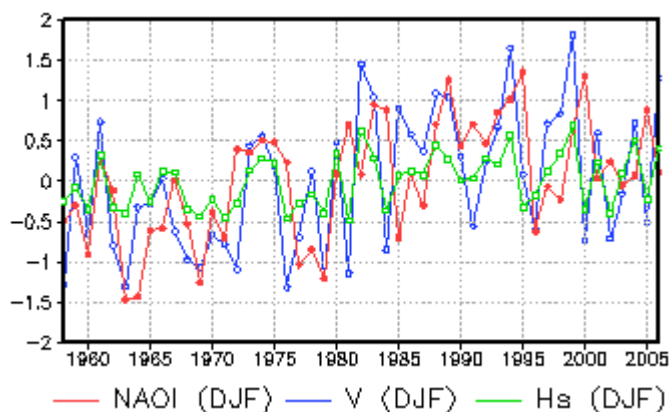


Abbildung 27 Verlauf des NAOI und der Anomalien der signifikanten Wellenhöhe und der Windgeschwindigkeit an der Station Alpha Ventus (54° N, $6,6^{\circ}$ E). Die Werte sind Mittelwerte der Monate Dezember, Januar und Februar. Die NAO-Daten stammen von der NOAA (ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh) (Quelle: eigene Darstellung).

Auffällig an Abbildung 27 ist, dass die drei Zeitreihen dieselbe Tendenz aufweisen. Hohe, bzw. niedrige NAO-Werte gehen mit hohen, bzw. niedrigen Anomalien der Wellenhöhe und Windgeschwindigkeit einher. Alle drei Zeitreihen weisen starke zwischenjährliche Schwankungen auf, wobei die Zeitreihe der Wellenhöhenanomalien die kleinste Amplitude besitzt. Die Abbildung zeigt, dass keine eindeutigen Trends, dafür aber langfristige Variabilitäten zu erkennen sind. Während die NAO-Werte zwischen 1958-1980 grösstenteils negativ sind, liegen

diese ab 1980 meist im positiven Bereich. Sehr niedrige Werte treten um 1963 und relativ hohe Werte um die Jahre 1989, 1995 und 2000 auf. Ob es sich bei den genannten Phasen aber tatsächlich um Trends handelt, ist ungeklärt (MACKAY 2009:7).

Wie in Kapitel 2.2.1 dargestellt, bedeuten negative NAO-Werte, dass der Luftdruckgradient zwischen dem Azorenhoch und dem Islandtief schwach ausgeprägt ist. Anhand der daraus resultierenden schwachen Westwinde, lassen sich die niedrigen Wellenhöhen erklären. In Jahren mit positivem NAOI hingegen besteht ein grösserer Luftdruckgradient, der stärkere Westwinde und grössere Wellenhöhen zur Folge hat. Niedrige, bzw. hohe signifikante Wellenhöhen führen wiederum, wie bereits erläutert, zu niedrigen, bzw. hohen Wellenenergieflüssen. In Jahren mit einem positiven/negativen NAOI herrschen laut dieser Abbildung hohe/niedrige Wellenenergieflüsse vor.

Zu beachten ist, dass die Auswertungen nur für die Wintermonate Dezember bis Februar durchgeführt wurden.

5.2.3 Saisonalitäten

Um ein genaueres Bild über die innerjährlichen Variabilitäten zu bekommen, wurden im Kapitel 5 neben den 50- und 10-jährigen ganzjährigen Mittelwerten der verschiedenen Variablen ebenfalls die 50-jährigen saisonalen Mittelwerte dargestellt. Eine Auswertung der Saisonalitäten ist aus verschiedenen Gründen wichtig.

Da beispielsweise der Energiebedarf nicht zu jeder Jahreszeit gleich ist, bleibt zu überprüfen, ob die Höhe des Wellenenergieangebots mit der wechselnden Nachfrage zeitlich übereinstimmt. Ausserdem sind in regelmässigen Abständen Wartungen der Wellenenergiewandler notwendig. Um einen möglichst geringen Verlust zu garantieren, sollten diese zu Zeiten mit geringem Wellenenergiepotenzial durchgeführt werden. Hinzu kommt, dass die Wartung und Installation der Systeme nicht bei allen Seegangsbedingungen möglich sind. Deshalb sind Kenntnisse über die mittleren Seegangsbedingungen in den verschiedenen Jahreszeiten wichtig (MACKAY 2009:2).

Sowohl die verschiedenen Perioden, als auch die signifikante Wellenhöhe und die Wellenenergieflüsse weisen im Untersuchungsgebiet ihr Maximum im langjährigen

Mittel im Winter auf. Die Werte nehmen im Frühling wieder ab und erreichen im Sommer ihr Minimum. Im Herbst liegen die Werte zwischen denen des Winters und denen des Frühlings. Aber nicht nur zwischen den verschiedenen Jahreszeiten herrschen grosse Unterschiede. Betrachtet man Abbildung 28, die die mittleren saisonalen Werte der verschiedenen Wellenparameter zwischen 1958-2007 an der Station Alpha Ventus darstellt, sind grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren zu erkennen. Die grösste Variabilität weisen die Wintermonate und die kleinste die Sommermonate auf. Hierauf wird in Kapitel 6 genauer eingegangen. Die Station zeigt, wie die langjährigen Mittelwerte für die ganze Nordsee auch, einen deutlichen Jahresgang der Wellenparameter: Die Werte liegen im Frühling über denen des Sommers, im Herbst über denen des Frühlings und im Winter über

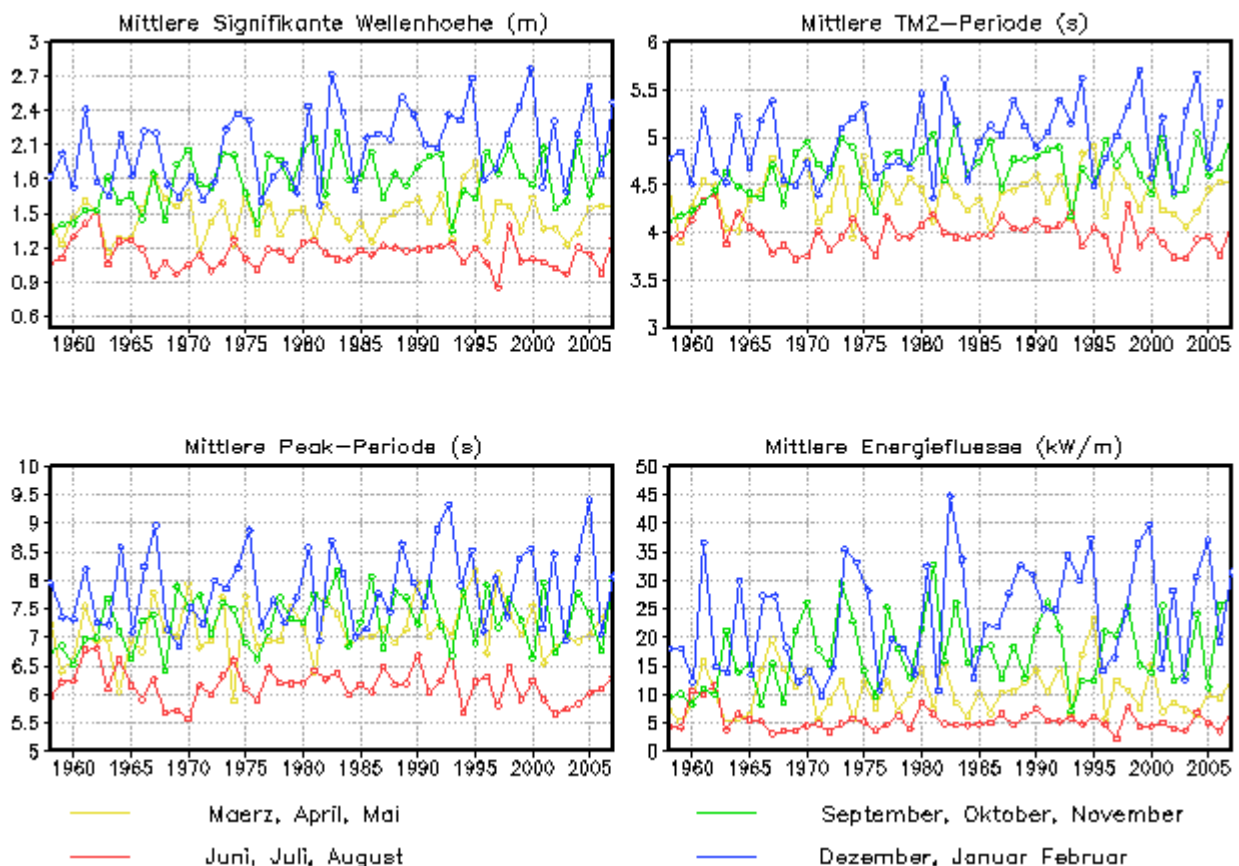


Abbildung 28 Mittlere Kennwerte für die verschiedenen Jahreszeiten an der Station Alpha Ventus (54° N, $6,6^{\circ}$ E) zwischen 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

denen des Herbstes. Es existieren jedoch auch Jahre, in denen dies nicht zutrifft. Im Jahr 1970 beispielsweise, sind die mittleren Energieflüsse im Herbst mit $\sim 26 \text{ kWm}^{-1}$

deutlich grösser als die im Winter des selben Jahres ($\sim 14 \text{ kWm}^{-1}$) und im Jahr 1960 liegen die mittleren Energieflüsse zu allen Jahreszeiten sehr nah beieinander (zwischen $7\text{-}12 \text{ kWm}^{-1}$). Die Existenz grosser zwischenjähriger Variabilitäten im Jahrgang bestätigt auch Bacon (1991:547) anhand seiner Auswertungen zur Nordsee und zum Nordatlantik.

Wie anhand der Auswertung der langjährigen Mittelwerte gezeigt wurde, sind die Welleneigenschaften und somit die Wellenenergieflüsse stark anhängig von den

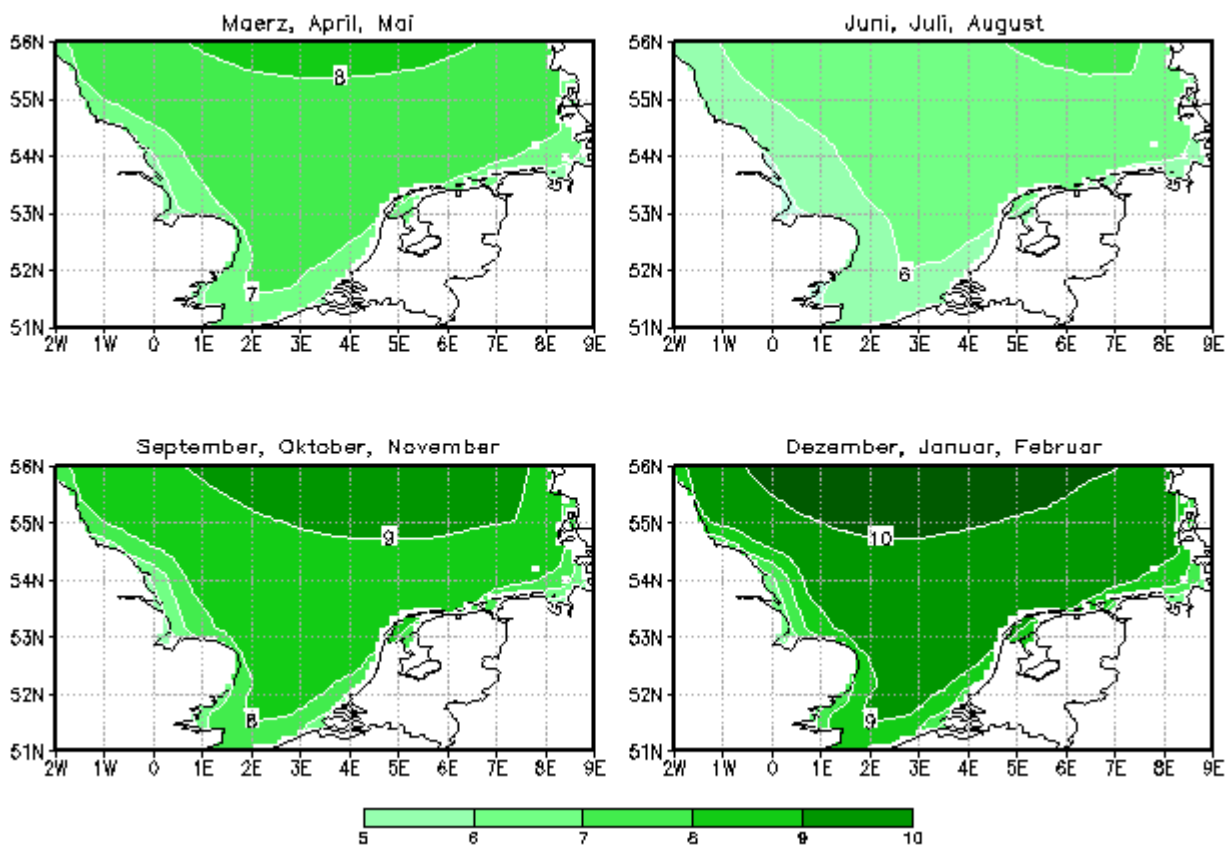


Abbildung 29 Mittlere saisonale Windgeschwindigkeiten (ms^{-1}) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

herrschenden Windbedingungen. Deshalb ist anzunehmen, dass die saisonalen Unterschiede der Windgeschwindigkeit denen der untersuchten Variablen ähnlich sind. Abbildung 29 bestätigt diese Vermutung. Mit Werten zwischen $10\text{-}10,5 \text{ s}$ herrschen im Winter im offenen Meer im Mittel die höchsten Windgeschwindigkeiten. An den Küsten liegen die Werte in dieser Jahreszeit nur $1\text{-}2 \text{ s}$ darunter. Im Frühling lassen die Geschwindigkeiten im gesamten Untersuchungsgebiet nach ($< 8,5 \text{ s}$) und erreichen im Sommer ihr Minimum ($< 7,5 \text{ s}$). Im Herbst liegen die

Windgeschwindigkeiten mit Werten kleiner 9,5 s im langjährigen Mittel zwischen denen des Winters und denen des Frühlings.

Wie kommen diese saisonalen Unterschiede in der Windgeschwindigkeit und damit im Wellenenergieangebot zustande?

Im Sommer der Nordhalbkugel verringert sich der Temperaturgegensatz zwischen Tropen und Pol in der gesamten Troposphäre. Grund hierfür sind die sich verändernden Einstrahlungsbedingungen. Der abnehmende Temperaturgradient bewirkt eine Verringerung des Druckgradienten und damit eine Verringerung der mittleren zonalen Windgeschwindigkeit (MALBERG 2007:268). Wie Abbildung 30 zeigt, unterscheiden sich die zonalen Strömungsverhältnisse (West und Ostwinde) im Winter und Sommer stark. Dargestellt sind die zonalen Windverhältnisse (ms^{-1}) im Sommer und Winter der Nordhalbkugel für verschiedene Höhen. Deutlich zu erkennen ist, dass im Winter auf der gesamten Nordhalbkugel (NHK) gut ausgeprägte Westwinde dominieren und Ostwinde nur in den Tropen auftreten. Die Westwinde erreichen in etwa 12 km Höhe Geschwindigkeiten von bis zu 40 ms^{-1} (HURRELL 2009:29). Im Sommer der NHK ist der Westwind weniger stark ausgebildet und es treten sowohl in der gesamten höheren Stratosphäre, als auch in der Troposphäre im Bereich der Tropen und bodennah in den Polargebieten Ostwinde auf (MALBERG 2007:267ff). Im Untersuchungsgebiet, das in der Westwindzone liegt (vgl. Kapitel 2), weisen die Westwinde im Winter der NHK aufgrund des grösseren Druckgradienten also höhere Windgeschwindigkeiten als im Sommer auf.

Die grossen Unterschiede der mittleren Energieflüsse in den einzelnen Jahreszeiten, die in Abbildung 23 zu erkennen sind, entstehen hauptsächlich aufgrund der sich ändernden Einstrahlungsverhältnisse. Diese haben sich verändernde Temperatur- und Druckgradienten zur Folge und führen somit zu saisonalen Änderungen der mittleren Windgeschwindigkeit. Geringere, bzw. höhere Windgeschwindigkeiten nehmen ihrerseits wieder Einfluss auf die vorherrschenden Wellenhöhen.

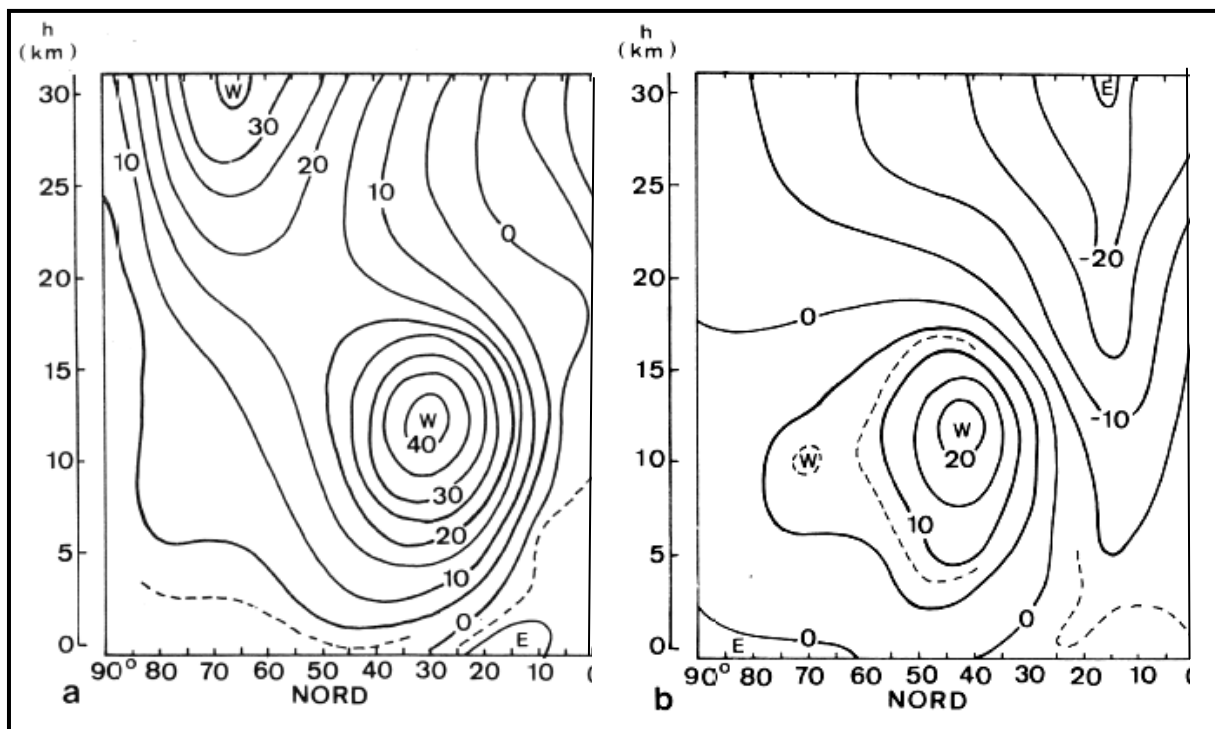


Abbildung 30 Zonale Windverhältnisse auf der Nordhalbkugel im Winter (links) und im Sommer (rechts) (Quelle: verändert nach MALBERG 2007:767).

5.3 Bedeutung für die Nutzung der Wellenenergie

Welche Bedeutung haben oben beschriebene Entwicklungen im Wellenklima in der Nordsee südlich von 56° N für die Nutzung der Wellenenergie?

Rein aus Sicht des theoretischen Potenzials ist die Wellenenergiegewinnung im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes im Mittel ergiebiger als im südlichen Teil. Ausserdem ist die Wellenenergienutzung im offenen Meer, wo grössere mittlere Energieflüsse herrschen als an den Küsten, sinnvoller. Zu beachten ist jedoch, dass für die Nutzung der Wellenenergie eines Gebietes nicht nur hohe Energieflüsse von Bedeutung sind. Da die Wellenenergieumwandler durch zu hohe Wellen beschädigt oder gar zerstört werden können, sollten diese in Regionen mit möglichst geringen Extremwerten installiert werden.

Zur Charakterisierung der Extremwerte wird das mittlere 95%-Quantil (1958-2007) der signifikanten Wellenhöhe gewählt. Dieses zeigt den Schwellenwert unterhalb welchem die 95% kleinsten und oberhalb welchem die 5% grössten Werte liegen. Die Berechnung beruht auf Stundenwerten der signifikanten Wellenhöhe. Wie Abbildung 31 zeigt, nimmt die Höhe der Extremwerte (vergleichbar mit den mittleren

signifikanten Wellenhöhen) von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin ab.

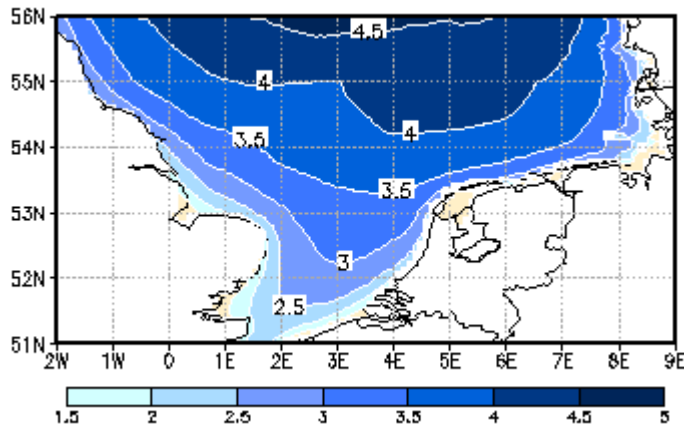


Abbildung 31 Mittleres 95%-Quantil der signifikanten Wellenhöhe 1958-2007. Die Berechnung beruht auf Stundenwerten der signifikanten Wellenhöhe (Quelle: eigene Darstellung).

In einem zweiten Schritt wird der Quotient aus der mittleren signifikanten Wellenhöhe (1958-2007) und dem mittleren 95%-Quantil (1958-2007) der signifikanten Wellenhöhe berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung liegen zwischen 0 und 1. Je höher die Werte eines Gebietes sind, desto geringer sind die mittleren Extremwerte im Verhältnis zur mittleren signifikanten Wellenhöhe. Abbildung 32 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung. Es wird deutlich, dass im gesamten Untersuchungsgebiet etwa dieselbe Beziehung zwischen mittleren Wellenhöhen und Extremwerten besteht. Das mittlere 95%-Quantil der signifikanten Wellenhöhe ist im gesamten Untersuchungsgebiet in etwa doppelt so hoch (0,45) wie die mittlere signifikante Wellenhöhe. Ein Wellenenergiewandler, der auf eine bestimmte mittlere Wellenhöhe ausgelegt ist, sollte in allen Bereichen des Untersuchungsgebietes also auch Wellen überstehen, die doppelt so hoch sind. Es ist jedoch zu beachten, dass die Wellenenergie nicht proportional zur signifikanten Wellenhöhe zunimmt.

Es kann demnach zusammengefasst werden, dass nur geringe Unterschiede in den mittleren Extremwerten im Verhältnis zur mittleren signifikanten Wellenhöhe bestehen. Aus Sicht des theoretischen Potenzials ist die Wellenenergiegewinnung demnach in Bereichen mit hohen Wellenenergieflüssen sinnvoll. Diese befinden sich im Norden und im Zentrum des Untersuchungsgebietes.

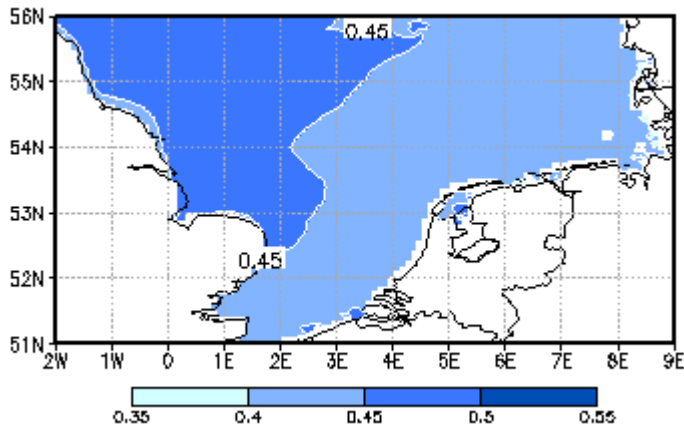


Abbildung 32 Quotient der mittleren signifikanten Wellenhöhe und des 95%-Quantils der signifikanten Wellenhöhe. Höhere Werte bedeuten geringere Extremwerte im Verhältnis zu den mittleren Wellenhöhen (Quelle: eigene Darstellung).

Die zeitlichen Variationen der Wellenenergieflüsse im Untersuchungsgebiet gehen vor allem auf sich ändernde Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen zurück. Die Windgeschwindigkeiten verändern sich einerseits innerjährlich im Zusammenhang mit der sich ändernden Sonneneinstrahlung. Andererseits korreliert die Windgeschwindigkeit zwischenjährlich mit dem Index der Nordatlantischen Oszillation. Dies gilt vorwiegend für die Wintermonate. Eine Nutzung der Wellenenergie ist demnach in Zeiträumen, die von positiven NAOI-Werten dominiert werden, ergiebiger als in Zeiträumen, in denen negative NAOI-Werte vorherrschen. Die Kenntnis über die innerjährlichen saisonalen Schwankungen ist sehr wichtig, da grosse Unterschiede im Energieangebot der verschiedenen Jahreszeiten bestehen. Im Mittel sind die Wellenenergieflüsse in den Wintermonaten (DJF) am grössten und die geringsten Werte sind im Sommer (JJA) zu erwarten. Die Werte des Frühlings (MAM) liegen zwischen denen des Sommers und des Herbstes (SON). Im langjährigen Mittel sind demnach im Winter die grössten und im Sommer die kleinsten Gewinne zu erwarten. Zudem ist das mittlere theoretische Potenzial im Herbst grösser als im Frühling. Es existieren jedoch auch Ausnahmen. Wie oben erwähnt, liegen in manchen Jahren die Energieflüsse der einzelnen Jahreszeiten sehr eng beieinander. Dies hat zur Folge, dass das theoretische Potenzial über das ganze Jahr hinweg annähernd gleich ist. Ausserdem treten Jahre auf, in denen die Energieflüsse einer Jahreszeit besonders hoch oder niedrig sind, sodass diese über oder unter den Werten einer anderen Jahreszeit liegen. Das im Mittel grössere

Wellenenergieangebot im Winter stimmt im Gegensatz zur Verfügbarkeit der Solarenergie mit dem deutschen Stromverbrauch überein. In Deutschland wird im Mittel im Winter 10% mehr Strom verbraucht als im Sommer (WWW.STROM-MAGAZIN.DE).

Abschliessend bleibt festzuhalten, dass zwar, wie in zahlreichen anderen Studien auch (MACKAY 2009, OSPAR 2000, GRABEMANN 2008), Fluktuationen im Wellenklima, aber keine eindeutigen Trends festgestellt werden konnten.

6 Langzeitige Variabilität

Ziel dieses Kapitels ist eine Darstellung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der für die Wellenenergiebetrachtung relevanten Variablen. Betrachtet wird der Zeitraum 1958-2007. Die Kenntnis über die langjährige Variabilität des Energieangebotes ist bei einer tatsächlichen Nutzung der Wellenenergie von grosser Bedeutung. Mit ihrer Hilfe können beispielsweise Fragen beantwortet werden, wie:

- Ist im Jahresmittel in den einzelnen Jahren in etwa das gleiche Energieangebot zu erwarten?
- In welchen Gebieten kann man im Jahresmittel mit einem gleichmässigen Energieangebot rechnen und welche Räume sind durch eine hohe Variabilität gekennzeichnet?
- Ist das Energieangebot in den einzelnen Jahreszeiten gleich variabel oder gibt es Jahreszeiten, in denen man mit einem stark schwankenden Energieangebot rechnen muss?
- Weist die Variabilität zwischen 1958-2007 einen Trend auf?
- Unterscheiden sich die untersuchten Variablen in ihrer Variabilität?

Anhand der Antworten auf diese Fragen und mit Hilfe weiterer Analysen können aus Sicht des theoretischen Potenzials beispielsweise Standortwahlen getroffen, Wellenenergiewandler angepasst oder Aussagen über die Variabilität des möglichen Energiegewinns gemacht werden.

Die Analyse der langzeitigen Variabilität des Wellenklimas im Untersuchungsgebiet wird mit Hilfe der EOF-Analyse durchgeführt. Diese wird im folgenden Text kurz vorgestellt.

6.1 Die EOF-Analyse

Die **Empirical Orthogonal Function Analysis (EOF)** ist eine der wichtigsten multivariaten statistischen Analysetechniken, die in den Naturwissenschaften ihre Anwendung finden. Je nach Fachgebiet werden jedoch unterschiedliche Begriffe verwendet, wobei neben dem oben Genannten häufig die Bezeichnung **Principal Component Analysis (PCA)** anzutreffen ist (WILKS 2006:463). Beschrieben wurde diese Technik zunächst von Pearson im Jahre 1902, gefolgt von Hotelling im Jahre 1935 (EMERY 1998:320). In der Meteorologie wurde die Analysetechnik durch ein Paper von Lorenz im Jahre 1956 populär, welcher diese Technik als erster als EOF-Analyse bezeichnete (LORENZ 1956:1ff). Anzumerken ist, dass die beiden Begriffe nicht mit der **Factor Analysis** gleichgesetzt werden dürfen. Hierbei handelt es sich zwar ebenfalls um eine multivariate statistische Analysetechnik, die Ähnlichkeiten zu den oben genannten Techniken aufweist, aber nicht identisch ist (WILKS 2006:463). Um Verwirrungen zu vermeiden, wird im folgenden Text nur der Begriff EOF-Analyse verwendet.

Hauptziel der EOF-Analyse ist die Identifikation räumlicher und zeitlicher Variabilität in einem Datensatz mittels orthogonaler Funktionen (EMERY 1998:319). Mit ihrer Hilfe kann ein Datensatz, der eine grosse Anzahl an Variablen enthält, durch einen neuen Datensatz, der idealerweise viel weniger Variablen beinhaltet, ersetzt werden. Hierdurch wird der Datensatz ohne grossen Informationsverlust stark komprimiert (HANNACHI 2004:3). Die neuen Variablen sind Linearkombinationen der Originalvariablen, unkorreliert, d.h. orthogonal zueinander (siehe Abbildung 33), und werden als **EOF-Koeffizienten**, bzw. **Principal Components (PC)** bezeichnet. Die EOF-Koeffizienten werden so gewählt, dass sie einen möglichst grossen Anteil der Varianz in den Ursprungsdaten erklären (WILKS 2006:463). Der erste EOF-Koeffizient ist dabei diejenige Linearkombination, die den grössten Anteil der Gesamtvarianz beinhaltet. Der zweite EOF-Koeffizient besitzt den grösst möglichen Anteil der Restvarianz, der dritte EOF-Koeffizient ebenfalls, etc. Das bedeutet, dass die einzelnen EOF-Koeffizienten abnehmende Anteile der Gesamtvarianz erklären. Zusammen gesehen beinhalten die einzelnen erklärten Varianzen aber einen immer grösseren Anteil an der Gesamtvarianz des ursprünglichen Datensatzes (HENRION 1987:133). Der erste EOF-Koeffizient erklärt beispielsweise 91,20% der

Gesamtvarianz und der zweite EOF-Koeffizient 8,20%. Zusammen erklären diese ersten beiden EOF-Koeffizienten mit 99,40% einen relativ grossen Teil der Gesamtvarianz. Wie dieses Beispiel deutlich macht, reichen in den meisten Fällen die ersten paar EOF-Koeffizienten aus, um einen Grossteil der Gesamtvarianz im Originaldatensatz zu erklären (VON STORCH 2001:293ff).

Zu beachten ist, dass EOFs stationäre Strukturen darstellen und sich nicht zeitlich verändern. Aus diesem Grund werden neben den EOFs die EOF-Koeffizienten, bzw. Principal Components dargestellt. Diese zeigen die allgemeine Amplitude der EOFs als eine Funktion der Zeit (HANNACHI 2004:10). Multipliziert man beispielsweise den ersten EOF-Koeffizienten eines bestimmten Jahres mit jedem einzelnen Gitterpunkt der ersten EOF, so erhält man eine Darstellung der Struktur in diesem Jahr. Erklärt der erste EOF-Koeffizient beispielsweise 91,20% der Varianz, so wird das Muster im ausgewählten Jahr mit einer Genauigkeit von 91,20% dargestellt. „In other words EOFs do not change structure in time, they only change sign and overall amplitude to represent the state of the atmosphere“ (HANNACHI 2004:10).

Eine detaillierte mathematisch-statistische Darstellung der EOF-Analyse ist unter anderem in LORENZ (1965), VON STORCH (2001), WILKS (2006) und EMERY (1998) zu finden.

Bei der Interpretation der EOFs muss beachtet werden, dass diese Analysemethode immer räumlich und zeitlich orthogonale Variabilitäten liefert (DOMMENGET 2000:13). Diese Tatsache schränkt die physikalische Interpretierbarkeit der erhaltenen Muster ein, da Orthogonalität nur selten auf physikalische Prozesse zutrifft (HANNACHI 2004:7). Ein weitere Schwierigkeit bei der Interpretation von EOFs nach EMERY (1998:336) ist, dass einerseits häufig ein einzelner physikalischer Prozess in mehr als einem EOF wiederzufinden ist. Andererseits können aber auch mehrere physikalische Prozesse zur Varianz innerhalb einer einzigen EOF beitragen.

Wie oben bereits erwähnt, handelt es sich bei den EOFs um stationäre Strukturen. Dies macht es sinnvoll, bei einer Interpretation der Ergebnisse neben den EOFs auch immer die Zeitreihe der zugehörigen EOF-Koeffizienten zu betrachten. Dadurch können zeitliche Zusammenhänge zwischen der Variabilität und physikalischen Prozessen erkannt werden, welche nicht leicht im räumlichen EOF-Muster zu erkennen sind (EMERY 1998:336). VON STORCH (2001) fasst die Schwierigkeiten bei

der Interpretation von EOFs folgendermassen zusammen: „In fact, the patterns that most efficiently represent variance do not necessarily have anything to do with the underlying dynamical structure“.

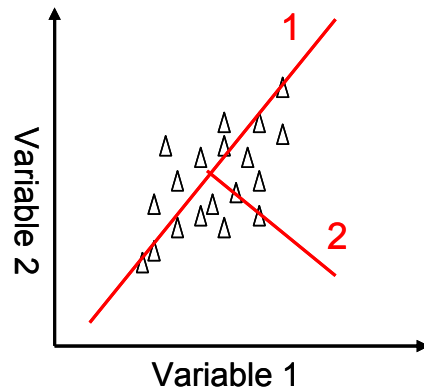


Abbildung 33 Beispiel für EOF-Koeffizienten (rote Achsen) (Quelle: Eigene Darstellung).

Die EOF-Analyse wird mit Hilfe der Anomalien der verschiedenen Variablen durchgeführt. Wie in Kapitel 5.2.2 erläutert, bedeutet das in diesem Fall, dass von den jährlichen Mittelwerten der 50-jährige Mittelwert subtrahiert wird. Bei der gemeinsamen EOF-Analyse, die im zweiten Teil dieses Kapitels dargestellt wird, werden normalisierte Daten verwendet.

Es existieren verschiedene Methoden Daten zu normalisieren. In diesem Fall wurde die Z-Score-Normalisierung angewendet. Formel 4 zeigt, wie hierbei vorgegangen wird. Zunächst werden die Anomalien für die einzelnen Jahre berechnet und anschliessend werden diese durch die Standardabweichung dividiert. Die Normalisierung wird durchgeführt, um Variablen mit verschiedenen Einheiten (z.B. Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) und Wellenhöhe (m)) vergleichen zu können und um ungewollte Gewichtungen zu vermeiden (KIETZ 2009:14).

$$x' = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}$$

x = Variable

\bar{x} = Mittelwert

σ = Standardabweichung

Formel 4 Formel zur Normalisierung von Daten (Quelle: verändert nach KIETZ 2009:15).

6.2 Ergebnisse

Da die EOF-Analysen der verschiedenen Variablen ähnliche Muster ergeben, werden im folgenden Text die EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe und die EOF-Analyse der mittleren Wellenenergieflüsse exemplarisch vorgestellt. Die Ergebnisse der EOF-Analyse der Peak-Periode und der T_{m2} -Periode sind im Anhang zu finden (siehe Anhang I und Anhang II).

6.2.1 EOF-Analyse der langjährigen mittleren signifikanten Wellenhöhe

Abbildung 34 zeigt das Ergebnis der EOF-Analyse der signifikanten Wellenhöhe im Untersuchungsgebiet. Die linken Abbildungen zeigen die räumliche und die rechten Abbildungen die zeitliche Variabilität der signifikanten Wellenhöhe. Neben der Angabe über die Nummer der Principal Component (PC), bzw. des EOF-Koeffizienten, ist die Höhe der erklärten Varianz (EV) abzulesen. In diesem Fall erklärt der erste EOF-Koeffizient 90,09, der zweite 6,99 und der dritte 1,86% der Gesamtvarianz. Zusammen erklären die EOF-Koeffizienten mit 98,94% einen sehr grossen Teil der im Datensatz enthaltenen Variabilität.

Wie oben bereits erwähnt, ist zu beachten, dass die EOF-Analyse mit Hilfe der Anomalien der verschiedenen Variablen durchgeführt wurde. Dies bedeutet, dass die dargestellten Werte als Abweichungen vom 50-jährigen Mittel (1958-2007) zu interpretieren sind. Betrachtet wird zunächst das räumliche Muster der ersten EOF. Dieses hat grosse Ähnlichkeit zum Muster der 10-jährigen und 50-jährigen Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe (vgl. Abbildung 16). Bereiche mit hohen Wellenhöhen sind durch hohe Schwankungen der Abweichung vom langjährigen Mittelwert und Bereiche mit kleinen Wellenhöhen durch geringe Schwankungen der

Abweichung vom langjährigen Mittelwert gekennzeichnet. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der ersten Principal Component zwischen 1958-2007, so ist zu erkennen, dass die Werte zwischen den einzelnen Jahren stark schwanken. Das vierjährige gleitende Mittel (blaue Linie) lässt erkennen, dass zwischen 1958-1980 im Wesentlichen negative und nach 1980 positive Abweichungen vom langjährigen Mittel vorherrschen. Da die Amplitude des ersten EOF-Musters im gesamten Untersuchungsgebiet positive Werte aufweist, ist die Wellenhöhe in den einzelnen Jahren entweder im gesamten Untersuchungsgebiet höher oder im gesamten Gebiet geringer als im langjährigen Mittel.

Wie können die zeitlichen Veränderungen in der Variabilität der ersten EOF erklärt werden? Da das Muster grosse Ähnlichkeiten zu demjenigen des 50-jährigen Mittelwerts der signifikanten Wellenhöhe besitzt, liegt die Vermutung nahe, dass ein Grossteil der Variabilität anhand des Nordatlantischen Oszillationsindex erklärt

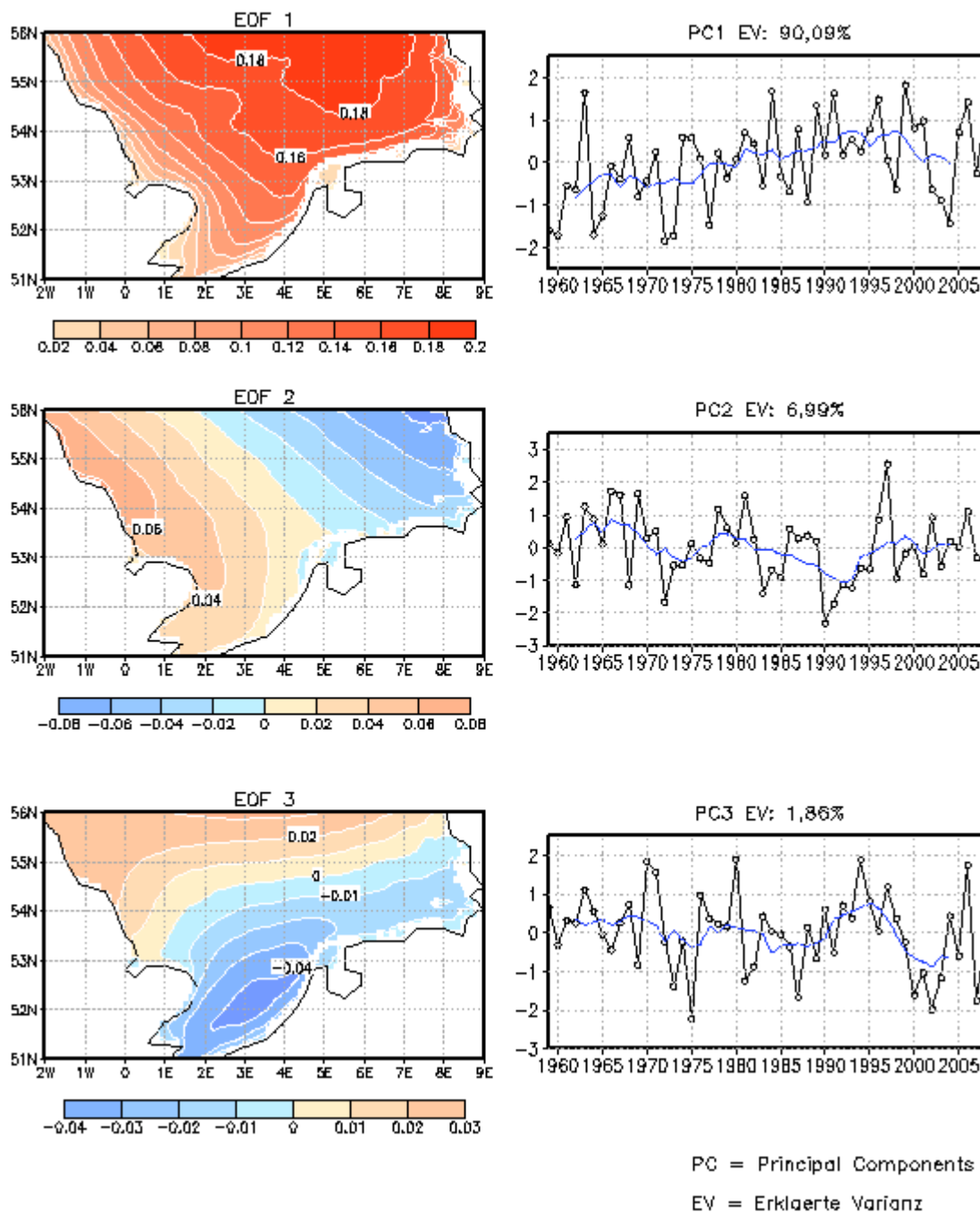


Abbildung 34 EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m). Linke Abbildungen: EOFs. Rechte Abbildungen: Principal Components. Blaue Linie: Vierjähriges, gleitendes Mittel (Quelle: eigene Darstellung).

werden kann. Um diese Vermutung zu überprüfen, wird der NAO-Index der Monate Dezember, Januar, Februar zusammen mit dem Verlauf der ersten PC dargestellt (vgl. Abbildung 35). Es ist deutlich zu erkennen, dass die erste PC in Jahren mit einem negativen NAO-Index meist ebenfalls negative Werte aufweist. Jahre mit hohen NAOI-Werten sind durch ebenfalls hohe PC-Werte gekennzeichnet. Beide

Zeitreihen weisen in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraumes vorwiegend negative und in der zweiten Hälfte hauptsächlich positive Werte auf. Der annähernd parallele Verlauf der beiden Parameter lässt darauf schließen, dass die zeitliche Variabilität, die durch die erste PC dargestellt wird, hauptsächlich auf die Schwankungen des NAO-Indexes und damit auf sich ändernde mittlere Windgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Es ist jedoch anzumerken, dass eine Korrelation der beiden Zeitreihen nur einen Wert von $\sim 0,4$ ergibt.

Das räumliche Muster der Variabilität kann, wie in Kapitel 5.2.1 erklärt, auf die Unter- und Oberwassertopographie und auf die Lage der Nordsee in der Westwindzone zurückgeführt werden.

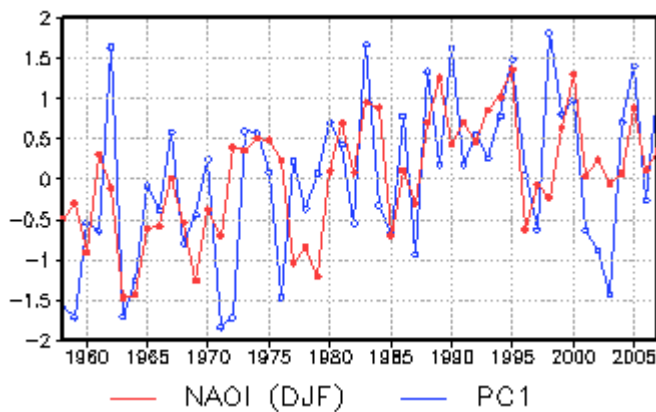


Abbildung 35 Verlauf des NAOI (DJF) und der ersten PC der signifikanten Wellenhöhe (Quelle: eigene Darstellung).

Die zweite EOF, die 6,99% der Gesamtvarianz erklärt, weist ein deutlich anderes Muster auf. Die von Südwesten nach Nordosten abnehmenden Werte sind als „Schaukel“ zu verstehen. Das bedeutet, dass bei hohen mittleren Wellenhöhen im Westen, niedrige mittlere Wellenhöhen im Osten und bei niedrigen mittleren Wellenhöhen im Westen, hohe mittlere Wellenhöhen im Osten zu verzeichnen sind. Die zweite PC und ihr vierjähriges gleitendes Mittel weisen keinen Trend auf und lassen sich nicht eindeutig mit einem physikalischen Prozess in Verbindung bringen.

Die dritte EOF erklärt 1,86% der Gesamtvarianz und weist ebenfalls eine Schaukel, welche in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet ist, auf. Die grössten Abweichungen vom langjährigen Mittelwert treten somit im nördlichen und im südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes auf. Da die dritte EOF nur 1,86% der

Gesamtvarianz erklärt, ist zu vermuten, dass diese mit keinem physikalischen Prozess in Verbindung gebracht werden kann. Daher wird auf diese nicht genauer eingegangen.

6.2.2 EOF-Analyse der mittleren saisonalen signifikanten Wellenhöhe

Neben der Kenntnis über die langjährige Variabilität der signifikanten Wellenhöhe ist die Kenntnis über die innerjährlichen Schwankungen von grosser Bedeutung. Aus diesem Grund wurde die EOF-Analyse ebenfalls für die verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt. Wie bei der langjährigen Variabilität der signifikanten Wellenhöhe erklären die ersten drei EOFs der jeweiligen Jahreszeit einen sehr grossen Teil der im Datensatz enthaltenen Varianz. Im Frühling (MAM) beträgt die erklärte Varianz der ersten drei EOFs 98,47%, im Sommer (JJA) 98,12%, im Herbst (SON) 98,66% und im Winter (DJF) 99,15%. Zu beachten ist, dass nur jeweils die erste EOF dargestellt ist (vgl. Abbildung 36). Da die einzelnen EOFs der verschiedenen Jahreszeiten grosse Ähnlichkeit zu den EOFs des langjährigen Mittels besitzen, wird auf diese nicht genauer eingegangen. Die Abbildungen sind im Anhang zu finden (siehe Anhang III und Anhang VI).

Wie in Abbildung 36 zu erkennen ist, nimmt die Variabilität in allen Jahreszeiten von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin ab. Ausserdem ist zu erkennen, dass die Variabilität am Ostrand des Untersuchungsgebietes grösser ist als am Westrand. Da die Muster der vier ersten EOFs grosse Ähnlichkeiten zum langjährigen EOF-Muster (Abbildung 34) haben und dieses wiederum stark dem Muster der langjährigen mittleren signifikanten Wellenhöhe (Abbildung 16) gleicht, ist anzunehmen, dass ein Grossteil der Variabilität anhand der Ober- und Unterwassertopographie und der Lage des Untersuchungsgebietes in der Westwindzone erklärt werden kann (vgl. Kapitel 5.2.1). Die höchsten Variabilitäten herrschen demnach in allen Jahreszeiten in Gebieten, die durch hohe mittlere signifikante Wellenhöhen gekennzeichnet sind.

Betrachtet man die einzelnen EOFs der verschiedenen Jahreszeiten genauer, ist zu erkennen, dass diese grosse Unterschiede in der Grösse der Amplituden der Muster aufweisen. Im Sommer treten maximale Abweichungen vom langjährigen Mittel von kleiner 0,25 m, im Frühling von kleiner 0,35 m, im Herbst von kleiner 0,4 m

und im Winter von kleiner 0,6 m auf. Im Winter ist die Variabilität demnach in weiten Bereichen im langjährigen Mittel beinahe dreimal so hoch wie im Sommer. Die hohen Variabilitäten im Winter und die geringen Variabilitäten im Sommer stimmen mit den Höhen der langjährigen mittleren signifikanten Wellenhöhen überein. In der Jahreszeit in der grosse/kleine mittlere Wellenhöhen vorherrschen, ist mit einer hohen/geringen Variabilität der signifikanten Wellenhöhe zu rechnen.

Vergleicht man die zeitliche Entwicklung der ersten PCs der einzelnen Jahreszeiten, so ist zu erkennen, dass in allen Jahreszeiten grosse zwischenjährliche Variabilitäten bestehen. Jahre mit sehr hoher/geringer Variabilität können von Jahren mit sehr geringer/hoher Variabilität gefolgt werden.

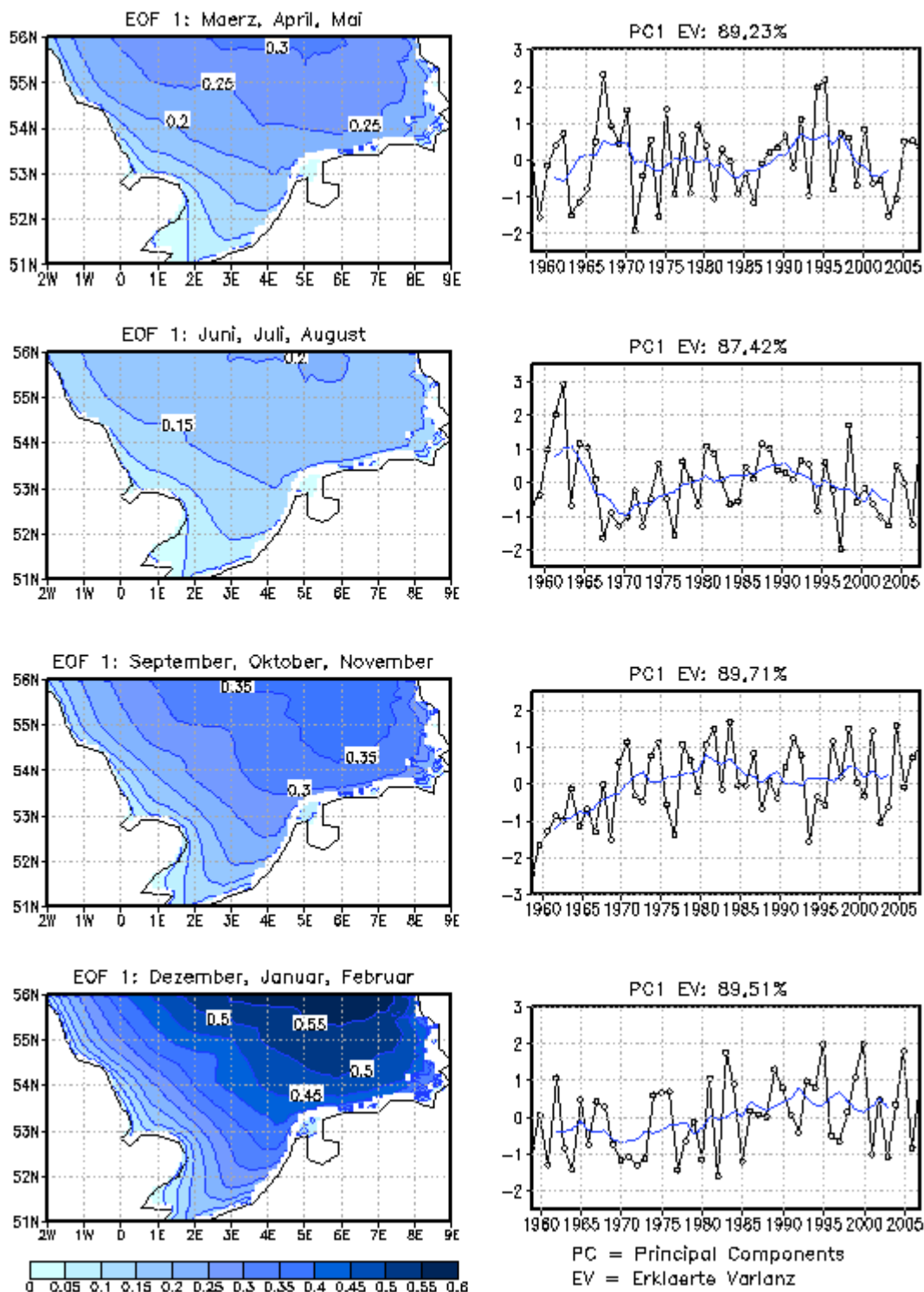


Abbildung 36 EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) für die einzelnen Jahreszeiten (1958-2007). Dargestellt sind jeweils die erste EOF und die erste PC. Blaue Linie: Vierjähriges gleitendes Mittel (Quelle: eigene Darstellung).

6.2.3 EOF-Analyse der langjährigen mittleren Wellenenergieflüsse

Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse der EOF-Analyse der mittleren Wellenenergieflüsse im Untersuchungsgebiet. Die Abbildungen auf der linken Seite

zeigen das räumliche Muster anhand der EOFs und die rechten Abbildungen stellen den zeitlichen Verlauf mittels der PCs dar. Der erste EOF-Koeffizient erklärt mit 89,56% einen sehr grossen Anteil der Varianz. Der zweite EOF-Koeffizient erklärt 7,73 und der dritte 1,58% der Gesamtvarianz. Die ersten drei EOFs erklären mit 98,87% somit einen erheblichen Anteil der im Datensatz enthaltenen Varianz.

Betrachtet man das Muster der ersten EOF fällt auf, dass dieses grosse Ähnlichkeit zum Muster der ersten EOF der mittleren signifikanten Wellenhöhe besitzt. Die Amplitude des Musters der EOF der Energieflüsse nimmt von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin ab. Die höchsten Werte von etwas über 6 kWm^{-1} sind bei etwa 56° N und zwischen 3 und 5° E zu finden. An der Ostküste Grossbritanniens ist die Variabilität mit kleiner 1 kWm^{-1} deutlich geringer als an der Westküste Dänemarks und Deutschlands ($< 3 \text{ kWm}^{-1}$). Das räumliche Muster der ersten EOF gleicht stark dem Muster der langjährigen mittleren Wellenenergieflüsse (vgl. Abbildung 22) und ist daher ebenfalls auf die Lage des Untersuchungsgebietes in der Westwindzone und auf die Unter- und Oberwassertopographie des Untersuchungsgebietes zurückzuführen.

Anhand der zugehörigen PC ist zu erkennen, dass der zeitliche Verlauf dem der mittleren signifikanten Wellenhöhe gleicht. Das vierjährige gleitende Mittel geht um 1980 vom negativen in den positiven Wertebereich über. Am Ende des untersuchten Zeitraums ist eine erneute Abnahme zu verzeichnen. Dieser Verlauf hat grosse Ähnlichkeit zum Verlauf der ersten PC der signifikanten Wellenhöhe (vgl. Kapitel 6.2.1) und somit auch zum Verlauf des NAOI (nicht dargestellt).

Der zweite EOF-Koeffizient erklärt mit 7,73% nur einen geringen Teil der Gesamtvarianz. Das Muster der zweiten Empirischen Orthogonalen Funktion zeigt, wie die zweite EOF der signifikanten Wellenhöhe auch, eine Schaukel zwischen dem Nordostrand und dem Südwestrand des Untersuchungsgebietes. Ist der östliche Bereich von hohen/geringen mittleren Energieflüssen gekennzeichnet, so sind im Westen geringe/hohe mittlere Energieflüsse zu erwarten.

Der dritte EOF-Koeffizient erklärt nur einen sehr geringen Teil der Gesamtvarianz (1,58%) und wird daher nicht weiter untersucht.

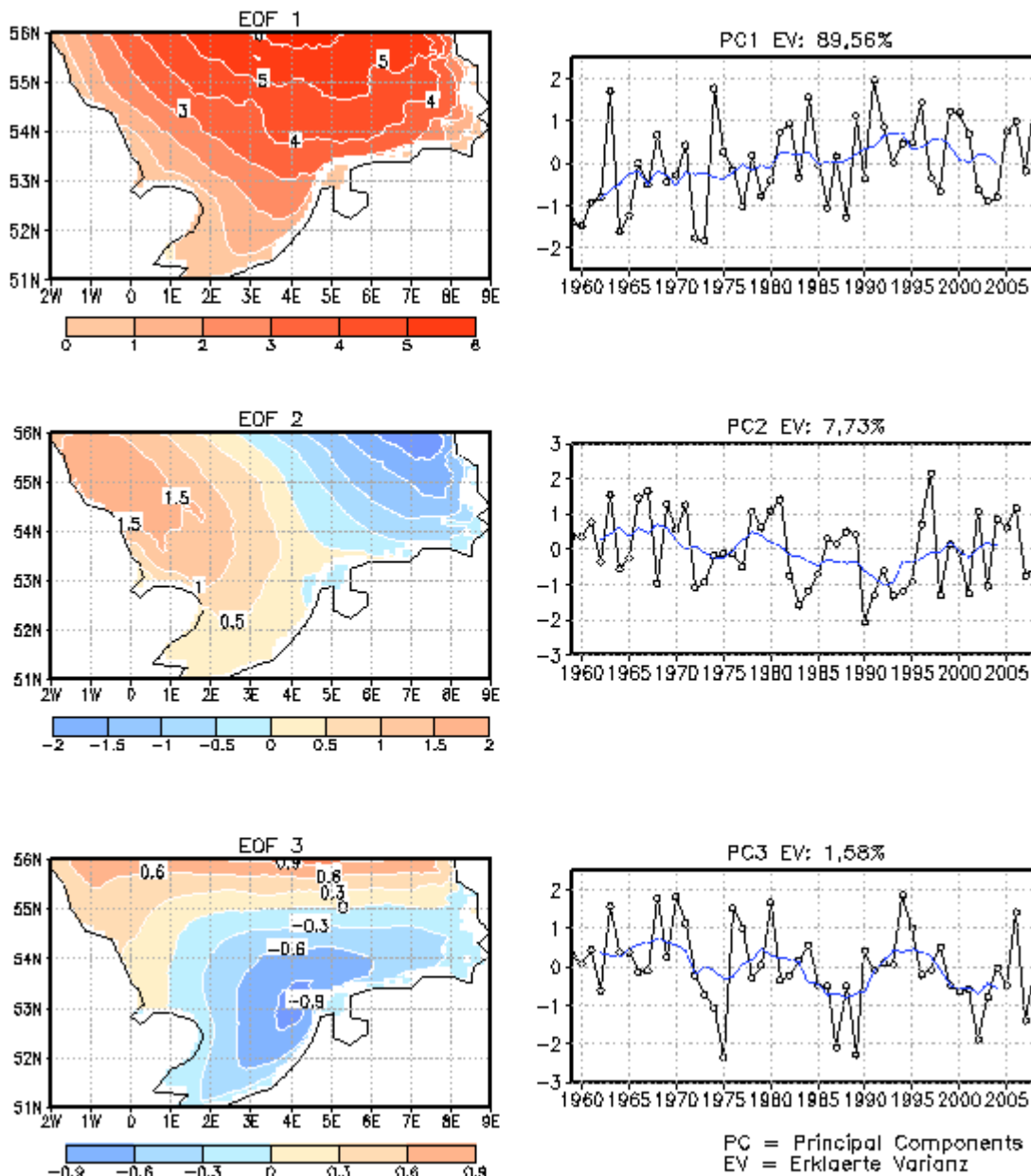


Abbildung 37 EOF-Analyse der mittleren Wellenenergieflüsse (kWm⁻¹) zwischen 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

6.2.4 EOF-Analyse der mittleren saisonalen Wellenenergieflüsse

Abbildung 38 zeigt die jeweils erste Empirische Orthogonale Funktion und die zugehörigen PCs der Wellenenergieflüsse für die einzelnen Jahreszeiten. Die ersten PCs erklären zu jeder Jahreszeit einen grossen Anteil der im Datensatz enthaltenen Varianz: Im Frühling 88,55%, im Sommer 88,77%, im Herbst 89,69% und im Winter 89,66%. Das Muster der EOFs ist in allen Jahreszeiten durch eine annähernd halbkreisförmige Abnahme der Variabilität von Norden nach Süden hin gekennzeichnet. Die geringste Amplitude des Musters herrscht im gesamten

Untersuchungsgebiet in den Sommermonaten. Hier beträgt der Gradient zwischen höchster und geringster Variabilität weniger als 6 kWm^{-1} . Im Winter treten maximale Abweichungen vom langjährigen Mittel von kleiner 24 kWm^{-1} auf. Im Frühling und im Winter liegt die Schwankungen mit Maximalwerten von kleiner 12 kWm^{-1} , bzw. kleiner 15 kWm^{-1} zwischen denjenigen im Sommer und denjenigen im Winter. Auffällig ist, dass die Variabilität an den Küsten zu jeder Jahreszeit annähernd gleich ist. An der Ostküste Grossbritanniens treten im langjährigen Mittel maximale Abweichungen von 3 kWm^{-1} und an der Westküste Dänemarks und Deutschlands von 6 kWm^{-1} auf.

Wie in Kapitel 5.2.3 erläutert, kommen die unterschiedlichen Wellenenergieflüsse in den einzelnen Jahreszeiten aufgrund der sich jahreszeitlich ändernden Einstrahlungsbedingungen zustande. Veränderte Strahlungsbedingungen haben variierende Temperatur- und Druckgradienten und somit sich ändernde mittlere Windgeschwindigkeiten zur Folge. Diese tragen ihrerseits wesentlich zur Ausbildung von kleineren/grösseren Wellen bei, welche wiederum geringere/grössere Wellenenergieflüsse zur Folge haben. Die ersten EOFs der verschiedenen Jahreszeiten spiegeln also ebenfalls den Einfluss der sich jahreszeitlich ändernden Einstrahlungsbedingungen wider. Die Jahreszeit mit den höchsten/niedrigsten Wellenhöhen ist charakterisiert durch eine hohe/geringe Variabilität der Wellenenergieflüsse.

Der zeitliche Verlauf der Variabilität ist in allen Jahreszeiten durch hohe zwischenjährliche Schwankungen gekennzeichnet. Da alle EOFs der Abbildung 38 nur positive Werte beinhalten, lässt sich feststellen, dass in den einzelnen Jahren entweder im gesamten Untersuchungsgebiet im Vergleich zum langjährigen Mittel höhere Werte oder im gesamten Untersuchungsgebiet niedrigere Werte herrschen.

Die vierjährigen gleitenden Mittel der ersten PCs der einzelnen Jahreszeiten zeigen jeweils keinen Trend, sondern nur langjährige Variabilitäten. Lediglich der Verlauf der PC der Wintermonate zeigt einen ähnlichen Verlauf wie der NAOI (nicht dargestellt). Während vor 1980 negative Abweichungen vom langjährigen Mittel vorherrschen, ist der Zeitraum danach von positiven Werten gekennzeichnet. Am Ende des Untersuchungszeitraumes ist, wie beim NAOI auch, eine erneute Abnahme der Werte zu erkennen.

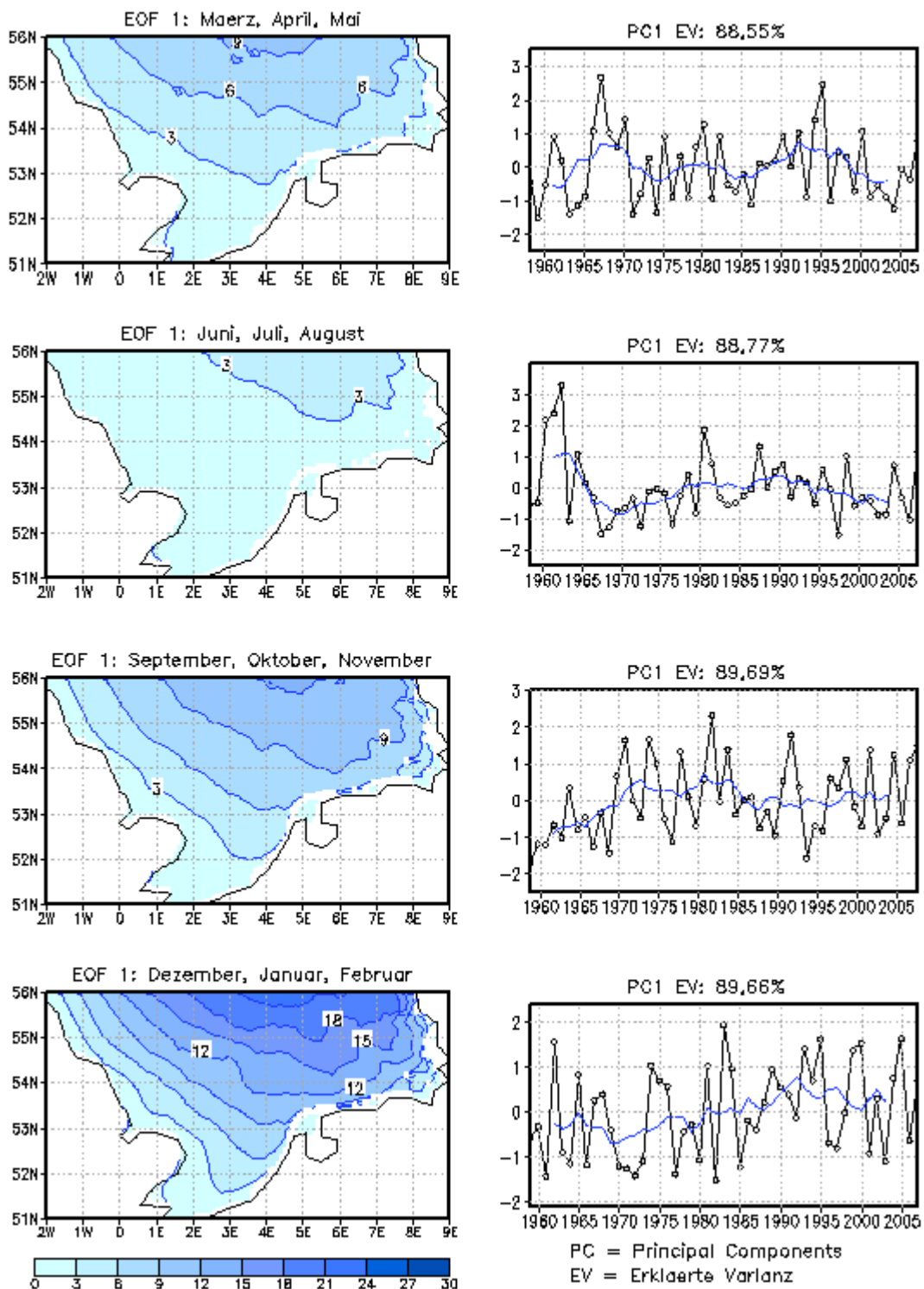


Abbildung 38 EOF-Analyse der mittleren saisonalen Wellenenergieflüsse (kWm^{-1}) (1958-2007). Dargestellt sind jeweils die erste EOF und die erste PC. Blaue Linie: Vierjähriges gleitendes Mittel (Quelle: eigene Darstellung).

6.2.5 Gemeinsame EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe und der mittleren Windgeschwindigkeit

Bei Abbildung 39 handelt es sich um die Ergebnisse der gemeinsamen EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe und der mittleren Windgeschwindigkeiten. Mit Hilfe der gemeinsamen EOF-Analyse können Gemeinsamkeiten in der Variabilität zweier Variablen identifiziert werden. Dargestellt sind die ersten beiden EOFs der signifikanten Wellenhöhe und der Windgeschwindigkeit (linke Abbildungen). Auf der rechten Seite sind die dazugehörigen gemeinsamen PCs und ihre vierjährigen gleitenden Mittel (blaue Linie) abgebildet. Der erste EOF-Koeffizient erklärt 84,46 und der zweite 5,93% der Gesamtvarianz. Da diese beiden EOF-Koeffizienten zusammen einen recht grossen Anteil der im Datensatz enthaltenen Varianz erklären, werden die weiteren EOFs und PCs nicht interpretiert. Diese sind im Anhang zu finden (Anhang XI und Anhang XII).

Betrachtet wird zunächst die erste EOF der beiden Variablen. Beide Muster weisen nur positive Werte auf. Dies macht deutlich, dass positive Anomalien in der Windgeschwindigkeit im gesamten Untersuchungsgebiet mit positiven Anomalien in der signifikanten Wellenhöhe im gesamten Untersuchungsgebiet einhergehen. Das Muster der ersten EOF der signifikanten Wellenhöhe entspricht in etwa dem Muster von Abbildung 16. Die Abweichungen vom langjährigen Mittel nehmen von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin ab. Das Muster der EOF der mittleren Windgeschwindigkeit ist gekennzeichnet durch hohe Abweichungen vom langjährigen Mittelwert ($< 0,55 \text{ ms}^{-1}$) im Zentrum des Untersuchungsgebietes. Diese nehmen zu den Küsten hin beinahe kreisförmig ab. Die erste PC zeigt in etwa denselben Verlauf wie die ersten PCs der bereits interpretierten EOFs und ist somit dem Verlauf des NAOI recht ähnlich.

Die zweite EOF zeigt wiederum eine Schaukel zwischen dem nordöstlichen und südwestlichen Ende des Untersuchungsgebietes. Die geringsten Abweichungen vom langjährigen Mittel sind somit im Zentrum des Untersuchungsgebietes zu finden.

Abschliessend ist festzuhalten, dass die Muster der ersten beiden EOFs der signifikanten Wellenhöhe und der Windgeschwindigkeit grosse Ähnlichkeit zueinander haben. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Wellenhöhe neben dem Fetch und der Winddauer, vor allem von der Windgeschwindigkeit abhängig ist.

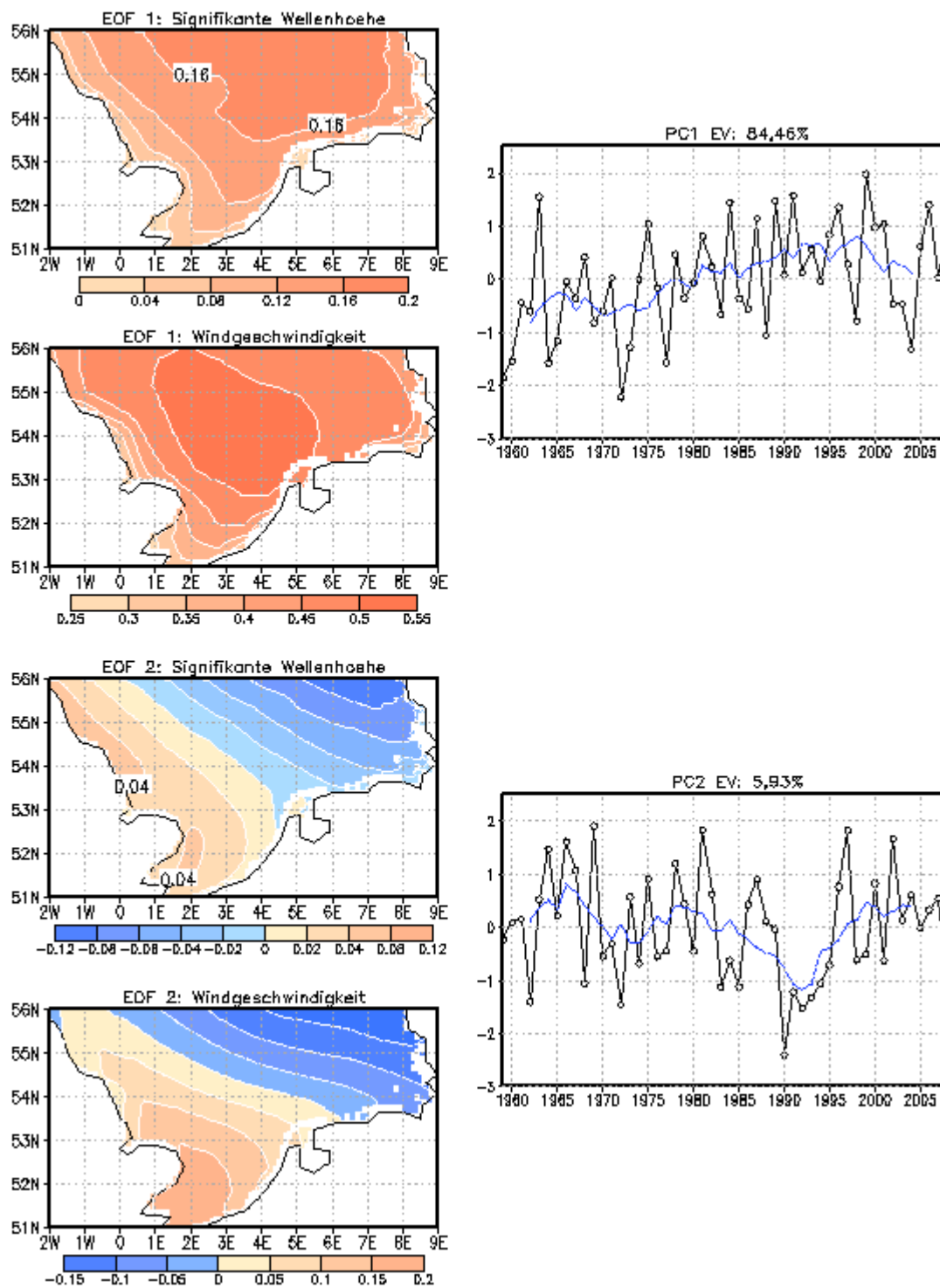


Abbildung 39 Gemeinsame EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) und der mittleren Windgeschwindigkeit (ms⁻¹) (1958-2007). Blaue Linie: Vierjähriges gleitendes Mittel. Bei den Werten der PCs handelt es sich um normalisierte Daten (Quelle: eigene Darstellung).

6.2.6 Gemeinsame EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe und der Perioden

Da die gemeinsame EOF-Analyse der signifikanten Wellenhöhe und der Peak-Periode, bzw. der T_{m2} -Periode ähnliche Ergebnisse liefert, wird im Folgenden nur das Ergebnis der gemeinsamen EOF-Analyse der signifikanten Wellenhöhe und der T_{m2} -Periode exemplarisch dargestellt. Abbildung 40 zeigt für beide Variablen die ersten beiden Empirischen Orthogonalen Funktionen und die dazugehörigen PCs. Die ersten zwei EOF-Koeffizienten erklären zusammen 91,81% der im Datensatz enthaltenen Varianz.

Die Muster der ersten EOF der signifikanten Wellenhöhe und der T_{m2} -Periode stimmen darin überein, dass hohe Werte der mittleren signifikanten Wellenhöhe mit hohen Werten der mittleren T_{m2} -Periode einhergehen. Die Amplitude des Musters der signifikanten Wellenhöhe im ersten EOF nimmt von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin ab. Das Muster der ersten EOF der T_{m2} -Periode zeigt eine von Nordosten nach Südwesten abnehmende Amplitude. Mit Ausnahme von wenigen Bereichen ist die Westküste Dänemarks und Deutschlands durch Abweichungen von kürzer 0,21 s vom langjährigen Mittel gekennzeichnet. Die Westküste Grossbritanniens hingegen weist niedrige Varianzen von kürzer 0,09 s auf. Da das gesamte Untersuchungsgebiet durch positive Werte gekennzeichnet ist, treten in den einzelnen Jahren entweder überall hohe mittlere signifikante Wellenhöhen, bzw. T_{m2} -Perioden oder im gesamten Gebiet niedrige mittlere signifikante Wellenhöhen, bzw. T_{m2} -Perioden auf. Das gleitende Mittel der ersten PC ist vor 1980 durch negative Werte gekennzeichnet und weist zwischen ~1980-1999 positive Werte auf. Ab 1999 fallen diese wieder auf etwa 0 zurück.

Die beiden zweiten EOFs der Wellenhöhe und der T_{m2} -Periode haben grosse Ähnlichkeit zueinander. Wie die bereits besprochenen zweiten EOFs weisen diese ebenfalls eine Schaukel zwischen dem nordöstlichen und südwestlichen Ende des Untersuchungsgebietes auf. Herrschen im östlichen Bereich niedrige/hohe Werte ist der westliche Bereich von hohen/niedrigen Werten gekennzeichnet.

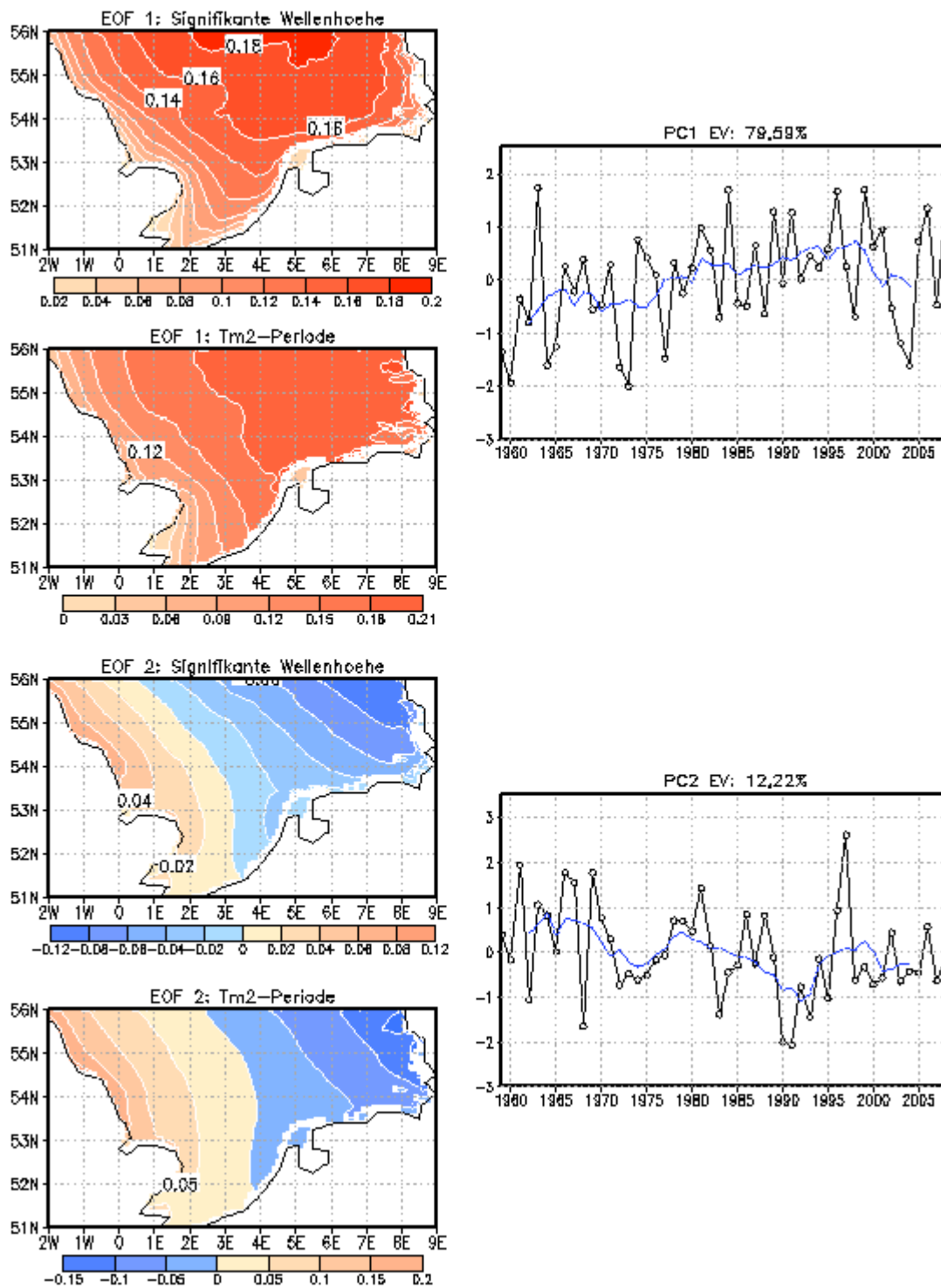


Abbildung 40 Gemeinsame EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) und der Tm2-Periode (s) (1958-2007). Blaue Linie: Vierjähriges gleitendes Mittel. Bei den Werten der PCs handelt es sich um normalisierte Daten (Quelle: eigene Darstellung).

6.3 Diskussion der Ergebnisse

Wie anhand der oben vorgestellten Ergebnisse der verschiedenen EOF-Analysen gezeigt werden konnte, kann ein Grossteil der in den Datensätzen enthaltenen Varianzen mit Hilfe der ersten 1 bis 3 EOFs erklärt werden. Das Muster der ersten EOF weist sowohl bei der signifikanten Wellenhöhe, als auch bei den Wellenenergieflüssen grosse Ähnlichkeit mit den langjährigen mittleren Werten auf (vgl. Kapitel 5). Bereiche mit hohen Wellenhöhen, bzw. grossen Energieflüssen sind von hohen Variabilitäten gekennzeichnet. An den Küsten, wo im Mittel kleine Wellenhöhen und geringe Energieflüsse vorherrschen, sind nur geringe Schwankungen zu verzeichnen. Die erste PC zeigt jeweils einen zeitlichen Verlauf, der grosse Ähnlichkeit mit demjenigen des NAO-Indexes besitzt. Aufgrund der räumlichen Struktur der ersten EOF und des zeitlichen Verlaufs der ersten PC kann darauf geschlossen werden, dass der Hauptteil der Variabilität durch die Lage des Untersuchungsgebietes in der Westwindzone zustande kommt. Daneben haben auch noch die Unter- und Oberwassertopographie des Untersuchungsgebietes einen Einfluss auf die räumliche Struktur der Variabilität.

Ein Vergleich der Muster der ersten EOFs der einzelnen Jahreszeiten zeigt, dass diese grosse Ähnlichkeiten mit denen der langjährigen saisonalen Muster besitzen. Daher kann darauf geschlossen werden, dass die variierenden Sonnenstände einen grossen Teil der innerjährlichen Variabilität erklären. Hierbei gilt ebenfalls, dass Jahreszeiten mit hohen signifikanten Wellenhöhen, bzw. grossen Energieflüssen auch von grösseren Abweichungen vom langjährigen Mittel gekennzeichnet sind.

Hohe Variabilitäten im Energiefluss sind also im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes, im offenen Meer und in den Wintermonaten zu erwarten.

7 Szenarien

„Laut IPCC werden die Reaktionen des Globalklimas auf die rasch ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen auch die physikalischen, biologischen und biogeochemischen Charakteristika der Ozeane auf verschiedenen Zeit- und Raumskalen beeinflussen“ (STERR 2007:88). Neben Veränderungen in den Meeresströmungen und einem Anstieg des Meeresspiegels, werden unter anderem Änderungen in der Häufigkeit und Intensität von Stürmen erwartet. Veränderte Windbedingungen nehmen nicht nur Einfluss auf das Windenergieangebot, sondern haben ihrerseits einen grossen Einfluss auf das Wellenklima. „Resource changes will affect capture: where the resource is restricted there may be reductions in energy production and consequent economic impacts (...); where the wave resource increases it may enhance production but the associated increase in extreme waves (...) may pose a greater threat to device survival“ (HARRISON 2005:1803).

Da beispielsweise die Eigenschaften des Wellenklimas in das Design von Wellenenergiewandlern mit eingehen, ist es wichtig zu wissen, welchen Einfluss der globale Klimawandel auf das Wellenklima besitzt (PRYOR 2010:430).

7.1 Ergebnisse

Wie in Kapitel 4.1.2 erwähnt, werden in der vorliegenden Arbeit der WRE-A- und der WRE-B-Datensatz ausgewertet. Ersterer basiert auf dem A2- und zweiterer auf dem B2-Szenario des IPCC. Ausserdem wird der WRE-C Kontrolldatensatz für den Zeitraum 1961-1990 analysiert.

In einem ersten Schritt wird zunächst die Qualität der Szenariendaten überprüft. Dies geschieht indem der Kontrolldatensatz mit dem Hindcast-Datensatz, der in Kapitel 5 bereits ausgewertet wurde, verglichen wird. Für letzteren wird ebenfalls der Zeitraum 1961-1990 gewählt. In einem zweiten Schritt wird die mögliche zukünftige Entwicklung der für eine energetische Betrachtung der Meereswellen relevanten Variablen für das Zeitfenster 2071-2100 dargestellt. Betrachtet werden jeweils die mittleren signifikanten Wellenhöhen, die mittleren T_{m2} -Perioden und die mittleren Wellenenergieflüsse in der Nordsee südlich von 56° N. Das Klimawandelsignal wird bestimmt, indem die Differenz zwischen dem Kontrollscenario WRE-C und dem

Szenario WRE-A, bzw. WRE-B berechnet wird (siehe Formel 5). Diese Auswertung wird für die drei oben genannten Variablen und die beiden Klimaszenarien WRE-A und –B durchgeführt.

$$\Delta_{SC} = X_S - X_C$$

Δ_{SC} = Klimawandelsignal

X_S = Wert vom Szenario WRE - A, bzw. WRE - B

X_C = Wert vom Kontrollscenario WRE - C

Formel 5 Berechnung des Klimawandelsignals (Quelle: verändert nach GRABEMANN 2008:202).

Anzumerken ist, dass Szenarien nur mögliche zukünftige Entwicklungen darstellen, da sie auf verschiedenen Annahmen über zukünftige sozioökonomische Veränderungen und damit auf unterschiedlichen Emissionen basieren. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit die Daten aus zwei verschiedenen Szenarien ausgewertet. Da in dieser Arbeit ein klar definiertes Gebiet untersucht wird, werden die auf lokalen Lösungen basierenden Szenarientypen A2 und B2 ausgewählt.

7.1.1 Vergleich von Szenario- und Hindcastdaten

Abbildung 41 zeigt die mittleren Werte des Hindcast-Datensatzes (rechts) und des Kontrollscenario (links) der signifikanten Wellenhöhe (oben), der Tm2-Periode (Mitte) und der Wellenenergieflüsse (unten). Sowohl bei den Ergebnissen des Hindcastmodells, als auch bei denen des Kontrollscenario handelt es sich um mittlere Werte des Zeitraums 1961-1990. Betrachtet werden zunächst die Auswertungen zur signifikanten Wellenhöhe.

Ein Vergleich der Szenariendaten mit den Hindcastdaten zeigt, dass das Szenario die signifikante Wellenhöhe unterschätzt. Während beim Hindcast die mittleren Wellenhöhen etwa zwischen 0,4 m an den Küsten und 2 m im offenen Meer liegen, weisen die Szenariendaten der signifikanten Wellenhöhe geringere Werte auf. An den Küsten liegen die mittleren Wellenhöhen bei etwa 0,4 m und im offenen Meer bei knapp über 1,6 m. Ein Vergleich der räumlichen Muster zeigt jedoch, dass das

Szenario die Wellenhöhen räumlich sinnvoll simuliert. Die Wellenhöhen nehmen vom offenen Meer zu den Küsten und von Norden nach Süden ab.

Bei der T_{m2} -Periode zeigt sich ein ähnliches Bild. Die mittleren T_{m2} -Perioden sind im Untersuchungsgebiet laut der Hindcastdaten zwischen 3 und 5 s lang. Beim Kontrollscenario sind die mittleren Perioden kürzer (3-4,5 s). Das räumliche Muster wird jedoch wieder sinnvoll vom Kontrollscenario dargestellt.

Betrachtet man die Auswertungen zu den mittleren Wellenenergieflüssen ist zu erkennen, dass das Szenario diese ebenfalls unterschätzt. Während die Energieflüsse des Hindcastmodells im 30-jährigen Mittel zwischen 0 und 21 kWm^{-1} liegen, reicht die Spanne bei den Szenariodaten von 0 bis 15 kWm^{-1} . Das Kontrollscenario unterschätzt im Vergleich zum Hindcastmodell die Wellenenergieflüsse um bis zu 30% (nicht dargestellt). Das räumliche Muster wird, wie bei beiden oben vorgestellten Variablen auch, sinnvoll vom Szenario simuliert. Die Wellenenergieflüsse nehmen von Norden nach Süden und vom offenen Meer zu den Küsten hin ab.

Es kann somit zusammengefasst werden, dass das Kontrollscenario sowohl die mittlere signifikante Wellenhöhe, als auch die T_{m2} -Periode und die Energieflüsse unterschätzt. Das räumliche Muster der einzelnen Variablen wird hingegen sinnvoll dargestellt.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Variablen im folgenden Text ist zu beachten, dass diese nur dem Vorzeichen nach verglichen werden sollten. Dies liegt darin begründet, dass der Wellenenergiefluss nicht linear von der signifikanten Wellenhöhe und der T_{m2} -Periode abhängt. Da der Wellenenergiefluss in etwa proportional zum Quadrat der signifikanten Wellenhöhe ist, bewirken kleine Fehler in der Wellenhöhe grosse Fehler im Energiefluss.

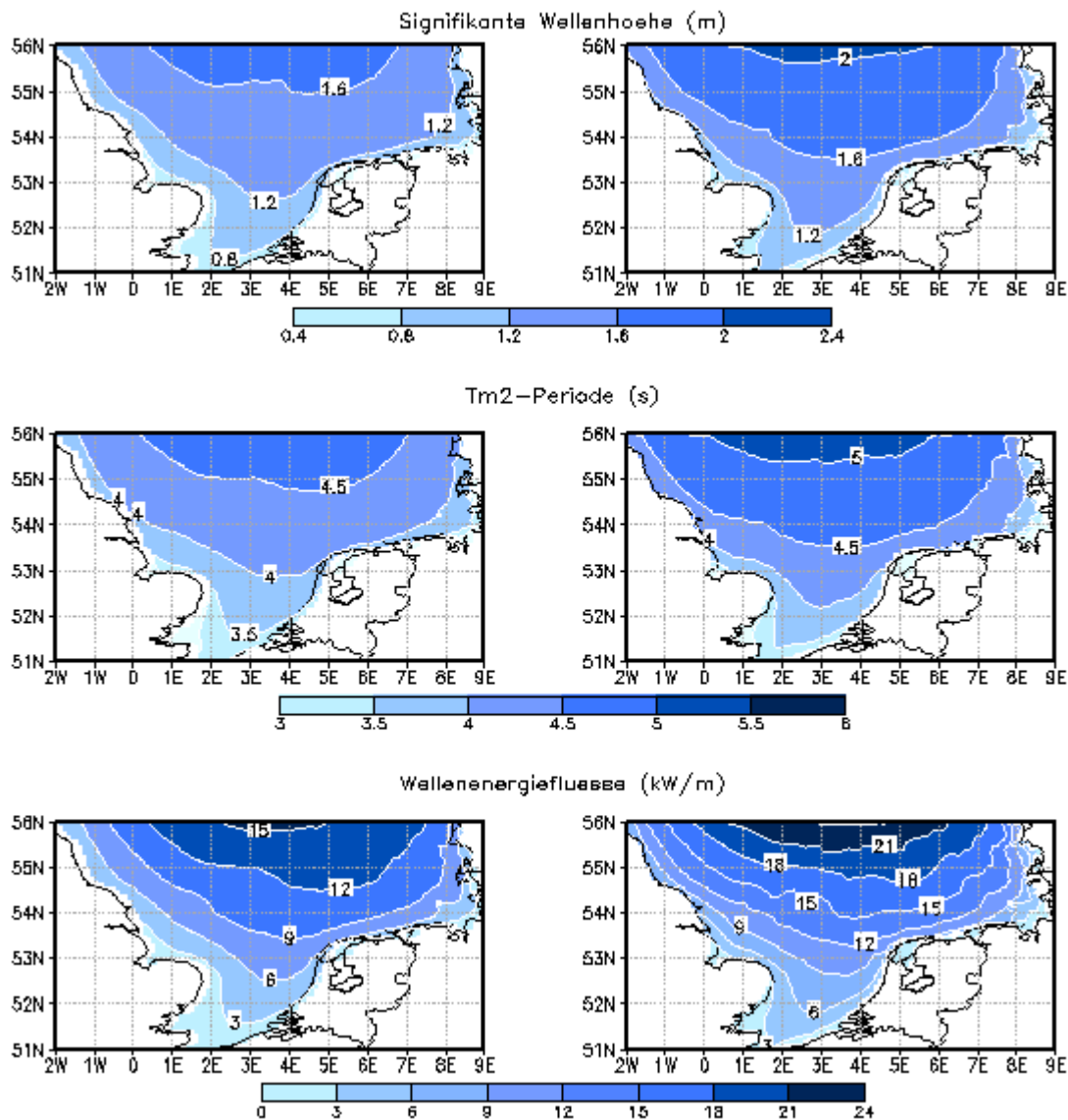


Abbildung 41 links: Kontrollszenarien (1961-1990); rechts: Hindcastdaten (1961-1990) (Quelle: eigene Darstellung).

7.1.2 Änderungen in der mittleren signifikanten Wellenhöhe

Abbildung 42 zeigt das Klimawandelsignal (siehe Formel 5) der signifikanten Wellenhöhe in m für das WRE-A- und WRE-B-Szenario. Auffällig ist, dass in grossen Teilen des Untersuchungsgebietes eine Zunahme der signifikanten Wellenhöhe zu verzeichnen ist. Beide Simulationen zeigen eine maximale Zunahme der Wellenhöhe am nordöstlichen Rand des Untersuchungsgebietes im Vergleich zum Kontrollzeitraum 1961-1990. Die Maximalwerte liegen beim WRE-A-Szenario bei knapp über 0,16 m und beim WRE-B-Szenario bei etwas über 0,12 m. Am Westende des Untersuchungsgebietes hingegen sind bei beiden Szenarien negative Werte anzutreffen. Im Vergleich zum Kontrollzeitraum 1961-1990 zeigt das WRE-A-

Szenario eine maximale Abnahme der signifikanten Wellenhöhe von ca. -0,08 m. Beim WRE-B-Szenario sind die Abnahmen mit Maximalwerten von -0,04 m etwas geringer. Im Mittel sind westlich des Zentrums des Untersuchungsgebietes in beiden Szenarien die geringsten Veränderungen zu verzeichnen.

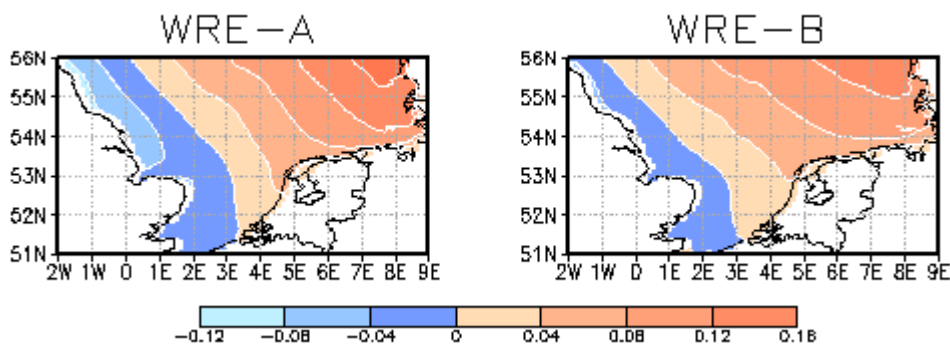


Abbildung 42 Klimawandelsignal der mittleren signifikanten Wellenhöhe in m für das WRE-A-Szenario (links) und das WRE-B-Szenario (rechts). Das Klimawandelsignal wurde nach Formel 5 berechnet (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 43 zeigt die prozentuale Veränderung der signifikanten Wellenhöhe laut dem WRE-A- im Vergleich zum WRE-C-Kontrollscenario. Für diese Darstellung wurde das WRE-A-Szenario ausgewählt, da dieses die grösseren Veränderungen prognostiziert. Im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes ist demnach eine Zunahme der mittleren signifikanten Wellenhöhe von bis zu 15% zu erwarten. Am Westende hingegen zeigt das Szenario im Mittel eine Abnahme der signifikanten Wellenhöhen von bis zu 10%.

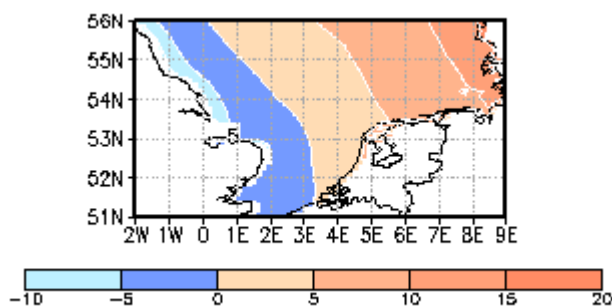


Abbildung 43 Prozentuale Veränderung der signifikanten Wellenhöhe laut WRE-A-Szenario im Vergleich zum Kontrollscenario WRE-C (Quelle: eigene Darstellung).

7.1.3 Änderungen in der mittleren Periode

Betrachtet man die Klimawandelsignale der T_{m2} -Periode in Abbildung 44 fällt auf, dass das Muster grosse Ähnlichkeit zu demjenigen der signifikanten Wellenhöhe besitzt. Beide Szenarien zeigen eine maximale Zunahme der T_{m2} -Periode im nordöstlichen Ende des Untersuchungsgebietes (max. 0,18 s) und die grösste Abnahme am Westrand (max. -0,12 s). Das WRE-A-Szenario zeigt wiederum eine etwas stärkere Zu-, bzw. Abnahme der mittleren T_{m2} -Periode gegenüber dem WRE-B-Szenario. Die maximale Zunahme beträgt prozentual gesehen ~8% und die Abnahme ~6% im Vergleich zu den Werten des Kontroll szenarios (nicht dargestellt).

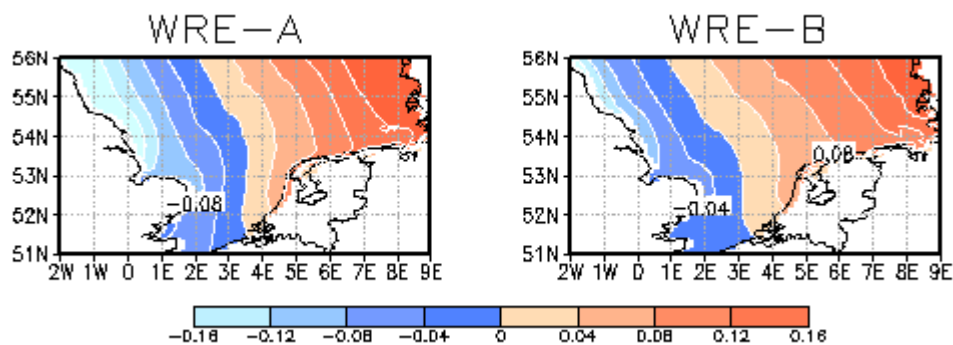


Abbildung 44 Klimawandelsignal der mittleren T_{m2} -Periode in s für das WRE-A-Szenario (links) und das WRE-B-Szenario (rechts). Das Klimawandelsignal wurde nach Formel 5 berechnet (Quelle: eigene Darstellung).

7.1.4 Änderungen im mittleren Wellenenergiefluss

Abbildung 45 zeigt die projizierten Klimawandelsignale des WRE-A- und WRE-B-Szenarios für die mittleren Wellenenergieflüsse. Diese Abbildung zeigt noch deutlicher als die vorhergehenden eine Zunahme der Werte am Nordostrand des Untersuchungsgebietes. Beim WRE-A-Szenario liegen die maximalen Zunahmen der Energieflüsse bei $4,5 \text{ kWm}^{-1}$ und beim WRE-B-Szenario bei $3,5 \text{ kWm}^{-1}$. Ersterer Wert entspricht einer prozentualen Zunahme der Wellenenergieflüsse von ~40% im Vergleich zum Kontroll szenario.

Der Westrand des Untersuchungsgebietes ist wiederum von abnehmenden Werten gekennzeichnet. Das WRE-A-Szenario geht von einer maximalen Abnahme der Wellenenergieflüsse von unter $1,0 \text{ kWm}^{-1}$ und das WRE-B-Szenario von unter $0,5 \text{ kWm}^{-1}$ aus. Prozentual ausgedrückt ist laut dem WRE-A-Szenario eine maximale Abnahme der mittleren Wellenenergieflüsse von weniger als 20% im Vergleich zum Kontroll szenario zu erwarten (nicht dargestellt).

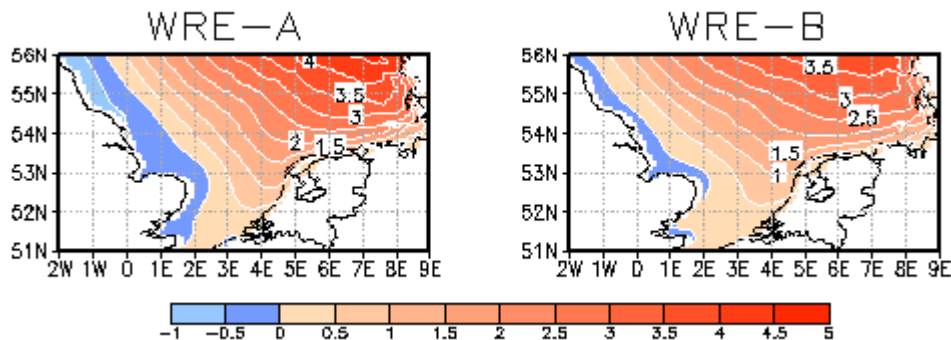


Abbildung 45 Klimawandelsignal der mittleren Wellenenergieflüsse in kWm^{-1} für das WRE-A-Szenario (links) und das WRE-B-Szenario (rechts). Das Klimawandelsignal wurde nach Formel 5 berechnet (Quelle: eigene Darstellung).

7.2 Diskussion der Ergebnisse

Der Klimawandel beeinflusst die Ozeane auf unterschiedlichste Weise. Indirekt führt dieser über sich ändernde Windbedingungen zu Veränderungen im Wellenklima. Da die Eigenschaften der Wellen, wie Wellenhöhe und Wellenperiode, in das Design von Wellenenergiewandlern mit eingehen, ist die Kenntnis über ein sich änderndes Wellenklima essentiell. Mit Hilfe verschiedener Szenarien können mögliche zukünftige Veränderungen im Wellenklima aufgezeigt werden. Wie oben dargestellt, ist es sinnvoll die Ergebnisse mehrerer Szenarien miteinander zu vergleichen, um die Qualität der Daten zu garantieren. Wie anhand eines Vergleichs von Kontroll- und WRE-Szenarien gezeigt wurde, simuliert das verwendete Szenario WRE die räumlichen Muster sinnvoll. Zwischen dem Kontrollscenario WRE-C und den Szenarien WRE-A und WRE-B bestehen keine erwähnenswerten Unterschiede im räumlichen Muster.

Vergleicht man die Werte der signifikanten Wellenhöhe, der T_{m2} -Periode und der Wellenenergieflüsse des Kontroll- und des WRE-A und WRE-B-Szenarios, sind hingegen in allen Fällen deutliche Unterschiede zu erkennen. Wie in Kapitel 4.2 dargelegt, werden Wellenmodelle mit Hilfe von Windfeldern angetrieben. Da die Wellenhöhen massgeblich von der Windgeschwindigkeit abhängen, können kleine Fehler in den Windfeldern zu grossen Fehlern in der Wellenhöhe führen. Die Wellenenergieflüsse ihrerseits sind in etwa proportional zum Quadrat der signifikanten Wellenhöhe. Dies hat wiederum zur Folge, dass kleine Fehler in den Wellenhöhen zu grossen Fehlern in den Energieflüssen führen. Die Problematik der

fehlerhaften Windfelder des antreibenden Modells ist bekannt und wird derzeit bearbeitet.

Des Weiteren unterscheiden sich die Ergebnisse des WRE-A- und WRE-B-Szenarios voneinander. Beide Szenarien basieren auf lokalen Lösungen, unterscheiden sich jedoch im Bevölkerungswachstum. Während die Bevölkerung im A2-Szenario stetig anwächst, wächst diese im B2-Szenario ebenfalls stetig, aber langsamer als im A2-Szenario. Des Weiteren liegt der Schwerpunkt beim B2-Szenario auf Umweltschutz und sozialer Gerechtigkeit. Das A2-Szenario hingegen ist ökonomisch orientiert.

Aufgrund der unterschiedlichen Annahmen der beiden Szenarien, ergeben sich verschiedene projizierte Entwicklungen des Klimas für die Zukunft. Laut IPCC (2007:13ff) liegt die „wahrscheinliche Bandbreite“ der Temperaturänderung (2090-2099 verglichen mit 1980-1999) beim A2-Szenario bei 2-5,4° C. Die „wahrscheinliche Bandbreite“ der Temperaturänderung beim B2-Szenario hingegen liegt bei 1,4-3,8° C. Vergleicht man die Werte des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs (2090-2099 verglichen mit 1980-1999) beider Szenarien mit einander, so ergeben sich ebenfalls Unterschiede. Während das A2-Szenario von einem Meeresspiegelanstieg zwischen 0,23-0,51 m ausgeht, liegt der erwartete Meeresspiegelanstieg beim B2-Szenario zwischen 0,2-0,43 m (IPCC 2007:13ff). Es kann also zusammengefasst werden, dass das B2-Szenario von geringeren Veränderungen in der Zukunft ausgeht als das A2-Szenario.

Die in der vorliegenden Arbeit erhaltenen Ergebnisse müssen kritisch betrachtet werden. Wie in Kapitel 4.1.2 vorgestellt, wurden zwar zwei verschiedene Szenarien betrachtet, diese wurden jedoch mit demselben globalen Modell generiert (ECHAM4/OPYC3). Wie GRABEMANN und WEISSE (2007) zeigen, sind die Unterschiede in der projizierten Entwicklung für die Zukunft **zwischen den verschiedenen Modellen grösser als zwischen den einzelnen Szenarien**. „For wind speed, the model-caused differences vary between about 0,2 and 0,8 ms⁻¹ which, for some areas, is larger than the overall mean climate change signal“ (GRABEMANN 2007:209). Für die signifikante Wellenhöhe geben sie Abweichungen aufgrund der verschiedenen Modelle zwischen 0,1 und 0,6 m an (GRABEMANN

2007:209). Es besteht demnach eine grössere Diskrepanz zwischen den Modellen als zwischen den Szenarien.

Ebenso wie in GRABEMANN und WEISSE (2007) konnten in dieser Arbeit Unterschiede zwischen den Ergebnissen des WRE-A- und WRE-B-Szenarios festgestellt werden. Sowohl die Werte der signifikanten Wellenhöhe, als auch diejenigen der T_{m2} -Periode und der mittleren Wellenenergieflüsse unterliegen beim WRE-A- grösseren Veränderungen als beim WRE-B-Szenario (vgl. Tabelle 2). Zu beachten ist, dass nicht im gesamten Untersuchungsgebiet zunehmende signifikante Wellenhöhen, T_{m2} -Perioden und Wellenenergieflüsse zu erwarten sind. Während der östliche Teil des Untersuchungsgebietes im Vergleich zum Kontrollscenario von hohen Zunahmen der Werte gekennzeichnet ist, weist der westliche Bereich negative Veränderungen auf. Westlich des Zentrums des Untersuchungsgebietes sind im Mittel die geringsten oder keine Veränderungen zu beobachten.

Tabelle 2 Projizierte mittlere Veränderungen der signifikanten Wellenhöhe (Hs), der T_{m2} -Periode und der Wellenenergieflüsse (P4) des WRE-A und WRE-B-Szenarios.

	WRE-A	WRE-B
Hs (m)	-0,08 --> 0,16	-0,04 --> 0,12
T_{m2} (s)	-0,16 --> 0,16	-0,12 --> 0,16
P4 (kWm⁻¹)	-1,0 --> 4,5	-0,5 --> 3,5

(Quelle: eigene Darstellung).

Abschliessend kann zusammengefasst werden, dass diese Ergebnisse eine Idee über die möglichen zukünftigen Veränderungen im Wellenklima geben. Diese können dazu genutzt werden, die Wellenenergie wandler an ein sich änderndes Klima anzupassen und die zukünftig zu erwartenden Wellenenergieflüsse abzuschätzen. Zu beachten ist jedoch, dass ein sich änderndes Klima indirekt weitere Auswirkungen auf das Wellenklima eines Gebietes haben kann. Neben Veränderungen des Meeresspiegels, kann es zu veränderten Meeresströmungen und zu einer sich ändernden Bathymetrie kommen (GRABEMANN 2008:211). Diese veränderten Bedingungen beeinflussen ihrerseits wiederum die Eigenschaften des Wellenklimas. Vor allem in küstennahen Bereichen dürfen diese Effekte nicht ausser Acht gelassen werden und müssen in zukünftige Untersuchungen miteinbezogen werden.

8 Synergien mit Offshore Wind

Die Windenergie stellt eine der wichtigsten erneuerbaren Energiequellen dar und wird bereits seit über 3000 Jahren vom Menschen genutzt. Während sie bis ins frühe 20. Jahrhundert hauptsächlich zur Gewinnung von mechanischer Energie eingesetzt wurde, liegt der Fokus heute auf der Bereitstellung von elektrischer Energie (ACKERMANN 2000:217). Die Nutzung der Windenergie besitzt viele Vorteile, wie die universelle Verfügbarkeit. Es besteht jedoch, wie bei vielen anderen erneuerbaren Energien auch, das Problem, dass Fluktuationen in der Energiebereitstellung existieren. Da die Windenergie proportional zur Windgeschwindigkeit in der dritten Potenz ist, bewirken kleinste Änderungen in der Windgeschwindigkeit, grosse Veränderungen im Windenergieangebot (LAKKOJU 1996:870). In Zeiten, in denen keine Windenergie verfügbar ist, muss die benötigte Energie mit Hilfe anderer Energiequellen bereitgestellt werden. Meist werden die Versorgungslücken mit Hilfe von nicht erneuerbaren Energiequellen gefüllt. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit mehrere erneuerbare Energiequellen miteinander zu kombinieren und so die Stromeinspeisung zu verstetigen (FUSCO 2010:315). Des Weiteren können andere positive Nebeneffekte, wie die gemeinsame Nutzung von Infrastruktur und damit verbunden eine Senkung der Kosten, ein kleinerer Flächenbedarf und somit ein geringerer Nutzungsdruck auf das Meer oder eine Vereinfachung der Genehmigungsverfahren, auftreten. Es ist erneut darauf hinzuweisen, dass sich diese Arbeit (mit Ausnahme des letzten Kapitels) nur mit dem theoretischen Potenzial der Wellenenergie beschäftigt. Bezogen auf dieses Kapitel bedeutet das, dass nur die theoretischen Synergieeffekte betrachtet und keine Aussagen bezüglich technischer, ökologischer und weitere Effekte gemacht werden können.

Ziel dieses Kapitels ist es also zu überprüfen, ob zwischen der Wind- und der Wellenenergie Synergieeffekte bezüglich der Verstetigung der Netzeinspeisung von Windenergie bestehen.

Die Windenergie wird nach LAKKOJU (1996:871) mit folgender Formel berechnet:

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \quad [Wm^{-2}]$$

$$P_{Wind} = \text{Windenergie} \quad [Wm^{-2}]$$

$$\rho = \text{Luftdichte} \quad [Kgm^{-3}]$$

$$A = \text{Flaeche des Rotors} \quad [m^{-2}]$$

$$V = \text{Windgeschwindigkeit} \quad [ms^{-1}]$$

Formel 6 **Berechnung der Windenergie (Quelle: LAKKOJU 1996:871).**

Die Analyse erfolgt mittels der Kreuzkorrelationsanalyse, die im folgenden Text kurz vorgestellt wird.

8.1 Kreuzkorrelationsanalyse

Für die Kreuzkorrelationsanalyse werden zwei Zeitreihen benötigt, welche die gleiche Anzahl an Beobachtungen, das gleiche Messintervall und die gleiche Beobachtungsperiode aufweisen. Mit Hilfe dieser Analyse kann die Zeitverschiebung gefunden werden, bei der die grösste Korrelation zwischen beiden Zeitreihen besteht (WWW.ECO.PSY.RUHR-UNI-BOCHUM.DE). Abbildung 46 verbildlicht, wie bei der Kreuzkorrelationsanalyse vorgegangen wird. Korreliert man beispielsweise die Zeitreihe der Variable A zum Zeitpunkt 0 (oberste Abbildung) mit der Zeitreihe der Variable B zum Zeitpunkt +1 (unterste Abbildung), so erhält man einen Kreuzkorrelationskoeffizienten von 0,29. Verschiebt man das Zeitfenster der Variable B um einen Zeitschritt zurück, also auf 0 (zweite Abbildung von unten), so steigt der Kreuzkorrelationskoeffizient auf 0,40. Die beste Korrelation von 0,98 erhält man, wenn man das Zeitfenster der Variable B um einen weiteren Zeitschritt nach hinten versetzt (zweite Abbildung von oben). Die Kreuzkorrelationskoeffizienten bilden eine Funktion, anhand welcher man den Zeitversatz, bei welchem die grösste Korrelation zwischen beiden Zeitreihen besteht, ablesen kann. In diesem Fall korrelieren die beiden Variablen am stärksten bei A(0) und bei B(-1).

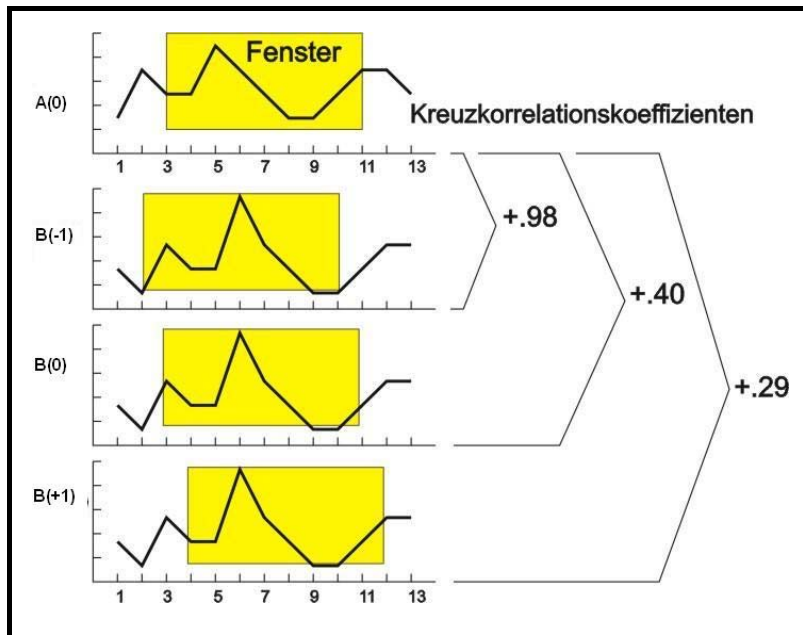


Abbildung 46 Prinzip der Kreuzkorrelation (Quelle: verändert NACH WWW.ECO.PSY.RUHR-UNI-BOCHUM.DE).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Kreuzkorrelation für eine Zeitspanne von 48 Stunden (-24 bis +24) durchgeführt. Die Analyse basiert auf Stundenwerten und umfasst den Zeitraum 1958-2007.

8.2 Die Standorte

Die Kreuzkorrelationsanalyse wurde für drei Standorte erstellt (siehe Abbildung 47). Hierzu zählen der bereits angesprochene Offshore-Windpark **Alpha Ventus** (~54° N, 6,6 °E), der Offshore-Windpark **H2-20** (~55,7° N, 4,1° E) und der Offshore-Windpark **Horns Rev** (~55,5° N, 7,8° E). Zu beachten ist, dass es sich bei den Koordinaten nur um ungefähre Werte handelt.

Die drei Windparks wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Lage in der Nordsee ausgewählt, wobei Alpha Ventus und H2-20 in deutscher und Horns Rev in dänischer Hand sind. Anzumerken ist, dass für die Ostküste Grossbritanniens kein Windpark ausgewählt werden konnte. Die dortigen Offshore-Windparks liegen relativ nah an der Küste und aufgrund der Auflösung der verwendeten Datensätze (vgl. Kapitel 4) ist die Datenqualität im Küstenbereich für diese Analyse nicht ausreichend.

Im folgenden Text werden die drei Offshore-Windparks vorgestellt und die Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalysen diskutiert. Wie im bisherigen Text auch, beziehen sich die Auswertungen auf das theoretische Energiepotenzial. Es werden also keine Aussagen über die tatsächlich erwirtschaftbare Energie der einzelnen Standorte gemacht.

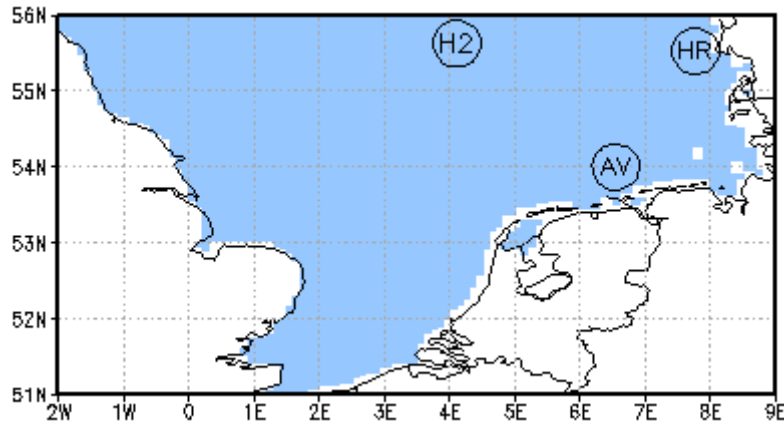


Abbildung 47 Ungefähre Lage der untersuchten Offshore-Windparks. H2 = H2-20 (55,7° N, 4,1° E), HR = Horns Rev (55,5° N, 7,8° E), AV = Alpha Ventus (54° N, 6,6° E). Bei den Koordinaten handelt es sich nur um ungefähre Werte (Quelle: eigene Darstellung).

8.2.1 Alpha Ventus

Der Offshore-Windpark Alpha Ventus, welcher aus 12 Windenergieanlagen besteht, liegt ~45 km nördlich der Insel Borkum und nimmt eine Fläche von ca. 3,85 km² ein. Die durchschnittliche Wassertiefe beträgt dort ~30 m. Alpha Ventus ist der erste deutsche Offshore-Windpark, der auf hoher See errichtet wurde. Die letzte der 12 Turbinen wurde Mitte November des Jahres 2009 installiert. In Zukunft soll Alpha Ventus Strom für 50.000 Haushalte liefern (www.alpha-ventus.de).

Der obere Teil der Abbildung 48 zeigt den Verlauf der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) und der mittleren Windgeschwindigkeit (ms⁻¹) zwischen 1958-2007 an der Station Alpha Ventus. Die Auswertung beruht auf Stundenmitteln der einzelnen Variablen. Die Korrelation zwischen beiden Zeitreihen beträgt, wie in Kapitel 5.2.1 bereits erwähnt, 0,88. Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl die Windgeschwindigkeit, als auch die signifikante Wellenhöhe grossen zwischenjährlichen Schwankungen unterworfen sind. Die mittleren Wellenhöhen schwanken in den einzelnen Jahren zwischen ~1,35-1,75 m und die Windgeschwindigkeiten zwischen ~7,3-8,8 ms⁻¹. Der mittlere Wellenenergiefluss und

die mittlere Windenergie unterliegen ebenfalls grossen zwischenjährlichen Schwankungen und weisen Werte zwischen ~ 8 - 19 kWm^{-1} , bzw. zwischen 190 - 350 Wm^{-2} auf. Alle vier Zeitreihen zeigen keinen eindeutigen Trend, sondern lediglich längerfristige Schwankungen. Während bis ~ 1990 eine geringe Zunahme der mittleren Werte zu verzeichnen ist, nehmen diese ab 1990 wiederum leicht ab. Vergleiche hierzu auch Kapitel 5.

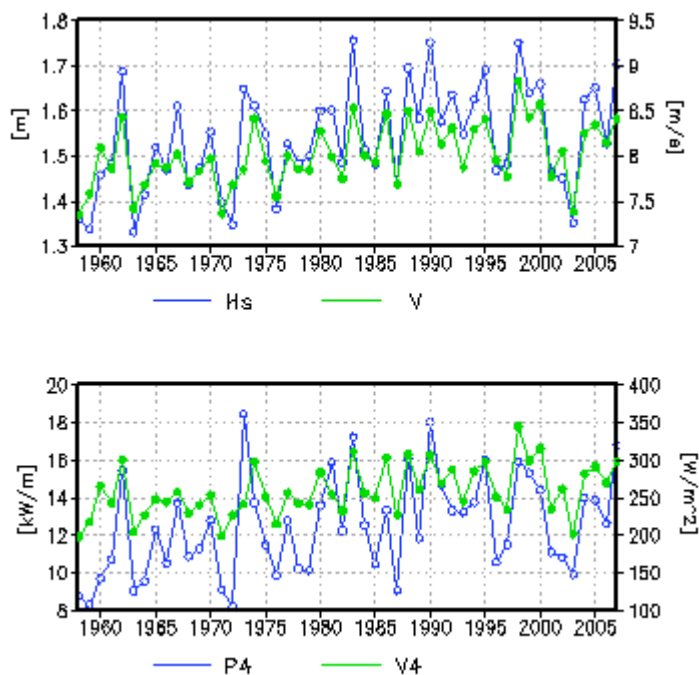


Abbildung 48 Oben: Verlauf der mittleren Wellenhöhe (m) (blau) und der mittleren Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) (grün) an der Station Alpha Ventus (54° N , $6,6^\circ \text{ E}$). Unten: Verlauf der mittleren Wellenenergieflüsse (kWm^{-1}) (blau) und der mittleren Windenergie (Wm^{-2}) (grün) an der Station Alpha Ventus (Quelle: eigene Darstellung).

8.2.2 H2-20

Der ca. 200 km vor der Küste Deutschlands liegende Offshore-Windpark H2-20, dessen Fertigstellung für das Jahr 2020 geplant ist, befindet sich noch im Genehmigungsverfahren. Auf einer Fläche von 130 km^2 sollen in einer Wassertiefe von 30 - 40 m 80 Windenergieanlagen gebaut werden. Das Besondere an diesem Projekt ist, dass der erzeugte Strom zur Produktion von Wasserstoff eingesetzt werden soll. Der Wasserstoff wird mit Hilfe der Elektrolyse, bei welcher Wasser in die Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird, hergestellt (www.GEO-MBH.COM).

Der obere Teil der Abbildung 49 zeigt den Verlauf der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) und der mittleren Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) zwischen 1958-2007 an der Station H2-20. Die Korrelation zwischen beiden Zeitreihen liegt, wie bei der Station Alpha Ventus auch, bei 0,88. Die zwischenjährlichen Schwankungen der mittleren signifikanten Wellenhöhe weisen eine Spanne von $\sim 1,8\text{-}2,3$ m auf. Die mittleren Windgeschwindigkeiten liegen zwischen $\sim 7,7\text{-}9,4$ ms^{-1} , die mittleren Wellenenergieflüsse zwischen $\sim 15\text{-}30$ kWm^{-1} und die mittlere Windenergie zwischen $\sim 240\text{-}420$ Wm^{-2} . Alle vier Zeitreihen der Station H2-20 weisen somit höhere Werte als die der Station Alpha Ventus auf.

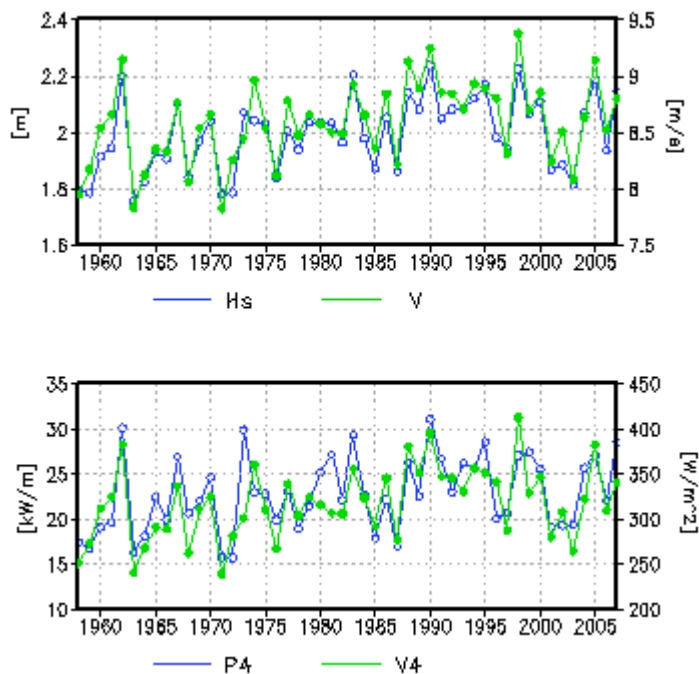


Abbildung 49 Oben: Verlauf der mittleren Wellenhöhe (m) (blau) und der mittleren Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) (grün) an der Station H2-20 ($55,7^\circ$ N, $4,1^\circ$ E). Unten: Verlauf der mittleren Wellenenergieflüsse (kWm^{-1}) (blau) und der mittleren Windenergie (Wm^{-2}) (grün) an der Station H2-20 (Quelle: eigene Darstellung).

8.2.3 Horns Rev

Der Offshore-Windpark Horns Rev befindet sich 14-20 km vor der Westküste Dänemarks und beinhaltet 80 Windenergieanlagen. Die Wassertiefe beträgt in diesem Gebiet etwa 6-14 m. Installiert wurde der grösste Offshore-Windpark der Welt, der eine Fläche von 20 km^2 einnimmt, im Sommer 2002 (www.hornsrev.dk).

Abbildung 50 zeigt, dass die Spanne der mittleren jährlichen signifikanten Wellenhöhe an der Station Horns Rev bei $\sim 1,2\text{-}1,7$ m und die der mittleren

Windgeschwindigkeit bei $\sim 7,5\text{-}8,9\text{ ms}^{-1}$ liegt. Die Spanne der mittleren jährlichen Wellenenergieflüsse beträgt $\sim 9\text{-}21\text{ kWm}^{-1}$ und die der mittleren Windenergie $\sim 200\text{-}350\text{ Wm}^{-2}$. Das Energieangebot an der Station Horns Rev ist von Jahr zu Jahr sehr variabel und entspricht in etwa dem der Station Alpha Ventus. Die Korrelation zwischen der Zeitreihe der signifikanten Wellenhöhe und der Windgeschwindigkeit beträgt an dieser Station 0,85.

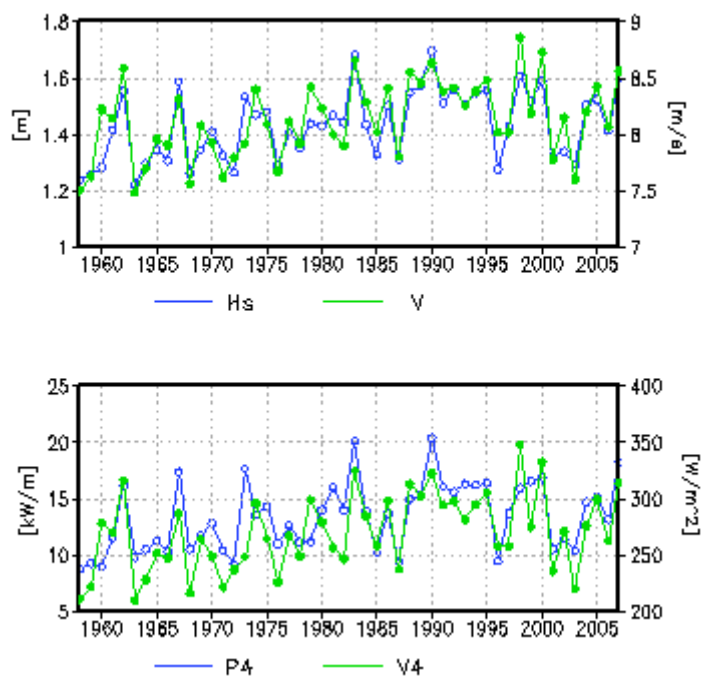


Abbildung 50 Oben: Verlauf der mittleren Wellenhöhe (m) (blau) und der mittleren Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) (grün) an der Station Horns Rev ($55,5^\circ\text{ N}$, $7,8^\circ\text{ E}$). Unten: Verlauf der mittleren Wellenenergieflüsse (kWm^{-1}) (blau) und der mittleren Windenergie (Wm^{-2}) (grün) an der Station Horns Rev (Quelle: eigene Darstellung).

8.3 Ergebnisse

Im folgenden Text werden die Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse vorgestellt. Analysiert wird zunächst die Korrelation zwischen der signifikanten Wellenhöhe und der Windgeschwindigkeit. In einem zweiten Schritt wird eine Kreuzkorrelationsanalyse der Wellen- und Windenergie durchgeführt. Abschliessend werden die Ergebnisse in Hinblick auf mögliche Synergieeffekte diskutiert.

8.3.1 Kreuzkorrelationsanalyse Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe

Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse der signifikanten Wellenhöhe und der Windgeschwindigkeit an den Stationen Alpha Ventus (oben), H2-20 (Mitte) und Horns Rev (unten). Alle drei Kreuzkorrelationsfunktionen weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Die Kreuzkorrelationskoeffizienten liegen zwischen 0,4 und 0,9, wobei die Korrelation zwischen beiden Variablen bei negativen Zeitverschiebungen geringer ist als bei positiven. Die grösste Korrelation besteht bei allen drei untersuchten Standorten bei einer Zeitverschiebung von +2 Stunden. Das bedeutet, dass das Maximum der Wellenenergie zwei Stunden nach dem Maximum der Windenergie auftritt. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Windwellen nach dem Einsetzen des Windes eine gewisse Zeit brauchen, um sich aufzubauen. Zu diesem Ergebnis gelangt auch Fusco (2010:319): „The slight delay, about 2-3 h (it can be determined as the maximum point of the temporal correlation) is due to the time required for the waves to develop which is relatively short for low energies“.

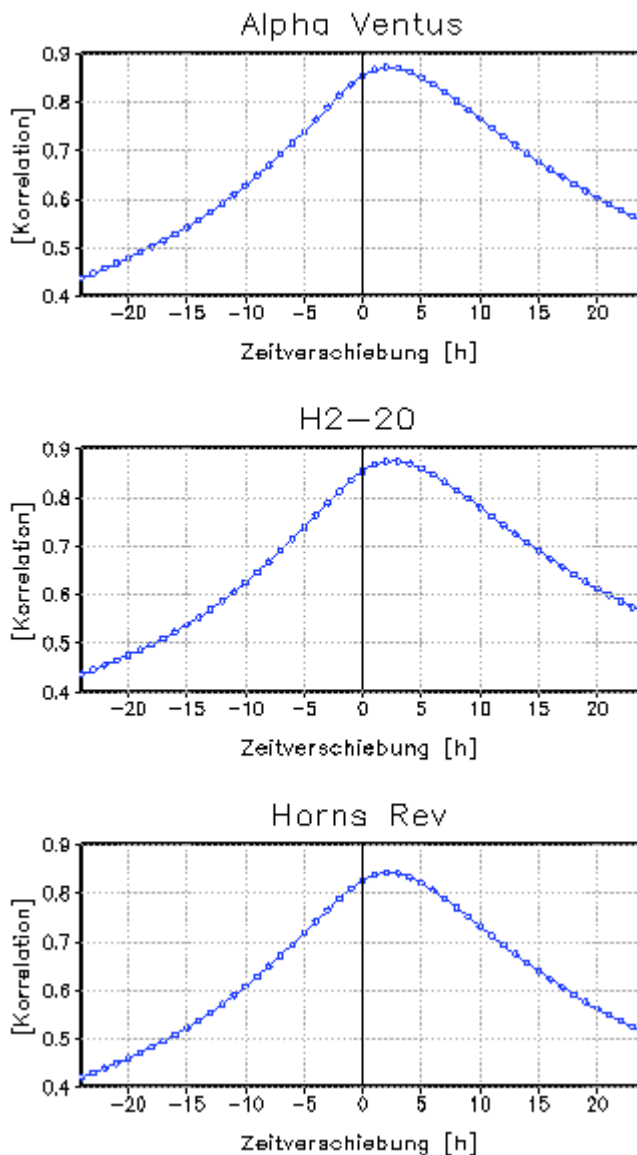


Abbildung 51 Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse der signifikanten Wellenhöhe (m) und der Windgeschwindigkeit (ms^{-1}) an der Station Alpha Ventus (oben) ($\sim 54^\circ \text{ N}$, $6,6^\circ \text{ E}$), H2-20 (Mitte) ($\sim 55,7^\circ \text{ N}$, $4,1^\circ \text{ E}$) und Horns Rev (unten) ($\sim 55,5^\circ \text{ N}$, $7,8^\circ \text{ E}$). Eine positive Zeitverschiebung bedeutet, dass die Wellenhöhe nach der Windgeschwindigkeit ihr Maximum erreicht (Quelle: eigene Darstellung).

8.3.2 Kreuzkorrelationsanalyse Windenergie und Wellenenergie

Betrachtet man die Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse der Wind- und Wellenenergie (siehe Abbildung 52), ist wie erwartet ein ähnliches Bild wie bei oben besprochener Analyse zu erkennen. Die Kreuzkorrelationsfunktionen der einzelnen untersuchten Standorte sind sich sehr ähnlich und weisen ihr Maximum bei einer Zeitverschiebung von +2 Stunden auf. Die Kreuzkorrelationskoeffizienten liegen zwischen 0,3-0,9.

Die erhaltenen Ergebnisse sind wenig erstaunlich, da die beiden Variablen eng miteinander korreliert sind (vgl. Kapitel 5.2.2). Um die Einspeisung einer erneuerbaren Energiequelle ins Stromnetz mit Hilfe einer anderen regenerativen Energiequelle ausreichend verstetigen zu können, sollte zwischen diesen beiden Quellen eine hohe Korrelation bei einer gewissen Zeitverschiebung bestehen. Anders ausgedrückt: wenn keine Windenergie zur Verfügung steht, sollte die andere erneuerbare Energiequelle (in diesem Fall die Wellenenergie) verfügbar sein. Die Wellen- und Windenergie sind jedoch stark voneinander abhängig und lassen sich bei den untersuchten Standorten aus Sicht des theoretischen Potenzials nur in geringem Masse zur Verstetigung der Stromeinspeisung einsetzen. Zu beachten ist, dass dies nur für die Kombination der Wellen- und Windenergie, die an ein und demselben Ort gewonnen werden, zutrifft.

Im folgenden Text wird deshalb untersucht, ob eine Kombination von Wellen- und Windenergie, die an verschiedenen Standorten gewonnen werden, einen höheren Beitrag zur Verstetigung der Stromeinspeisung liefern könnte.

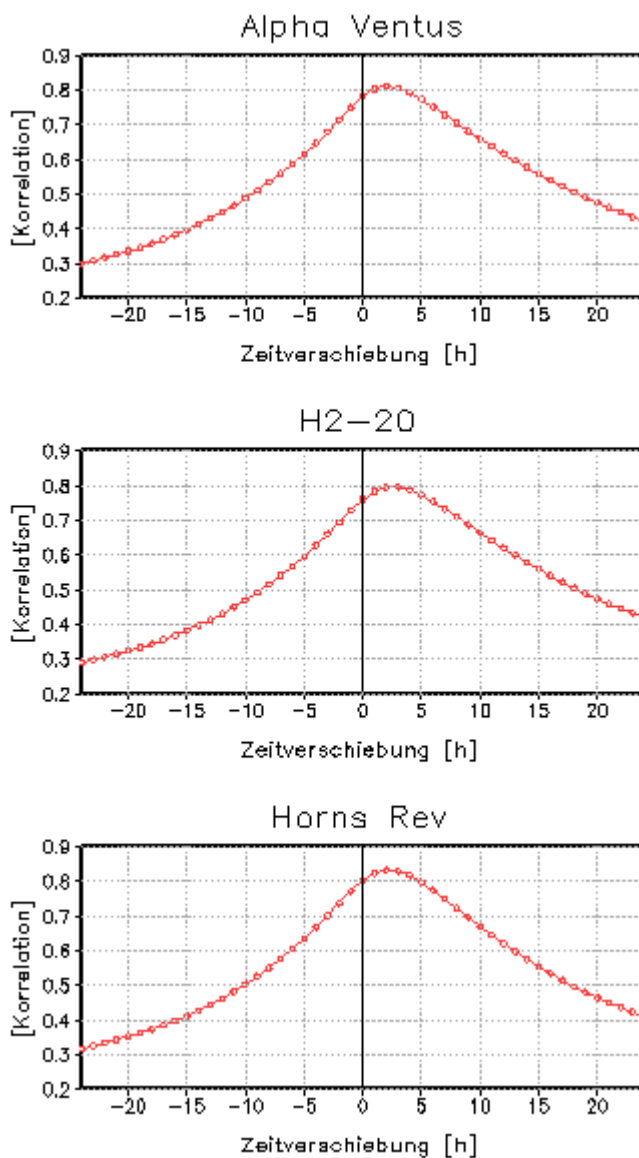


Abbildung 52 Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse der Wellen- und Windenergie an der Station Alpha Ventus (oben) ($\sim 54^\circ$ N, $6,6^\circ$ E), H2-20 (Mitte) ($\sim 55,7^\circ$ N, $4,1^\circ$ E) und Horns Rev (unten) ($\sim 55,5^\circ$ N, $7,8^\circ$ E). Eine positive Zeitverschiebung bedeutet, dass die Wellen- nach der Windenergie ihr Maximum erreicht (Quelle: eigene Darstellung).

8.3.3 Kreuzkorrelationsanalyse verschiedener Standorte

Zunächst wird der Zusammenhang zwischen dem Auftreten der maximalen Windenergie an der Station H2-20 und dem Auftreten der maximalen Wellenenergie an der Station Horns Rev und an der Station Alpha Ventus untersucht. Während der Offshore-Windpark H2-20 ~ 200 km von der Küste entfernt liegt, weisen die Windparks Horns Rev und Alpha Ventus mit 14-20 km, bzw. 45 km einen viel geringeren Abstand zur Küste auf. Abbildung 53 zeigt die Ergebnisse dieser Kreuzkorrelationsanalysen. Sowohl zwischen den Stationen H2-20 und Horns Rev,

als auch zwischen den Stationen H2-20 und Alpha Ventus, ist eine Zeitverschiebung von 6 Stunden zu erkennen. Das bedeutet, dass die Wellenenergie an den Stationen Horns Rev und Alpha Ventus 6 Stunden nach der Windenergie an der Station H2-20 ihr Maximum erreicht.

In einem zweiten Schritt werden die Windgeschwindigkeit der Station H2-20 und die Windgeschwindigkeit der Stationen Alpha Ventus korreliert. Dasselbe geschieht für die signifikante Wellenhöhe. Abbildung 54 zeigt das Ergebnis dieser Analysen.

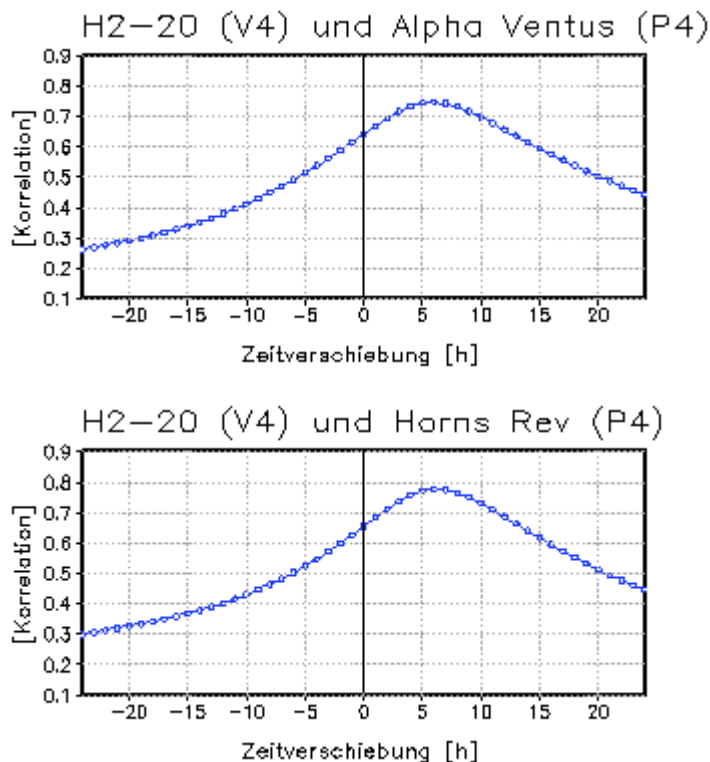


Abbildung 53 Oben: Kreuzkorrelationsanalyse der Windenergie (V4) an der Station H2-20 und der Wellenenergie (P4) an der Station Alpha Ventus. Unten: Kreuzkorrelationsanalyse der Windenergie (V4) an der Station H2-20 und der Wellenenergie (P4) an der Station Horns Rev. Eine positive Zeitverschiebung bedeutet, dass das Maximum der Wellenenergie dem Maximum der Windenergie folgt (Quelle: eigene Darstellung).

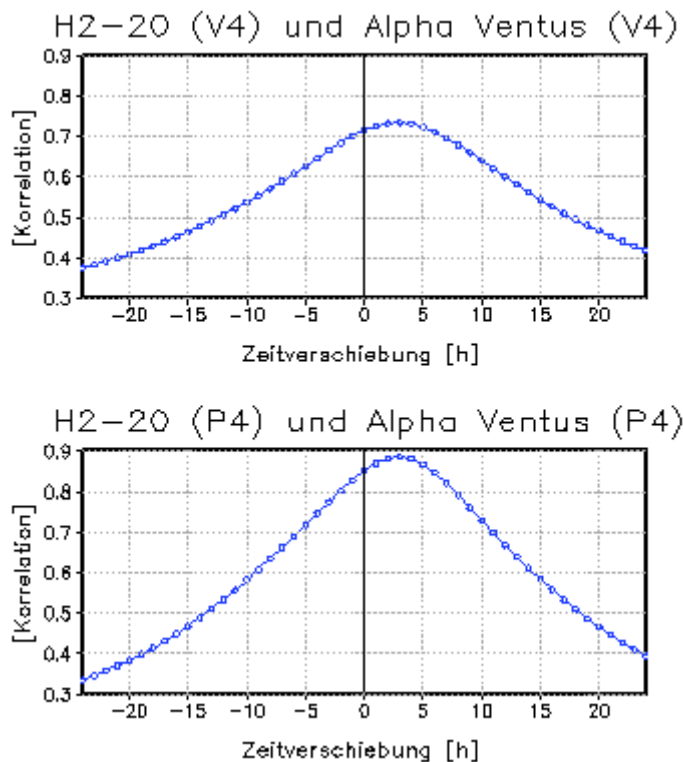


Abbildung 54 Oben: Ergebnis der Kreuzkorrelationsanalyse der Windenergie (V4) an der Station H2-20 und der Windenergie (V4) an der Station Alpha Ventus. Unten: Ergebnis der Kreuzkorrelationsanalyse der Wellenenergie (P4) der Station H2-20 und der Wellenenergie (P4) der Station Alpha Ventus. Eine positive Zeitverschiebung bedeutet, dass das Maximum der jeweiligen Variablen der Station Alpha Ventus dem der Station H2-20 folgt (Quelle: eigene Darstellung).

8.4 Diskussion der Ergebnisse

Da die Windenergie, genauso wie viele andere erneuerbare Energien auch, starken Schwankungen unterlegen ist, kann es sinnvoll sein, diese mit einer anderen erneuerbaren Energiequelle zu kombinieren. Aus Sicht des theoretischen Potenzials gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten die Stromeinspeisung der Windenergie mit Hilfe der Wellenenergie zu verstetigen.

Erstens können Wind- und Wellenenergie von **ein und demselben Standort** kombiniert werden. Die Auswertungen hierzu haben ergeben, dass an allen drei untersuchten Standorten das Maximum der Wellenenergie zwei Stunden nach dem Maximum der Windenergie auftritt. Um eine Verstetigung der Stromeinspeisung durch eine Kombination von erneuerbaren Energien zu erreichen, sollte zwischen diesen beiden Quellen eine hohe Korrelation bei einer gewissen Zeitverschiebung bestehen. Da die Windwellen jedoch vom Wind ausgelöst werden, besteht nur ein

geringer Zeitversatz zwischen dem Auftreten der jeweiligen Maximalwerte. Eine Kombination von Wind- und Wellenenergie, die am selben Standort gewonnen werden, kann aus Sicht des theoretischen Potenzials demnach nur einen kleinen Beitrag zur Verstetigung der Stromeinspeisung leisten.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, die Wind- und Wellenenergie von **verschiedenen Standorten** zu kombinieren. Wie oben vorgestellte Kreuzkorrelationsanalysen zeigen, beträgt die Zeitverzögerung zwischen der maximalen Windenergie am Standort H2-20 und der maximalen Wellenenergie an den Standorten Alpha Ventus und Horns Rev 6 Stunden.

Um dieses Ergebnis zu überprüfen, wurden zusätzliche Kreuzkorrelationsanalysen zwischen der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe der Standorte H2-20 und Alpha Ventus durchgeführt (siehe Abbildung 54). Diese Analysen ergaben, dass sowohl das Maximum der Windenergie, als auch das Maximum der Wellenenergie der Station Alpha Ventus dem jeweiligen Maximum der Station H2-20 mit einem Zeitversatz von 3 Stunden folgen. Wie Abbildung 52 zeigt, besteht zwischen dem Auftreten der maximalen Wellen- und Windenergie an ein und derselben Station ein Zeitversatz von 2 Stunden. Addiert man nun zu diesem Zeitversatz von 2 Stunden den Zeitversatz von 3 Stunden (aufgrund der unterschiedlichen Standorte), erhält man eine Zeitverschiebung von 5 Stunden und somit den Zeitversatz zwischen dem Auftreten des Maximums der Windenergie an der Station H2-20 und dem der Wellenenergie an den Stationen Horns Rev und Alpha Ventus.

Die Differenz von 1 Stunde (6-5) kommt dadurch zustande, dass die Auflösung nur stundengenau ist. Das hat zur Folge, dass der Zeitversatz beispielsweise nicht exakt 2 Stunden betragen muss, sondern auch 2 Stunden 40 Minuten betragen kann. Der Zeitversatz von 5 Stunden (2+3) kann bei einer genaueren Auflösung zu einem Zeitversatz von 6 Stunden (z.B. 2 Stunden 40 Minuten + 3 Stunden 30 Minuten = 6 Stunden 10 Minuten) führen.

Aus Sicht des theoretischen Potenzials könnte eine Kombination von Offshore-Windenergie und Wellenenergie an verschiedenen Standorten demnach einen grösseren Beitrag zur Verstetigung der Stromeinspeisung leisten. Um genauere

Aussagen machen zu können, sind jedoch weitere Untersuchungen, die eine Vielzahl an Standorten betrachten, notwendig. Dies kann aus Umfangsgründen nicht Teil dieser Arbeit sein.

Abschliessend ist zu sagen, dass sich Offshore-Windparks (wie Alpha Ventus und Horns Rev) meist in Regionen befinden, in denen das theoretische Wellenenergiepotenzial relativ gering ist. Eine Ausnahme stellt hierbei der geplante Windpark H2-20 dar (vgl. Kapitel 8.2). Aus diesem Grund ist grundsätzlich zu klären, ob eine Kombination von Wellen- und Windkraftwerken am selben Standort sinnvoll ist.

9 Einschränkung des theoretischen Potenzials

Die vorhergehenden Kapitel beschäftigen sich ausschliesslich mit dem **theoretischen** Potenzial der Wellenenergie in der Nordsee südlich von 56° N. Dieses Kapitel soll beispielhaft darstellen, wie die theoretisch nutzbare Wellenenergie durch weitere Potenziale eingeschränkt wird. Im folgenden Text wird deshalb zunächst auf die Potenzialbegriffe nach PIOT (2006) eingegangen. Daran anschliessend wird am Beispiel der deutschen Nordsee gezeigt, welche Räume nicht nur theoretisch, sondern auch wirklich für eine Nutzung der Wellenenergie in Frage kämen. Es ist anzumerken, dass es sich nur um eine beispielhafte Darstellung handelt, welche keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Eine umfassende Analyse des tatsächlich zu erwartenden Potenzials würde kein Bestandteil der vorliegenden Arbeit sein.

Abbildung 55 zeigt, wie das theoretische Potenzial einer erneuerbaren Energiequelle durch die weiteren Potenziale eingeschränkt wird, sodass man am Ende das zu **erwartende** Potenzial erhält. Die theoretisch zur Verfügung stehende Wellenenergie wird zum einen dadurch reduziert, dass die Wellenenergienutzung **technisch** nicht im gesamten Untersuchungsgebiet möglich ist. Die Schnittmenge aus dem theoretisch und technisch nutzbaren Potenzial, wird ihrerseits eingeschränkt durch die **ökologischen** Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes. Der Einsatz einer erneuerbaren Energiequelle sollte immer so erfolgen, dass dieser weder ein zusätzliche Beeinträchtigung des Lebensraums in „Bezug auf Diversität noch Wechselwirkungen sowohl zwischen den Lebewesen als auch zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt“ (PIOT 2006:2) zur Folge hat.

Des Weiteren spielen **wirtschaftliche** Gesichtspunkte, die das theoretisch und technisch nutzbare Potenzial weiter einschränken, eine wesentliche Rolle. Die Kosten für die Energieumwandlung einer erneuerbaren Energiequelle sollten „in der gleichen Bandbreite liegen wie die Gesamtkosten konkurrierender Systeme“ (PIOT 2006:2). Da erneuerbare Energiequellen aber oftmals subventioniert werden, wird zusätzlich das **erweitert wirtschaftliche Potenzial** betrachtet. Dieses bezieht mögliche Förderungen für die Energieumwandlung von erneuerbaren Energiequellen mit ein.

Ausserdem ist beim Einsatz von regenerativen Energiequellen die **soziale Akzeptanz** dieser Form der Energiegewinnung nicht ausser Acht zu lassen. Beispielsweise sind Bewohner, die in enger räumlicher Nähe zu einem geplanten Windpark angesiedelt sind, in die Planung mit einzubeziehen.

Die Schnittmenge aus diesen genannten Potenzialen bildet das **erwartete Potenzial**. Deutlich zu erkennen ist, dass dieses erheblich geringer ist, als das theoretische Potenzial. Wird die betrachtete erneuerbare Energiequelle im Untersuchungsgebiet bereits genutzt, so ist ausserdem zwischen dem **Ausbaupotenzial** zu unterscheiden. Hierunter wird die Differenz aus dem bereits genutzten Potenzial und den weiteren Potenzialen verstanden (PIOT 2006:3). Da die Meeresenergie in Deutschland bisher noch nicht wesentlich genutzt wird, entspricht das theoretische Potenzial dem Ausbaupotenzial.

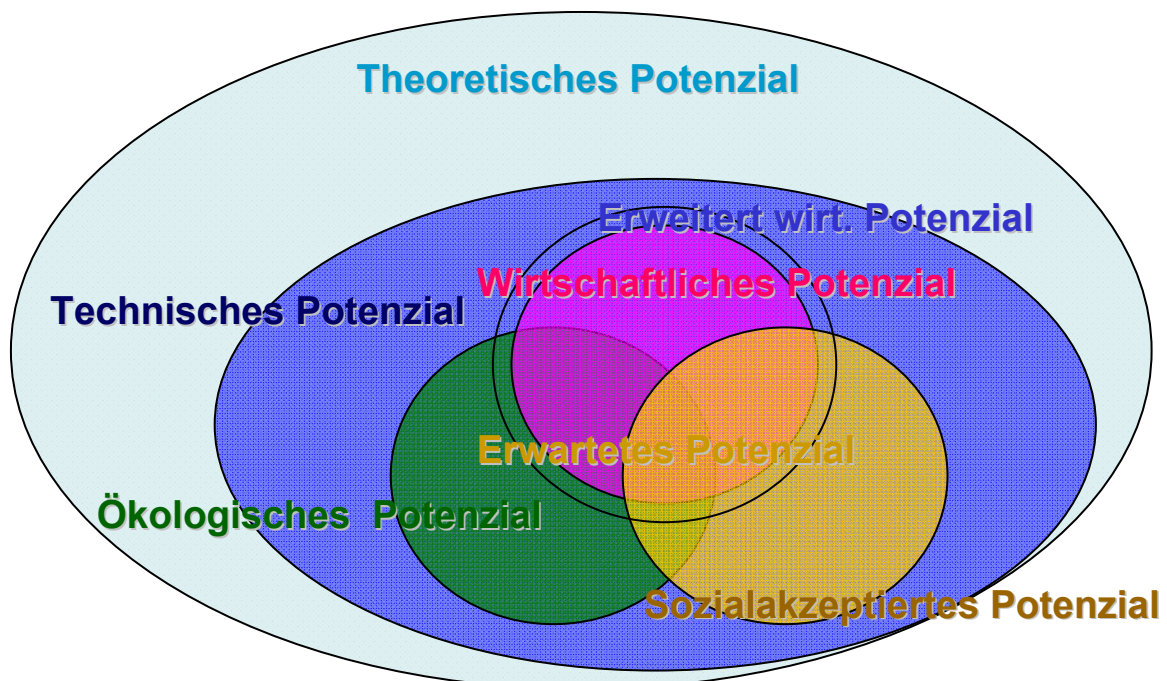


Abbildung 55 Potenzialbegriffe (Quelle: verändert nach BRUGGER 2009:2).

Die Einschränkung des theoretischen Wellenenergiepotenzials wird am Beispiel des deutschen Gewässers der Nordsee vorgestellt. Dieses wird laut dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in die **12-Seemeilen-Zone** und die Ausschliessliche Wirtschaftszone (**AWZ**) unterteilt (vgl. Abbildung 57). Erstere wird auch als Küstenmeer bezeichnet und unterliegt der Zuständigkeit des jeweilig

angrenzenden Bundeslandes. Die AWZ befindet sich seewärts der 12-Seemeilen-Zone und weist eine maximale Entfernung von der Küste von 200 Seemeilen auf (WWW.BSH.DE).

9.1 Theoretisches Wellenenergiepotenzial und Nutzungskonkurrenzen

Da die Nordsee in vielerlei Hinsicht vom Menschen genutzt wird (z. B. Fischfang, Transport, Erholung, Rohstoff- und Energiegewinnung), bleiben Nutzungskonkurrenzen zwischen den verschiedenen Bedürfnissen nicht aus. Daher ist es wichtig, die Nordsee als System, das sich aus interagierenden Einzelkomponenten zusammensetzt, zu verstehen. Gebiete, in denen aus Sicht des theoretischen Potenzials eine Gewinnung der Wellenenergie sinnvoll wäre, werden auch für andere Systemkomponenten (z.B. der Schifffahrt) als nutzbarer Raum angesehen. Die einzelnen Nutzungsarten sind entweder miteinander kombinierbar, oder schliessen sich gegenseitig aus. Während beispielsweise eine Kombination von Wellen- und Windkraftwerken am selben Ort theoretisch möglich ist, sind Wellenkraftwerke und Schiffverkehr nicht miteinander vereinbar. Eine Möglichkeit das zu erwartende Potenzial der Wellenenergie abzuschätzen, besteht daher in der Analyse von Nutzungskonkurrenzen.

Abbildung 56 zeigt zunächst das theoretisch nutzbare Wellenenergiepotenzial zwischen 3 und 9° E und 53 und 56° N. In diesem Bereich liegen auch die AWZ und die 12-Seemeilen-Zone des deutschen Nordseegewässers. Diese Abbildung lässt abnehmende Wellenenergieflüsse von Nord nach Süd und vom offenen Meer zu den Küsten hin erkennen (vgl. hierzu auch Kapitel 5). Die Wellenenergieflüsse liegen in diesem Ausschnitt im 50-jährigen Mittel (1958-2007) zwischen 6-24 kWm⁻¹.

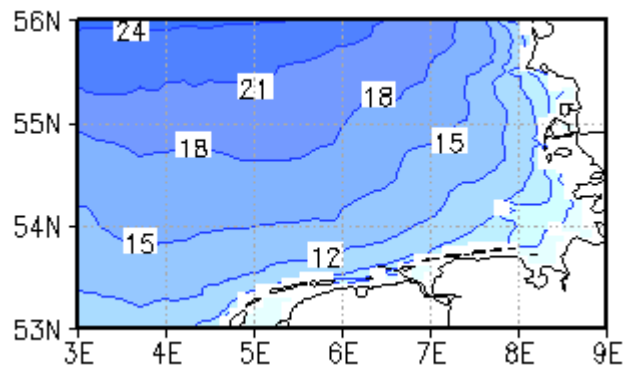


Abbildung 56 50-jähriges Mittel (1958-2007) der Wellenenergieflüsse (kWm^{-1}) in der Nordsee zwischen 3-9° E und 53-56° N (Quelle: eigene Darstellung).

Die dargestellte theoretisch nutzbare Wellenenergie wird jedoch eingeschränkt und kann nicht im gesamten Untersuchungsgebiet genutzt werden. Dies zeigt Abbildung 57. Dargestellt sind die Nutzungskonkurrenzen in der deutschen AWZ und der 12-Seemeilen-Zone (ECOFYS 2009:19ff). Unterschieden wird zwischen drei verschiedenen Gruppen:

- Gruppe 1 (rot) beinhaltet die Gebiete, die für eine Nutzung der Meeresenergien **ausgeschlossen** sind. Hierzu zählen vorwiegend Gebiete, die für die Schifffahrt bedeutsam sind.
- Gruppe 2 (gelb) umfasst die Gebiete, in denen **im Einzelfall** eine Nutzung möglich ist. Neben Gebieten, die zum Schutz der Meeresumwelt ausgewiesen wurden, gehören hierzu Gebiete für die vorrangige Nutzung von Offshore-Windenergie und Gebiete für sonstige öffentliche Belange (z. B.: Rohstoffgewinnung).
- Gruppe 3 (grün) beinhaltet die Bereiche, in denen eine Nutzung der Meeresenergie **möglich** ist. Für diese Gebiete ist entweder keine geplante Nutzung bekannt, oder es handelt sich um Gebiete in denen Windparks installiert werden sollen (ECOFYS 2009:19ff).

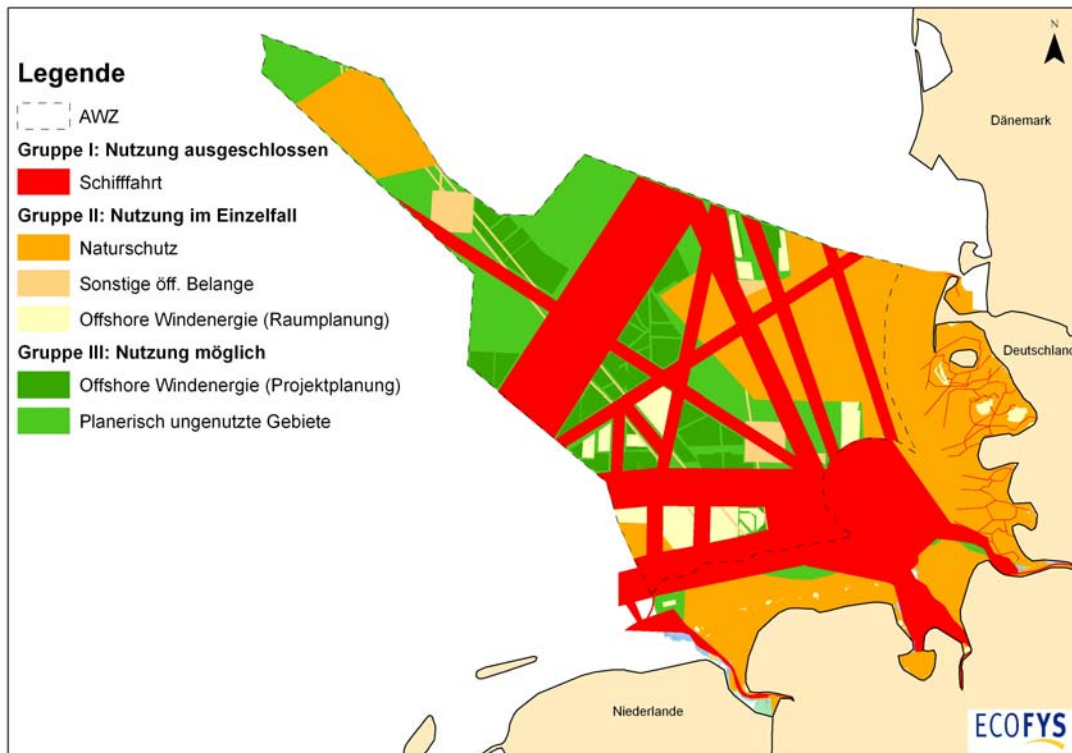


Abbildung 57 Nutzungskonkurrenzen im Untersuchungsgebiet (Quelle: ECOFYS 2009:21).

9.2 Diskussion der Ergebnisse

Wie Abbildung 56 erkennen lässt, herrschen im Mittel in grossen Teilen der deutschen AWZ und der 12-Seemeilen-Zone relativ geringe Wellenenergieflüsse zwischen $6-18 \text{ kWm}^{-1}$. Lediglich am nordwestlichen Ende liegen die mittleren Flüsse bei $\sim 24 \text{ kWm}^{-1}$. Es lässt sich also festhalten, dass das theoretische Wellenenergiepotenzial in diesem Gebiet im langjährigen Mittel relativ gering ist.

Hinzukommt, dass in grossen Teilen des Untersuchungsgebietes im Vorhinein eine Nutzung der Wellenenergie ausgeschlossen oder nur im Einzelfall möglich ist (Abbildung 57). Da die Nordsee eines der am stärksten befahrenen Meere der Welt ist, sind breite Bereiche der Schifffahrt vorbehalten (rote Flächen). Zudem stehen ein grosser Teil der 12-Seemeilen-Zone und ein geringerer Teil der AWZ unter Naturschutz (gelbe Flächen). In diesen Bereichen kann nur in den seltensten und genau zu überprüfenden Fällen eine Wellenenergienutzung erfolgen. Kleinere Einzelflächen sind ausserdem Offshore-Windparks und weiteren öffentlichen Belangen vorbehalten. Wie in Kapitel 8 gezeigt werden konnte, sind diese Gebiete jedoch nicht vollständig von einer Nutzung der Wellenenergie ausgeschlossen, da

durch eine Kombination von Offshore-Wind- und Wellenenergieanlagen Synergieeffekte bestehen können. Ob dies zutrifft, ist jedoch in den einzelnen Fällen genau abzuklären. Die verbleibenden Flächen im Untersuchungsgebiet sind mehr oder weniger stark zerschnitten und hauptsächlich im Bereich der AWZ zu finden. In diesen Bereichen ist eine Wellenenergienutzung demnach grundsätzlich möglich. Es ist jedoch zu beachten, dass weitere Potenziale (wie das technische Potenzial), diese Flächen, die nach einer Auswertung der Nutzungskonkurrenzen für eine Wellenenergienutzung in Frage kämen, weiter einschränken können.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass vor einem tatsächlichen Einsatz von Wellenenergiewandlern eine umfassende Raumanalyse durchgeführt werden muss. Nach einer Untersuchung des theoretischen Potenzials, müssen sowohl ökologische, als auch technische, ökonomische, soziale und weitere Aspekte betrachtet werden.

Dieses Beispiel zeigt sehr schön, wie stark das theoretische Potenzial der Wellenenergie durch diese weiteren Potenziale eingeschränkt wird. Nur ein sehr kleiner Teil des Raumes, der theoretisch nutzbar ist, kann auch tatsächlich für die Wellenenergiegewinnung genutzt werden. Anzumerken ist jedoch, dass das theoretische Wellenenergiepotenzial im Untersuchungsgebiet im weltweiten Vergleich relativ gering ist und somit grundsätzlich geklärt werden muss, in welcher Weise eine Nutzung der Wellenenergie hier sinnvoll ist.

10 Diskussion und Schlussfolgerung

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der vorhergehenden Kapitel zusammenfassend interpretiert werden. Die Diskussion erfolgt, ausser wenn dies speziell erwähnt wird, nur aus Sicht des theoretischen Potenzials.

Wie die Auswertungen der verschiedenen Variablen zwischen 1958-2007 ergeben haben, liegen die mittlere signifikante Wellenhöhe im Untersuchungsgebiet zwischen ~0,3-2 m, die mittlere T_{m2} -Periode zwischen 3-5 s, die mittlere Peak-Periode zwischen 5-8 s und die mittleren Energieflüsse zwischen 3-24 kWm^{-1} . Diese Werte sind im Vergleich zu anderen Regionen der Welt gering. Da die Wellenhöhen und somit die Wellenenergie primär abhängig sind von der Windgeschwindigkeit, existiert das grösste Wellenenergiepotenzial in Gebieten, in denen hohe Windgeschwindigkeiten herrschen. Demnach sind die höchsten Wellenenergiepotenziale in den gemässigten Breiten zwischen 40-60° N und S und dort in den östlichen Randbereichen der Ozeane zu finden (PELC 2002:475). Neben der Westküste Grossbritanniens ist beispielsweise auch die Westküste Süd-Indiens von hohen Wellenenergieflüssen (~30-90 kWm^{-1}) gekennzeichnet (GRAW 1995:2-7).

Die Nordsee liegt zwar in diesem Bereich der Breitengrade, wird jedoch durch die umgebenden Landmassen abgeschirmt und weist eine verhältnismässig geringe Fläche auf. Es kann also festgehalten werden, dass das theoretische Potenzial der Wellenenergie in der Nordsee im Vergleich zum zonalen Mittel relativ gering ist.

Des Weiteren haben die Auswertungen zum Wellenklima der Nordsee ergeben, dass die höchsten Potenziale im Mittel im offenen Meer und im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes zu erwarten sind. Aufgrund der Über- und Unterwassertopographie und der Lage in der Westwindzone sind im südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes nur geringe Wellenenergieflüsse anzutreffen. Eine Analyse der mittleren jährlichen Wellenhöhen hat ergeben, dass zwischen 1958-2007 einige Variabilitäten, aber kein eindeutiger Trend festzumachen sind. Ausserdem konnte ein Zusammenhang zwischen der Entwicklung der mittleren signifikanten Wellenhöhe, der mittleren Windgeschwindigkeit und dem NAO-Index festgestellt werden. Alle drei Zeitreihen weisen bis ~1990 zunehmende und ab 1990 leicht abnehmende Werte auf. Eine enge Korrelation zwischen den Zeitreihen konnte jedoch nicht festgestellt werden. Im langjährigen Mittel weisen der NAOI und die

Wellenenergieflüsse also dieselbe Tendenz auf, in den einzelnen Jahren können ihre Werte jedoch stark voneinander abweichen.

Im Wellenenergiepotenzial bestehen nicht nur zwischen den einzelnen Jahren grosse Unterschiede, sondern auch innerhalb eines Jahres. Aufgrund der sich ändernden Einstrahlungsbedingungen während eines Jahres sind im Mittel die grössten Energiegewinne im Winter, gefolgt vom Herbst zu erwarten. Im Frühling nehmen die Energieflüsse ab und erreichen im Mittel in den Sommermonaten ihr Minimum. Im Hinblick auf eine Nutzung der Wellenenergie bedeutet das, dass die Wellenenergiewandler in den Herbst- und Wintermonaten möglichst ohne Unterbrechungen laufen sollten. Die Frühlings- und Sommermonate hingegen, sind für Installations- und Wartungsarbeiten, bei denen geringe Wellenhöhen vorherrschen sollten, geeignet. Zu beachten ist jedoch, dass es sich um langjährige Mittelwerte handelt und auch Jahre existieren, in denen die Wellenenergieflüsse im Winter nicht am höchsten und im Sommer nicht am geringsten sind. Als positiv anzusehen ist ausserdem, dass die jahreszeitliche Variabilität der Wellenenergieflüsse im Gegensatz zur Solarenergie mit dem deutschen Stromverbrauch, der im Winter ebenfalls sein Maximum erreicht, übereinstimmt.

Interessant ist auch die räumliche Variabilität der verschiedenen Wellenparameter. Während der südliche Bereich des Untersuchungsgebietes und die küstennahen Gebiete im Mittel von geringen Schwankungen im Wellenenergieangebot gekennzeichnet sind, weisen der nördliche Bereich und das offene Meer höhere Variabilitäten auf. Ebenfalls hohe Variabilitäten sind in den Winter- und Herbstmonaten aufzufinden. Im Sommer und Frühling besteht über die einzelnen Jahre hinweg ein relativ konstantes Energieangebot.

Die identifizierten räumlichen, zwischenjährlichen, innerjährlichen und windrichtungsabhängigen Variabilitäten müssen bei der tatsächlichen Gewinnung der Wellenenergie Beachtung finden. Ist die Variabilität hoch, so muss die Energiebereitstellung mittels einer anderen Energiequelle jederzeit gewährleistet sein.

Der globale Klimawandel beeinflusst die Ozeane auf verschiedenste Weise. Indirekt bewirkt er über sich ändernde Windgeschwindigkeiten eine Veränderung des Wellenklimas. Dieses hat wiederum Einfluss auf das Wellenenergieangebot. Mit Hilfe von Szenarien kann abgeschätzt werden, wie sich der globale Klimawandel auf das Wellenklima auswirkt. Da Klimaszenarien nur eine mögliche, aber nie die tatsächliche Entwicklung für die Zukunft darstellen, werden häufig mehrere Szenarien betrachtet. Um die Qualität der Szenariendaten zu garantieren, sollten diese mit Hilfe von Kontrollszenarien überprüft werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Szenariendaten unterschätzen sowohl die signifikante Wellenhöhe, als auch die T_{m2} -Periode und die Wellenenergieflüsse. Die räumlichen Muster werden jedoch sinnvoll simuliert. Mit Hilfe der beiden verwendeten Szenariendatensätze, die auf unterschiedlichen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen basieren, kann der Einfluss unterschiedlicher Annahmen gezeigt werden. Während das Ostende des Untersuchungsgebietes in beiden Szenarien von einer Zunahme der Werte der verschiedenen Variablen im Vergleich zum Kontrollzeitraum 1961-1990 betroffen ist, sind am Westrand abnehmende Werte zu verzeichnen. Westlich des Zentrums des Untersuchungsgebietes sind laut beiden Szenarien die geringsten Veränderungen zu erwarten.

Diese Ergebnisse geben eine Idee über die zukünftig zu erwartenden Veränderungen im Wellenklima. Diese können dazu genutzt werden, die in der Zukunft zu erwartenden Wellenenergieflüsse abzuschätzen und die veränderten Welleneigenschaften in das Design der Wellenenergiewandler mit einzubeziehen. Vor allem im küstennahen Bereich müssen jedoch weitere Effekte, wie ein steigender Meeresspiegel, veränderte bathymetrische Strukturen und sich ändernde Meeresströmungen in die Betrachtung miteinbezogen werden.

Eine weitere erneuerbare und sehr wichtige Energiequelle stellt die Windenergie dar. Da diese sehr variabel und nur schwierig vorherzusagen ist, bestehen Überlegungen diese mit anderen erneuerbaren Energiequellen zu kombinieren. Hierbei sollte eine möglichst hohe Korrelation zwischen den Energiequellen bei einem gewissen Zeitversatz existieren. Eine Kombination von Offshore-Wind- und Wellenenergie kann auf zwei Arten durchgeführt werden. Die erste Möglichkeit besteht darin, die Wind- und Wellenenergie von ein und demselben Standort zu

kombinieren. Berechnungen hierzu haben ergeben, dass mit einer Zeitverzögerung von ~2 Stunden nur ein geringes Potenzial besteht, die Netzeinspeisung von Windenergie zu verstetigen. Dies ist auf die physikalische Abhängigkeit zwischen Wind und Windwellen zurückzuführen.

Die zweite Möglichkeit wäre Wind- und Wellenenergie an verschiedenen Standorten zu gewinnen. Zwischen der Windenergie des Offshore-Windparks H2-20 und der Wellenenergie der Windparks Alpha Ventus und Horns Rev, besteht ein Zeitversatz von ~6 Stunden. Dieses Ergebnis zeigt, dass durch eine Kombination von Wind- und Wellenenergie von verschiedenen Standorten eine bessere Verstetigung der Stromeinspeisung erzielt werden könnte. Um dieses Ergebnis zu überprüfen, sind jedoch weitere Analysen einer Vielzahl von Standorten notwendig. Neben diesem Verstetigungseffekt können weitere Synergieeffekte, wie die gemeinsame Nutzung von Tiefseekabeln und Netzanschlüssen bestehen. Diese würden den Einsatz von Wellenenergiewandlern nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch attraktiver machen, da geringere Eingriffe in die Natur nötig wären.

Die Nordsee wird in vielerlei Hinsicht genutzt. Sie ist nicht nur eine der weltweit wichtigsten Schifffahrtsrouten, sondern wird auch zum Fischfang, als Erholungsort und zur Rohstoffgewinnung verwendet. Des Weiteren stehen grosse Teile der 12-Seemeilen-Zone unter Naturschutz. Diese unterschiedlichen Nutzungsarten stehen oft in Konflikt miteinander und sind nur in den seltensten Fällen miteinander vereinbar. Soll die Wellenenergie in der Nordsee tatsächlich gewonnen werden, müssen die einzelnen Komponenten, die zusammen das System Nordsee bilden, beachtet werden. Da die Gewinnung von Wellenenergie nicht nur Einfluss auf die Ökologie hat, sondern auch mit der Schifffahrt und dem Fischfang in Konflikt steht, technisch nicht überall möglich und ökonomisch nicht in allen Fällen sinnvoll ist, muss eine umfassende Analyse durchgeführt werden. Die beispielhafte Darstellung einer solchen Nutzungskonflikt-Analyse am Beispiel der deutschen AWZ und der 12-Seemeilen-Zone hat gezeigt, dass das erwartete Potenzial erheblich geringer ist, als das theoretische. Hinzukommt, dass das Wellenenergiepotenzial des Untersuchungsgebietes im weltweiten Vergleich als gering einzuschätzen ist. Deshalb bleibt zu überprüfen, in wieweit eine Gewinnung der Wellenenergie im Untersuchungsgebiet sinnvoll ist. Alternativen zu einer reinen Nutzung der

Wellenenergie bietet der kombinierte Einsatz mit Offshore-Windparks oder mit dem Küstenschutz.

Abschliessend kann zusammengefasst werden, dass das theoretische Wellenenergiepotenzial der Nordsee südlich von 56° N und somit eine tatsächliche Wellenenergiegewinnung sehr komplex ist. Neben räumlichen, existieren zeitliche inner- und zwischenjährliche Variabilitäten, neben Einflüssen der Windgeschwindigkeit, haben die Winddauer, der Fetch, die Unter- und Oberwassertopographie massgebenden Einfluss auf die Energieflüsse und neben Veränderungen im Energieangebot aufgrund des globalen Klimawandels müssen Nutzungskonkurrenzen im Untersuchungsgebiet beachtet werden.

11 Literaturverzeichnis

ACKERMANN, T., SÖDER, L. (2000): Wind Energy Technology and Current Status: a Review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 4, 315-374.

ARL (2009): Regionale Klimaszenarien für Deutschland. Eine Leseanleitung. ARL, Hannover.

ASPELIEN, T. (2006): The Use of Long-Term Observations in Combination with Modelling and Their Effect on the Estimation of the North Sea Storm Surge Climate. GKSS, Geesthacht.

BACON, S, CARTER, D. J. T. (1991): Wave Climate Changes in the North Atlantic and North Sea. In: International Journal of Climatology. Vol. 11, 545-558.

BACON, S., CARTER, D. J. T. (1993): A Connection between Mean Wave Height and Atmospheric Pressure Gradient in the North Atlantic. In: International Journal of Climatology. Vol. 13, 423-436.

BENKEL, A., MEINKE, I. ET AL. (2008): Bedeutung der Zyklonenzugbahnen auf die Sturmfluthöhe in der Ostsee. MUSTOK-Workshop 2008.

BIGG, G. R., JICKELLS, T. D. ET AL. (2003): The Role of the Oceans in Climate. In: International Journal of Climatology. Vol. 23, 1127-1159.

BMU (2007): Strom aus Erneuerbaren Energien. Zukunftsinvestition mit Perspektiven. Silber Druck oHG, Niestetal.

BRAUNER, R., DENTLER, F.-U. ET AL. (2003): Strom, Seegang, Gezeiten. Meereskunde für Segler. DSV, Hamburg.

BROWN, J., COLLING, A. ET AL. (1989): Waves, Tides and Shallow-Water Processes. Pergamon Press, Oxford.

BRUGGER, E. A., DIETRICH, P. ET AL. (2009): Erneuerbare Energien: Übersicht über vorliegende Studien und Einschätzung des Energie Trialog Schweiz zu den erwarteten inländischen Potenzialen für die Strom-, Wärme- und Treibstoffproduktion in den Jahren 2035 und 2050 inklusive Berücksichtigung der Potenziale aus Abfällen. Energie Trialog Schweiz, Zürich.

DIETRICH, G., KALLE, K. ET AL. (1975): Allgemeine Meereskunde. Eine Einführung in die Ozeanographie. 3. Auflage. Gebrüder Bornträger, Berlin.

DOMMENGET, D., LATIF, M. (2000): A Cautionary Note on the Interpretation of EOFs. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.

ECOFYS (2009): Nutzung der Meeresenergie in Deutschland. Unveröffentlichter Bericht. Berlin.

EMERY, W. J., THOMSON, R. E. (1998): Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Kidlington, Oxford.

FAIZAL, M., AHMED, M. R. ET AL. (2009): On Utilizing the Orbital Motion in Water Waves to Drive a Savonius Rotor. In: Renewable Energy, Vol. 35, 164-169.

FALNES, J. (2007): A Review of Wave-Energy Extraction. In: Marine Structures. Vol. 20, 185-201.

FESER, F. (2006): Enhanced Detectability of Added Value in Limited Area Model Results Separated into Different Spatial Scales. In: Monthly Weather Review. Vol. 134, 2180-2190.

FURNES, G. K. (1992): Climatic Variations of Oceanographic Processes in the North European Seas: A Review of the 1970s and 1980s. In: Continental Shelf Research. Vol. 12, No. 2/3, 235-256.

FUSCO, F., NOLAN, G. ET AL. (2010): Variability Reduction Through Optimal Combination of Wind/Wave Resources – An Irish Case Study. In: Energy. Vol. 35, 314-325.

GARRISON, T. (2009): Essentials of Oceanography. 5. Auflage. Brooks/Cole, Australia.

GRABEMANN, I., WEISSE, R. (2008): Climate Change Impact on Extreme Wave Conditions in the North Sea: an Ensemble Study. In: Ocean Dynamics. Vol. 58, 199-212.

GRAW, K.-U. (1995): Wellenenergie – eine hydromechanische Analyse. IGAW, BUGH, Wuppertal.

GRAW, K.-U. (1998): Wellenenergie: Schutzbedarf – Nutzungsmöglichkeiten. Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Bereich Bauwesen, Universität Leipzig.

GRAW, K.-U. (2006): Nutzung der Wellenenergie – Stand und Perspektiven. Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden.

HÄCKEL, H. (2008): Meteorologie. 6. Auflage. Ulmer, Stuttgart.

HANNACHI, A. (2004): A Primer for EOF Analysis of Climate Data. Department of Meteorology, University of Reading.

HARRISON, G. P., WALLACE, A. R. (2005): Climate Sensitivity of Marine Energy. In: Renewable Energy. Vol. 30, 1801-1817.

HAYER, S., MOAN, T. (1983): On Some Uncertainties Related to the Short Term Stochastic Modelling of Ocean Waves. In: Applied Ocean Research. Vol. 5, 93-108.

HENRION, A., HENRION, R. ET AL. (1987): Hauptkomponentenanalyse und Hauptkomponentendisplay als Methode zur multivariaten Datenanalyse und Mustererkennung. In: Acta hydrochim. hydrobiol. Vol. 15, No. 2, 129-142.

HOWARTH, M. J., DYER, K. R. ET AL. (1994): Seasonal Cycles and their Spatial Variability. In: Understanding the North Sea System. Chapman & Hall, London.

HUANG, Z.-C., HSIAO, S.-C. ET AL. (2009): Turbulence and Energy Dissipations of Surf-Zone Spilling Breakers. In: Coastal Engineering. Vol. 56, 733-746.

HURRELL, J. W. (1995): Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. In: Science. Vol. 269, 676-679.

HURRELL, J. W., DESER, C. (2009): North Atlantic Climate Variability: The Role of the North Atlantic Oscillation. In: Journal of Marine Systems. Vol. 78, 28-41.

IPCC (2000): Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Cambridge University Press, Cambridge.

JANSSEN, T. T., BATTJES, J. A. (2007): A Note on Wave Energy Dissipation over Steep Beaches. In: Coastal Engineering. Vol. 54, 711-716.

KALTSCHMITT, M., STREICHER, W. ET AL. (2006): Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 4. Auflage. Springer, Berlin.

KAPPAS, M. (2009): Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert – Herausforderungen für Natur- und Sozialwissenschaften. Spektrum, Heidelberg.

KIETZ, J-U. (2009): Data Mining zur Wissensgewinnung aus Datenbanken. Teil 4: Datenaufbereitung. Universität Zürich.

KLOSE, B. (2008): Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Springer, Berlin.

KOMEN, G. J., CAVALERI, L. ET AL. (1994): Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press, Cambridge.

KOREVAAR, C. G. (1990): North Sea Climate – Based on Observations from Ships and Lightvessels. KNMI, Dordrecht.

LAKKOJU, V. N. M. R. (1996): Combined Power Generation with Wind and Ocean Waves. In: Renewable Energy. Vol. 9, 870-874.

LIU, P. C., SCHWAB, D. J. ET AL. (2002): Has wind-wave Modelling Reached its Limit? In: Ocean Engineering. Vol. 29, 81-98.

LOEWE, P. (2009): Atmosphärenphysik. In: System Nordsee. Zustandsbericht 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen. BSH, Hamburg.

LORENZ, E. N. (1956): Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction. Scientific Report 1, Statistical Forecasting Project. Massachusetts Institute of Technology, Department of Meteorology (Hrsg.), Massachusetts.

LOZAN, J. L., LENZ, W. ET AL. (1990): Warnsignale aus der Nordsee. Wissenschaftliche Fakten. Paul Parey, Berlin.

MACKAY, E. B. L., BAHAJ, A. S. ET AL. (2009): Uncertainty in Wave Energy Resource Assessment. Part 2: Variability and Predictability. In: Renewable Energy. Article in Press, 1-11.

MAI, S., PÄSLER, C. ET AL. (2004): Vorlesungsergänzungen des Lehrstuhls für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Franzius-Institut , Universität Hannover.

MALBERG, H. (2007): Meteorologie und Klimatologie. Eine Einführung. 5. Auflage. Springer, Berlin.

MCCORMICK, M. E., KRAEMER, D. R. B. (2001): Wave Energy. In: Steele, J. H., Turekian, K. K. et al. (2008): Encyclopedia of Ocean Sciences. 2. Auflage. Elsevier, Amsterdam.

MICHAELSEN, K., KRELL, U. ET AL. (1998): Climate of the North Sea. DWD, Hamburg.

MÜLLER, P., VON STORCH, H. (2004): Computer Modelling in Atmospheric and Oceanic Sciences. Springer, Berlin.

OSPAR COMMISSION (2000): Quality Status Report 2000. Regional QSR II. OSPAR Commission, London.

ÖZGER, M., SEN, Z. (2009): Return Period and Risk Calculations for Ocean Wave Energy Applications. In: Ocean Engineering. Vol. 35, 1700-1706.

PELC, R., FUJITA, R. M. (2002): Renewable Energy from the Ocean. In: Marine Policy. Vol. 26, 471-479.

PILAR, P., SOARES, C. G. ET AL. (2008): 44-Year Wave Hindcast for the North East Atlantic European coast. In: Coastal Engineering. Vol. 55, 861-871.

PIOT, M. (2006): Exkurs 5: Potenzialbegriffe. Bundesamt für Energie, Bern.

PITTOCK, A. B. (2009): Climate Change. The Science, Impacts and Solutions. 2. Auflage. CSIRO PUBLISHING, Collingwood.

PRYOR, S. C., BARTHELMIE, R. J. (2010): Climate Change Impacts on Wind Energy: A Review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 14, 430-437.

SCHLICHTING, H. J., RODEWALD, B. (1983): Über die konstruktive Rolle der Reibung. In: Vorträge der Frühjahrstagung der DPG. Giessen.

SCHWARTZ, M. L. (2005): Encyclopedia of Coastal Science. Springer, Dordrecht.

SIMPSON, J. H. (1994): Introduction to the North Sea Project. In: Understanding the North Sea System. Chapman & Hall, London.

SOARES, C. G., WEISSE, R. ET AL. (2002): A 40 Years Hindcast of Wind, Sea Level and Waves in European Waters. In: 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Oslo, Norway.

STERL, A., CAIRES, S. (2005): Climatology, Variability and Extrema of Ocean Waves: The Web-Based KNMI/ERA-40 Wave Atlas. In: International Journal of Climatology. Vol. 25, 963-977.

STERR, H. (2007): Folgen des Klimawandels für Ozeane und Küsten. In: Endlicher, W.: Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke, Ausblicke.

SÜNDERMANN, J, BEDDIG, S. ET AL. (2002): The North Sea. Problems and Research Needs. Centre for Marine and Climate Research of the University of Hamburg, Hamburg.

THORPE, T. W. (2007): Wave Energy. In: Survey of Energy Resources. World Energy Council, London.

VON STORCH, H., ZWIERS, F. W. (2001): *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge.

WATSON, R. T., ZINYOWERA, M. C. ET AL. (1997): *Summary for Policymakers. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. IPCC.

WEISSE, R., PLUESS, A. (2006): *Storm-related Sea Level Variations along the North Sea Coast as Simulated by a High-Resolution Hindcast 1958-2002*. In: *Ocean Dynamics*. Vol. 57, 16-25.

WEISSE, R., CALLIES, U. ET AL. (2007a): *Wind, Wave, and Storm Surge Hindcasts and Scenarios and Related Coastal and Offshore Applications: The coastDat Data Set at the GKSS Institute for Coastal Research*. In: *10th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Coastal Hazard Symposium*.

WEISSE, R., GÜNTHER, H. (2007b): *Wave Climate and Long-Term Changes for the Southern North Sea Obtained from a High-Resolution Hindcast 1958-2002*. In: *Ocean Dynamics*. Vol. 57, 161-172.

WEISSE, R., VON STORCH, H. ET AL. (2009): *Regional Meteorological-Marine Reanalyses and Climate Change Projections - Results for Northern Europe and Potential for Coastal and Offshore Applications*. In: *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 90, Issue 6, 849-860.

WEISSE, R., VON STORCH, H. (2009): *Marine Climate and Climate Change. Storms, Wind Waves and Storm Surges*. Springer, Berlin.

WILKS, D. S. (2006): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2. Auflage. Elsevier, Amsterdam.

YOUNG, I. R. (1999a): *Seasonal Variability of the Global Ocean Wind and Wave Climate*. In: *International Journal of Climatology*. Vol. 19, 931-950.

YOUNG, I. R. (1999b): Wind Generated Ocean Waves. 2. Auflage. Elsevier, Amsterdam.

ZEPP, H. (2004): Geomorphologie. 3. Auflage. UTB, Paderborn.

ZHENG, Y. H., SHEN, Y. M. ET AL. (2004): Determination of Wave Energy Dissipation Factor and Numerical Simulation of Wave Height in the Surf Zone. In: Ocean Engineering. Vol. 31, 1083-1092.

Internetquellen:

<http://www.alpha-ventus.de/#aktuelles>, (Stand: 06.01.2010).

<http://www.aviso.oceanobs.com/en/applications/climate/nao/what-is-the-nao/index.html>, (Stand: 19.11.2009).

www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/CONTIS-Informationssystem/Index.jsp, (Stand: 26.01.2010).

<http://www.coastdat.de/about/index.html.de>, a, (Stand: 20.07.2009).

<http://www.coastdat.de/glossary/index.html.de>, b, (Stand: 23.07.2009).

<http://www.coastdat.de/data/index.html.de>, c, (Stand: 23.07.2009).

ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh, (Stand: 10.11.2009).

http://eco.psy.ruhr-uni-bochum.de/download/Guski-Lehrbuch/Kap_7_1.html, (Stand: 03.12.09).

<http://www.geo-mbh.com/documents.cfm?TextID=193>, (Stand: 06.01.2010).

<http://www.hamburger-bildungsserver.de/klima/klimawandel/klimaaenderung/images/Winter-NAO-Index.png>, a, (Stand: 03.10.2009).

<http://www.hamburger-bildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/ipcc2001/szen-1.html>, b, (Stand: 17.12.2009).

http://www.hornsrev.dk/nyheder/brochurer/Horns_Rev_TY.pdf, (Stand: 06.01.2010).

<http://www.iges.org/grads/>, (Stand: 15.01.2010).

<http://maps.google.de/>, (Stand: 24.11.2009).

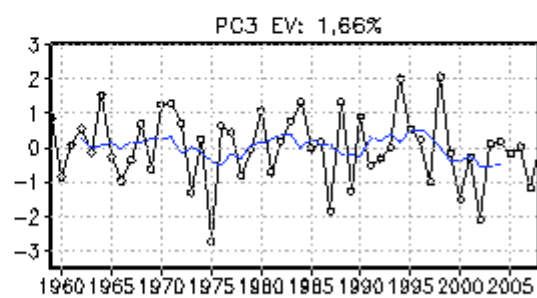
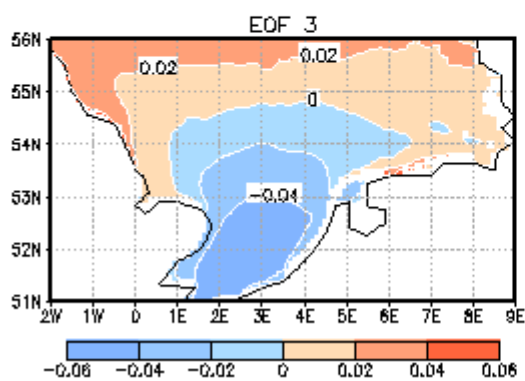
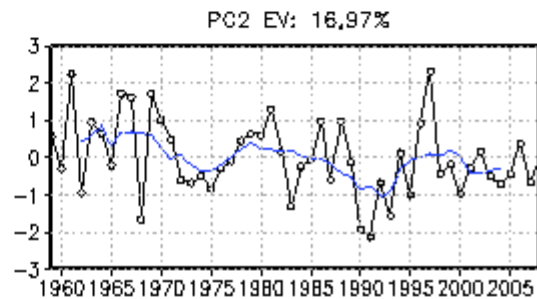
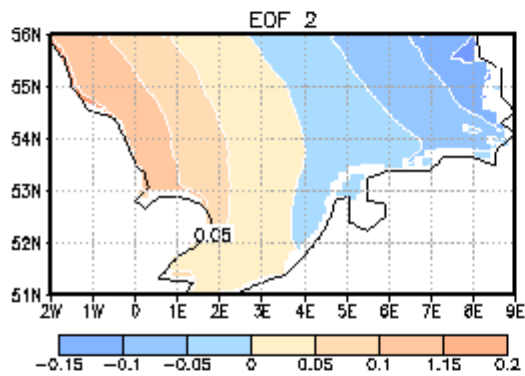
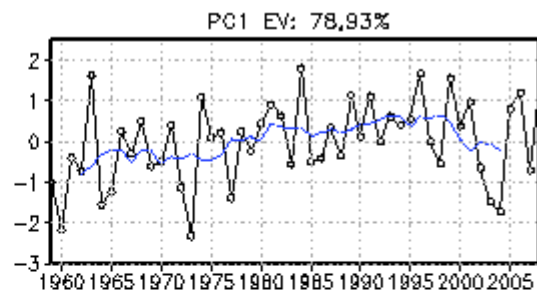
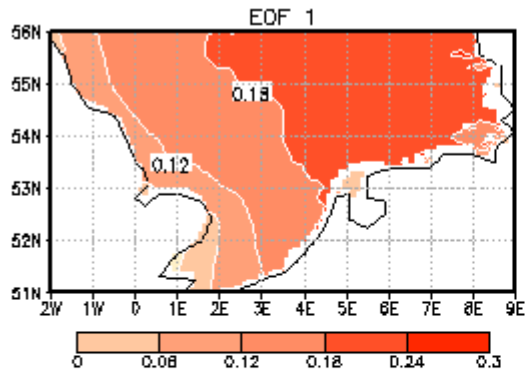
<http://www.mpimet.mpg.de/presse/faqs/was-ist-das-ipcc.html>, (Stand: 10.01.2010).

<http://www.pelamiswave.com/media/pelamisbrochure.pdf>, (Stand: 16.11.2009).

<https://srv.rz.uni-bayreuth.de/lehre/fortran90/vorlesung/index.html>, (Stand: 15.01.2010).

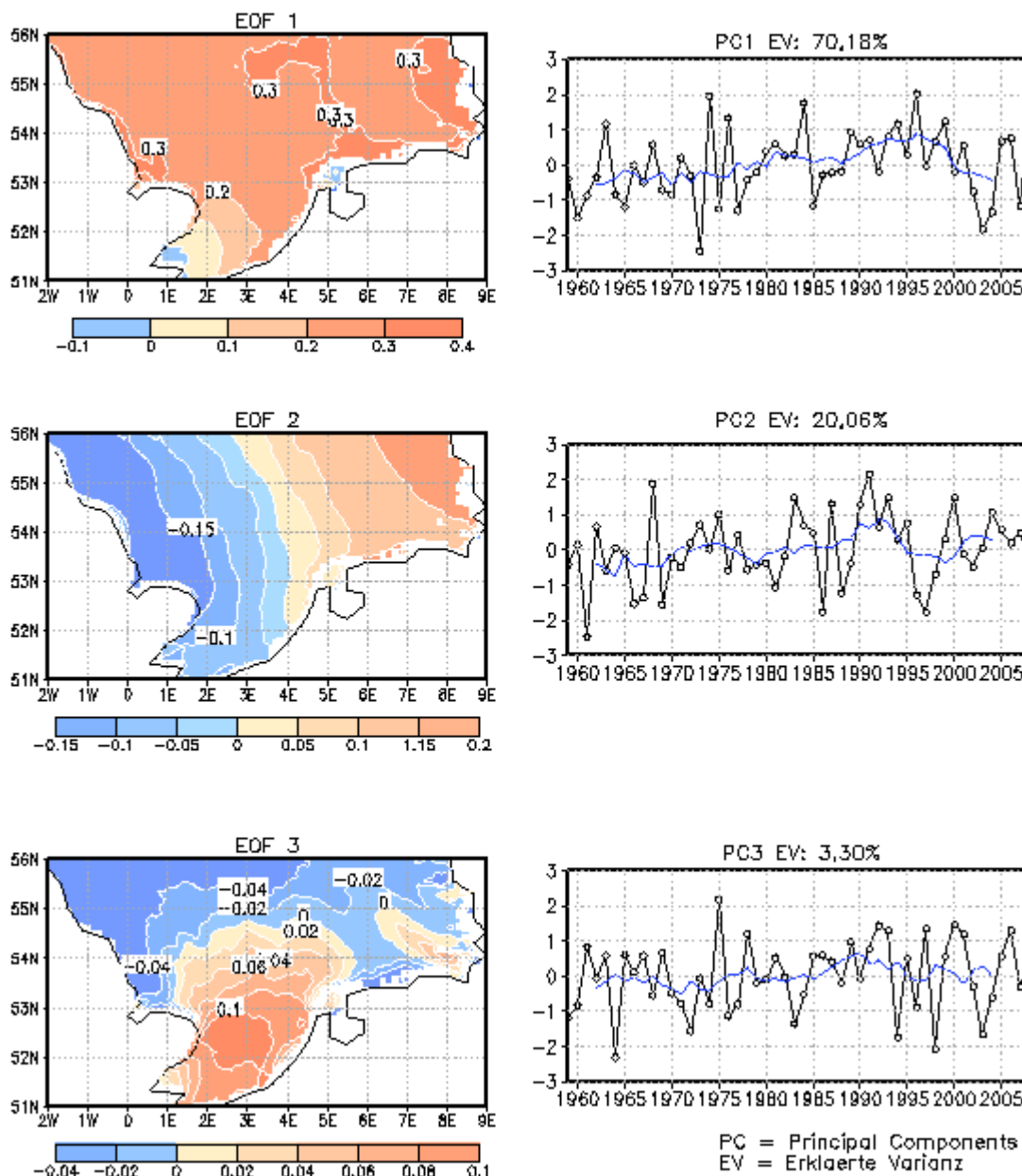
http://www.strom-magazin.de/strommarkt/stromverbrauch-im-jahresverlauf-der-winter-ist-stromsaison_10177.html, (Stand: 01.12.2009).

12 Anhang

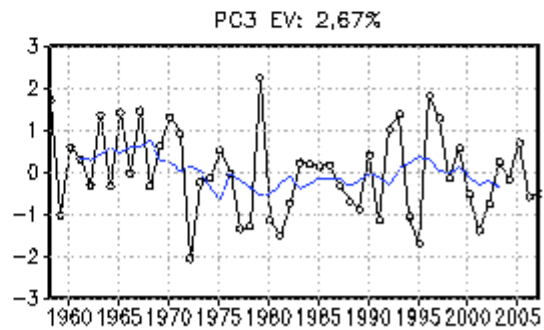
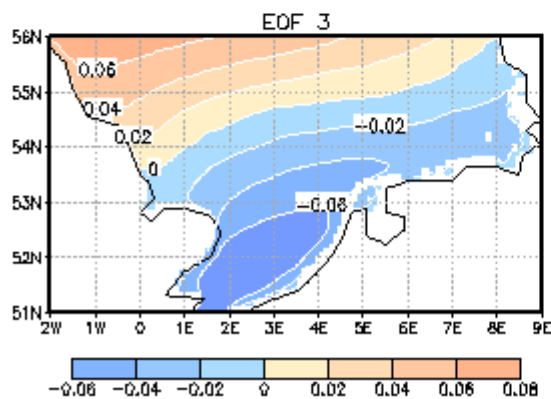
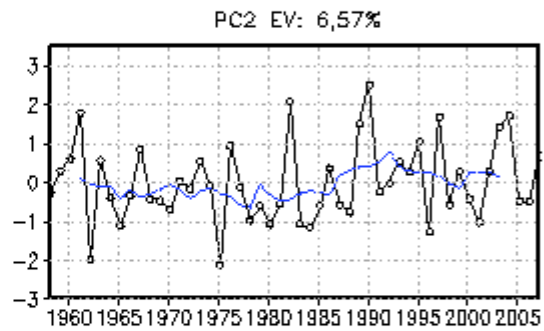
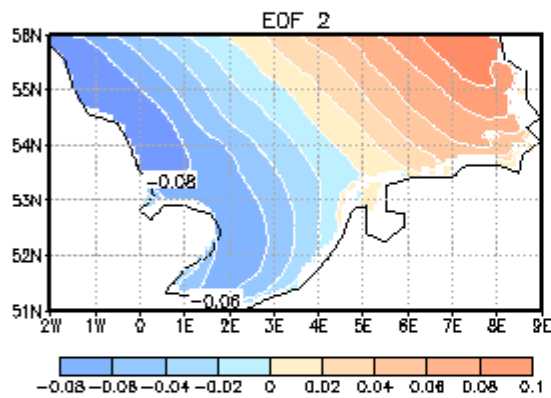
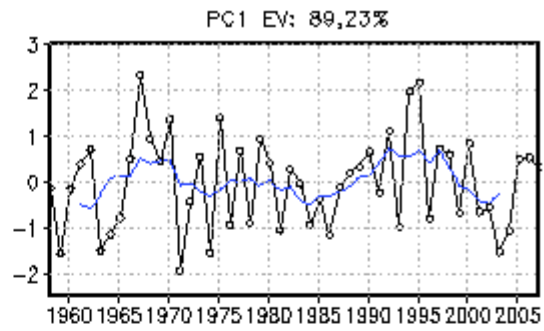
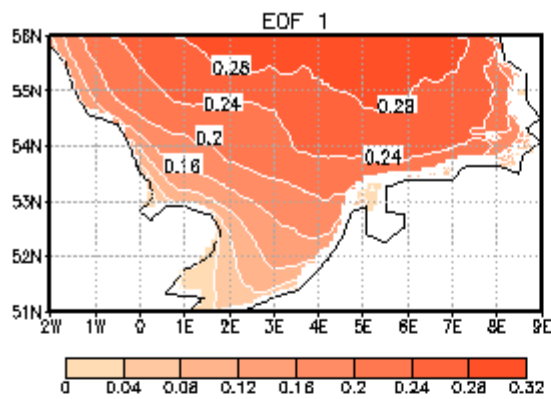


PC = Principal Components
EV = Erklärte Varianz

Anhang I EOF-Analyse der mittleren Tm2-Periode für den Zeitraum 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).



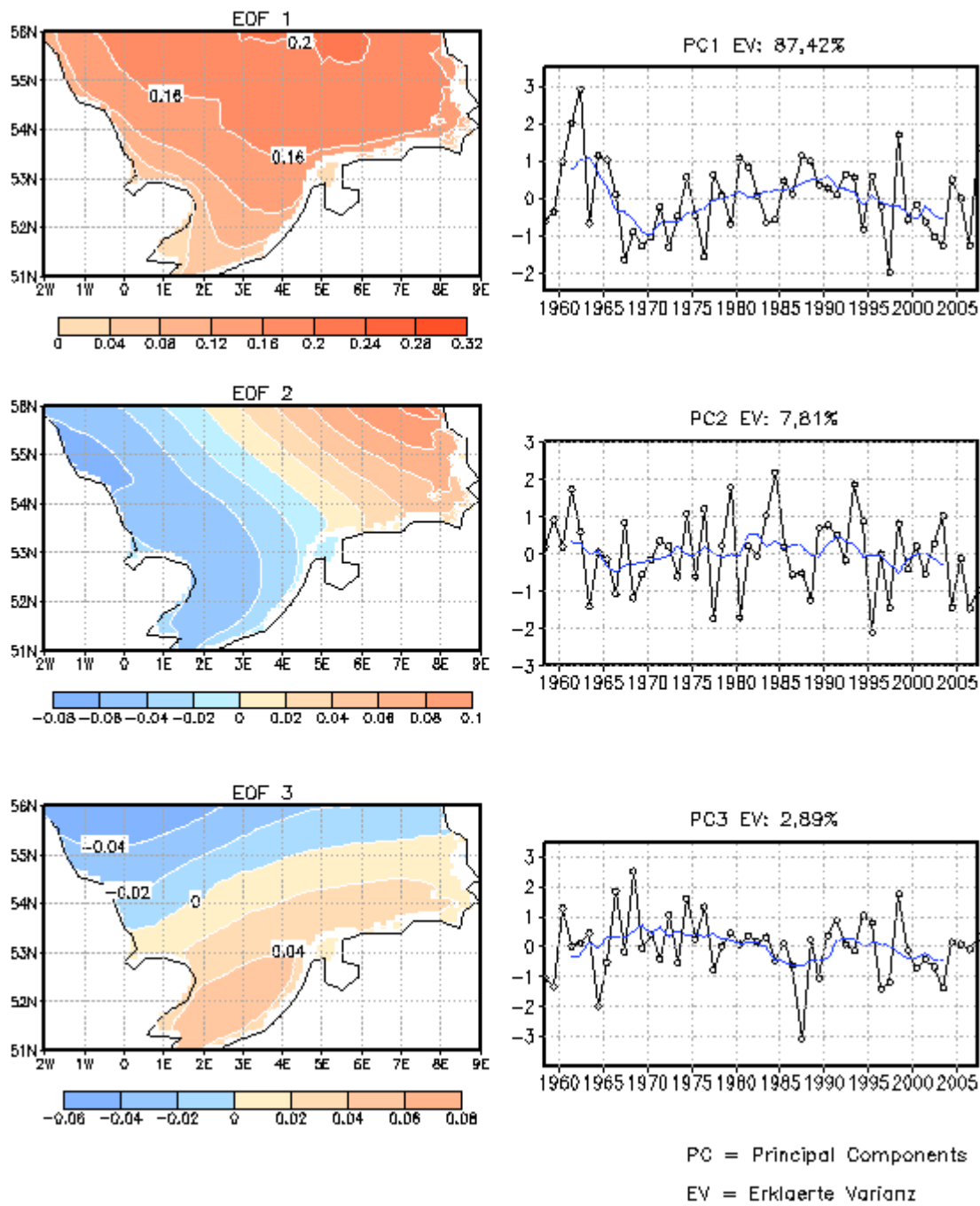
Anhang II EOF-Analyse der mittleren Peak-Periode für den Zeitraum 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).



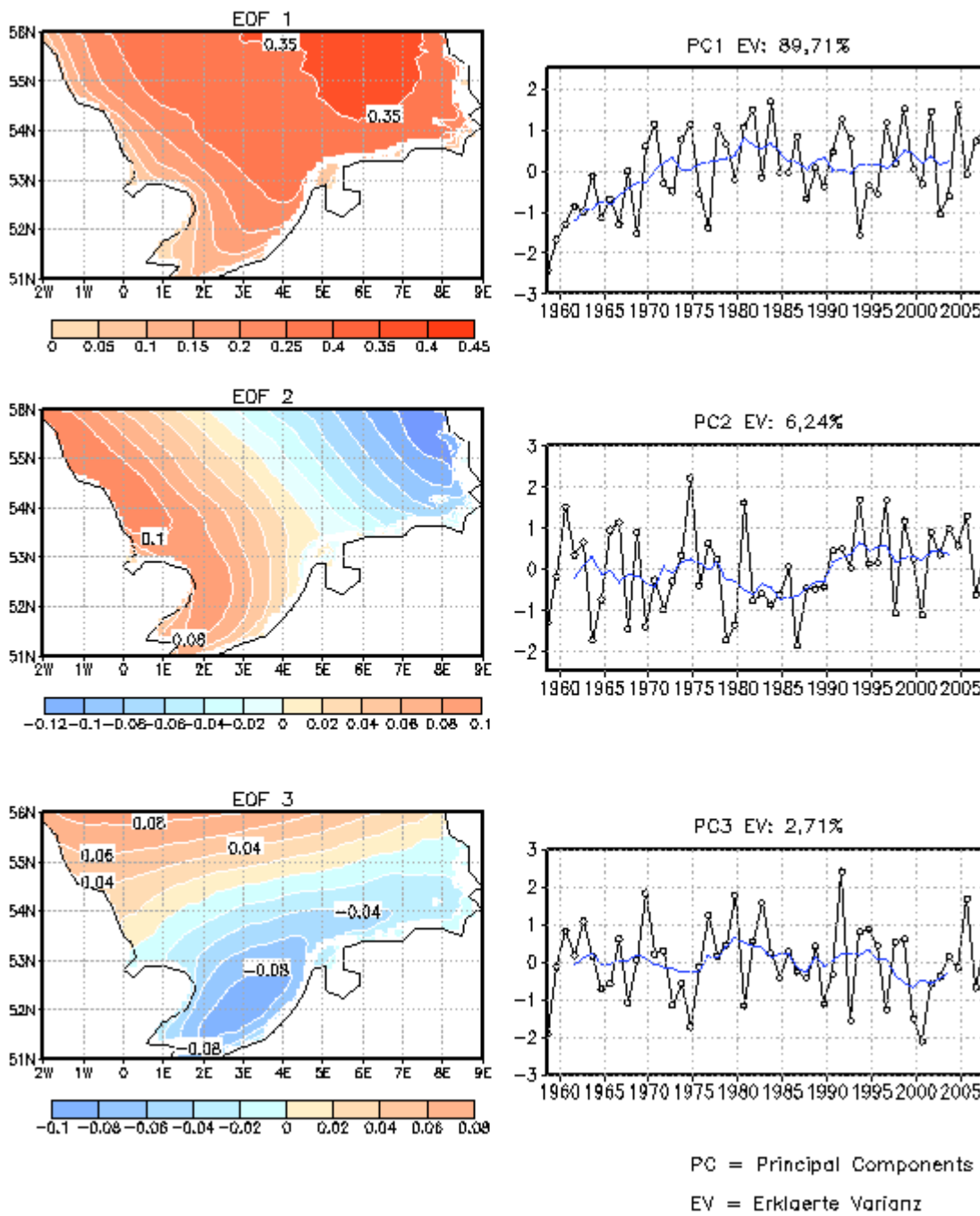
PC = Principal Component

EV = Erklärte Varianz

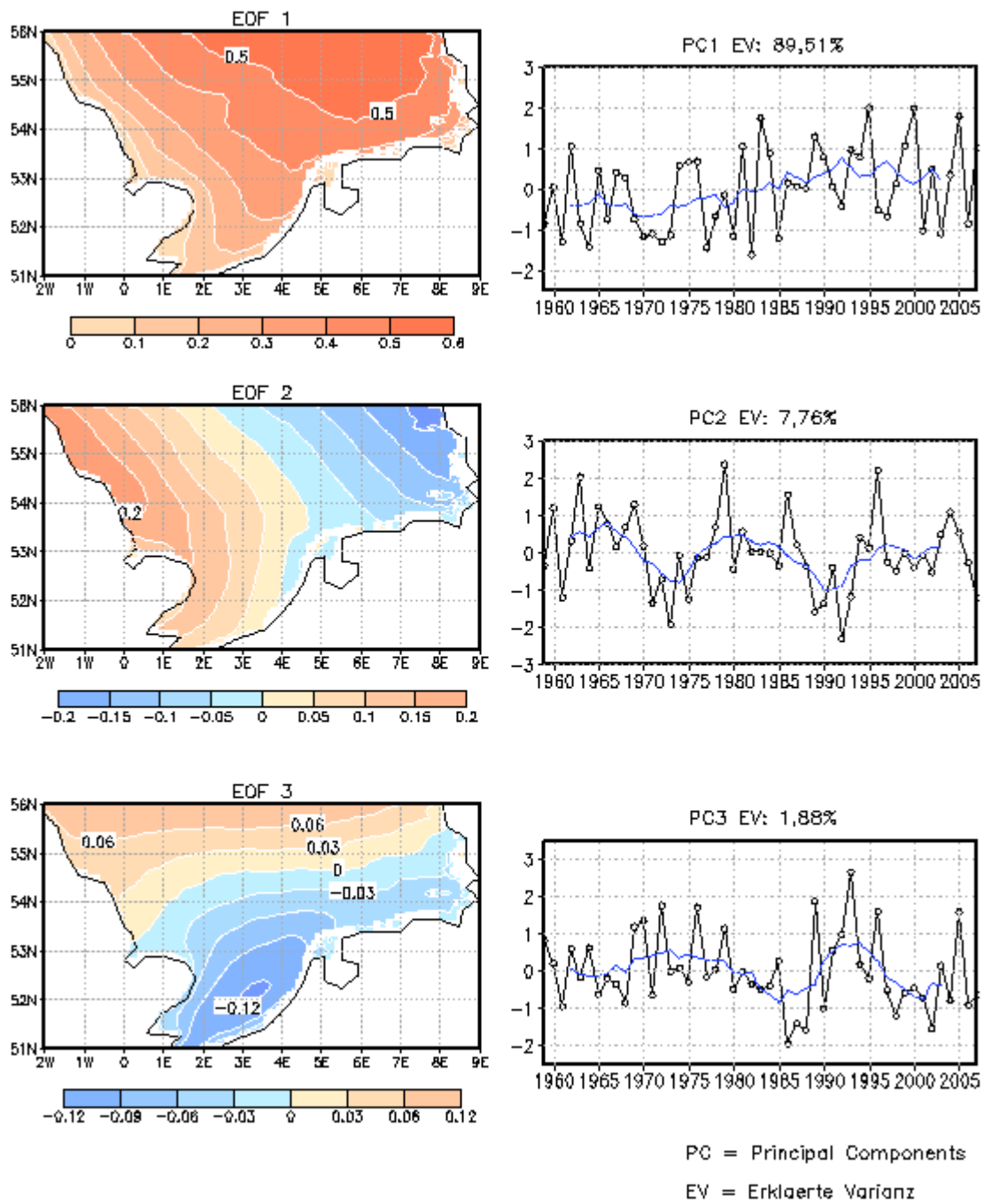
Anhang III EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe der Frühlingsmonate (März, April, Mai) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).



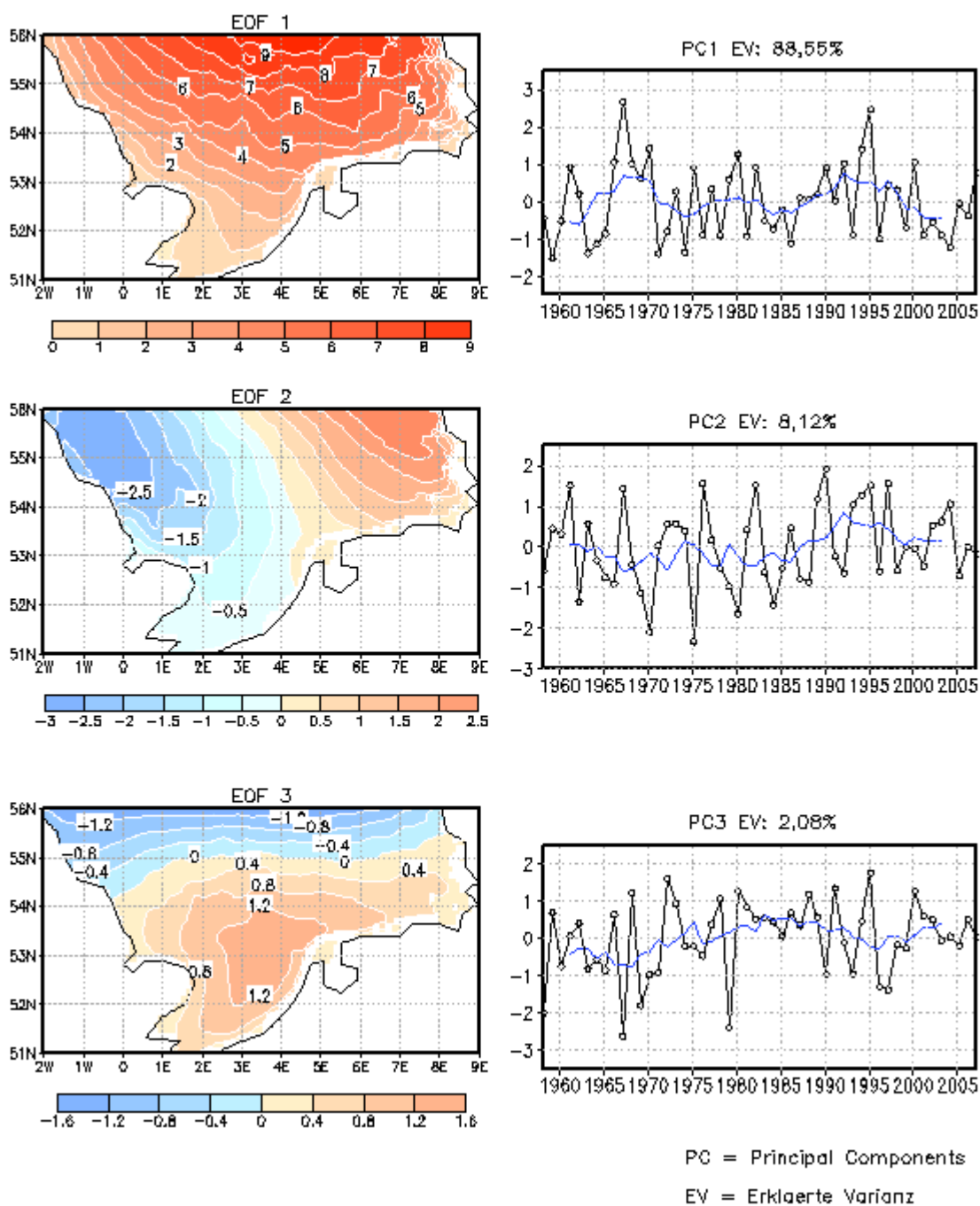
Anhang IV EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe für die Sommermonate (Juni, Juli, August) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).



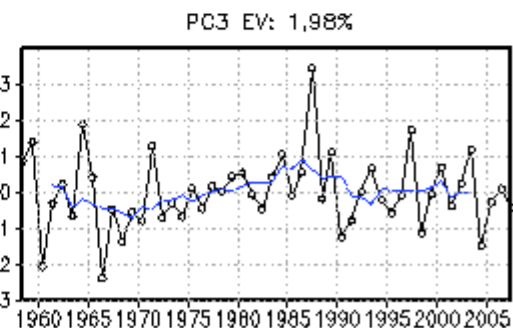
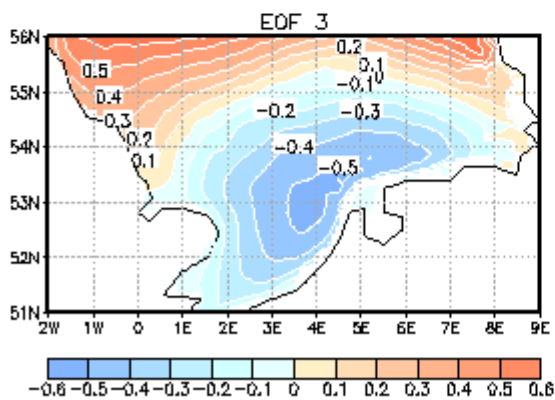
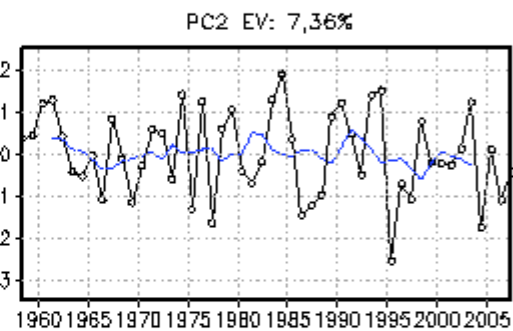
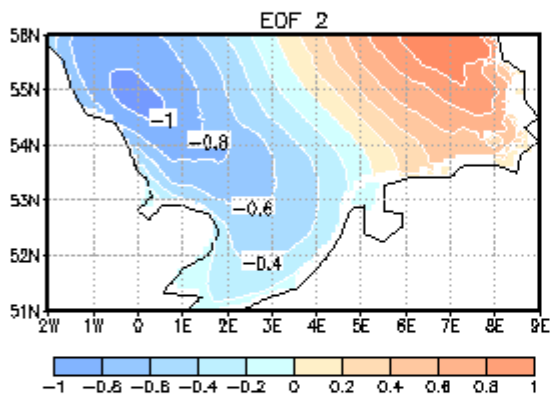
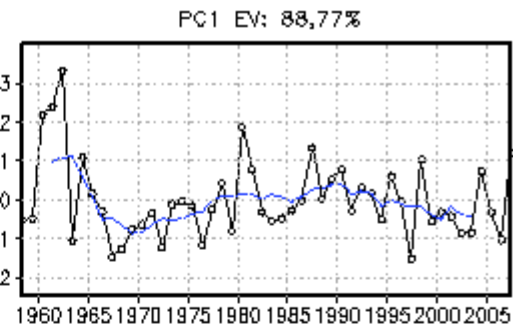
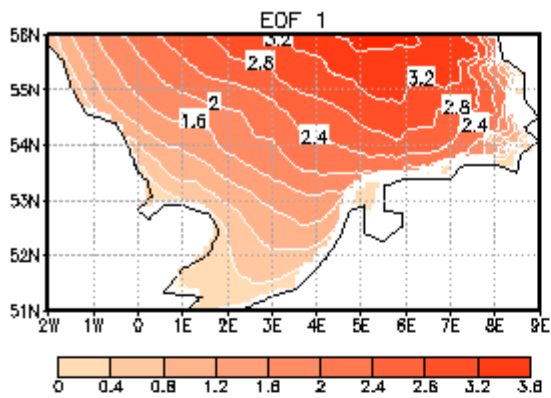
Anhang V EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe für die Herbstmonate (September, Oktober, November) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).



Anhang VI EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

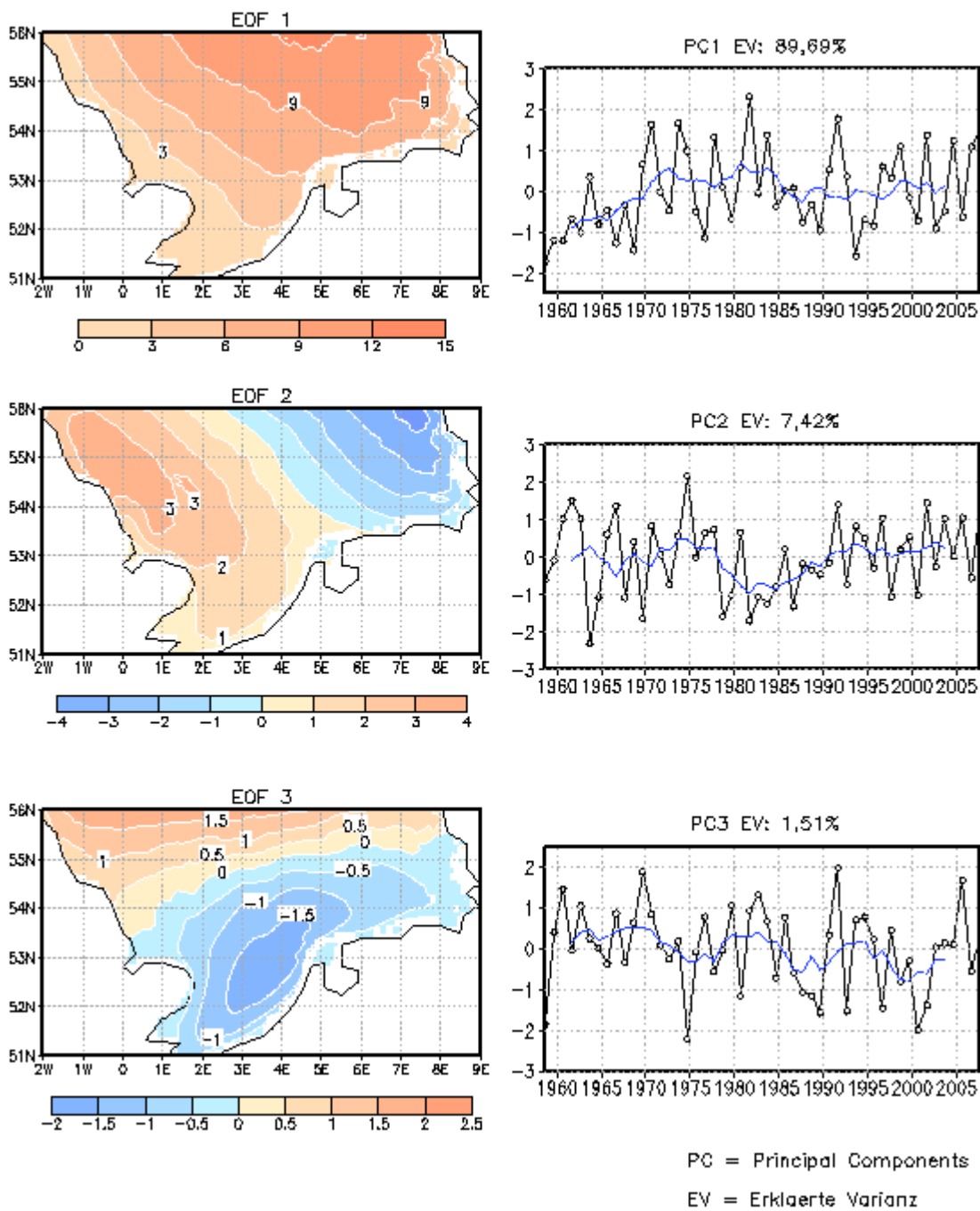


Anhang VII EOF-Analyse der mittleren Wellenenergieflüsse für die Frühlingsmonate (März, April, Mai) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

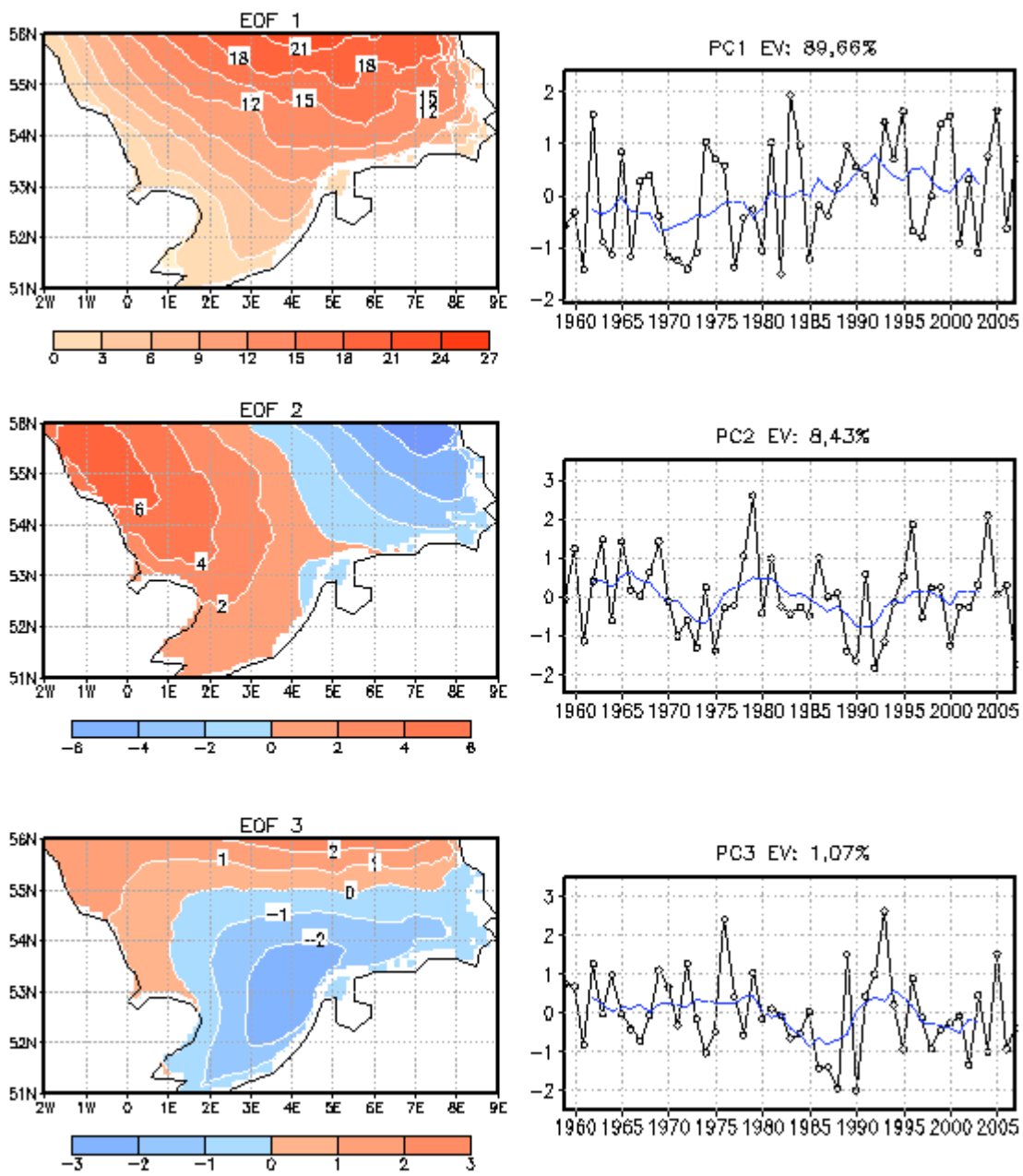


PC = Principal Components
 EV = Erklärte Varianz

Anhang VIII EOF-Analyse der mittleren Wellenenergieflüsse für die Sommermonate (Juni, Juli, August) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

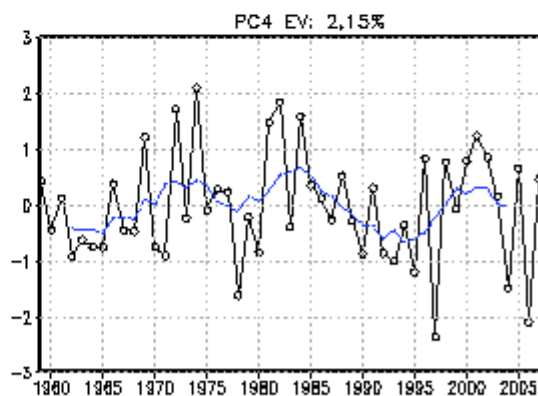
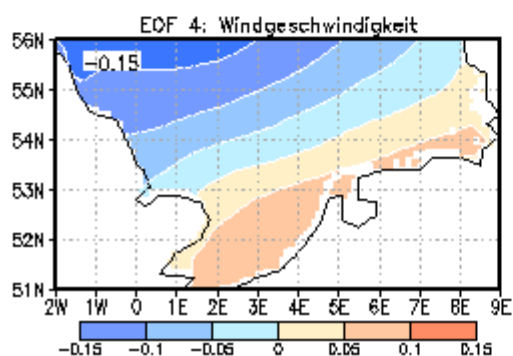
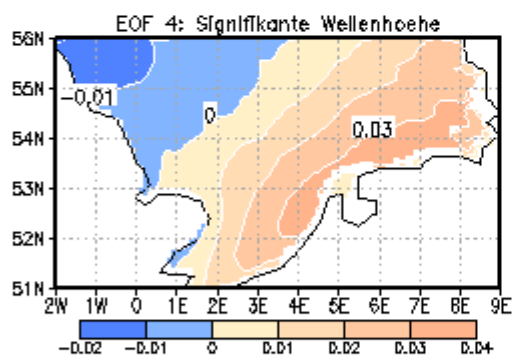
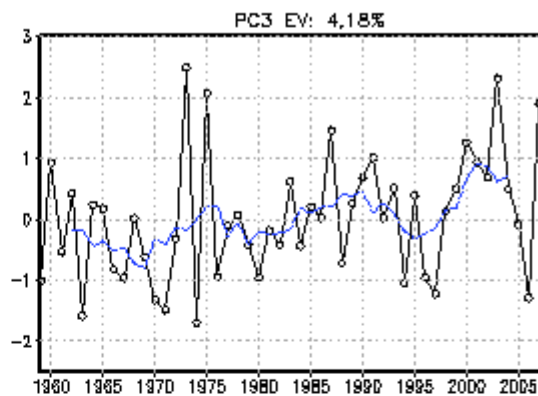
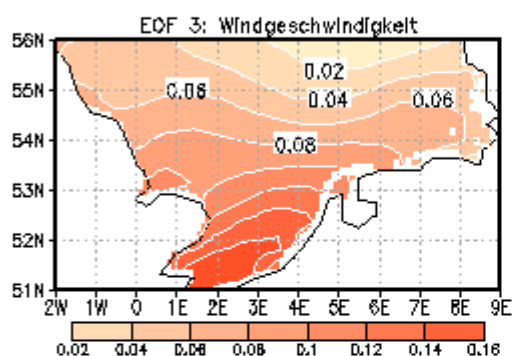
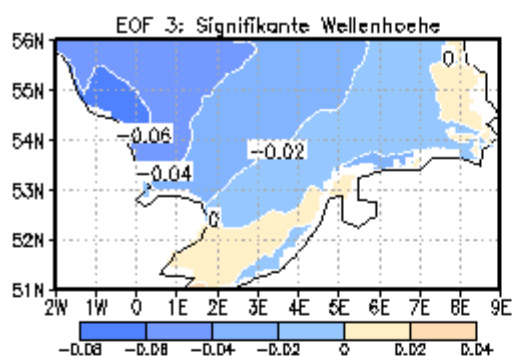


Anhang IX EOF-Analyse der mittleren Wellenenergieflüsse für die Herbstmonate (September, Oktober, November) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).

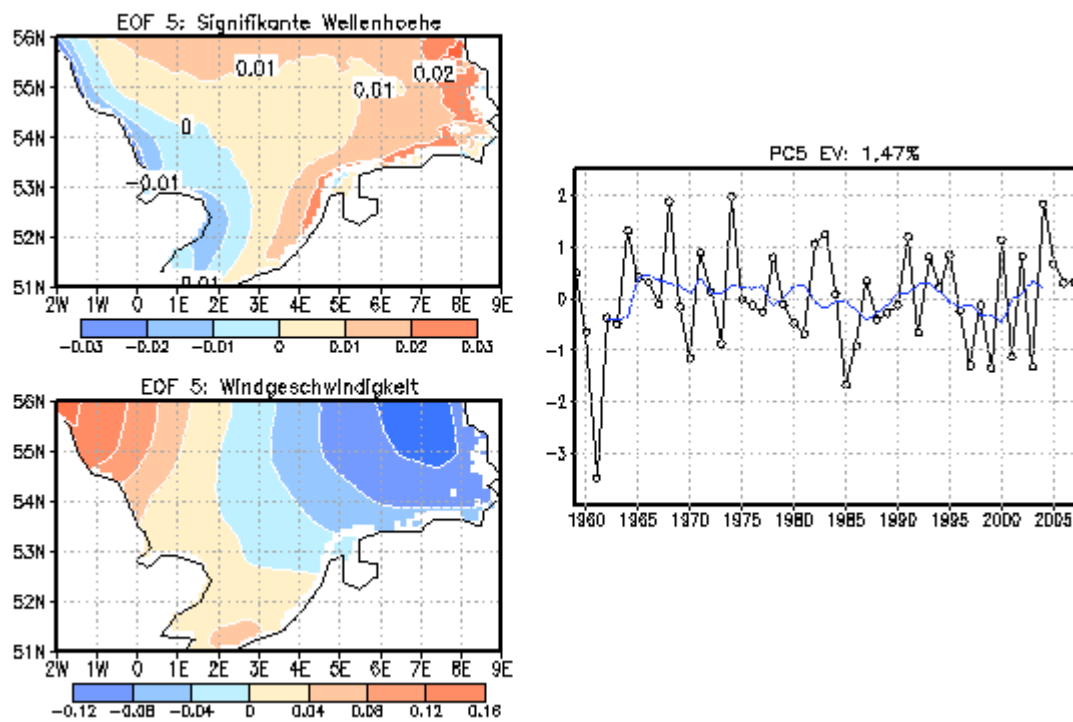


PC = Principal Components
 EV = Erklärte Varianz

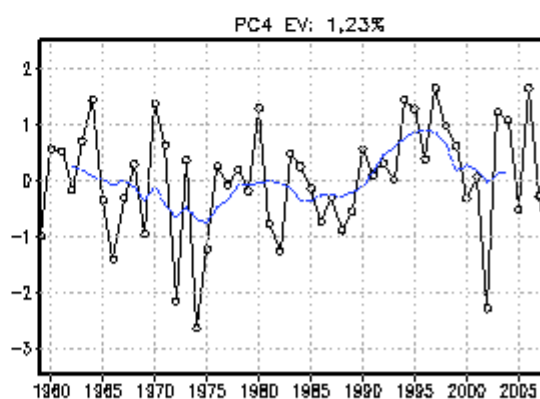
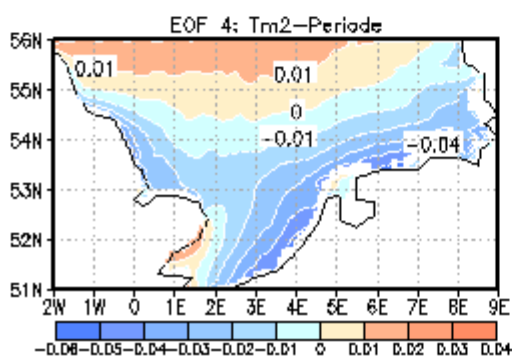
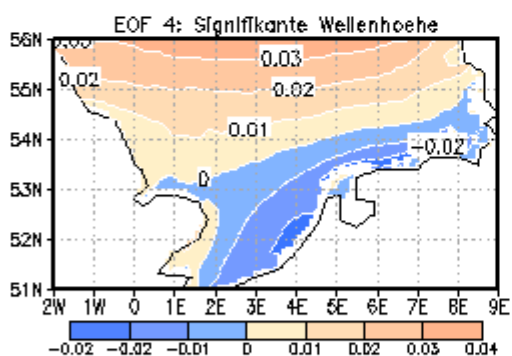
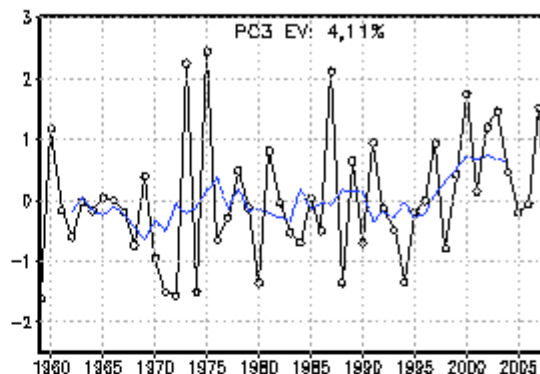
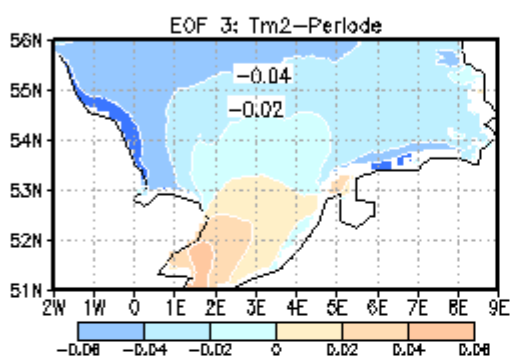
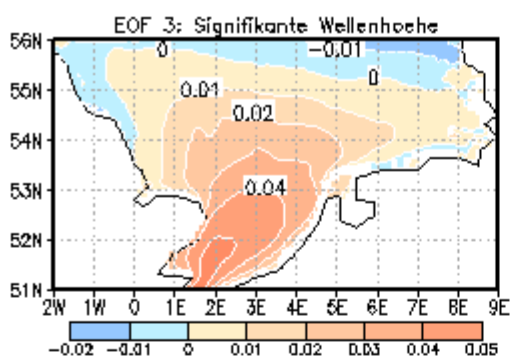
Anhang X EOF-Analyse der mittleren Wellenenergieflüsse für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) 1958-2007 (Quelle: eigene Darstellung).



Anhang XI Zweiter Teil der gemeinsamen EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) und der mittleren Windgeschwindigkeit (ms^{-1}). Dargestellt sind die dritte und vierte EOF und die dazugehörigen PCs. Blaue Linie: Vierjähriges gleitendes Mittel (Quelle: eigene Darstellung).



Anhang XII Dritter Teil der gemeinsamen EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) und der mittleren Windgeschwindigkeit (ms^{-1}). Dargestellt sind die fünfte EOF und die dazugehörige PC. Blaue Linie: Vierjähriges gleitendes Mittel (Quelle: eigene Darstellung).



Anhang XIII Zweiter Teil der gemeinsamen EOF-Analyse der mittleren signifikanten Wellenhöhe (m) und der Tm2-Periode (s). Dargestellt sind die dritte und vierte EOF und die dazugehörigen PCs. Blaue Linie: Vierjähriges gleitendes Mittel (Quelle: eigene Darstellung).

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich während meines gesamten Studiums und besonders bei der Erstellung meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Von Seiten des Geographischen Institutes der Universität Basel gilt mein Dank besonders Herrn Prof. Dr. Nikolaus J. Kuhn. Er hat mich bei meinem Vorhaben meine Masterarbeit extern zu schreiben in jeglicher Weise best möglichst unterstützt.

Am GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht, möchte ich mich vor allem bei meinem Betreuer Dr. Ralf Weisse bedanken. Er war jeder Zeit bereit mir bei Fragen und Problemen weiterzuhelfen und seine Ratschläge und Erfahrung waren mit stets von Vorteil.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinem ehemaligen Erdkundelehrer, Herrn Wetzel, dem ich die Begeisterung für das Fach Geographie verdanke, bedanken. Mein Dank gilt auch dem gesamten Geographischen Institut der Universität Kiel, dem der Universität von Toulouse und dem der Universität Basel, für einen lernintensiven, abwechslungs- und erfahrungsreichen Abschnitt meines Lebens.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie. Meine Geschwister Julian und Laura, haben mich bei jeder meiner Entscheidungen bezüglich meines Studiums unterstützt und waren auch sonst immer für mich da. Meine Eltern, Thomas und Anne, standen mir vom Anfang bis zum Ende meines Studiums, sowohl in Hoch- als auch in Tiefphasen in jeglicher Art und Weise beiseite und waren mir auch während der Erstellung meiner Masterarbeit eine sehr grosse Stütze. Mein Dank gilt ausserdem meinem Freund Dominik, der mich ebenfalls bei jeder Entscheidung unterstützte, mich auch in Tiefphasen ertragen hat und es jedes Mal schaffte, mich neu zu motivieren.