# Kombinierte extreme Einwirkungen für Offshore-Windenergieanlagen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

> zur Erlangung des Grades DOKTOR-INGENIEUR Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Boso Schmidt aus Hannover

Hannover, 2017

Referent: Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx1. Korreferent: Assoc. Prof. Dr. Alfred Strauss2. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Michael BeerTag der Promotion: 10. März 2017

## Abstract

A reliable description of the combination of wind and wave loads with averaged return periods of several decades is crucial for ensuring safe and economic offshore wind turbine (OWT) design. The combination of frequently occurring conditions (fatigue, and various operating conditions) is regulated in guidelines and standards, which allow the determination of variable, simultaneously occurring loads from scatter diagrams. However, little is known about the combined occurrence of variable extreme loads for OWTs. Existing combination rules for buildings are not suitable for support structures of OWTs, as these structures are subjected to high dynamic loads. Multidimensional extreme value distributions are more suitable, as they integrate the correlation of several random variables. Current probability models based on multi-dimensional extreme value distributions are very data-intensive and therefore more suitable for simulated than measured time series. In this dissertation, reliable combination methods for variable load parameters with a defined averaged return period are developed, based on simultaneously measured time series of wind speed and significant wave height. These methods are characterised by low data requirements. For the first time, the directional dependency of these variable load parameters is taken into account in a combination method, in addition to the temporal correlation of extreme wind speeds and sea states. The combination methods are developed using the load parameters mentioned above and can be transferred to arbitrary, simultaneously measured variable load parameters. These methods allow the determination of combination values for extreme loads with averaged return periods of several decades, provided that a suitable sample size is available. For combinations not characterised by the maximum of one of the load parameters, approximation methods are developed. The combination methods are validated by measurement series from two different measurement sites. A comparison of the results from both sites provides insights into location dependency and the influence of the sample size on the reliability of the combination methods. Finally, the results of the developed combination methods and an existing joint probabilistic model are compared using the same data. If only a limited sample size is available, the combination method developed in this dissertation and based on simultaneously occurring extreme events results in a more reliable description of the combination of the considered load parameters..

Keywords: wind loads, wave loads, load combination, offshore wind energy

# Kurzfassung

Die zuverlässige Beschreibung der Kombination von Wind- und Welleneinwirkungen mit festgelegten mittleren Wiederholungsperioden von mehreren Jahrzehnten ist entscheidend für eine sichere und wirtschaftliche Auslegung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Für die Kombination häufig auftretender Ereignisse (Ermüdungserscheinungen sowie verschiedene Betriebszustände von OWEA) existieren Bemessungsvorschriften für die zeitgleich auftretende veränderliche Einwirkungsparameter sogenannten Scatter-Diagrammen entnommen werden. Über das kombinierte Auftreten von extremen veränderlichen Einwirkungen bei OWEA ist hingegen bisher wenig bekannt. Bestehenden Kombinationsregeln des Hochbaus sind für die hochdynamisch beanspruchten Tragstrukturen von OWEA weitgehend ungeeignet. Besser geeignet sind mehrdimensionale Extremwertverteilungen, welche die Korrelation mehrerer Zufallsvariablen einbeziehen. Bestehende Wahrscheinlichkeitsmodelle mit mehrdimensionalen Extremwertverteilungen sind äußerst datenintensiv und daher eher für simulierte als für gemessene Zeitreihen von Einwirkungsparametern geeignet. In dieser Arbeit werden daher auf Grundlage von synchron erfassten Messzeitreihen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe zuverlässige Kombinationsmethoden für veränderliche Einwirkungsparameter mit definierter mittlerer Wiederholungsperiode entwickelt, die durch einen geringen Datenbedarf gekennzeichnet sind. Neben der zeitlichen Korrelation extremer Wind- und Seegangsereignisse wird erstmals auch die Richtungsabhängigkeit von veränderlichen Einwirkungsparametern berücksichtigt. Die am Beispiel der genannten Einwirkungsparameter erarbeiteten Kombinationsansätze sind auf beliebige, synchron erfasste veränderliche Einwirkungsparameter übertragbar und ermöglichen bei einem geeigneten Stichprobenumfang die Bestimmung von Kombinationswerten für extreme Einwirkungsparameter mit mittleren Wiederholungsperioden von mehreren Jahrzehnten. Für die Beschreibung von Kombinationen, welche nicht durch das Maximum einer der Einwirkungsparameter gekennzeichnet sind, werden Näherungsverfahren angegeben. Die Kombinationsmethoden werden anhand von Messzeitreihen von zwei unterschiedlichen Messstandorten validiert. Durch den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Messstandorte und Beobachtungszeiträume werden Erkenntnisse zur Ortsabhängigkeit und zum Einfluss des Stichprobenumfangs auf die Zuverlässigkeit der Kombinationsmethoden gewonnen. Abschließend werden die Ergebnisse der entwickelten Kombinationsansätze und eines bestehenden gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsmodells anhand identischer Daten verglichen. Insbesondere die in dieser Arbeit entwickelte zeitlich bedingte Kombinationsmethode führt bei begrenztem Stichprobenumfang zu einer zuverlässigeren Beschreibung der Kombination der betrachteten Einwirkungsparameter als die anderen Methoden.

#### Schlüsselwörter:

Windeinwirkung, Welleneinwirkung, Einwirkungskombination, Offshore-Windenergie

# Inhaltsverzeichnis

A	Abstract				
K	KurzfassungV				
In	Inhaltsverzeichnis				
S	Symbolverzeichnis				
Glossar					
1	Ein	leitun	g	1	
	1.1	Mot	ivation	1	
	1.2	Ziel	setzung	2	
	1.3	Glie	derung der Arbeit	3	
2	Sta	nd dei	r Forschung	5	
	2.1	Win	deinwirkung	5	
	2.2	Wel	leneinwirkung	6	
	2.3	Sim	ulation extremer Beanspruchungen von Offshore Windenergieanlagen	7	
	2.4	Kon	nbination von Wind und Wellen in derzeitigen Regelwerken	9	
	2.5	Kor	relation von Wind und Welle	.10	
	2.5	.1	Manuelle Vorhersagemodelle und spektrale Seegangsbeschreibung	. 10	
	2.5	.2	Numerische Hindcast Simulationen	.13	
	2.5.3		Gemeinsame Wahrscheinlichkeitsmodelle für Wind- und Seegangsereignisse	.16	
3	Me	thodik	٢	. 19	
	3.1	Ana	lyse von Extremereignissen	. 19	
	3.1.1		Total-Sample-Methode	.22	
	3.1.2		Peak Over Threshold Methode	.23	
	3.1	.3	Block-Maxima-Methode	.25	
	3.2	Kon	nbinationsregeln für Einwirkungen im Hochbau	. 29	
	3.2	.1	Turkstra-Modell	.29	

	3.2.	2	Borges-Castanheta-Modell	9
4	Me	ssdate	en	3
	4.1	Mes	ssstandorte und Messwerterfassung	3
	4.1.	1	FINO1	4
	4.1.	2	FINO3	7
	4.2	Mes	ssdatenaufbereitung	8
5	Una	ıbhän	ngige Extremereignisse4	1
	5.1	Ext	remwertanalyse4	2
	5.1.	1	Parameterschätzung4	3
	5.1.	2 V	/erteilungsfunktionen4	9
	5.1.	3	Datengrundlage	0
	5.1.	4	Extremwertbestimmung	7
	5.2	Wir	ndgeschwindigkeit $V_{ref}$ und signifikante Wellenhöhe $H_{s50}$	9
	5.3	Ein	fluss der Einwirkungsparameter $V_{ref}$ und $H_{s50}$ auf die Strukturbeanspruchung	0
6	Me	thode	en zur Kombination extremer Einwirkungsparameter7	5
	6.1	Ric	htungsbedingter Kombinationsansatz7	5
	6.1.	1	Richtungsabhängigkeit extremer Wind- und Wellenereignisse	7
	6.1.	2	Methodenentwicklung7	8
	6.1.	3	Anwendung und Verifizierung der Methode	3
	6.1.	4	Methodenbewertung	9
	6.1.	5	Richtungsbedingter Kombinationsansatz am Standort FINO39	1
	6.2	Zeit	tlich bedingter Kombinationsansatz9	4
	6.2.	1	Methodenentwicklung9	5
	6.2.	2	Anwendung und Verifizierung der Methode10	1
	6.2.	3	Methodenbewertung10	6
	6.2.	4	Zeitlich bedingter Kombinationsansatz am Standort FINO310	7
	6.3	Kor	nbinationsansätze im Vergleich11	1
7	Zus	amm	enfassung und Ausblick	7
	7.1	Zus	ammenfassung11	7
	7.2	Aus	sblick	1
8	Lite	eratur	verzeichnis	3
A	. Anł	nang	Konturplotverfahren	1

B.	Anh	ang Extremwertanalyse	133
E	8.1	Windgeschwindigkeit	133
E	8.2	Signifikante Wellenhöhe	138
C.	Anh	ang richtungsabhängige Extremereignisse	143
D.	Anh	ang zeitlich bedingte Extremereignisse	145
Γ	<b>D</b> .1	Verteilung der extremen und bedingten Messwerte	145
Γ	<b>D</b> .2	Windgeschwindigkeit	145
Γ	<b>)</b> .3	Signifikante Wellenhöhe	148

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Buchstaben

а	Parameter der Gumbel-I-max-Verteilung und der Gammafunktion					
$C(\tau)$	Autokovarianzfunktion					
E	Einwirkung					
exp(x)	Exponential function von x					
$f_X(x)$	Verteilungsdichte der Zufallsvariable X					
$F_{X}(x)$	Verteilungsfunktion der Zufallsvariable X					
$H_s$	signifikante Wellenhöhe					
H <sub>sN</sub>	extreme signifikante Wellenhöhe mit einer mittleren Wiederholungsperiode von $N$ Jahren					
k	Parameter der Frechet-II-max-, Gamma-, Pareto-, Weibull-III-max- und Weibull-III- min-Verteilung					
Κ	Beobachtungszeitraum					
n	Zählvariable					
Ν	Anzahl von Belastungszuständen, mittlere Wiederholungsperiode für extreme Bedingungen					
$n_s$	Anzahl von Sektoren					
P(x)	Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Zufallsvariable X					
$Q_i$	zeitlich veränderliche Einwirkung					
R	Mittlere Wiederholungsperiode in Jahren					
t	Zeit, Parameter der Gammafunktion					
Т	Bezugszeitraum					
$T_B$	Bezugszeitintervall					
$T_i$	Grundzeitintervall					

и	Parameter der Gumbel-I-max-Verteilung
V	Windgeschwindigkeit
$V_{hub}$	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
$V_N$	extreme Windgeschwindigkeit (über zehn Minuten gemittelt) mit einer mittleren Wiederholungsperiode von $N$ Jahren
Vref	Bezugswindgeschwindigkeit (im Allgemeinen der Mittelwert über zehn Minuten von der extremen Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe mit einer mittleren Wiederholungs- periode von 50 Jahren)
W	Parameter der Weibull-III-max und Weibull-III-min-Verteilung
<i>X</i> 0	Schwellenwert
X <sub>i</sub>	Realisierung der Zufallsvariable X an der Stelle <i>i</i>
$x_p$	Quantilwert
$X_R$	Realisierung der Zufallsvariable $X$ mit der mittleren Wiederholungsperiode $R$
$\bar{x}$	Stichprobenmittelwert

# Griechische Buchstaben

α	Signifikanzniveau, Parameter der Pareto- und Rayleigh-Verteilung
$\alpha_i$	Wichtungsfaktor
β	Zuverlässigkeitsindex
$\beta_{c}$	Zuverlässigkeitsindex nach Cornell
Г	Gammafunktion
Δ	Differenz
θ	Wirkrichtung eines Einwirkungsparameters
λ	Mittlere Wiederholungsperiode von Ereignissen pro Jahr, Parameter der Exponential- und Gamma-Verteilung
μ	Erwartungswert einer Zufallsgröße
v	Parameter der Frechet-II-max-Verteilung
σ	Standardabweichung
τ	Parameter der Exponential-, Frechet-II-max, Rayleigh- und Weibull-III-min-Verteilung, Lag
$\Phi$	Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung
$\Phi^{-1}$	inverse Funktion von $\Phi$
Ψ	Kombinationsbeiwert
$\psi_ heta$	richtungsabhängiger Kombinationsbeiwert
ω	Parameter der Weibull-III-max- und Weibull-III-min-Verteilung

# Glossar

Beanspruchung	Auswirkung einer Einwirkung (Last), z.B. Spannung, Schnittgröße oder Verformung.		
Beobachtungszeitraum	Zeitintervall, für den eine Zeitreihe statistisch ausgewertet wird.		
Bezugszeitintervall	gewähltes Zeitintervall für die Bestimmung eines Extremwerts einer veränderlichen Einwirkung/eines veränderlichen Einwirkungsparameters (z. B. Jahresextremwerte).		
Bezugszeitraum	gewählter Zeitraum für die statistische Beurteilung veränderlicher Einwirkungen.		
Charakteristischer Wert	Bezugsgröße einer Zufallsvariablen für den Teilsicherheitsbeiwert, z.B. 98 %- oder 5 %-Quantile für Einwirkungen oder Widerstände (z.T. auch als repräsentativer Wert bezeichnet).		
Einwirkung	auf das Tragwerk einwirkende Kraft- oder Verformungsgröße.		
Einwirkungsparameter	physikalische Größe, mit der eine Einwirkung charakterisiert wird. Hier: Windgeschwindigkeit in m/s und signifikante Wellenhöhe in m.		
Erwartungswert	(engl. mean value, mean) Mittelwert, entspricht dem statistischen Moment erster Ordnung.		
Extremwertanalyse	Im Allgemeinen ist die Abschätzung von Extremwerten mit mittleren Wiederholungsperioden größer als der Beobachtungszeitraum gemeint.		
FORM	(engl. First-Order-Reliability Method) Zuverlässigkeitsmethode erster Ordnung: Zuverlässigkeitsberechnung mit Hilfe von zwei statistischen Momenten (z.B. Mittelwert und Varianz) und einer linearisierten Grenzzustandsfunktion.		
Grenzzustand	(engl. limit state) Zustand, bei dessen Überschreitung das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt.		
Hindcast	eine Methode zur Überprüfung eines mathematischen Modells unter Verwendung historischer Daten. In der Ozeanographie und Meteorologie wird dieses Reanalyseverfahren häufig zur Simulation eines mathematisch beschriebenen und in Zeit und Raum ausgedehnten Seegangs anhand von punktuell erfassten Wind- und Bathymetriedaten genutzt.		

Inferenz(engl. inference or statistical inference) Schluss von der Stichprobe auf die<br/>Grundgesamtheit.

Konfidenzintervall auch Vertrauensbereich oder Vertrauensintervall. Begriff aus der mathematischen Statistik, der die Lageschätzung eines Parameters präzisiert (z.B. Mittelwert). Das Vertrauensintervall schließt einen Bereich um den geschätzten Wert des Parameters ein, der – vereinfacht gesagt – mit einer zuvor festgelegten Wahrscheinlichkeit die wahre Lage des Parameters trifft.

KonfidenzniveauAussagewahrscheinlichkeit bzw. statistische Sicherheit, dass die<br/>Ergebnisgröße in einem definierten Konfidenzintervall liegt.

Konturplotverfahren Graphisches Verfahren zur Darstellung von unabhängigen Zufallsvariablen einer gemeinsamen gewählten mittleren Wiederholungsperiode.

- Kurzzeitstatistik Umweltparameter werden statistisch analysiert und für die Dauer weitgehend stationärer Verhältnisse durch signifikante Parameter beschrieben. Beispielsweise werden für den Seegang stationäre Verhältnisse über einen Zeitraum von drei Stunden angenommen und der Seegang durch eine konstante signifikante Wellenhöhe und Wellenperiode für diesen Zeitraum charakterisiert.
- Langzeitstatistik Die Variabilität der in der Kurzzeitstatistik beschriebenen signifikanten Parameter über längere Zeiträume wird durch die Langzeitstatistik beschrieben. Die Beschreibung erfolgt meist durch Scatter-Diagramme oder Verteilungsfunktionen.

Probabilistisch auf stochastischer Grundlage abgeleitet.

QuantilDefinierter Wert in einer Verteilungsfunktion zur Festlegung einer Unter-<br/>bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit.

Refraktion Änderung der Ausbreitrichtung von Wellen.

Restrisiko Risiko für eine Konstruktion oder Anlage, die nach dem Stand der Technik auf Grund eines sicherheitstheoretischen Bemessungsverfahrens erstellt wurde. Das Restrisiko ergibt sich aus der Unmöglichkeit, alle möglichen zukünftigen Ereignisse zu erfassen.

- Risiko Wagnis, Gefahr, Verlustmöglichkeit bei einer unsicheren Unternehmung. Produkt aus der Auftrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses (Eintrittswahrscheinlichkeit) und des beim Ereigniseintritt zu erwartenden Schadensausmaßes (z.B. Kosten).
- Seekartennull (engl. Lowest Astronomical Tide, LAT) Bezugsfläche für Wassertiefen. Das Seekartennull als "niedrigst möglicher Gezeitenwasserstand" wird auch von extremen Springtiden kaum unterschritten.

Shoaling	Effekt der gleichzeitigen Verringerung der Wellenlänge und Vergrößerung der Wellenhöhe beim Einlaufen von Tiefwasserwellen in einen Flachwasserbereich.
Sicherheit	Sachlage, bei der das Risiko kleiner als das Grenzrisiko ist.
Sicherheitsbeiwert	Multiplikator für Beanspruchbarkeiten und Beanspruchungen, oft auch Synonym für den Sicherheitsfaktor.
Sicherheitsfaktor	Verhältnis von Beanspruchbarkeit R zu Beanspruchung E.
Sicherheitsindex $\beta$	vgl. Zuverlässigkeitsindex $\beta$ .
Sicherheitszone	Differenz von Beanspruchbarkeit <i>R</i> und Beanspruchung <i>E</i> . Die zugehörige zentrale Sicherheitszone bezieht sich auf Mittelwerte, die Quantilsicherheitszone auf Quantile (vgl. auch Sicherheitsfaktor).
Standardabweichung $\sigma$ , s	(engl. standard deviation) Wurzel aus der Varianz.
Stochastik	befasst sich mit der Beschreibung und Untersuchung von zufälligen Ereignissen. Die Stochastik umfasst die mathematischen Teilgebiete Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik.
Teilsicherheitsbeiwert	Multiplikator für Beanspruchung oder Divisor für Beanspruchbarkeit (charakteristische Werte) zur Umrechnung der stochastischen Variablen in Bemessungswerte.
Varianz $\sigma^2$	(engl. variance) entspricht dem zentrierten Moment zweiter Ordnung. Die Varianz beschreibt die Streuung der Zufallsvariablen um den Erwartungswert.
Variationskoeffizient v	(engl. variation coefficient) dimensionsloser Koeffizient als anschauliches Maß der Streuung bezüglich des Mittelwerts (Standardabweichung dividiert durch Mittelwert).
Vertrauensbereich	siehe Konfidenzniveau
Vertrauensintervall	siehe Konfidenzintervall
Wiederholungsperiode	(engl. return period or recurrence interval) Zeit in Jahren zwischen zwei Überschreitungen von Extremwerten, die nur mit einer relativ kleinen Wahrscheinlichkeit erreicht oder überschritten werden. Üblicherweise wird bei extremen Einwirkungen die mittlere Wiederholungsperiode angegeben.
Zeitinvariant	zeitunabhängig
Zeitvariant	zeitabhängig
Zentrale Sicherheitszone	vgl. Sicherheitszone

Zufallsvariable	(engl. random variable) eine Größe, die zufällig einen der Werte der Merkmalsausprägung im vordefinierten Intervall annehmen kann.
Zuverlässigkeitsindex $\beta$	Hilfswert zur Berechnung operativer Versagenswahrscheinlichkeiten auf Grundlage der standardisierten Normalverteilung.

## 1 Einleitung

#### 1.1 Motivation

Die Kenntnis von kombinierten Wind- und Seegangsereignissen ist für zahlreiche Anwendungen wie beispielsweise eine sichere und wirtschaftliche Auslegung von Offshore-Strukturen, aber auch für die Festlegung von Wetterfenstern für Bau- und Wartungsarbeiten von großer Bedeutung. Die ersten in größerer Anzahl installierten Offshore-Strukturen waren Förderplattformen der Öl- und Gasindustrie. Im Vergleich zu heutigen Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) spielte bei diesen Bauwerken die Kombination von extremen Wind- und Seegangsereignissen nur eine untergeordnete Rolle, da ihre Tragstrukturen überwiegend durch hydrodynamische Einwirkungen und weniger stark durch Windeinwirkungen beansprucht werden. Die Abminderung untergeordneter Einwirkungen hat einen geringeren Einfluss auf Beanspruchungen der Tragstruktur. Der Einfluss von Lastkombinationen nimmt zu, je stärker die Auswirkungen unterschiedlicher Einwirkungen übereinstimmen. OWEA werden je nach Tragstruktur und Anlagengröße etwa zu gleichen Teilen durch Wind und hydrodynamische Einwirkungen beansprucht, vgl. SEIDEL und KELMA (2012). In einer quasi-statischen Bemessung nehmen die Wind- und Welleneinwirkungen quadratisch bzw. exponentiell mit linear steigender Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe zu. Bereits kleine Abweichungen dieser Einwirkungsparameter führen daher zu nicht unerheblichen Änderungen in den resultierenden Schnittgrößen. Wind- und Welleneinwirkungen wirken zudem periodisch auf die dynamisch reagierende Tragstruktur ein. Eine transiente Berechnung unter Berücksichtigung der Strukturdynamik kann daher zu einer weiteren Erhöhung der resultierenden Schnittgrößen führen. Ob es zu einer dynamische Überhöhung der Schnittgrößen gegenüber einem statischen Berechnungsansatz kommt und wie hoch die Überhöhung ausfällt, ist vom Verhältnis der anregenden Frequenz zur Eigenfrequenz von der Tragstruktur bzw. von Tragstrukturbestandteilen abhängig. Ein realitätsnaher Kombinationsansatz ist daher insbesondere für OWEA, aber auch für andere Offshore Bauwerke von Bedeutung. Für die Auslegung von Hoch- und Ingenieurbauwerken an Land sind Kombinationsregeln für als gleichzeitig auftretend angenommene Einwirkungen normativ festgeschrieben, siehe unter anderem DIN EN 1990 (2010). Diese Kombinationsregeln wurden für statische bzw. quasi-statische Einwirkungen entwickelt. Auf dynamisch hoch beanspruchte Tragstrukturen von OWEA sind sie nur sehr begrenzt übertragbar. Bei OWEA werden für die Bestimmung der Strukturbeanspruchung Simulationsrechnungen unter Berücksichtigung der Gesamtanlagendynamik und Anlagensteuerung durchgeführt. Die Ermittlung der Einwirkungen und Beanspruchungen erfolgt innerhalb der Simulationsrechnungen unter

Berücksichtigung der Tragwerks- bzw. Anlagenreaktion auf Grundlage vorgegebener Einwirkungsparameter wie Windgeschwindigkeit, Wellenhöhe, Strömungsgeschwindigkeit etc.. Anders als im Hoch- und Ingenieurbau ist daher für OWEA ein Kombinationsmodell für Einwirkungsparameter und nicht für Einwirkungen sinnvoll. Für Ermüdungsuntersuchungen und die Untersuchung verschiedener Betriebszustände von OWEA werden solche Simulationsrechnungen mit zeitlich bedingten Einwirkungsparametern durchgeführt. Die bedingten Einwirkungsparameter wie beispielsweise die gleichzeitig mit einer Windgeschwindigkeit auftretende signifikante Wellenhöhe oder der zu einer Wellenhöhe gehörende Periodenbereich werden sogenannten Scatter-Diagrammen entnommen, vgl. Abschnitt 2.4. Für häufig auftretende Umweltereignisse wird auf diese Weise die Korrelation unterschiedlicher Einwirkungsparameter berücksichtigt. Über das kombinierte Auftreten von extremen Einwirkungen bei OWEA ist bisher hingegen wenig bekannt. Ursache hierfür ist in erster Linie eine unzureichende Datengrundlage. Für Aussagen zur Kombination extremer Einwirkungsparameter mit mittleren Wiederholungsperioden von mehreren Jahrzehnten sind langjährige, gleichzeitig erfasste Messzeitreihen der zu untersuchenden Parameter erforderlich. Die mittlere Wiederholungsperiode gibt den Erwartungswert des Zeitraums zwischen Extremwerten einer Einwirkung, die nur mit einer relativ kleinen Wahrscheinlichkeit erreicht oder überschritten werden, an. Die deutsche Bundesregierung hat daher im Jahr 2002 den Bau von mehreren Offshore Forschungsplattformen zur Erkundung der Umgebungsbedingungen zukünftiger OWEA beschlossen. Mit den in Nord- und Ostsee installierten Forschungsplattformen FINO1 bis FINO3 ("Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee", vgl. NEUMANN et al. (2004)) wird eine Datengrundlage geschaffen, welche Aussagen zur zeitlichen Korrelation und Richtungsabhängigkeit maßgebender Einwirkungsparameter ermöglicht. Aussagen hinsichtlich extremer Umweltereignisse wie beispielsweise eines Sturmes mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren und der dabei zu erwartenden signifikanten Wellenhöhen liefern bisher lediglich die gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsmodelle nach JOHANNESSEN et al. (2001) und WINTERSTEIN et al. (1993), vgl. Abschnitt 2.5.3. Diese Modelle sind äußerst datenintensiv und basieren auf zusammengesetzten Messzeitreihen unterschiedlicher Standorte oder auf numerisch simulierten Daten. Die Richtungsabhängigkeit der Einwirkungsgrößen wird in diesen Modellen nicht berücksichtigt. Ein verlässliches und praktikables Kombinationsmodell, basierend auf Messzeitreihen zur Bestimmung gleichzeitig auftretender extremer Wind- und Seegangsereignisse in der südlichen Nordsee, existiert bisher nicht.

#### 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, ein auf gleichzeitig gemessenen Umweltparametern beruhendes Kombinationsmodell für extreme Wind- und Seegangsereignisse zu entwickeln. Dieses Modell soll auf Grundlage langjähriger Messzeitreihen der Forschungsplattform FINO1 entwickelt und die Übertragbarkeit bzw. Standortabhängigkeit an entsprechenden Messzeitreihen der Forschungsplattform FINO3 überprüft werden. Das Ergebnis, nicht jedoch der methodische Ansatz der an den genannten Standorten durchzuführenden Kombination der Einwirkungsparameter ist standortabhängig. Das Kombinationsmodell soll für extreme Einwirkungsparameter mit der bei OWEA üblichen mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren entwickelt werden, aber auf beliebige Bezugszeiträume übertragbar sein. Das Ergebnis soll eine zuverlässige Kombinationsmethode sein, die sich durch einen geringen Datenbedarf auszeichnet und dadurch neben simulierten Hindcast-Daten auch Messzeitreihen nutzen kann. Neben der zeitlichen Korrelation extremer Wind- und Seegangsereignisse soll erstmals auch deren Richtungsabhängigkeit berücksichtigt werden. Die zu entwickelnde Kombinationsmethode soll auf geeignete, gemessene oder simulierte, Zeitreihen anderer Einwirkungsparameter übertragbar sein.

#### 1.3 Gliederung der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird der aktuelle Stand der Forschung zur Korrelation von (extremen) Wind- und Seegangsereignissen dargestellt, vgl. Kapitel 2. Hierzu werden zunächst die derzeit übliche separate Abschätzung von Wind- und Welleneinwirkungen auf OWEA sowie deren gemeinsamer Ansatz nach aktuellen Regelwerken beschrieben. Danach werden aktuelle Ansätze aus der Forschung zur Beschreibung der Korrelation von Wind- und Seegangsereignissen dargestellt. Die unterschiedlichen methodischen Ansätze lassen sich in manuelle Vorhersagemodelle und spektrale Seegangsbeschreibung, numerische Hindcast-Simulationen und gemeinsame Wahrscheinlichkeitsmodelle unterteilen. Die methodischen Ansätze werden beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung zur Kombination extremer Umweltereignisse bewertet.

In Kapitel 3 werden bestehende Methoden erläutert, auf die im Rahmen dieser Arbeit zurückgegriffen wird. Verschiedene Methoden der Extremwertanalyse und bestehende Kombinationsregeln für Einwirkungen werden detailliert beschrieben. Außerdem wird das spezifische methodische Vorgehen bei der Last- bzw. Beanspruchungsermittlung bei OWEA durch Simulationsrechnungen am dynamischen Gesamtsystem dargelegt.

Die Datengrundlage für die statistischen Auswertungen wird in Kapitel 4 beschrieben. Aufgeführt sind die Messstandorte, Messparameter und die zugrunde gelegten Beobachtungszeiträume für die weitere Auswertung. Ebenfalls beschrieben werden die Datenaufbereitung und der Aufbau einer Datenbank mit zeitlich einander zugeordneten Einwirkungsparametern.

In Kapitel 5 wird ein einheitliches methodisches Vorgehen für Extremwertanalysen von Messzeitreihen der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe festgelegt. Um die Modellunsicherheiten für den zu entwickelnden Kombinationsansatz so gering wie möglich zu halten, werden hierzu umfangreiche Sensitivitätsanalysen für unterschiedliche Verfahren der Stichprobenerhebung, verschiedene Verteilungsfunktionen, Schätzverfahren und Bezugszeitintervalle bzw. Schwellenwerte durchgeführt. Die Ergebnisse werden miteinander verglichen und anhand von verteilungsunabhängigen Anpassungstests bewertet. Mit dem im Anschluss gewählten Verfahren zur Extremwertanalyse werden

die Einwirkungsparameter  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  unabhängig voneinander für die untersuchten Standorte bestimmt.

Die Entwicklung und anschließende Validierung von Kombinationsmethoden für extreme Einwirkungsparameter findet in Kapitel 6 statt. Auf Grundlage der Richtungsabhängigkeit der betrachteten Einwirkungsparameter wird in Abschnitt 6.1 der richtungsbedingte Kombinationsansatz entwickelt. In Abschnitt 6.2 wird der zeitlich bedingte Kombinationsansatz basierend auf der zeitlichen Korrelation der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe entwickelt. Die Methoden werden auf Basis der gleichzeitig erfassten Messzeitreihen der Forschungsplattform FINO1 erarbeitet und durch Anwendung auf Daten der Forschungsplattform FINO3 verifiziert. Der Vergleich der Ergebnisse liefert zudem Erkenntnisse zur Ortsabhängigkeit kombinierter Extremereignisse und zum Einfluss unterschiedlich großer Beobachtungszeiträume auf die Zuverlässigkeit der Kombinationsansätze. Abschließend werden die Methoden miteinander sowie mit dem bestehenden Ansatz nach JOHANNESSEN et al. (2001) verglichen und hinsichtlich Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Praktikabilität bewertet.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst, Empfehlungen für den Einsatz der entwickelten Kombinationsmethoden aufgeführt und im Ausblick Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsarbeiten angegeben.

# 2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird auf die Ermittlung und Modellierung separater Wind- und Welleneinwirkungen, deren Kombination nach aktuellen Regelwerken sowie nach dem Stand der Forschung eingegangen. Außerdem werden die Hintergründe der offshorespezifischen Beanspruchungsermittlung und das Vorgehen dazu erläutert. Auf unterschiedliche Verfahren der Extremwertanalyse und bestehende Kombinationsregeln für Einwirkungen im Hochbau wird in Kapitel 3 eingegangen. Die dort aufgeführten Methoden werden in den weiteren Untersuchungen angewendet bzw. bilden die Grundlage für den zu entwickelnden Kombinationsansatz.

#### 2.1 Windeinwirkung

Zur Bestimmung der Windeinwirkungen auf OWEA sind Kenntnisse der atmosphärischen Grenzschicht, insbesondere die auftretenden Windgeschwindigkeiten, Windgeschwindigkeitsänderungen und Windrichtungen von Bedeutung. Eine Beschreibung der in gängigen Regelwerken aufgeführten Windmodelle für OWEA findet sich in GRÜNBERG und GÖHLMANN (2010). Die Veränderung der mittleren Windgeschwindigkeit über die Höhe wird durch das Windgeschwindigkeitsprofil beschrieben. Eine allgemeine Formulierung auf Grundlage der *Monin-Obukov-Theorie* findet sich in BUSINGER et al. (1971). Die Windgeschwindigkeiten innerhalb der für OWEA maßgebenden atmosphärischen Grenzschicht untersuchten unter anderem MAAT et al. (1991) sowie YELLAND und TAYLOR (1996). Grundlage dieser Untersuchungen waren punktuelle Messungen ohne oder mit einer nur sehr geringen Höhenauflösung. LANGE et al. (2004) untersuchten an verschiedenen Standorten in der Ostsee Windgeschwindigkeiten und -richtungen bis zu einer Höhe von 50 m. Diese Zeitreihen umfassen zwei bis drei Jahre und unterliegen aufgrund ihrer geringen Entfernung zur Küste dem Landeinfluss.

Um die Beanspruchungen von OWEA infolge Windeinwirkungen realistisch abschätzen zu können ist eine Auflösung des Windgeschwindigkeitsprofils über die Höhe wichtig. Für den Standort der FINO1-Messplattform wurden höhenaufgelöste Untersuchungen der atmosphärischen Grenzschicht durch TÜRK (2008) durchgeführt. Die dabei über einen Zeitraum von vier Jahren ausgewerteten Windgeschwindigkeiten erlaubten zudem erste Extremwertabschätzungen im Bereich der Nabenhöhen moderner OWEA. Untersuchungen zur Rauigkeit der Meeresoberfläche sowie deren Einfluss auf das Windgeschwindigkeitsprofil wurden von BUSINGER et al. (1971) und WU (1985) durchgeführt. Die geringere Rauigkeit der Meeresoberfläche gegenüber dem Festland schlägt sich in derzeitigen Regelwerken in einem schnelleren Anstieg der Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe seeseitiger Anlagen nieder. Die natürliche Schwankung der Windgeschwindigkeit um die mittlere Windgeschwindigkeit in einem zehnminütigen Intervall wird als Turbulenz bezeichnet, vgl. DNV-RP-C205 (2010). Die Turbulenzintensität ergibt sich aus dem Verhältnis der Standardabweichung zum Zehn-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit. SMITH (1980), CSANADY (2001) und TÜRK (2008) führten hierzu Untersuchungen auf dem Meer durch, wo Wellen maßgeblich die Turbulenzintensität in den unteren Luftschichten beeinflussen. Neben den aufgeführten Untersuchungen zu ungestörten Windverhältnissen spielt die gegenseitige Beeinflussung von OWEA in Windparks eine Rolle bei der Lastermittlung. Sogenannte Windparkeffekte wurden unter anderem in BARTHELMIE et al. (2006), NEUMANN et al. (2009) und SANDERSE et al. (2011) anhand von Simulationsrechnungen untersucht.

#### 2.2 Welleneinwirkung

Grundlage für die Bestimmung von Strukturbeanspruchungen infolge Welleneinwirkungen ist die mathematische Beschreibung von Wellen. Diese begann Anfang des 19. Jahrhunderts mit der Trochoidalen Wellentheorie von GERSTNER (1809). Mit den Annahmen der Rotation von Wasserteilchen auf Orbitalbahnen und der Abnahme der Orbitalbahnradien zum Meeresboden hin, kann diese Wellentheorie als Grundlage aller darauffolgenden Theorien angesehen werden. In den folgenden Jahrhunderten wurden weitere Wellentheorien wie die lineare Wellentheorie nach Airy und Laplace, vgl. AIRY (1845), entwickelt. Lineare Wellentheorien sind gekennzeichnet durch geringe Wellensteilheit, ausschließlichen Energietransport durch die Welle und eine rein lineare mathematische Beschreibung. Die Stokes-Wellentheorien höherer Ordnung sind eine Weiterentwicklungen der Airy-Wellentheorie, vgl. SCHWARTZ (1974). Darüber hinaus wurden nichtlineare Wellentheorien erarbeitet, wie die von DEAN (1965) entwickelte Stromfunktion. Nichtlineare Effekte sind beispielsweise das Aufsteilen oder Brechen von Wellen in geringen Wassertiefen. Die mathematische Beschreibung erfolgt nicht mehr ausschließlich linear. Weitere Formulierungen der Stromfunktion folgten, siehe auch SOBEY (1989) und SOBEY (1992). Die Stromfunktion wird bei allen Formulierungen mit Hilfe von Fourier-Reihen berechnet. Detaillierte Beschreibungen gängiger Wellentheorien findet sich in CLAUSS et al. (1988), HAPEL (1990), DEAN und DALRYMPLE (1991) und MITTENDORF (2006). Die äußere Form der Welle und damit auch die verwendete Wellentheorie hängen von der Wellenperiode und -höhe sowie der Wassertiefe ab. Angaben zu den Anwendungsbereichen verschiedener Wellentheorien finden sich in GL-IV-2 (2012), DIN EN 61400-3 (2010) sowie DNV-OS-J101 (2007). Durch die mathematische Beschreibung von Wellen wurde die Lastermittlung aus der Wasserpartikelkinematik möglich. Bei im Verhältnis zur Wellenlänge kleinen Durchmessern wird hierzu in der Regel das Verfahren nach MORISON et al. (1950) verwendet. Für große Strukturdurchmesser im Verhältnis zur Wellenlänge werden Verfahren basierend auf der Diffraktionstheorie eingesetzt, siehe MAC CAMY und FUCHS (1954). In GRÜNBERG und GÖHLMANN (2010) und SCHMIDT et al. (2014) wird die Abweichung in den Ergebnissen zwischen den beiden Berechnungsmethoden anhand von Beispielrechnungen quantifiziert.

Der Seegang an einem Beobachtungspunkt kann durch eine (unendliche) Summe von Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen, Phasen und Amplituden verstanden werden. Zur stochastischen Beschreibung des Seegangs wurden sogenannte Seegangsspektren entwickelt. Mit Hilfe dieser Spektren lässt sich der unregelmäßige Seegang durch Superposition mehrerer sinusförmiger Wellen darstellen, vgl. GODA (2010). Die gebräuchlichsten Spektren zur analytischen Beschreibung des Seegangs sind das Spektrum nach PIERSON und MOSKOWITZ (1963) und das Jonswap-Spektrum, siehe HASSELMANN et al. (1973). Da die Seegangsspektren nur für lineare Wellentheorien gültig sind, muss für die Beanspruchung durch unregelmäßige, nichtlineare Wellen der Einfluss der Nichtlinearität gesondert ermittelt werden, siehe DIN EN 61400-3 (2010). In ZIELKE et al. (2004) wird die spektrale Beschreibung des Seegangs um eine Richtungsfunktion ergänzt. Damit ist eine Berücksichtigung der Wellenrichtung in Seegangssimulationen möglich, was sich insbesondere auf den Ermüdungsnachweis positiv auswirkt, vgl. auch SCHAUMANN et al. (2004).

Richtungsabhängige Extremwellen und ihre Auswirkungen auf nicht rotationssymmetrische Offshore-Bauwerke werden in FORRISTALL (2004) untersucht. Forristall veranschaulicht den Einfluss von richtungsabhängigen Wellenhöhen auf die Versagenswahrscheinlichkeit bei nicht rotationssymmetrischen Offshore-Strukturen. Der von Forristall beschriebene Ansatz für ein konstantes richtungsunabhängiges Sicherheitsniveau ist für Strukturen mit unterschiedlichen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften in verschiedenen Wirkrichtungen von Bedeutung. Die praktische Bedeutung dieses Ansatzes wird in WEI et al. (2016) an einer Jacket-Gründungsstruktur veranschaulicht.

### 2.3 Simulation extremer Beanspruchungen von Offshore Windenergieanlagen

Die Beanspruchungsermittlung bei Offshore-Windenergieanlagen weicht deutlich von dem Vorgehen bei herkömmlichen Hochbauten ab. In diesem Abschnitt werden die nach dem heutigen Stand der Technik durchgeführten Simulationsrechnungen zur Beanspruchungsermittlung bei Windenergieanlagen erläutert. Die windenergieanlagen-spezifische Ermittlung der Beanspruchungen verdeutlicht, warum eine Übertragung bestehender Ansätze zur Einwirkungskombination aus dem Hochbau im Allgemeinen ungeeignet ist.

Anders als übliche Hochbauten sind Windenergieanlagen hochgradig dynamische Strukturen. Zudem beeinflusst die Anlagensteuerung die Strukturbeanspruchungen. Der Pitchwinkel, der die Verdrehung des Rotorblattes um seine Längsachse beschreibt und der Regelung der Leistung dient, veranschaulicht diesen Zusammenhang. Es ergeben sich signifikant andere Beanspruchungen, je nachdem ob das Rotorblatt in den Wind gedreht (Produktionsbetrieb) oder aus dem Wind gedreht ist (Leerlauf oder auch sogenanntes Trudeln der Anlage). Die im Hochbau übliche quasi-statische Bemessung ist für ausgeprägt dynamisch reagierende Tragstrukturen von Windenergieanlagen unter diesen zeitvarianten Einwirkungen ungeeignet. Stattdessen haben sich Simulationsrechnungen an Finite-Elemente- und/oder Mehrkörper-System-Modellen durchgesetzt, vgl. auch VORPAHL et al. (2013). Hierzu werden in

Richtlinien und Regelwerken Einwirkungssituationen definiert, siehe DIN EN 61400-3 (2010), GL-IV-2 (2012) und DNV-OS-J101 (2007). Diese sogenannten Design Load Cases (DLC) beschreiben unterschiedliche Betriebszustände und Umweltbedingungen, für die eine Bemessung mindestens erfolgen soll. In Absprache mit einem Zertifizierer können ggf. weitere Bemessungslastfälle erforderlich sein. Die Zertifizierung von Windenergieanlagen ist eine Typenprüfung durch unabhängige Sachverständige (Zertifizierer) und umfasst in der Regel die Prüfung der Konstruktion und der Lastermittlung. In Tab. 2-1 sind beispielhaft zwei Extremlastfälle aus der Zertifizierungsrichtlinie GL-IV-2 (2012) aufgelistet.

Design situation	DLC	Wind conditions	Marine conditions	Other conditions
Parked (standstill or idling)	6.1	EWM $V_{hub} = V_{ref}$	Irregular sea state with $H_{s50}$	MIS, MUL
	6.2	EWM $V_{hub} = V_{ref}$	Irregular sea state with $H_{s50}$	Grid loss, MIS, MUL

Tab. 2-1: Ausschnitt definierter Extremlastfälle der Zertifizierungsrichtlinie GL-IV-2 (2012)

Anders als für Hochbauten werden also keine Einwirkungen, sondern Einwirkungsparameter und Umweltbedingungen vorgegeben, für welche die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglickeit nachzuweisen sind. Auf Grundlage der DLC werden Simulationsrechnungen am dynamischen Gesamtsystem durchgeführt. Beispielsweise werden für den DLC 6.1 Simulationen mit einem turbulenten Windmodell bzw. einem extremen Seegangsmodell durchgeführt. Ein tubulentes Windmodell ist das aufgeführte extreme Windgeschwindigkeitsmodell (extreme wind speed model: EWM). Eingangsdaten dieses Modells sind ein Windgeschwindigkeitsprofil, die Referenzwindgeschwindigkeit V<sub>ref</sub> in Nabenhöhe und eine Turbulenzintensität. Die Simulation des Seegangs erfolgt beim DLC 6.1 beispielsweise mit dem Jonswap-Spektrum unter Ansatz der signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}$  und einer geeigneten Wellenperiode. Die Referenzwindgeschwindigkeit  $V_{ref}$  und die signifikante Wellenhöhe H<sub>s50</sub> werden hierbei aus Mess- oder Hindcastdaten aller Wirkrichtungen bestimmt. Überlagert werden diese Umweltbedingungen in den Simulationsrechnungen im Allgemeinem mit einem Strömungsmodell und einem maßgebendem Wasserstand, vgl. DIN EN 61400-3 (2010), GL-IV-2 (2012) und DNV-OS-J101 (2007). Als maßgebender Wasserstand gilt der Wasserstand, welcher gemeinsam mit den genannten Umweltbedingungen zu den ungünstigsten Beanspruchungen führt. Mit dem dynamischen Gesamtmodell wird auf diese Weise eine Mindestanzahl Simulationen von vorgeschriebener Dauer durchgeführt. Das Ergebnis an umfasst Beanspruchungszeitreihen, denen die maßgebende Beanspruchung für die Nachweisführung entnommen wird. Aufgrund der zahlreichen Lastfälle ergibt dies einen enormen Rechenaufwand für die Offshore-Windenergieanlagen. Beanspruchungsermittlung bei Das beschriebene Vorgehen gewährleistet eine realitätsnahe Erfassung von zeitvarianten Einwirkungen, des dynamischen Verhaltens der Gesamtstruktur und der Anlagensteuerung. Um die Vorteile der windenergiespezifischen Beanspruchungsermittlung beizubehalten, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Kombinationsmodell für Einwirkungsparameter entwickelt. Voraussetzung hierfür sind ausreichend lange, synchron erfasste Mess- oder Simulationszeitreihen von Wind- und Seegangsdaten.

#### 2.4 Kombination von Wind und Wellen in derzeitigen Regelwerken

In derzeitigen Regelwerken zur Auslegung und Bemessung von Offshore-Windenergieanlagen werden verschiedene Auslegungszustände unterschieden, vgl. Abschnitt 2.3. Diese lassen sich in Tragfähigkeit im Produktionsbetrieb, Betriebsfestigkeit im Produktionsbetrieb und Tragfähigkeit einer parkenden Anlage (extreme Umweltbedingungen) unterteilen. Die für das Bauwesen eher ungewöhnliche Unterteilung von Produktionsbetrieb und Parken resultieren aus der Anlagensteuerung von Windenergieanlagen. Bei hohen Windgeschwindigkeiten werden die Rotorblätter aus dem Wind gedreht und der Rotor steht weitgehend still. Dieser Zustand wird auch als Parken einer Windenergieanlage bezeichnet. Aus diesen unterschiedlichen Betriebszuständen resultieren verschiedene Lastsituationen für die in den Regelwerken unterschiedliche Kombinationen und Richtungsüberlagerungen von Wind- und Welleneinwirkungen gefordert werden.

Im Produktionsbetrieb werden Windgeschwindigkeiten zwischen der Einschalt- und Ausschaltwindgeschwindigkeit einer Anlage betrachtet. Für diese häufig auftretenden Windgeschwindigkeiten liegen je nach geplantem Standort der Anlage gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder Scatterdiagramme von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen vor. Im Rahmen der Tragfähigkeitsuntersuchung sind sämtliche Windgeschwindigkeiten in diesem Bereich mit den zugehörigen signifikanten Wellenhöhen zu untersuchen. Die zusätzlich für die Definition eines Seegangs erforderliche Wellenperiode ist so festzulegen, dass sie innerhalb des Periodenbereichs der angesetzten signifikanten Wellenhöhe liegt und maximale Beanspruchungen erzeugt. Der Periodenbereich kann dazu entweder aus Messdaten abgeleitet oder durch empirische Gleichungen näherungsweise bestimmt werden, vgl. z. B. DIN EN 61400-3 (2010) und GL-IV-2 (2012). Die Richtungsüberlagerung beider Umwelteinwirkungen wird in den genannten Regelwerken konservativ aus einer (der ungünstigsten) Richtung kommend angenommen. Liegen entsprechende Messdaten vor, steht es dem Konstrukteur jedoch frei, die Wechselbeziehung zwischen der mittleren Wind- und Wellenrichtung einzubeziehen. Für Betriebsfestigkeitsanalysen im Produktionsbetrieb sind die signifikante Wellenhöhe, spektrale Spitzenperiode und die Windgeschwindigkeit einer gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung zu entnehmen. Hierfür sind ausreichend lange Messungen, welche gegebenenfalls durch numerische Hindcast-Techniken ergänzt werden, erforderlich. Anders als bei der Tragfähigkeitsanalyse im Produktionsbetrieb wird bei der Betriebsfestigkeitsanalyse die Richtung von Wind und Welle im Allgemeinen als variabel angenommen. Beide werden in den aufgeführten Regelwerken zwar weiterhin aus einer Richtung kommend angenommen, jedoch entspricht die Streuung dieser gemeinsamen Wirkrichtung der tatsächlichen Richtungsverteilung beider Größen. Die Tragfähigkeitsanalyse unter extremen Umweltbedingungen (parkende Anlage) erfolgt anhand voneinander getrennt ermittelter Wind- und Welleneinwirkungen mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren. Die einzelnen Extremereignisse sind mittels

statistischer Methoden aus Messzeitreihen oder numerisch simulierten Zeitreihen zu bestimmen. Der Versatz von Wind- und Wellenrichtung ist zu berücksichtigen, wobei die ungünstigste Richtungskombination maßgebend ist. Gemäß gängigen Regelwerken sind die extremen Einzelereignisse konservativ zu überlagern, sofern keine gemeinsame Langzeitwahrscheinlichkeitsverteilung vorliegt. Im informativen Anhang der DIN EN 61400-3 (2010) wird in diesem Zusammenhang auf das Verfahren nach WINTERSTEIN et al. (1993) verwiesen. Dieses Verfahren ermöglicht eine Bestimmung von gemeinsamen Umweltparametern mit einer kombinierten mittleren Wiederholungsperiode. Auf das Verfahren von WINTERSTEIN et al. (1993) wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

#### 2.5 Korrelation von Wind und Welle

Es existieren verschiedene Ansätze, die das kombinierte Auftreten von Wind- und Seegangsereignissen beschreiben. Die Ansätze lassen sich in

- manuelle Vorhersagemodelle und spektrale Seegangsbeschreibung,
- numerische Hindcast-Simulationen und
- gemeinsame Wahrscheinlichkeitsmodelle

unterteilen, vgl. auch MITTENDORF (2006). Die manuellen Vorhersagemodelle und Methoden der spektralen Seegangsbeschreibung wurden zum Teil bereits in den Jahren zwischen 1940 und 1970 entwickelt. Da sie nach wie vor Anwendung finden, werden sie an dieser Stelle mit aufgeführt. Mit den manuellen Vorhersagemodellen und der spektralen Seegangsbeschreibung sowie den numerischen Hindcast-Simulationen wird nur die gemeinsame Kurzzeitstatistik beschrieben. Aussagen hinsichtlich extremer Umweltereignisse wie beispielsweise eines Sturms mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren und der dabei auftretenden maximalen signifikanten Wellenhöhe liefern lediglich die gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsmodelle nach JOHANNESSEN et al. (2001) und WINTERSTEIN et al. (1993). Sie basieren auf zusammengesetzten Messzeitreihen unterschiedlicher Standorte oder auf numerisch simulierten Daten. Ein verlässliches Modell, basierend auf Messzeitreihen zur Bestimmung gleichzeitig auftretender extremer Wind- und Seegangsereignisse in der südlichen Nordsee, existiert bisher nicht.

#### 2.5.1 Manuelle Vorhersagemodelle und spektrale Seegangsbeschreibung

Um die signifikante Wellenhöhe auf Grundlage bekannter Windverhältnisse zu beschreiben existieren zahlreiche empirische Ansätze. Als Datengrundlage hierfür dienen Beobachtungen von Schiffen aus oder lokale Messungen. Diese Ansätze liefern bei bekannten Windverhältnissen unmittelbar Aussagen zu den zu erwartenden Wellenhöhen. Jedoch sind sie aufgrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen in ihrer Anwendung beschränkt.

SVERDRUP und MUNK (1947) waren unter den Ersten, die Wellenhöhen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und -einwirklänge bestimmten. Aus theoretischen Überlegungen zum Energieeintrag vom Wind in die Welle und der Energieübertragung bei der Wellenbewegung sowie aus Seegangsbeobachtungen leiteten sie dimensionslose Gleichungen zur signifikanten Wellenhöhe in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, Windeinwirklänge und Windeinwirkdauer her. Dieser kombinierte, empirisch-analytische Ansatz war das erste weiter verbreitete Vorhersagemodell. Die Vorhersagekurven von Sverdrup und Munk wurden von BRETSCHNEIDER (1952) und BRETSCHNEIDER (1958) unter Verwendung zusätzlicher empirischer Daten erweitert. Dieser Vorhersage-Ansatz ist auch bekannt als die *Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB-Methode)* und ist gültig für ausgereiften Seegang im Tiefwasser, vgl. Abb. 2-1.



Abb. 2-1: Diagramm zur Vorhersage der signifikanten Wellenhöhe im Tiefwasser aus COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (Hrsg.) (1984)

NEUMANN und PIERSON (1966) ermittelten die in Gl. (2-1) und (2-2) angegebenen Verhältnisse zwischen der Windgeschwindigkeit  $U_m$  und der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  bzw. der Wellenperiode  $T_z$ .

$$H_s = \frac{0.21}{g} \cdot U_m^2 \tag{2-1}$$

$$T_z = 0.81 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{g} \cdot U_m \tag{2-2}$$

Diese Ansätze sind unabhängig von der Windeinwirkdauer und –länge und gelten nur für ausgereiften Seegang im Tiefwasser. Tiefwasser liegt ab einer Wassertiefe vor, welche mindestens der halben Wellenlänge  $\lambda$  entspricht, vgl. Abb. 2-2. Ab dieser Wassertiefe unterliegt die Welle nicht mehr dem Einfluss durch den Meeresgrund.



Abb. 2-2: Schematisch dargestellte Veränderung der Orbitalbahnen von Wasserteilchen beim Einlaufen der Welle in flaches Wasser aus ZIMMERMANN et al. (2004)

Neben den Ansätzen für das Tiefwasser existieren Vorhersagemodelle für Wellenhöhen in Wassertiefen, in denen der Meeresgrund die Wellenbildung beeinflusst. In COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (Hrsg.) (1984) ist ein Ansatz beschrieben, der erlaubt, den Energieeintrag vom Wind in die Wellen abzüglich der Energieverluste aus Reibung und Filtration am Meeresgrund schrittweise zu berechnen. Für die Berechnung des Energieeintrags und der Energieübertragung in der Wellenbewegung bedient sich diese Methode der Ansätze, die für das Tiefwasser entwickelt wurden. Die Abschätzung der Energieverluste aus Reibung und Filtration am Meeresgrund gehen auf Untersuchungen von BRETSCHNEIDER und REID (1953) zurück. Beide Anteile, Energieeintrag und Energieverluste, werden in dem Ansatz in COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (Hrsg.) (1984) numerisch kombiniert. Die Ergebnisse beinhalten Vorhersagekurven für die Wellenhöhe und die Wellenperiode im Flachwasser, vgl. Abb. 2-3.



Abb. 2-3: Diagramm zur Vorhersage der Wellenhöhe im Flachwasser (hier 6,0 m Wassertiefe) aus COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (Hrsg.) (1984)

Alle manuellen Vorhersagemodelle gelten für konstante Umgebungsbedingungen und legen der Berechnung einen Gleichgewichtszustand zwischen Wind und Welle zugrunde. Das heißt, diese Modelle setzen eine gleich bleibende Wassertiefe innerhalb einer Windeinwirklänge und eine konstante Windgeschwindigkeit aus einer Richtung für viele Stunden voraus. Mit diesen Vereinfachungen liefern die manuellen Vorhersagemethoden recht gute Ergebnisse für das mittlere Wind-Wellen-Verhalten, vgl. MITTENDORF (2006). Der Wellenhöhenbereich, der bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit auftreten kann, wird mit diesen Verfahren nicht beschrieben. Daher sind auch keine Aussagen zum kombinierten Auftreten von Extremereignissen möglich.

Unter der Annahme, dass einzelne Seegangszustände über Zeiträume von etwa drei Stunden stationär sind, wurden zur stochastischen Beschreibung des Seegangs sogenannte Seegangsspektren entwickelt. Von besonderer Bedeutung für die Offshore-Technik sind das Spektrum nach PIERSON und MOSKOWITZ (1963) und das JONSWAP-Spektrum nach HASSELMANN et al. (1973), vgl. auch Abschnitt 2.2. Das Pierson-Moskowitz-Spektrum beschreibt für eine konstante Windgeschwindigkeit die spektrale Energieverteilung der voll entwickelten Windsee. Unter voll entwickelter Windsee versteht man die sich infolge eines lokalen Windfelds einstellenden Wellen. Aus ihr lässt sich mittels Fourier-Analyse die Zusammensetzung eines Seegangs aus Sinuswellen unterschiedlicher Frequenz bestimmen. Das JONSWAP-Spektrum hingegen wird vornehmlich zur Beschreibung des Seegangs im Flachwasser und bei begrenzter Windeinwirklänge verwendet. Da beide Spektren die Windgeschwindigkeit in Beziehung zur signifikanten Wellenhöhe bzw. der Peak-Wellenperiode setzen, werden indirekt bereits Korrelationen dieser Eingangsgrößen berücksichtigt. Beide Spektren wurden auf Grundlage von Messungen entwickelt und dienen der Darstellung stationärer Kurzzeit-Seegangszustände. Aussagen zu gleichzeitig auftretenden Extremereignissen mit Seegangsspektren sind theoretisch möglich, erfordern jedoch sehr lange Simulationen und sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Seegangsspektren sind zur Darstellung von Kurzzeitseegangszuständen entwickelt worden und beruhen trotz ihrer weltweiten Verbreitung auf örtlich begrenzten Messungen.

#### 2.5.2 Numerische Hindcast Simulationen

In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden mehrere numerische Simulationsmethoden zur Erzeugung eines mathematisch beschriebenen und in Zeit und Raum ausgedehnten Seegangs entwickelt. Ziel dieser Methoden ist die Abschätzung der Seegangsverhältnisse an Orten, für die keine oder nur sehr wenige Informationen zum Seegang vorliegen. Voraussetzung hierfür sind gemessene oder simulierte Windzeitreihen und die Kenntnis der topographischen Gestalt des Meeresbodens. Innerhalb dieser Simulationen wird die Wirkung des Windes auf den Seegang und die Transformation des aus dem Tiefwasser in den Flachwasserbereich einlaufenden Seegangs berechnet. Sofern der unter diesen Randbedingungen simulierte Seegang die Realität gut abbildet, sind Aussagen zu Wellenhöhen und -perioden bei bekannter Windgeschwindigkeit möglich.

Die bestehenden numerischen Seegangsmodelle lassen sich in phasenauflösende und phasengemittelte Modelle unterscheiden. Die phasenauflösenden Modelle bilden die Wasserspiegelauslenkung in Raum und Zeit nach. Bei phasengemittelten Modellen wird die Wasserspiegelauslenkung durch eine spektrale Energiedichtefunktion beschrieben, bzw. durch eine Impulsdichtefunktion, falls die Strömung berücksichtigt wird. Die bekanntesten numerischen Seegangsmodelle sind WAVEWATCH III, vgl. TOLMAN (2009) und MITTENDORF et al. (2002), und SWAN, siehe HOLTHUIJSEN et al. (2003). WAVEWATCH III ist ein Wellenmodell der dritten Generation, das vom National Oceanic & Atmospheric Administration / National Center of Environmental Prediction (NOAA/NCEP) in den USA entwickelt wurde. Das Modell eignet sich insbesondere für Tiefwasserbereiche. Da Diffraktionseffekte und tiefenbedingtes Wellenbrechen in diesem Modell unberücksichtigt bleiben, sind die Ergebnisse für küstennahe Bereiche zunehmend ungenau. Das numerische Seegangsmodell SWAN (Simulating Waves Nearshore) ist ein Flachwassermodell, das an der Technischen Universität Delft entwickelt wurde. Im Gegensatz zu Tiefwasserwellen, welche fast ausschließlich durch den Wind beeinflusst werden, spielen hier Effekte wie Bodenreibung, Shoaling, Refraktion, tiefenbedingtes Wellenbrechen und nichtlineare Wellen-Wellen-Interaktion zunehmend eine Rolle. Diese Effekte werden vom Seegangsmodell SWAN berücksichtigt; es eignet sich daher besonders für küstennahe Seegangssimulationen. Vergleiche von numerischen Seegangssimulationen mit Messzeitreihen wurden in MITTENDORF et al. (2002), MITTENDORF et al. (2004), ZIMMERMANN et al. (2004) und MITTENDORF (2006) durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Effekte, die von den verschiedenen numerischen Modellen berücksichtigt werden, ist der Grad der Übereinstimmung am jeweiligen Standort stark vom eingesetzten Modell abhängig. Untersuchungen von MITTENDORF (2006) am Standort Nordseeboje 2 (150 km westlich von Sylt) zeigen, dass unter Verwendung eines geeigneten Simulationsmodells der momentane Seegang trotz einer Überschätzung der Häufigkeit kleiner signifikanter Wellenhöhen H<sub>s</sub> und einer Unterschätzung mittlerer signifikanter Wellenhöhen  $H_s$  insgesamt recht gut abgebildet werden kann, vgl. Abb. 2-4.



Abb. 2-4: Relative Häufigkeit der gemessenen und simulierten signifikanten Wellenhöhe *H*<sub>s</sub> nach MITTENDORF (2006)

Die auf Grundlage der Mess- und Simulationszeitreihen extrapolierten Extremwerte zeigen jedoch deutliche Abweichungen, vgl. Abb. 2-5. Je nach mittlerer Wiederholungsperiode liegen die auf Grundlage der Simulationsdaten extrapolierten charakteristischen Werte bis zu 37 % über den charakteristischen Werten, welche auf Grundlage der Messwerte extrapoliert werden. Weitere Auswertungen von MITTENDORF (2006) ergeben geringere Differenzen zwischen den Extremwerten, wenn statt des gesamten Datensatzes Jahresextremwerte als Extrapolationsgrundlage verwendet werden. Die Bestimmung einer geeigneten Verteilung zur Approximation der Mess- und Simulationswerte wird hierbei jedoch für kürzere Beobachtungszeiträume zunehmend ungenau.



Abb. 2-5: Auf Grundlage von Messwerten und Hindcast-Simulationen bestimmte Extremwerte der signifikanten Wellenhöhe unterschiedlicher mittlerer Wiederholungsperioden (Daten nach MITTENDORF (2006))

Die Ergebnisse von numerischen Hindcast Simulationen können zur Untersuchung der Wind-Wellen-Korrelation genutzt werden, da Windbedingungen eine Eingangsgröße und Seegangsbedingungen eine Ausgangsgröße darstellen. Numerische Hindcast Simulationen bilden dabei die Kurzzeitstatistik für viele Jahre oder Jahrzehnte nach. Direkte Aussagen zur Kombination von extremen Einwirkungsparametern üblicher mittlerer Wiederholungsperioden sind im Allgemeinen nicht möglich. Die simulierten Messzeitreihen können jedoch als Eingangsdaten für bestehende Kombinationsansätze verwendet werden, vgl. Abschnitt 2.5.3.

Dem Vorteil, dass sehr lange Beobachtungszeiträume simuliert werden können, stehen die Abweichungen zwischen Messungen und Simulationen gegenüber. Insbesondere für gemeinsam auftretende Extremereignisse ist der Einfluss aus der Simulation recht groß, vgl. Abb. 2-5. Ein auf Simulationen basierender Kombinationsansatz für Extremereignisse ist mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

# 2.5.3 Gemeinsame Wahrscheinlichkeitsmodelle für Wind- und Seegangsereignisse

Für gleichzeitig gemessene oder simulierte Wind- und Wellendaten (Numerische Hindcast Simulationen) an einem Ort wurden mehrere Wahrscheinlichkeitsmodelle für die Beschreibung eines gemeinsamen Auftretens unterschiedlicher Umweltparameter entwickelt. WINTERSTEIN et al. (1993) führten für das sogenannte Konturplotverfahren die inverse First Order Reliability Method (iFORM) ein, bei der eine Wahrscheinlichkeitstransformation von zwei unkorreliert standardnormalverteilten Zufallsgrößen  $U_1$  und  $U_2$  in ein gemeinsam verteiltes Wertepaar, in diesem Fall die Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe, durchgeführt wird. Im Raum der standardnormalverteilten Zufallsgrößen können sämtliche Wertepaare so bestimmt werden, dass sie einer festgelegten Überschreitungswahrscheinlichkeit entsprechen. Die Zufallsgrößen  $U_1$  und  $U_2$ werden hierzu so variiert, dass sie auf einem Kreis mit dem Radius  $\beta$  liegen, vgl. Gl. (2-3).

$$\beta = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \tag{2-3}$$

Der Radius  $\beta$  bestimmt sich aus der Auftrittswahrscheinlichkeit  $P_f$  einer betrachteten Zufallsvariable X mit einer festgelegten mittleren Wiederholungsperiode, vgl. WINTERSTEIN et al. (1993). Als Beispiel ist in Gl. (2-4) der Radius  $\beta$  für die Auftrittswahrscheinlichkeit eines extremen Zehn-Minuten Mittelwerts mit einer mittleren Wiederholungsperiode von R Jahren angegeben.

$$\beta = \Phi^{-1} \left( 1 - P_f(X) \right) = \Phi^{-1} \left( 1 - \frac{1}{6 \cdot 24 \cdot 365 \cdot R} \right)$$
(2-4)

Der in Gl. (2-4) aufgeführte Term  $6 \cdot 24 \cdot 365 \cdot R$  gibt die Anzahl der Zehn-Minuten-Mittelwerte während der mittleren Wiederholungsperiode *R* an. Der Konturplot von zwei oder mehr Zufallsvariablen mit einer gemeinsamen mittleren Wiederholungsperiode ergibt sich bei diesem Verfahren aus den zuvor ermittelten inversen Verteilungsfunktionen. Unter der Annahme, dass die Windgeschwindigkeit eine randverteilte Zufallsvariable und die signifikante Wellenhöhe eine weitere, durch die Windgeschwindigkeit bedingt verteilte Zufallsvariable darstellt, sind in Gl. (2-5) und Gl. (2-6) die resultierenden Zufallsvariablen *V* und *H<sub>s</sub>* dargestellt. Die resultierenden Zufallsvariablen weisen für eine Berechnung des Radius  $\beta$  nach Gl. (2-4) eine mittlere Wiederholungsperiode von *R* Jahren auf.

$$V = F_V^{-1}\left(\Phi(U_1)\right) \tag{2-5}$$

$$H_{s} = F_{H_{s}|V}^{-1} \left( \Phi(U_{2}) \right)$$
(2-6)

Die inversen Verteilungsfunktionen ergeben sich für die als randverteilt angenommene Zufallsvariable direkt aus gemessenen oder simulierten Zeitreihen. Die inverse Verteilungsfunktion der bedingt verteilten Zufallsvariable wird für Verteilungsparameter in Abhängigkeit der randverteilten Zufallsvariable angegeben. Hierzu wird die randverteilte Zufallsvariable klassiert und die Verteilung der

bedingten Zufallsvariable in jeder Klasse separat mit einer Verteilungsfunktion des gleichen Typs, aber mit abweichenden Verteilungsparametern approximiert. Die Verteilungsparameter werden dabei durch ein geeignetes Schätzverfahren ermittelt. Die sich in Abhängigkeit der randverteilten Zufallsvariablen einstellenden Verläufe der Verteilungsparameter werden durch Näherungsgleichungen beschrieben. Diese Näherungsgleichungen ersetzen die Verteilungsparameter in der inversen Verteilungsfunktion der bedingten Zufallsvariable. Die inverse Verteilungsfunktion ist damit lediglich von der randverteilten Zufallsvariable abhängig und kann für die nach Gl. (2-3) bestimmte standardnormalverteilte Zufallsgröße  $U_2$  ausgewertet werden, vgl. Gl. (2-6). Die zweite Koordinate der Wertepaare des Konturplots ergibt sich nach Gl. (2-5) für die nach Gl. (2-3) ermittelten zugehörige standardnormalverteilte Zufallsgröße  $U_1$ . Die Berechnung von Konturlinien für zwei Zufallsvariablen ist schematisch im Anhang A aufgeführt. Grafisch aufgetragen ergeben sich Konturplots, wobei alle sich auf den Konturgrenzen befindlichen Ereignisse die gleiche, zuvor festgelegte Überschreitungswahrscheinlichkeit aufweisen. Das an dieser Stelle exemplarisch an zwei Zufallsvariablen erläuterte Verfahren ist auf eine beliebige Anzahl von Zufallsvariablen anwendbar.

WINTERSTEIN et al. (1993) haben das Konturplotverfahren auf Hindcast-Daten von Wind, Wellen und Strömung in der Nordsee angewendet. Das Ergebnis umfasst Konturplots unterschiedlicher mittlerer Wiederholungsperioden für die Seegangsparameter Peakperiode und signifikante Wellenhöhe sowie Strömungsgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe, vgl. Abb. 2-6.



Abb. 2-6: Konturplots unterschiedlicher mittlerer Wiederholungsperioden für die signifikante Wellenhöhe  $H_s$  und Peakperiode  $T_p$  (links) sowie die signifikante Wellenhöhe  $H_s$  und Strömungsgeschwindigkeit U aus WINTERSTEIN et al. (1993)

JOHANNESSEN et al. (2001) entwickelten für die nördliche Nordsee Konturplots für die mittlere Windgeschwindigkeit, signifikante Wellenhöhe und spektrale Spitzenperiode. Die spektrale Spitzenperiode ist die Periode des absoluten spektralen Energiemaximums. Das Verfahren ist vergleichbar mit dem Ansatz von WINTERSTEIN et al. (1993). Es wird jedoch auf drei anstatt auf zwei Zufallsvariablen angewendet und verwendet andere Verteilungsfunktionen, welche an die Wellenparameter der nördlichen Nordsee angepasst sind. Als Datengrundlage dienen zusammengesetzte Messungen von

mehreren Öl- und Gasplattformen und einem Wetterschiff nordöstlich von Großbritannien. Die Messzeitreihen wurden für Zeiträume, für die keine Messdaten vorliegen, durch Hindcasts ergänzt.

Das Konturplotverfahren setzt gleichzeitig erfasste Zufallsvariablen voraus. In dem für die Auslegung von Offshore Strukturen relevanten Bereich extremer gemessener oder simulierter Werte existieren im Allgemeinen nur sehr wenige bedingte Werte. Für zuverlässige Aussagen zur Kombination von extremen Werten sind daher sehr lange Beobachtungszeiträume erforderlich, was vermutlich ein wesentlicher Grund ist, warum bisherige Konturplots auf Grundlage von Hindcastdaten bzw. zusammengesetzten Messzeitreihen unterschiedlicher Standorte ermittelt wurden. Das Ergebnis ist damit stark davon abhängig, wie repräsentativ die zusammengesetzten oder simulierten Messzeitreihen für einen Standort sind. Untersuchungen zur Abweichung von Extremwertanalysen basierend auf Hindcast- und Messdaten eines Standorts sind in MITTENDORF (2006) aufgeführt, vgl. Abschnitt 2.5.2.

Für die Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe und mittleren Nulldurchgangsperiode (Periode aller Wasserspiegelauslenkungen, welche die mittlere Wasserstandslinie schneiden) sowie für die Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit wurde in MITTENDORF (2006) ein Wahrscheinlichkeitsmodell für die südliche Nordsee entwickelt, vgl. Abb. 2-7.



Abb. 2-7: 3D-Fläche der erwarteten mittleren Wellenperiode als Funktion der signifikanten Wellenhöhe und der mittleren Windgeschwindigkeit nach MITTENDORF (2006)

MITTENDORF (2006) verwendet, ebenso wie JOHANNESSEN et al. (2001), den Ansatz nach MELING et al. (2000) mit einer gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung für die untersuchten Einwirkungsparameter. Anders als die zuvor vorgestellten Methoden basiert dieser Ansatz jedoch allein auf Messdaten. Mittendorf verwendet hierfür eine gemeinsame Messzeitreihe der FINO1-Forschungsplattform für einen Zeitraum von 20 Monaten. Das Modell stellt das gemeinsame Auftreten von Kurzzeitereignissen dar. Das gemeinsame Auftreten von Extremereignissen betrachtet Mittendorf in diesem Ansatz nicht.
## 3 Methodik

In diesem Kapitel werden bestehende Methoden beschrieben, welche wichtig für das Verständnis der Arbeit sind und in dieser Anwendung finden. Die aufgeführten Methoden unterteilen sich in Methoden zur Analyse von Extremereignissen und in Methoden zur Kombination von Einwirkungen.

#### 3.1 Analyse von Extremereignissen

Zur Abschätzung von Extremereignissen mit langen mittleren Wiederholungsperioden existieren verschiedene statistische Verfahren, vgl. auch Abb. 5-1. Voraussetzung für alle Verfahren ist eine ausreichend große Stichprobe von Mess- oder Simulationsdaten, durch welche auf die Grundgesamtheit und Auftrittshäufigkeit von Extremereignissen geschlossen werden kann. Je größer der Stichprobenumfang, desto zuverlässiger kann auf die Grundgesamtheit geschlossen werden. Dabei unterschieden sich die gängigen Verfahren zur Extremwertabschätzung durch die der Auswertung zugrunde liegende Stichprobe, vgl. COLES (2001). Um von der Stichprobe auf charakteristische Werte mit einer definierten mittleren Wiederholungsperiode zu schließen, werden die Daten klassiert und anschließend durch eine Dichtefunktion mathematisch beschrieben, vgl. Abb. 3-1.



Abb. 3-1: Schematische Darstellung eines klassierten Merkmals X (z.B. Windgeschwindigkeiten) und angepasster Dichteverteilung  $f_X(x)$ 

Durch Integration der Verteilungsdichte  $f_X(x)$  erhält man die Verteilungsfunktion  $F_X(x_i)$ , siehe Gl. (3-1). Verteilungsdichte und –funktion einer Stichprobe stellen ein mehr oder weniger genaues Abbild der Grundgesamtheit dar.

$$F_X(x_i) = P(x \le x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} f_X(x) \, dx$$
(3-1)

Dabei bezeichnet  $F_X(x_i)$  die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert *x* kleiner oder gleich  $x_i$  ist. Es gilt, dass die Fläche unterhalb der Verteilungsdichte gleich eins ist, vgl. Gl. (3-2). Die Wahrscheinlichkeit  $P(x \le x_i)$  ist somit gleich dem Flächeninhalt unterhalb Verteilungsdichte im Intervall  $-\infty < x \le x_i$ , vgl. auch FISCHER (2001).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_X(x) \, dx = 1 \tag{3-2}$$

Im Bauwesen sind meist Werte  $x_i = x_p$  von Interesse die mit einer hohen oder niedrigen Wahrscheinlichkeit P über- oder unterschritten werden. Der Wert  $x_p$  wird als Quantilwert bezeichnet. Für die Betondruckfestigkeit wäre beispielsweise der 5 %-Quantilwert  $x_{p=0.05}$  relevant, also der Wert der Druckfestigkeit, den im hypothetischen Fall unendlich vieler Prüfungen (Grundgesamtheit) nur 5 % der Ergebnisse unterschreiten oder gerade erreichen, vgl. ZILCH und ZEHETMAIER (2010). Für Windgeschwindigkeiten dagegen wäre in der Regel der 98 %-Quantilwert  $x_{p=0.98}$  von Bedeutung, also der Wert der Windgeschwindigkeit, der im hypothetischen Fall unendlich vieler Jahresextremwerte der Windgeschwindigkeit von 98 % der Ergebnisse unterschritten oder gerade erreicht wird. Im Bauwesen werden die Quantile von Verteilungen als charakteristische Werte bezeichnet. Im Sinne einer zuverlässigkeitsorientierten Bemessung werden im Allgemeinen für Einwirkungen obere charakteristische Werte, d. h. hohe Quantilwerte, und für Widerstände untere charakteristische Werte, d. h. niedrige Quantilwerte (i. d. R. Werte des 5 %-Quantils) verwendet. Im Bauwesen werden charakteristische Werte  $x_k$  von Einwirkungen im Allgemeinen mit einer definierten mittleren Wiederholungsperiode angegeben. Der Eurocode definiert beispielsweise den charakteristischen Wert veränderlicher Einwirkungen für Hochbauten für eine mittlere Wiederholungsperiode von 50 Jahren, vgl. DIN EN 1990 (2010). Das zu einer mittleren Wiederholungsperiode R gehörende Quantil p kann mit Gl. (3-3) berechnet werden.

$$p = 1 - \frac{1}{R} \tag{3-3}$$

Für eine mittlere Wiederholungsperiode von R = 50 Jahre ergibt sich mit Gl. (3-3) der o. g. 98 %-Quantilwert  $x_{p=0.98}$  der Jahresextremwertverteilung. Der charakteristische Wert  $x_k$  mit einer definierten mittleren Wiederholungsperiode R berechnet sich in Abhängigkeit einer Quantile p aus der inversen Verteilungsfunktion, siehe Gl. (3-4).

$$x_k = F^{-1}(p) \tag{3-4}$$

Im Bauwesen umfassen übliche mittlere Wiederholungsperioden mehrere Jahrzehnte. Die in Gl. (3-3) aufgeführte relative Auftrittshäufigkeit von beispielsweise einmal in 50 Jahren setzt eine Jahresextremwertverteilung voraus. Um Quantile p unabhängig vom Bezugszeitintervall  $T_B$  der Extremwertverteilung zu bestimmen, kann Gl. (3-3) um die mittlere Wiederholungsperiode von Ereignissen  $\lambda$  ergänzt werden, siehe Gl. (3-5). Das Bezugszeitintervall  $T_B$  bezeichnet hierbei das gewählte Zeitintervall für die Bestimmung eines Extremwerts (z. B. ein Jahr für Jahresextremwerte).

$$p_{\lambda} = 1 - \frac{1}{\lambda \cdot R} \tag{3-5}$$

Die mittlere Wiederholungsperiode von Ereignissen  $\lambda$  ist definiert als die Anzahl von Ereignissen  $N_T$ , die während eines Beobachtungszeitraums von *K* Jahren auftritt, siehe Gl. (3-6). Beobachtungszeiträume, die nicht eine ganzzahlige Anzahl von Jahren umfassen, können dabei als Dezimalzahl angegeben werden, vgl. GODA (2010).

$$\lambda = \frac{N_T}{K} \tag{3-6}$$

Durch die in Gl. (3-5) dargestellte Ergänzung können Quantilwerte  $x_p$  bzw. charakteristische Werte  $x_k$ aus Datenmengen von Extremwerten mit beliebigen konstanten Bezugszeitintervallen bestimmt werden, die für eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit p erreicht werden. Für Jahresextremwerte eines beliebigen Beobachtungszeitraums K ergibt sich eine mittlere Wiederholungsperiode  $\lambda = 1$  und Gl. (3-5) vereinfacht sich zu Gl. (3-3). Der charakteristische Wert mit einer mittleren Wiederholungsperiode von R = 50 Jahren entspricht somit dem 98 %-Quantil der Verteilung der Jahresextremwerte  $x_k = F^{-1}(0,98)$ . Für Wochenextremwerte ergibt sich eine mittlere Wiederholungsperiode  $\lambda \approx 52,2$ , vgl. Gl. (3-6). Die mittlere Wiederholungsperiode ist dabei abhängig von der Anzahl der Schaltjahre im Beobachtungszeitraum. Der charakteristische Wert mit einer mittleren Wiederholungsperiode von R = 50 Jahren entspricht somit dem ~99,96 %-Quantil der Verteilung der Wochenextremwerte:  $x_k \approx F^{-1}(0,9996)$ . Mit den aufgeführten Gleichungen kann der charakteristische Wert unabhängig vom Bezugszeitintervall der Extremwerte einer Stichprobe bestimmt werden.

Die beschriebene Extremwertabschätzung erfolgt auf Grundlage einer Stichprobe. Die Elemente einer Stichprobe sind Bestandteil der Grundgesamtheit eines betrachteten Merkmals und werden aus Experimenten oder Beobachtungen erhoben. Die Stichprobe muss dabei dem Kriterium der Inferenz, also dem "Schluss von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit", siehe FISCHER (2001), genügen. Das Ziel der Stichprobenerhebung ist die Erfassung einer repräsentativen Stichprobe für die zu untersuchende Grundgesamtheit, wobei die Entnahme der Stichprobenelemente aus der Grundgesamtheit unabhängig voneinander erfolgt. Im Rahmen dieser Arbeit sind in erster Linie Methoden der Stichprobenerhebung erforderlich, welche die Extremwertverteilungen der untersuchten Merkmale repräsentieren. Hierfür existieren unterschiedliche Methoden, vgl. unter anderem COLES (2001) und GODA (2010). Die *Total-Sample-Methode, Peak-Over-Threshold-Methode* und *Block*-

*Maxima-Methode* werden im Rahmen dieser Arbeit zur Erhebung einer Datengrundlage für die Extremwertanalyse verwendet. Die genannten Methoden werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Bis auf die *Total-Sample-Methode* verwenden diese Methoden unterschiedlich definierte Extremwerte einer Stichprobe. Es handelt sich somit um eine eingeschränkte Zufallsauswahl, vgl. FISCHER (2001). Der Vergleich und die Bewertung dieser Methoden hinsichtlich der Eignung für die Extremwertanalyse der untersuchten Zufallsvariablen Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe erfolgt in Kapitel 5.

#### 3.1.1 Total-Sample-Methode

Die *Total-Sample-Methode* verwendet alle Daten aus einer Stichprobe eines Merkmals *X*, vgl. Abb. 3-2. Das können gemessene oder simulierte Werte eines Beobachtungszeitraums oder auch Ergebnisse experimenteller Versuche sein. Anders als bei den in den Abschnitten 3.1.2 und 3.1.3 beschriebenen Verfahren beschränkt sich die *Total-Sample-Methode* nicht auf Maximal- oder Minimalwerte als Datengrundlage für eine Extremwertanalyse, sondern nutzt die Information aller erfassten Daten. Wesentlicher Vorteil dieser Methode gegenüber den nachfolgend vorgestellten Methoden ist der größere Stichprobenumfang, welcher der Extremwertanalyse zugrunde gelegt wird. Insbesondere bei kleinen Stichproben aus Messungen eines kurzen Beobachtungszeitraums oder bei wenigen Versuchsergebnissen kann so zuverlässiger eine geeignete Verteilungsfunktion zur Beschreibung der Stichprobe bestimmt werden.



Abb. 3-2: Schematische Darstellung von Daten einer Stichprobe (rot), die gemäß der *Total-Sample-Methode* einer Extremwertanalyse zugrunde gelegt werden

Nachteilig für die Extremwertanalyse ist, dass ein Großteil der angesetzten Daten keine extremen Bedingungen abbildet. Der Verlauf von Verteilungsfunktionen im Bereich extremer Realisierungen wird maßgeblich von kleineren und mittleren Werten der Stichprobe beeinflusst. Die an eine solche Stichprobe angepassten Verteilungsfunktionen eignen sich daher insbesondere zur Beschreibung eines Merkmals um den Mittelwert. Da Extremwerte einer Grundgesamtheit oftmals einer anderen Verteilung folgen als die Grundgesamtheit selbst, ist diese Methode nur bedingt für Extremwertanalysen geeignet. Die unterschiedliche Häufigkeitsverteilung der Grundgesamtheit und ihrer Extremwerte ist schematisch in Abb. 3-3 abgebildet, vgl. auch KLINGMÜLLER und BOURGUND (1992).



Merkmalsausprägung x

Abb. 3-3: Schematische Darstellung einer Dichteverteilung für die Extremwertanalyse mit der *Total-Sample-Methode* (rot) und Dichteverteilungen der Extremwerte eines Bezugszeitintervalls  $T_B$  (grau)

Die beschriebenen statistischen Modelle schließen von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit. Solche statistischen Modelle sind nur für stochastisch voneinander unabhängige Stichprobenelemente gültig, vgl. FISCHER (2001). Bei der *Total-Sample-Methode* ist durch die Verwendung von aufeinander folgenden Messwerten dieses Kriterium oftmals nicht erfüllt, vgl. SPAETHE (1992) oder auch GODA (2010). Als Maß für die stochastische Abhängigkeit aufeinander folgender Werte einer Zeitreihe kann der Autokorrelationskoeffizient herangezogen werden. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten aufeinander folgenden Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und aufeinander folgenden Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe lassen hohe Autokorrelationskoeffizienten erwarten, was ein Merkmal für stochastisch voneinander abhängige Stichprobenelemente ist. Die Anforderung stochastisch unabhängiger Daten für die Extremwertanalyse wäre von der *Total-Sample-Methode* in diesen Fällen nicht erfüllt. Die Berechnung der Autokorrelationskoeffizienten der untersuchten Zufallsvariablen und die Bewertung der stochastischen Abhängigkeit der Stichprobenelemente erfolgt in Abschnitt 5.1.3.1.

#### 3.1.2 Peak Over Threshold Methode

Die *Peak-Over-Threshold-Methode* ist ein ursprünglich aus der Hydrologie stammendes Verfahren zur Erhebung einer Datenmenge von Maximalwerten aus einer Stichprobe oder Grundgesamtheit einer Zufallsvariable. Neben ihren klassischen Einsatzgebieten wie der Analyse von extremen Wasserständen und Wellenhöhen wird sie auch für Extremwertanalysen von Windgeschwindigkeiten eingesetzt, vgl. SIMIU und HECKERT (1996). Bei der *Peak-Over-Threshold-Methode* bilden lediglich Werte oberhalb eines zuvor definierten Schwellenwerts  $x_0$  die Datengrundlage für die anschließende Extremwertanalyse, siehe Abb. 3-4.



Abb. 3-4: Schematische Darstellung von Daten einer Stichprobe (rot), die gemäß der *Peak-Over-Threshold-Methode* für eine Extremwertanalyse zugrunde gelegt werden

Extremwertanalysen mit der *Peak-Over-Threshold-Methode* hängen von dem zuvor festgelegten Schwellenwert ab. Ein niedriger Schwellenwert führt zu einem größeren Stichprobenumfang, jedoch auch zu einem zunehmenden Einfluss von Messwerten weitab des gesuchten Extremwerts auf die Verteilungsfunktion, vgl. Abb. 3-5. Da Mittel- und Extremwerte einer Grundgesamtheit oftmals unterschiedlichen Verteilungsfunktionen folgen, vgl. Abschnitt 3.1.1, führt ein zu niedriger Schwellenwert unter Umständen zu ungeeigneten Verteilungsfunktionen in der Extremwertanalyse.



Merkmalsausprägung x

Abb. 3-5: Schematische Darstellung einer Dichteverteilung für die Extremwertanalyse mit der *Peak-Over-Threshold-Methode* (rot) mit Dichteverteilungen der Grundgesamtheit (schwarz) und der Extremwerte eines Bezugszeitintervalls (grau)

Ein (zu) hoher Schwellenwert führt zu einer geringen Anzahl von Extremwerten und großen Varianz in den Ergebnissen der Extremwertanalyse, vgl. COLES (2001). Für die daraus resultierenden, sehr kleinen Stichproben ist ein geeigneter Verteilungstyp meist nur unsicher festzulegen und die Schätzung von Verteilungsparametern unzuverlässig. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein geeigneter Schwellenwert für die untersuchten Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen auf Grundlage von

Sensitivitätsanalysen festgelegt, vgl. Abschnitt 5.1.3. Die stochastische Abhängigkeit der Daten von mittels der *Peak-Over-Threshold-Methode* ermittelten Stichproben nimmt mit abnehmenden Schwellenwerten zu. In GODA (2010) wird daher empfohlen, zunächst die Extremwerte eines definierten Bezugszeitintervalls zu bestimmen und die *Peak-Over-Threshold-Methode* anschließend auf die resultierende Stichprobe anzuwenden. Die Dauer eines geeigneten Bezugszeitintervalls kann, wie zuvor erläutert, mit einer Autokorrelationsfunktion abgeschätzt werden, siehe Abschnitt 5.1.3.1. Nach MATHIESEN et al. (1994) kann von stochastisch weitgehend unabhängigen Daten ausgegangen werden, wenn das Bezugszeitintervall der Extremwerte größer oder gleich dem Zeitschritt ist, für den die Autokorrelationsfunktion 0,3–0,5 ergibt. In Abschnitt 5.1.3 wird die stochastische Abhängigkeit von Extremwerten oberhalb unterschiedlicher Schwellenwerte und geeigneter Bezugszeitintervalle mittels Messzeitreihen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe untersucht.

#### 3.1.3 Block-Maxima-Methode

Die *Block-Maxima-Methode* stellt ein weiteres Verfahren zur Bestimmung einer Stichprobe von Maximalwerten für eine Extremwertanalyse dar. Insbesondere in der Sonderform der *Annual-Maxima-Methode* findet sie häufig Anwendung in der Extremwertanalyse von veränderlichen Einwirkungen im Hochbau, vgl. ZILCH und ZEHETMAIER (2010) und DIN EN 1990 (2010). Die *Block-Maxima-Methode* unterteilt die Stichprobe eines Merkmals in Bezugszeitintervalle  $T_B$  gleicher Dauer. Aus diesen Bezugszeitintervallen werden jeweils die Maximalwerte bestimmt, welche die Stichprobe für die weitere Extremwertanalyse bilden, siehe Abb. 3-6.



Abb. 3-6: Schematische Darstellung von Daten einer Stichprobe (rot), die gemäß der *Block-Maxima-Methode* einer Extremwertanalyse zugrunde gelegt werden. Die stochastisch unabhängigen Zufallsvariablen *max x* sind die Maximalwerte der Bezugszeiträume  $T_{Bi}$ 

Extremwertanalysen mittels der *Block-Maxima-Methode* hängen vom Bezugszeitintervall  $T_B$  der zugrunde gelegten Extremwerte ab. Die Häufigkeitsverteilung der Grundgesamtheit und ihrer Extremwerte ist schematisch in Abb. 3-7 abgebildet.



Merkmalsausprägung x



Ein kurzes Bezugszeitintervall  $T_B$  führt zu einer größeren Anzahl an Extremwerten. Da bspw. Tagesextremwerte ( $T_B = 1$  Tag) im Allgemeinen kleiner als Wochenextremwerte ( $T_B = 1$  Woche) sind, führt ein kurzes Bezugszeitintervall  $T_B$  jedoch auch zu einem zunehmenden Einfluss von Messwerten weitab des gesuchten Extremwerts. Ein (zu) kurzes Bezugszeitintervall führt, ebenso wie ein zu niedriger Schwellenwert bei der *Peak-Over-Threshold-Methode*, somit unter Umständen zu ungeeigneten Verteilungsfunktionen in der Extremwertanalyse. Sehr lange Bezugszeitintervalle führen zu einem geringen Stichprobenumfang. Die in Abschnitt 3.1.2 aufgeführten Unsicherheiten in der Wahl des Verteilungstyps und der Verteilungsparameter gelten sinngemäß. Geeignete Bezugszeitintervalle für die Extremwerte der untersuchten Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen werden in Abschnitt 5.1.3 festgelegt. Die Mindestdauer von Bezugszeitintervallen zur Gewährleistung stochastisch unabhängiger Extremwerte wird in Abschnitt 5.1.3.1 untersucht.

Ein Sonderfall der *Block-Maxima-Methode* ist die *Annual-Maxima-Methode*, bei der der Extremwertanalyse Extremwerte mit einem Bezugszeitintervall von einem Jahr zugrunde gelegt werden. Ein Vorteil dieser speziellen Form der *Block-Maxima-Methode* ist, dass die stochastische Unabhängigkeit der resultierenden Daten innerhalb einer Stichprobe in den allermeisten Fällen gewährleistet ist. Außerdem ist eine Extremwertanalyse auf Grundlage von Jahresextremwerten robuster im Vergleich zu Analysen, die auf Extremwerten mit kürzeren Bezugszeitintervallen basieren, vgl. COLES (2001), da jahreszeitliche Effekte, die bei vielen Umweltereignissen auftreten, bei aus Jahresextremwerten bestehenden Stichproben berücksichtigt werden. Voraussetzung für die Anwendung der *Annual-Maxima-Methode* ist eine entsprechend große Stichprobe gemessener oder simulierter Werte. Dieses Verfahren findet verbreitet Anwendung bei der Bestimmung von charakteristischen Einwirkungsparametern im Hoch- und Ingenieurbau. Charakteristische Einwirkungen wie beispielsweise Wind- und Schneelasten, deren charakteristische Werte im Mittel einmal in 50 oder 100 Jahren auftreten, werden üblicherweise mit der *Annual-Maxima-Methode* ermittelt, vgl. u. a. SCHEUERMANN (2002) und SCHAUMANN et al. (2007). In TUCKER und PITT (2001)

sowie GRÜNBERG und GÖHLMANN (2010) ist eine Sonderform der Annual-Maxima-Methode beschrieben. Das beschriebene Verfahren ist auf die Gumbel-I-max-Verteilung beschränkt und macht sich eine besondere Eigenschaft dieser Verteilungsfunktion zunutze. Die Form der Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion ist unabhängig vom Bezugszeitintervall, d. h. die Standardabweichung bleibt konstant. Ein verändertes Bezugszeitintervall führt zu einer Parallelverschiebung der Verteilungsfunktion um ln(N)/a entlang der Merkmalsachse, vgl. Gl. (3-9). Die Jahresextremwertverteilung auf Grundlage von Extremwerten des Bezugszeitintervalls  $T_B$  ergibt sich somit zu Gl. (3-7), wobei N die Anzahl der Extremereignisse pro Jahr angibt. Bei einem Bezugszeitintervall von einer Woche ergibt sich beispielsweise N = 52. Durch eine Schätzung der Verteilungsparameter a und u wird die Verteilungsfunktion an die Häufigkeitsverteilung der Messwerte angepasst.

$$F_{X,N}(x_N) = exp\left[-exp\left[-\alpha \cdot (x_N - u_N)\right]\right]$$
(3-7)

$$u_N = u_{T_B} + \frac{\ln(N)}{a} = u_{T_B} + \ln(N) \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \sigma$$
(3-8)

$$m_N = m_{T_B} + \frac{\ln(N)}{a} \tag{3-9}$$

Das zu einem charakteristischen Wert mit einer mittleren Wiederholungsperiode von R = 50 Jahren gehörende Quantil berechnet sich für das Bezugszeitintervall von einem Jahr zu p = 0,98, vgl. Gl. (3-3). Damit ergibt sich die inverse Verteilungsfunktion der Gumbel-I-max-Verteilung, siehe Gl. (3-7), basierend auf den Extremwerten des Bezugszeitintervalls  $T_B$  zu Gl. (3-10).

$$F_{\rm X}^{-1}(p=0.98) = u_{T_B} + \frac{\ln(N)}{a} - \frac{l}{a} \cdot \ln[-\ln(p=0.98)]$$
(3-10)

Mit dem beschriebenen Verfahren kann eine an Extremwerte mit beliebigen Bezugszeitintervallen angepasste Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion in eine Jahresextremwertverteilung transformiert werden. Das Verfahren ist unter anderem in SCHMIDT et al. (2014) beschrieben und wird dort auf signifikante Wellenhöhen angewendet.

Alternativ zur Verschiebung der Gumbelverteilung um ihren Mittelwert kann das Quantil p nach Gl. (3-5) angepasst werden. Die inverse Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion ergibt sich somit zu

$$F_{\mathrm{X}}^{-1}(p_{\lambda}) = u_{T_{B}} - \frac{l}{a} \cdot ln[-ln(p_{\lambda})], \qquad (3-11)$$

wobei das Quantil  $p_{\lambda}$  nach Gl. (3-5) berechnet wird. Dass beide Verfahren zu identischen Quantilwerten führen, kann durch Gleichsetzen der Gleichungen (3-10) und (3-11) nachgewiesen werden:

$$u_{T_B} + \frac{ln(N)}{a} - \frac{l}{a} \cdot ln[-ln(p = 0,98)] = u_{T_B} - \frac{l}{a} \cdot ln[-ln(p_{\lambda})]$$

$$\Leftrightarrow ln(N) - ln[-ln(p)] = -ln[-ln(p_{\lambda})]$$

$$\Leftrightarrow exp[ln[-ln(p)]] = exp[ln(N) + ln[-ln(p_{\lambda})]]$$

$$\Leftrightarrow ln(p) = N \cdot ln(p_{\lambda})$$

$$\Leftrightarrow exp[ln(p)] = exp[ln(p_{\lambda})]^{N}$$
(3-12)

Der dargestellte Ausdruck vereinfacht sich zu

$$p = 0.98 = p_{\lambda}^{N}$$
 bzw.  $F_{X}(p) = F_{X}(p_{\lambda})^{N}$ . (3-13)

Der in Gl. (3-13) dargestellte Zusammenhang wird u. a. in SPAETHE (1992) bestätigt und kann durch ein Zahlenbeispiel veranschaulicht werden. Nach Gl. (3-3) ergibt sich das zu einer mittleren Wiederholungsperiode von R = 50 Jahren gehörende Quantil für eine Jahresextremwertverteilung zu p = 0,98. Das einer gleichen mittleren Wiederholungsperiode entsprechende Quantil für beispielsweise eine Wochenextremwertverteilung ergibt sich nach Gl. (3-5) zu  $p_{\lambda} = 1-1/2600 \approx 0,9996$ . In einem Jahr liegen N = 52 Wochenextremwerte vor. Damit führt Gl. (3-13) zum Ergebnis  $(1-1/2600)^{52} = 0,98$ . Ein wesentlicher Vorteil des in Abschnitt 3.1 beschriebenen Verfahrens zur Anpassung des Quantilwerts ist dessen Unabhängigkeit von der Verteilungsfunktion. Die Verschiebung der Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion setzt die Unabhängigkeit der Standardabweichung vom Bezugszeitintervall voraus. Diese ist nur bei der Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion gegeben, vgl. TUCKER und PITT (2001). Für die zuverlässige Anwendung der Annual-Maxima-Methode ist der in dieser Arbeit betrachtete Beobachtungszeitraum von zehn Jahren zu kurz. Um die Verteilungsfunktion frei wählen zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit bei Anwendung der Block-Maxima-Methode mit der verteilungsunabhängigen Anpassung des Quantilwerts gearbeitet.

Die hier beschriebenen Methoden der Stichprobenerhebung beeinflussen das Ergebnis der Extremwertanalyse. So weichen die Ergebnisse von Extremwertanalysen mit der *Total-Sample-Methode* zum Teil stark von denen der *Block-Maxima-Methode* oder *Peak-Over-Threshold-Methode* ab, vgl. auch Abschnitt 5.2. In VAN VLEDDER et al. (1993) ergibt sich zum Beispiel mit der *Total-Sample-Methode* eine um 10 % höhere extreme Wellenhöhe mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 100 Jahren als mit der *Peak-Over-Threshold-Methode*, was auf den Einfluss geringerer Wellenhöhen in der Stichprobe zurückgeführt wird. Die Methoden der Stichprobenerhebung sind Bestandteil der zu entwickelnden Kombinationsansätze in der vorliegenden Dissertation und werden in Abschnitt 5.1.3 hinsichtlich ihrer Eignung verglichen. Ziel ist eine statistische Modellbildung, welche die Extremwertverteilung der betrachteten Zufallsvariablen optimal repräsentiert und eine Beschreibung der Kombination ermöglicht.

### 3.2 Kombinationsregeln für Einwirkungen im Hochbau

Zur Last- bzw. Einwirkungskombination gibt SPAETHE (1992) an: "Wirken auf ein statisches System mehrere zeitlich veränderliche Lasten ein, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß Extremwerte zusammenfallen, sehr gering, und es ist der Extremwert der Summe mehrerer Lastprozesse in der Regel kleiner als die Summe der Extremwerte." Diese für den Hochbau formulierte Annahme bildet die Grundlage für die bestehenden Kombinationsregeln des Hochbaus, welche auf TURKSTRA (1970) und BORGES und CASTANHETA (1971) zurückgehen. Bei Offshore-Tragstrukturen für Windenergieanlagen handelt es sich nicht um statische Systeme und demzufolge ist die Beschreibung der Kombination von Einwirkungsparametern zweckmäßiger als die von Einwirkungen, vgl. Abschnitt 2.3. Dennoch sind die grundlegenden Annahmen bestehender Kombinationsregeln wertvoll für die zu entwickelnden Kombinationsmethoden für Einwirkungsparameter von Offshore-Tragstrukturen. Die Kombinationsansätze von TURKSTRA (1970) und BORGES und CASTANHETA (1971) werden im Folgenden beschrieben. Die Regelung der Einwirkungskombination in aktuellen Normen des Hochbaus ist u. a. in DIN EN 1990 (2010) aufgeführt.

#### 3.2.1 Turkstra-Modell

Das gleichzeitige Auftreten von Einwirkungen mit ihren Maximalwerten ist im Allgemeinen sehr unwahrscheinlich. Für rechnerische Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit wurden vereinfachte Ansätze für die Kombination mehrerer Einwirkungen entwickelt. Viele Methoden gehen auf den Kombinationsansatz von TURKSTRA (1970) für veränderliche Einwirkungen zurück. Turkstra betrachtet verschiedene veränderliche und voneinander unabhängige Einwirkungen als ergodische Blockprozesse. Eine veränderliche Einwirkung  $Q_I$  wird dabei mit ihrem Größtwert als Leiteinwirkung betrachtet. Die übrigen veränderlichen Einwirkungen  $Q_{I>I}$ (Begleiteinwirkungen) werden mit dem jeweils zeitgleichen Momentanwert angesetzt. Jede veränderliche Einwirkung wird nach diesem Modell einmal als Leiteinwirkung angenommen. Es gibt demnach so viele Kombinationen wie gleichzeitig wirkende veränderliche Einwirkungen. Für die Bemessung ist die ungünstigste der auf diese Weise berechneten Einwirkungskombinationen maßgebend. Etwaige ungünstigere Einwirkungskombinationen, die nicht durch das Maximum einer der beteiligten Einwirkungen gekennzeichnet sind, werden mit dem Ansatz nicht erfasst.

#### 3.2.2 Borges-Castanheta-Modell

Aufbauend auf dem Vorschlag von TURKSTRA (1970) wurde das Borges-Castanheta-Modell entwickelt, vgl. BORGES und CASTANHETA (1971). Im Borges-Castanheta-Modell werden, wie auch beim Ansatz nach TURKSTRA (1970), veränderliche und voneinander unabhängige Einwirkungen als ergodische Blockprozesse betrachtet. Hierzu wird der Bezugszeitraum T jeder zeitvarianten Einwirkung in  $N_i$ Grundzeitintervalle mit jeweils konstanter Dauer  $T_i$  unterteilt, siehe Abb. 3-8. Dabei sind kleinere Grundzeitintervalle ganzzahlige Teiler der nächstgrößeren Grundzeitintervalle und des Bezugszeitraums. Für die Dauer der Grundzeitintervalle wird jeweils eine konstante Lastintensität  $Q_i$  angenommen.



Abb. 3-8: Bestimmung des Größtwerts  $E_{max}$  nach dem Borges-Castanheta-Modell aus GRÜNBERG (2004)

Die Verteilungsfunktion der Extremwerte  $F_{Q,max}(Q_i)$  berechnet sich nach Gl. (3-14), vgl. SPAETHE (1992).

$$F_{Q,max}(Q_i) = [F_i(Q_i)]^{N_i}$$
(3-14)

Die Anzahl der Grundzeitintervalle  $T_i$  im Bezugszeitraum T berechnet sich nach Gl. (3-15) für die veränderlichen Einwirkungen  $Q_i$ . Als Bezugszeitraum T wird in der Regel die geplante Nutzungsdauer des Tragwerks angesetzt, vgl. GRÜNBERG (2004).

$$N_1 = \frac{T}{T_1} \tag{3-15}$$

Der Kombinationswert  $\psi_{0,i}$  für extreme Einwirkungen berechnet sich nach Gl. (3-18), vgl. GRÜNBERG (2004). Der Kombinationswert  $\psi_0$  hängt dabei vom größten Grundzeitintervall  $T_1$  ab. Beispiele für Grundzeitintervalle  $T_1$  unabhängiger Einwirkungen sind u. a. in SPAETHE (1992) gegeben. Im Bauwesen wurden Wichtungsfaktoren eingeführt, um den Streuungseinfluss der einzelnen Zufallsvariablen zu berücksichtigen. Für die Einwirkung bzw. den Widerstand mit dem größten Streuungseinfluss (Leitwert) werden die Wichtungsfaktoren  $\alpha_{E,1}$  bzw.  $\alpha_{R,1}$ , und für alle anderen Einwirkungen und Widerstände (Begleitwerte)  $\alpha_{E,i}$  bzw.  $\alpha_{R,i}$  angenommen, vgl. Gl. (3-16) bzw. Gl. (3-17).

$$\alpha_{E,1} = \alpha_{R,1} = 1,0 \quad \text{Leitwert} \tag{3-16}$$

$$\alpha_{E,i} = \alpha_{R,i} = 0.4$$
 Begleitwert (3-17)

$$\Psi_{0,i} = \frac{F_{Q_{max}}^{-1} \left(\Phi(0,4 \cdot \beta_c)\right)^{N_1}}{F_{Q_{max}}^{-1} \left(\Phi(\beta_c)\right)^{N_1}} = \frac{F_{Q_{max}}^{-1} \left(\exp(-N_1 \cdot \Phi(0,4 \cdot \beta_c)\right)\right)}{F_{Q_{max}}^{-1} \left(\Phi(0,7 \cdot \beta)\right)}$$
(3-18)

Der dem Grundzeitintervall  $T_1$  entsprechende Zuverlässigkeitsindex  $\beta_c$  nach CORNELL (1969) berechnet sich nach Gl. (3-19).

$$\beta_c = -\Phi^{-1} \left[ \frac{\Phi(\alpha_E \cdot \beta)}{N_1} \right] \tag{3-19}$$

Das Borges-Castanheta-Modell kann dabei auch Einwirkungen mit dem Wert null während des Zeitintervalls  $T_1$  abbilden (z. B. außergewöhnliche Einwirkungen). Eine ausführliche Beschreibung des Borges-Castanheta-Modells mit Berechnungsbeispielen für Kombinationswerte ist in GRÜNBERG (2004) gegeben.

## 4 Messdaten

#### 4.1 Messstandorte und Messwerterfassung

Im Januar 2002 beschloss die deutsche Bundesregierung drei Forschungsplattformen in der Nord- und Ostsee (FINO1 bis FINO3) zur Erfassung von Einwirkungsparametern und Umweltbedingungen von Offshore-Windparks zu errichten. Die Forschungsplattformen FINO1 und FINO3 wurden in der südlichen Nordsee und die Plattform FINO2 in der südwestlichen Ostsee errichtet, vgl. Abb. 4-1.



Abb. 4-1: Standorte der Forschungsplattformen FINO1, FINO2 und FINO3

Im Rahmen dieser Arbeit werden Messdaten von den in der Nordsee installierten Plattformen FINO1 und FINO3 verwendet, siehe Abb. 4-2. Seit Inbetriebnahme der Plattformen in den Jahren 2003 (FINO1), 2007 (FINO2) und 2009 (FINO3) besteht deren Hauptaufgabe in der Erfassung von meteorologischen und ozeanographischen Daten sowie der ökologischen Begleitforschung in der Umgebung geplanter, genehmigter oder bereits installierter Offshore-Windparks.



Abb. 4-2: Forschungsplattformen FINO1 (links) und FINO3 (rechts) in der Nordsee

Mit Hilfe dieser Forschungsplattformen werden Messdaten relevanter Umwelt- und Einwirkungsparameter für Offshore-Windenergieanlagen über viele Jahre hinweg erfasst. Die zeitgleich erfassten Messzeitreihen der Wind- und Seegangsdaten der Plattformen FINO1 und FINO3 bilden die Datengrundlage für die stochastischen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit und werden im Folgenden vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Einwirkungsparameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung, signifikante Wellenhöhe und Wellenrichtung ausgewertet.

#### 4.1.1 FINO1

Die Forschungsplattform FINO1 wurde ca. 45 km nördlich der Insel Borkum (N 54° 0,86' E 6° 35,26') in rund 30 m Wassertiefe im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) errichtet. Für die Untersuchungen kombinierter Wind- und Seegangseinwirkungen im Rahmen dieser Arbeit sind insbesondere die in Tab. 4-1 aufgeführten Parameter von Bedeutung. Dargestellt sind die durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bereitgestellten Parameter. Die stochastischen Untersuchungen werden an Zehn-Minuten-Mittelwerten der Winddaten und Drei-Stunden-Mittelwerten der signifikanten Wellenhöhe bzw. Wellenrichtung durchgeführt. Um statistisch möglichst zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, wird ein zehnjähriger Beobachtungszeitraum vom 1. Januar 2004 bis zum 1. Januar 2014 betrachtet.

Umweltparameter	Format der Messwerte	Messort und Messinstrument
Windgeschwindigkeit in m/s	Zehn-Minuten- Mittelwerte	Schalensternanemometer in 34 bis 103,5 m Höhe über LAT (ca. alle 10 m) an Auslegern in südöstlicher Orientierung zum Messmast
Windrichtung in Grad	Zehn-Minuten- Mittelwerte	Windfahnen in 34 bis 91,5 m Höhe über LAT (ca. alle 10 m) an Auslegern in nordwestlicher Orientierung zum Messmast
Signifikante Wellenhöhe in m	Alle 30 Minuten eine signifikante Wellenhöhe	Seegangsboje (Directional-Waverider-Boje der Firma Datawell) in rund 200 m Entfernung zur Plattform
Wellenrichtung in Grad	30-Minuten-Mittelwerte	Seegangsboje (Directional-Waverider-Boje der Firma Datawell) in rund 200 m Entfernung zur Plattform

# Tab. 4-1: Ausgewählte meteorologische- und hydrographische Messungen der FINO1 Messplattform

Zum Teil werden die in Tab. 4-1 aufgeführten Umweltparameter zusätzlich durch weitere Messinstrumente wie Ultraschall-Anemometer und Acoustic Wave and Current Meter (AWAC) erfasst. Es wurde entschieden, Messzeitreihen der in Tab. 4-1 aufgeführten Messinstrumente zu verwenden, da Schalensternanemometer, Windfahnen und Seegangsbojen nach wie vor als Referenzgeräte für die Erfassung der aufgeführten Parameter gelten und ein möglichst langer Beobachtungszeitraum mit hoher Datenverfügbarkeit wesentlich für die durchzuführenden Untersuchungen ist. Das verwendete Schalensternanemometer vom Typ A100LM der Firma Vector Instruments ist durch ein Messintervall von 1 Hz und einen Messbereich bis maximal 75 m/s gekennzeichnet, vgl. KETTLE (2013). Für Auswertungen der Windgeschwindigkeit wird, sofern nicht anders gekennzeichnet, auf Messungen des Schalensternanemometers in 103,5 m Höhe über LAT zurückgegriffen. Dieses Anemometer befindet sich oberhalb des Messmasts und ist damit in keiner Windrichtung einer Abschattung durch den Messmast ausgesetzt. Die Windrichtungen werden in dieser Höhe nicht erfasst. Die oberste Windfahne ist in 91,5 m Höhe montiert. Für die Windrichtungsauswertungen hoher Windgeschwindigkeiten wird angenommen, dass die in 91,5 m Höhe gemessenen Windrichtungen mit denen in 103,5 m Höhe übereinstimmen. Diese Annahme wird durch Untersuchungen der Windrichtungsabweichungen zwischen 81,5 m und 91,5 m Höhe validiert. Die Windrichtungen in diesen Höhen weisen kaum Richtungsabweichungen auf. Dies gilt insbesondere für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten hohen Windgeschwindigkeiten, vgl. Abb. 4-3. Hier beträgt die Richtungsabweichung in über 98 % aller gleichzeitig gemessenen Windrichtungen weniger als  $2^{\circ}$ , was im Bereich der Messwertabweichung der Windfahnen liegt. Im gesamten Beobachtungszeitraum wurden für diese hohen Windgeschwindigkeiten keine Richtungsabweichungen von  $\geq 4^{\circ}$  gemessen.



Abb. 4-3: Histogramm der Richtungsabweichungen von gleichzeitig gemessenen Windgeschwindigkeiten > 20 m/s in 81,5 m und 91,5 m Höhe, aus SCHMIDT et al. (2015)

Aufgrund der nordwestlichen Orientierung der Windfahnen zum Messmast ist mit Abweichungen zwischen gemessener und tatsächlicher Windrichtung bei südöstlicher Windrichtung zu rechnen. Da am untersuchten Standort keine extremen Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen aus südöstlicher Richtung zu erwarten sind, vgl. Abschnitt 6.1, hat die Abschattung durch den Messmast keinen Einfluss auf den zu entwickelnden Kombinationsansatz. Für die Bestimmung richtungsabhängiger Extremereignisse werden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich zeitgleich gemessene Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen verwendet. Nach Entfernung aller Messausfälle liegen 506.579 Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit bei gleichzeitig gemessener Windrichtung vor, was ca. 96 % bzw. 95 % der maximal möglichen Anzahl an Messwerten in dem zuvor genannten Beobachtungszeitraum entspricht. Für die Bestimmung gleichzeitig auftretender Extremereignisse werden ausschließlich zeitgleich gemessene Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen verwendet. Nach Entfernung aller Messausfälle liegen 411.077 Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit bei gleichzeitig gemessener signifikanter Wellenhöhen vor, was etwa 78 % der maximal möglichen Anzahl an Messwerten in dem zuvor genannten spricht.

Die Seegangsboje (Directional-Waverider-Boje MKIII der Firma Datawell) befindet sich in ca. 200 m Entfernung zur Plattform und bestimmt durch Messung der vertikalen und horizontalen Beschleunigung die signifikante und maximale Wellenhöhe, die Wellenperiode und die Wellenlaufrichtung. Die Daten werden in der Regel alle 30 Minuten zur Verfügung gestellt. In Anlehnung an gebräuchliche Regelwerke wie GL-IV-2 (2012) und DNV-RP-C205 (2010) wird angenommen, dass sich Kurzzeitseegangszustände über einen Zeitraum von drei Stunden stationär verhalten. Für alle weiteren Untersuchungen werden daher Drei-Stunden-Mittelwerte aus den vorliegenden signifikanten Wellenhöhen und Wellenrichtungen bestimmt. Bei den Messzeitreihen der Seegangsboje existiert für jede signifikante Wellenhöhe auch eine Wellenrichtung. Nach Entfernung aller Messausfälle liegen 23.788 Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe und Wellenrichtung vor, was etwa 82 % der maximal möglichen Anzahl an Drei-Stunden-Mittelwerten in dem zuvor genannten Beobachtungszeitraum entspricht. Für die Bestimmung gleichzeitig auftretender Extremereignisse werden ausschließlich zeitgleich gemessene Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen verwendet. Nach Entfernung aller Messausfälle liegen 22.904 Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe bei gleichzeitig gemessener Windgeschwindigkeit vor, was etwa 78 % der maximal möglichen Anzahl an Messwerten in dem zuvor genannten Beobachtungszeitraum entspricht.

Eine Korrelation der Messausfälle des Anemometers bzw. der Boje mit extremen Windgeschwindigkeiten bzw. signifikanten Wellenhöhen wurde nicht festgestellt.

#### 4.1.2 FINO3

Die Forschungsplattform FINO3 wurde in den Jahren 2008 bis 2009 ca. 80 Kilometer westlich von der Insel Sylt (N 55° 11,7' E 7° 9,5') in rund 23 m Wassertiefe im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) errichtet. Für die Untersuchung kombinierter Wind- und Seegangseinwirkungen am Standort FINO3 werden die in Tab. 4-2 aufgeführten Parameter ausgewertet. Dargestellt sind wie zuvor die durch das BSH bereitgestellten Parameter. Für die stochastischen Untersuchungen werden Mittelwerte mit den zuvor genannten Bezugszeiträumen verwendet. Es wird ein vierjähriger Beobachtungszeitraum vom 1. Januar 2010 bis zum 1. Januar 2014 betrachtet.

Umweltparameter	Format der Messwerte	Messort und Messinstrument
Windgeschwindigkeit in m/s	Zehn-Minuten- Mittelwerte	Schalensternanemometer in ca. 100 m Höhe über LAT an einem Ausleger in nordnordwestlicher Orientierung zum Messmast
Windrichtung in Grad	Zehn-Minuten- Mittelwerte	Windfahnen in ca. 100 m Höhe über LAT an einem Ausleger in ostsüdöstlicher Orientierung zum Messmast
Signifikante Wellenhöhe in m	Alle 30 Minuten eine signifikante Wellenhöhe	Seegangsboje (Directional Waverider Boje der Firma Datawell) in rund 200 m Entfernung zur Plattform
Wellenrichtung in Grad	30-Minuten-Mittelwerte	Seegangsboje (Directional Waverider Boje der Firma Datawell) in rund 200 m Entfernung zur Plattform

Tab. 4-2:Ausgewählte meteorologische- und hydrographische Messungen der FINO3<br/>Messplattform

Bei südsüdöstlicher Windrichtung ist mit einer Abschattung des Schalensternanemometers durch den Messmast der FINO3-Plattform zu rechnen. Da hohe Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen insbesondere aus Südwesten bis Norden zu erwarten sind, haben Abschattungseffekte kaum Einfluss auf die richtungsunabhängige Analyse von Extremwindereignissen und die Untersuchung kombinierter Extrembeanspruchungen. Bei den in dieser Arbeit der Vollständigkeit halber durchgeführten richtungsabhängigen Extremwindabschätzungen aus südsüdöstlicher Richtung

ist für weiterführende Untersuchungen eine mögliche Beeinflussung durch den Messmast zu berücksichtigen. Diese ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Nach Entfernung aller Messausfälle liegen 198.957 Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit bzw. 191.626 Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit bei gleichzeitig gemessener Windrichtung vor, was etwa 95 % bzw. 91 % der maximal möglichen Anzahl an Messwerten in dem zuvor genannten Beobachtungszeitraum entspricht. Für die Bestimmung gleichzeitig auftretender Extremereignisse werden ausschließlich zeitgleich gemessene Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen verwendet. Nach Entfernung aller Messausfälle liegen 169.926 Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit bei gleichzeitig gemessener signifikanter Wellenhöhe vor, was etwa 81 % der maximal möglichen Anzahl an Messwerten in dem zuvor genannten Beobachtungszeitraum entspricht.

Die Seegangsboje (Directional-Waverider-Boje MKIII der Firma Datawell) befindet sich in ca. 200 m Entfernung zur Plattform und bestimmt in gleicher Weise wie die Seegangsboje am Standort FINO1 die signifikante und maximale Wellenhöhe, die Wellenperiode und die Wellenlaufrichtung. Aus den ebenfalls alle 30 Minuten zur Verfügung gestellten signifikanten Wellenhöhen und mittleren Wellenrichtungen werden für alle weiteren Untersuchungen Drei-Stunden-Mittelwerte bestimmt. Bei den Messzeitreihen der Seegangsboje existiert für jede signifikante Wellenhöhe auch eine Wellenrichtung. Nach Entfernung aller Messausfälle liegen 9.953 Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe und -richtung vor, was etwa 85 % der maximal möglichen Anzahl an Drei-Stunden-Mittelwerten in dem zuvor genannten Beobachtungszeitraum entspricht. Für die Bestimmung gleichzeitig auftretender Extremereignisse werden ausschließlich zeitgleich gemessene Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen verwendet. Nach Entfernung aller Messausfälle liegen 9.484 Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe bei gleichzeitig gemessener Windgeschwindigkeit vor, was etwa 81 % der maximal möglichen Anzahl an Messwerten in dem zuvor genannten Beobachtungszeitraum entspricht.

Eine Korrelation der Messausfälle des Anemometers bzw. der Boje mit extremen Windgeschwindigkeiten bzw. signifikanten Wellenhöhen wurde nicht festgestellt.

#### 4.2 Messdatenaufbereitung

Für die stochastischen Untersuchungen in Kapitel 6 wurde eine Datenbank zeitlich zugeordneter Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen, signifikanter Wellenhöhen und Wellenrichtungen erstellt. Während die gemessenen Winddaten jeweils zu festen Uhrzeiten im Abstand von zehn Minuten vorliegen (z.B. 00:10:00 Uhr, 00:20:00 Uhr, ...), werden die Wellendaten zum Teil zu abweichenden Uhrzeiten erfasst (z.B. 00:16:00 Uhr, 00:46:00 Uhr, ...). Um möglichst große Stichproben sicherzustellen und unter Berücksichtigung des weitgehend stationären Verhaltens des Seegangs über einen Zeitraum von drei Stunden, werden für die zeitliche Zuordnung der Seegangsmessungen

Toleranzzeiten von neun Minuten zugelassen. Eine beispielsweise um 00:16:00 Uhr gemessene signifikante Wellenhöhe wird den Winddaten um 00:20:00 Uhr zugeordnet. Anschließend wird die zuvor aufgeführte Mittelung der Seegangsdaten über drei Stunden vorgenommen. Die arithmetische Berechnung des Mittelwerts ist für Richtungen ungeeignet (die mittlere Richtung von beispielsweise  $359^{\circ}$  und  $1^{\circ}$  würde nach der arithmetischen Mittelwertberechnung  $180^{\circ}$  ergeben). Für die Mittelwertberechnung der Wind- und Wellenrichtungen werden die Winkel daher vorübergehend in kartesische Koordinaten umgerechnet. Die Berechnung der Mittelwerte für *n* Winkel  $\alpha_i$  erfolgt mit Gleichungen (4-1) bis (4-3).

$$x = \sum_{i=1}^{n} \cos(\alpha_i)$$
(4-1)

$$y = \sum_{i=1}^{n} sin(\alpha_i)$$
(4-2)

Damit die Lösung der Berechnung des Winkels mit der Arkustangensfunktion im Wertebereich eines Vollkreises liegt, ist eine Anpassung an die vier Quadranten eines Kreises erforderlich, vgl. Gl. (4-3).

.17.

$$\alpha = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right); & x > 0, y > 0\\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + 360^{\circ}; & x > 0, y < 0\\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + 180^{\circ}; & x < 0\\ 90^{\circ}; & x = 0, y > 0\\ 270^{\circ}; & x = 0, y \le 0 \end{cases}$$
(4-3)

Die Datenbank der zeitlich zugehörigen Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie der Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe und Wellenrichtung bildet die Datengrundlage für die statistischen Auswertungen in Abschnitt 6.1. Für die Untersuchung richtungsabhängiger Extremereignisse werden die Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie der Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe und Wellenrichtung in Richtungssektoren klassiert. Voraussetzung ist, dass sowohl die Windgeschwindigkeit und Windrichtung als auch die signifikante Wellenhöhe und Wellenrichtung zu einem betrachteten Zeitpunkt vorliegen. In Tab. 4-3 ist die Anzahl der Zehn-Minuten und Drei-Stunden-Mittelwerte bei gleichzeitig gemessener Richtung am Standort FINO1 dargestellt. Entsprechende Angaben für den Standort FINO3 sind in Tab. 4-4 aufgeführt.

Tab. 4-3: Anzahl der Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit *V* und Windrichtung  $\theta_V$  sowie der Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  und Wellenrichtung  $\theta_{Hs}$  je Richtungssektor am Standort FINO1 (Werte in Klammern geben die Anzahl der Messwerte in richtungsversetzten Sektoren an)

Richtungssektor	Anzahl Messwerte V und $\theta_V$	Anzahl Messwerte $H_s$ und $\theta_{Hs}$
0° - 30° (345° - 15°)	23.607 (24.479)	1.007 (2.706)
30° - 60° (15° - 45°)	28.588 (25.745)	691 (692)
60° - 90° (45° - 75°)	36.216 (31.640)	1.955 (1.136)
90° - 120° (75° - 105°)	37.016 (40.344)	751 (1.777)
120° - 150° (105° - 135°)	31.594 (32.965)	309 (313)
150° - 180° (135° - 165°)	32.990 (31.113)	338 (328)
180° - 210° (165° - 195°)	55.862 (40.160)	349 (355)
210° - 240° (195° - 225°)	67.742 (66.454)	534 (357)
240° - 270° (225° - 255°)	61.686 (67.212)	4.011 (2.073)
270° - 300° (255° - 285°)	49.012 (53.068)	3.324 (4.034)
300° - 330° (285° - 315°)	44.594 (46.919)	3.358 (3.048)
330° - 360° (315° - 345°)	30.503 (39.311)	7.161 (6.969)
Gesamtanzahl	499.410	23.788

Tab. 4-4:Anzahl der Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit V und Windrichtung  $\theta_V$ sowie der Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  und Wellen-<br/>richtung  $\theta_{Hs}$  je Richtungssektor am Standort FINO3 (Werte in Klammern geben die<br/>Anzahl der Messwerte in richtungsversetzten Sektoren an)

Richtungssektor	Anzahl Messwerte V und $\theta_V$	Anzahl Messwerte $H_s$ und $\theta_{Hs}$
0° - 30° (345° - 15°)	7.307 (8.169)	273 (172)
30° - 60° (15° - 45°)	9.419 (9.871)	196 (241)
60° - 90° (45° - 75°)	10.324 (11.512)	334 (358)
90° - 120° (75° - 105°)	13.259 (14.471)	342 (365)
120° - 150° (105° - 135°)	13.724 (11.858)	440 (526)
150° - 180° (135° - 165°)	11.509 (13.396)	418 (248)
180° - 210° (165° - 195°)	16.137 (19.931)	222 (363)
210° - 240° (195° - 225°)	23.999 (25.484)	1.069 (1.582)
240° - 270° (225° - 255°)	23.975 (22.092)	1.317 (1.028)
270° - 300° (255° - 285°)	21.619 (24.644)	1.060 (1.814)
300° - 330° (285° - 315°)	26.202 (22.007)	3.208 (2.701)
330° - 360° (315° - 345°)	14.152 (8.191)	1.074 (555)
Gesamtanzahl	191.626	9.953

# 5 Unabhängige Extremereignisse

Offshore-Strukturen werden im Allgemeinen vereinfacht mit extremen Einwirkungsparametern bemessen, welche unabhängig voneinander ermittelt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Kombinationsansätze basieren auf synchron erfassten Messzeitreihen und sollen die bestehende Korrelation zwischen den Einwirkungsparametern berücksichtigen. In diesem Kapitel werden die voneinander unabhängigen extremen Einwirkungsparameter V<sub>ref</sub> und H<sub>s50</sub> ermittelt. Sie werden im folgenden Kapitel (Kapitel 6) als Bezugsgröße für die bedingten Einwirkungsparameter aus den Kombinationsmethoden angesetzt. Auf diese Weise werden vergleichbare, einheitenlose Kombinationswerte für voneinander unabhängig ermittelte extreme Einwirkungsparameter berechnet. Außerdem wird bei der Ermittlung der unabhängigen Extremereignisse  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  untersucht, welche Datengrundlage, Methode zur Stichprobenerhebung, Verteilungsfunktion und welches Schätzverfahren für Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe besonders geeignet ist. Im Vergleich zu den bedingten Einwirkungsparametern der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsmodelle sind die als unabhängig voneinander angenommenen Einwirkungsparameter Vref und Hs50 zuverlässiger zu bestimmen, und in der Literatur existieren mitunter Vergleichswerte von demselben oder einem nahe gelegenen Messstandort zur Verifizierung der Ergebnisse. Das Ergebnis beinhaltet ein einheitliches methodisches Vorgehen für eine möglichst präzise Abschätzung extremer Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen in der südlichen Nordsee mit mittleren Wiederholungsperioden von mehreren Jahrzehnten. Dieses validierte methodische Vorgehen wird in Kapitel 6 zur Entwicklung der Kombinationsmethoden verwendet und so die Modellunsicherheit dieser Methoden gering gehalten. Zur Wahl eines einheitlichen methodischen Vorgehens werden zunächst Untersuchungen zu den einzelnen Bestandteilen der Extremwertanalyse auf Basis der in Kapitel 4 aufgeführten Messzeitreihen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe durchgeführt. Hierzu wird der Einfluss unterschiedlicher Datengrundlagen, verschiedener Extremwertanalyse-Methoden, Verteilungsfunktionen und Schätzverfahren untersucht, vgl. Abschnitt 5.1. Als Maß für die Eignung einer Methode oder Funktion wird die Anpassung der Verteilungsfunktion an die empirische Häufigkeitsverteilung visuell und durch verteilungsunabhängige Anpassungstests bewertet. Außerdem werden die sich aus der Extremwertanalyse ergebenden charakteristischen Werte einer definierten mittleren Wiederholungsperiode verglichen. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wird ein einheitliches Verfahren zur Extremwertanalyse für Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen gewählt. Dieses Verfahren wird anschließend auf die untersuchten Zufallsvariablen angewendet, und die unabhängigen Einwirkungsparameter Vref und Hs50 werden bestimmt, vgl. Kapitel 5.2. Die Einwirkungsparameter  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  werden abschließend mit denen aus Untersuchungen anderer Wissenschaftler am Standort FINO1 verglichen.

#### 5.1 Extremwertanalyse

In der Literatur existieren verschiedene Verfahren für Extremwertanalysen, vgl. u. a. COLES (2001) und GODA (2010). Bei diesen Verfahren wird stets die empirische Häufigkeitsverteilung einer betrachteten Zufallsvariable durch eine geeignete Verteilungsfunktion bzw. Verteilungsdichte mathematisch beschrieben und anschließend stochastisch ausgewertet, vgl. Abschnitt 3.1. Die Extremwertanalyse wird demzufolge von den zu untersuchenden Messwerten, der Stichprobenerhebung und Extremwertanalysemethode, den Verteilungsfunktionen und Verfahren zur Schätzung der Verteilungsparameter beeinflusst. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Datengrundlagen, Methoden und Funktionen sind in Abb. 5-1 dargestellt. Ebenfalls dargestellt sind die verwendeten Methoden zur Bewertung der Anpassungsgüte. Sie sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung der Eignung eines Verfahrens.



Abb. 5-1: Flussdiagramm möglicher Vorgehensweisen bei der Extremwertanalyse

Die Ergebnisse der Extremwertanalysen können in dieser Arbeit nicht empirisch verifiziert werden, da die mittleren Wiederholungsperioden der untersuchten Einwirkungsparameter  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  deutlich länger sind als die Beobachtungszeiträume der Messzeitreihen. Wesentlich ist daher die Beurteilung der Anpassungsgüte als Bewertungskriterium, ob und wie gut eine Verteilungsfunktion oder ein Schätzverfahren geeignet ist, eine empirische Häufigkeitsverteilung au beschreiben bzw. eine Verteilungsfunktion an die empirische Häufigkeitsverteilung anzupassen. Die Anpassungsgüte als Maß für die Übereinstimmung zwischen empirischer Häufigkeitsverteilung und Verteilungsfunktion nimmt Werte zwischen Null, keinerlei Übereinstimmung, und Eins, sehr guter Übereinstimmung, an. Eine Beschreibung verbreiteter Anpassungstests ist u. a. in GOLLWITZER (2007) und FISCHER (2001) gegeben. In dieser Arbeit wird die Anpassungsgüte durch die verteilungsunabhängigen Chi-Quadratund Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstests bewertet. Darüber hinaus wird stets eine visuelle Prüfung der Übereinstimmung zwischen angenommener Verteilungsfunktion und empirischer Verteilung vorgenommen.

Im Folgenden wird untersucht, welche der in Abb. 5-1 dargestellten Methoden der Stichprobenerhebung und Extremwertanalyse, sowie welche Verteilungsfunktionen und Schätzverfahren am besten für Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe geeignet sind. Ziel ist ein einheitliches methodisches Vorgehen für eine möglichst präzise Abschätzung extremer Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen in der südlichen Nordsee. Das am Ende dieses Kapitels gewählte und validierte Vorgehen wird für die weiteren Extremwertanalysen der unabhängigen und bedingten Extremwerte eingesetzt.

### 5.1.1 Parameterschätzung

Verteilungsfunktionen werden über ihre Parameter an eine Stichprobe angepasst. Die Verteilungsparameter sind in der Regel nicht bekannt und werden in Abhängigkeit von der Stichprobe geschätzt. Ausführliche Beschreibungen gängiger Methoden für sogenannte Punktschätzungen sind in FISCHER (1999) und HARTUNG et al. (1995) gegeben. Sinnvolle Eigenschaften von Schätzfunktionen sind in FISCHER (2001) aufgeführt. Die Anwendung diverser Schätzmethoden ist in PLATE (1993) ausführlich beschrieben. In dem für die statistischen Analysen verwendeten Programm *Statrel* sind zahlreiche Verfahren zur Parameterschätzung implementiert, vgl. GOLLWITZER (2007). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Eignung der folgenden Schätzverfahren untersucht:

- Methode kleinster Fehlerquadrate
- Momentenmethode
- Maximum-Likelihood-Methode

Bei der *Maximum-Likelihood-Methode* drückt die sogenannte Likelihood-Funktion die Wahrscheinlichkeit aus, ob die Verteilungsfunktion für angenommene Parameter der Häufigkeitsverteilung der untersuchten Stichprobe entspricht. Wird die von den Verteilungsparametern abhängige Likelihood-Funktion maximiert, erhält man demzufolge die Verteilungsparameter, für welche die angenommene Verteilungsfunktion die Häufigkeitsverteilung der Stichprobe am plausibelsten beschreibt, vgl. FISCHER (2010). Die Maximierung der Likelihood-Funktion kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. In dieser Arbeit wird die logarithmierte Likelihood-Funktion verwendet. Die logarithmierte Likelihood-Funktion ist im Vergleich zur Likelihood-Funktion in vielen Fällen einfacher abzuleiten. Mit Hilfe der Ableitung wird das Maximum der (logarithmierten) Likelihood-Funktion bestimmt. Da die logarithmierte Likelihood-Funktion ihr Maximum an derselben Stelle hat wie die nicht logarithmierte Funktion, ergeben sich keine Einschränkungen. Ein Vorteil der *Maximum-Likelihood-Methode* ist die Möglichkeit, Verteilungsparameter mit einem zugehörigen Konfidenzintervall zu schätzen. Das Konfidenzintervall ist der Bereich  $u_1$  bis  $u_2$ , in dem der zu schätzende Parameter X der Stichprobe mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit 1 -  $\alpha$  liegt, vgl. Gl. (5-1).

$$P\left(u_{1} \leq \frac{X - \mu(x)}{\sigma(x)} \leq u_{2}\right) \geq l \cdot \alpha$$
(5-1)

Die aufgeführten Wahrscheinlichkeiten werden auch als Vertrauensniveau *1-a*, und bei Tests als Signifikanzniveau  $\alpha$  bezeichnet. Die Wahl der Wahrscheinlichkeit  $\alpha$  ist Ermessenssache. Häufig verwendete Werte sind  $\alpha = 0,05$ ,  $\alpha = 0,01$  und  $\alpha = 0,001$ , entsprechend den 95 %, 99 % und 99,9 % Konfidenzintervallen, vgl. COLES (2001). Neben einer Intervallschätzung für Verteilungsparameter werden in dieser Arbeit obere Konfidenzgrenzen für Quantilwerte angegeben, vgl. auch GOLLWITZER (2007). Die Konfidenzintervalle bzw. oberen Konfidenzgrenzen werden für ein Signifikanzniveau von 95 % angegeben. Konfidenzintervalle sind ein Maß für die Präzision, mit der ein Verteilungsparameter oder charakteristischer Wert geschätzt bzw. bestimmt wird.

Anhand der Anpassungsgüte der resultierenden Verteilung wird festgelegt, welches der aufgeführten Schätzverfahren bei der Extremwertanalyse Anwendung findet. In dieser Arbeit wird das Schätzverfahren angewendet, welches zu den höchsten Anpassungsgüten nach dem Kolmogorow-Smirnowbzw. Chi-Quadrat-Anpassungstest führt. Nicht immer lassen sich alle Parameter mit jedem der aufgeführten Schätzverfahren bestimmen. In Abhängigkeit von Stichprobe und Verteilungsfunktion kann es vorkommen, dass Schätzverfahren nicht konvergieren und somit nicht in der Lage sind, einen oder mehrere Parameter zu schätzen. In einem solchen Fall wird zunächst ein anderes der zuvor aufgeführten Schätzverfahren zur Bestimmung des gesuchten Parameters eingesetzt. Anschließend wird der so geschätzte Verteilungsparameter als bekannt angenommen und die übrigen Parameter mit dem ursprünglichen Verfahren geschätzt. Werden alle Parameter vorgegeben, so handelt es sich selbstverständlich nicht mehr um ein Schätzverfahren. Die Verteilungsparameter werden in dem Fall so lange variiert, bis sich eine möglichst hohe Anpassungsgüte einstellt. Ein solches iteratives Vorgehen erfordert die Vorgabe der Verteilungsparameter und ist sehr zeitintensiv. Verteilungsparameter, die nicht mit dem gewählten Verfahren geschätzt und als bekannt angenommen werden, sind im Folgenden gekennzeichnet.

Um den Einfluss der Schätzverfahren auf die Extremwertanalyse zu beurteilen und ein geeignetes Schätzverfahren für Extremwertanalysen von Wind- und Wellenereignissen in der Deutschen Bucht festzulegen, werden die eingangs genannten Schätzverfahren auf unterschiedliche Verteilungsfunktionen und Stichproben der Messstandorte FINO1 und FINO3 angewendet. In Abb. 5-2 sind für unterschiedliche Stichproben und Schätzverfahren die Anpassungsgüten nach dem Kolmogorow-Smirnow- und Chi-Quadrat-Anpassungstest aufgeführt. Als Stichproben werden mittels der *Block-Maxima-Methode (BMM)* ausgewählte Extremwerte der Windgeschwindigkeit mit einem Bezugszeitintervall von vier bzw. acht Wochen untersucht. Die unterschiedlich langen Bezugszeitintervalle werden aufgrund der verschiedenen Beobachtungszeiträume an den Standorten FINO1 und FINO3 angesetzt. Außerdem werden mittels der *Peak-Over-Threshold-Methode (POT-Methode)* ermittelte Stichproben mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 30 m/s untersucht. Dargestellt sind Ergebnisse der Weibull-III-max- und Weibull-III-min-Verteilungsfunktion, welche sich besonders gut zur Beschreibung der untersuchten Stichproben eignen, vgl. Abschnitt 5.1.2. Die Ergebnisse der Anpassungstests für die weiteren Verteilungsfunktionen nach Tab. 5-1 sind im Anhang B.1 aufgelistet. Auf geeignete Verteilungsfunktionen und Stichproben wird in den Abschnitten 5.1.2 und 5.1.3 eingegangen.



Abb. 5-2: Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstests und des Chi-Quadrat-Anpassungstests für verschiedene Verteilungsfunktionen, Schätzverfahren und Stichproben extremer Windgeschwindigkeiten der Forschungsplattformen FINO1 und FINO3

Abb. 5-2 veranschaulicht, dass Stichprobe, Verteilungsfunktion und das Verfahren zur Parameterschätzung Einfluss darauf haben, wie gut die mathematische Approximation einer Häufigkeitsverteilung nach den aufgeführten Anpassungstests ist. Deutlich sind die unterschiedlichen Anpassungsgüten bei verschiedenen Schätzverfahren für jede der vier aufgeführten Stichproben zu erkennen. Die Ergebnisse der Anpassungstests variieren sowohl für die aufgeführten Schätzverfahren als auch die verwendeten Anpassungstests deutlich. Um ein einheitliches methodisches Vorgehen für eine möglichst präzise Abschätzung extremer Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen in der südlichen Nordsee für unterschiedliche Stichproben und Verteilungsfunktionen festzulegen, werden die Verfahren zur Parameterschätzung gewählt, die im Mittel die höchsten Anpassungsgüten erzielen. Wie in Abb. 5-2 zu erkennen, sind dies die *Maximum-Likelihood-Methode* und die *Momentenmethode*. Die Anpassungsgüte des ebenfalls untersuchten Schätzverfahrens nach der *Methode kleinster Fehlerquadrate* fällt im Mittel deutlich geringer aus. Die Anpassungsgüten weiterer Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der dargestellten Stichproben können Tab. 5-2 bis Tab. 5-5 entnommen werden.

Entsprechende Untersuchungsergebnisse für signifikante Wellenhöhen sind in Abb. 5-3 dargestellt. Als Stichproben werden wie zuvor Extremwerte mit einem Bezugszeitintervall von vier bzw. acht Wochen und signifikante Wellenhöhen von mehr als fünf Metern mit der *Peak-Over-Threshold-Methode* untersucht. Die Datengrundlage bilden die in Kapitel 4 beschriebenen Messzeitreihen. Wiederum sind die Ergebnisse der Weibull-III-max-Verteilungsfunktion und Weibull-III-min-Verteilungsfunktion dargestellt, welche sich sehr gut zur Approximation der untersuchten Einwirkungsparameter eignen. Die Anpassungsgüten weiterer Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der dargestellten Stichproben können den o. g. Tabellen entnommen werden.



Abb. 5-3: Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstests und des Chi-Quadrat-Anpassungstests für verschiedene Verteilungsfunktionen, Schätzverfahren und Stichproben extremer signifikanter Wellenhöhen der Forschungsplattformen FINO1 und FINO3

In Abb. 5-3 werden die nach dem Kolmogorow-Smirnow-Test und dem Chi-Quadrat-Test im Mittel höchsten Anpassungsgüten bei Schätzung der Verteilungsparameter mit der *Maximum-Likelihood-Methode* und *Momentenmethode* erreicht. Die Anpassungsgüte bei Schätzung mit der *Methode kleinster Fehlerquadrate* fällt auch bei diesen Stichproben im Mittel deutlich geringer aus. Es ist zu beachten, dass die Anpassung der Verteilungsfunktion an die gesamte Stichprobe erfolgt. Ein Schätzverfahren, welches im oberen Quantilbereich eine hohe Anpassungsgüte erzielt, kann daher für die Extremwert-analyse zweckmäßiger sein, als ein Verfahren mit einer insgesamt höheren Anpassungsgüte. Dies ist ein wesentlicher Grund für abweichende Ergebnisse bei Extremwertanalysen auf Grundlage von Stichproben wenig extremer Werte im Vergleich zu Stichproben, die sich auf Extremwerte beschränken, vgl. Abschnitt 3.1.1. Für eine hohe Anpassungsgüte im oberen Quantilbereich werden hier daher Maximalwerte mit langen Bezugszeitintervallen bzw. hohen Schwellenwerten zugrunde gelegt. Außerdem wird stets eine visuelle Prüfung der Eignung einer Verteilungsfunktion oder eines Schätzverfahrens vorgenommen, vgl. auch Abb. 5-6 bis Abb. 5-9.

Nachdem hohe Anpassungsgüten insbesondere bei Parameterschätzungen mit der *Maximum-Likelihood-Methode* und der *Momentenmethode* nachgewiesen wurden, soll überprüft werden, ob die Schätzverfahren auch zu übereinstimmenden Ergebnissen bei der Extremwertanalyse führen. In Abb. **5-4** ist die Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  als Ergebnis von Extremwertanalysen verschiedener Stichproben und Verteilungsfunktionen dargestellt. Für die Beurteilung des Einflusses der Schätzverfahren sind die Ergebnisse eines Messstandortes zu berücksichtigen.



Abb. 5-4: Windgeschwindigkeiten  $V_{ref}$  in Abhängigkeit von verschiedenen Schätzverfahren auf Grundlage unterschiedlicher Stichproben

Die Schätzverfahren *Maximum-Likelihood-Methode* und *Momentenmethode* führen bei den untersuchten Stichproben jeweils zu nahezu identischen Windgeschwindigkeiten  $V_{ref}$ , siehe Abb. 5-4. Die prozentuale Abweichung der Ergebnisse beider Schätzverfahren beträgt bei den dargestellten vier Stichproben und Verteilungsfunktionen im Mittel 1,7 % und maximal 2,8 %. Die Schätzung nach der *Methode kleinster Fehlerquadrate* führt zu stärker abweichenden Extremwerten. Die Ergebnisse der Extremwertanalyse bei Verwendung dieses Schätzverfahrens weichen im Mittel 4,4 % bzw. 6,0 % und maximal 8,9 % bzw. 10,4 % von den Ergebnisse der Extremwertanalyse unter Verwendung der *Maximum-Likelihood-Methode* bzw. der *Momentenmethode* ab. Auf den Einfluss der *Block-Maxima-Methode* bzw. der *Peak-Over-Threshold-Methode* wird in Abschnitt 5.2 eingegangen.

In Abb. 5-5 ist die signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  als Ergebnis der Extremwertanalyse auf Grundlage verschiedener Stichproben und Verteilungsfunktionen dargestellt.



Abb. 5-5: Signifikante Wellenhöhe H<sub>s50</sub> in Abhängigkeit von verschiedenen Schätzverfahren auf Grundlage unterschiedlicher Stichproben

Die Schätzverfahren *Maximum-Likelihood-Methode* und *Momentenmethode* führen bei der signifikanten Wellenhöhe trotz im Mittel ähnlich guter Anpassungsgüten, vgl. Abb. 5-3, zu stärker abweichenden Ergebnissen der Extremwertanalyse, siehe Abb. 5-5. Die prozentuale Abweichung der Ergebnisse dieser beiden Schätzverfahren beträgt im Mittel 3,1 % und maximal 9,2 %. Die *Methode kleinster Fehlerquadrate* führt im Vergleich zur *Maximum-Likelihood-Methode* bzw. *Momentenmethode* zu im Mittel um 4,8 % bzw. 6,5 % und maximal um 7,2 % bzw. 7,2 % abweichende Ergebnissen. Das heißt, dass im Vergleich zur Windgeschwindigkeit die Streuung der Ergebnisse der Extremwertanalyse bei der signifikanten Wellenhöhe insgesamt stärker ist. Die Ursache ist möglicherweise die geringere Anzahl von Messwerten aus denen sich die aufgeführten Stichproben bestimmen. Die resultierenden signifikanten Wellenhöhen  $H_{s50}$  stimmen im Mittel jedoch auch hier bei Verwendung der *Maximum Likelihood Methode* und *Momentenmethode* etwas besser überein.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Stichproben, Verteilungsfunktionen und Verfahren zur Parameterschätzung deutlich die Ergebnisse der verwendeten verteilungsunabhängigen Anpassungstests

beeinflussen. Bei den untersuchten Daten führen insbesondere die Schätzverfahren *Maximum-Likelihood-Methode* und *Momentenmethode* zu hohen Anpassungsgüten und zu gut übereinstimmenden Ergebnissen in der Extremwertanalyse. Diese Schätzverfahren führten für alle untersuchten Stichproben und Verteilungsfunktionen zu sinnvoll geschätzten Verteilungsparametern. Durch ein einheitliches geeignetes Schätzverfahren sind Vergleiche zwischen den Ergebnissen von Extremwertanalysen von unterschiedlichen Stichproben oder bei annahme unterschiedlicher Verteilungsfunktionen möglich. Die Untersuchungen schließen jedoch nicht aus, dass andere Schätzverfahren für einzelne Stichproben und/oder Verteilungsfunktionen zu höheren Anpassungsgüten führen.

#### 5.1.2 Verteilungsfunktionen

Zur mathematischen Beschreibung der stochastischen Natur von Zufallsvariablen existieren zahlreiche Verteilungsfunktionen, vgl. u. a. WEBER (1992), BRONŠTEJN et al. (1993) sowie HOSKING und WALLIS (2005). Die Auswahl einer geeigneten Verteilungsfunktion kann nach unterschiedlichen Prinzipien wie theoretischen Überlegungen, Anpassung mittels der empirischen Momente, Erfahrung, der qualitativen Analyse eines Histogramms und durch Anpassungstests vorgenommen werden, vgl. FISCHER (2001). Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst geeignete Verteilungen für die Beschreibung der (extremen) Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe aufgrund von Angaben in der Literatur zusammengestellt. Anschließend werden mit diesen Verteilungsfunktionen Extremwertanalysen für die betrachteten Zufallsvariablen durchgeführt und die Anpassung sowie die resultierenden charakteristischen Werte bewertet. Die Anpassung wird visuell durch die Darstellung empirischer Häufigkeitsverteilungen und Verteilungsfunktionen sowie durch die bereits zuvor verwendeten verteilungsunabhängigen Anpassungstests bewertet. Die resultierenden charakteristischen Werte werden qualitativ durch Vergleiche mit in dieser Arbeit anderweitig ermittelten charakteristischen Werten sowie mit charakteristischen Werten aus Untersuchungen anderer Wissenschaftler am selben Messstandort bewertet, siehe Abschnitt 5.2. Da die Eignung einer Verteilungsfunktion von der zu beschreibenden Stichprobe abhängt, werden sowohl mittels der Block-Maxima-Methode als auch mittels der Peak-Over-Threshold-Methode ermittelte Stichproben betrachtet. Ziel ist die Wahl von geeigneten Verteilungsfunktionen für die mathematische Beschreibung der empirischen Häufigkeit extremer Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen in der südlichen Nordsee.

In der Literatur werden unterschiedliche Verteilungsfunktionen für die Beschreibung von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen aufgeführt. Dabei ist zu unterscheiden, ob Verteilungsfunktionen Mittel- oder Extremwerte dieser Zufallsvariablen beschreiben, vgl. Abschnitt 3.1. Im Rahmen dieser Arbeit werden Extremwertanalysen auf Grundlage von Stichproben durchgeführt, welche aus Maximalwerten der betrachteten Zufallsvariablen bestehen, siehe Abschnitt 5.1.3. Es werden daher Extremwertverteilungen und Verteilungsfunktionen verwendet, welche in Voruntersuchungen hohe Anpassungsgüten bei der Beschreibung von Extremwerten erzielten. Für die Analyse extremer Windgeschwindigkeiten wird vielfach die Gumbel-I-max-Verteilung verwendet, vgl. GASCH et al. (2005) und RACKWITZ (1997). In SIMIU und HECKERT (1996) wird außerdem die Weibull-III-max-Verteilung zur Beschreibung extremer Windgeschwindigkeiten empfohlen. Für die mathematische Beschreibung extremer signifikanter Wellenhöhen finden sich in der Literatur zahlreiche Angaben. Die Gumbel-I-max-Verteilung, Frechet-II-max-Verteilung und Weibull-III-max-Verteilung sind die gebräuchlichsten Funktionen zur Beschreibung extremer (signifikanter) Wellenhöhen in Kombination mit der Block-Maxima-Methode, vgl. GODA (2010). In Kombination mit der Peak-Over-Threshold-Methode werden meist die Exponential- und Pareto-Verteilungen angewendet, siehe CAIRES (2011). Ebenfalls Anwendung finden die zweiparametrige Weibull- und Rayleigh-Verteilung, vgl. DNV-RP-C205 (2010) und GL-IV-2 (2012). Unabhängig von der betrachteten Zufallsvariable werden in der Extremwertanalyse zudem häufig die Verteilungsfamilien der Generalized Extreme Value (GEV) Distribution und Generalized Pareto Distribution (GPD) verwendet, vgl. u. a. COLES (2001) sowie RAGAN und MANUEL (2007). Die Eignung der GEV Distribution und der GPD wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, jedoch decken die verwendeten Verteilungsfunktionen einen Großteil möglicher Realisierungen dieser Verteilungsfamilien ab. Die GEV-Verteilung vereinfacht sich je nach Formparameter zur Gumbel-I-max-, Frechet-II-maxoder Weibull-III-max-Verteilung, vgl. RAGAN und MANUEL (2007). Die GPD kann zur Exponential- oder Pareto-Verteilungsfunktion vereinfacht werden. Diese Sonderformen der GEV- bzw. GPD-Verteilungsfunktionen werden in dieser Arbeit abgedeckt, vgl. Tab. 5-1. Zum Teil finden sich in der Literatur widersprüchliche Angaben zur Verwendung von Verteilungsfunktionen in der Extremwertanalyse. In den bereits genannten Untersuchungen von CAIRES (2011) werden extreme signifikante Wellenhöhen unter Verwendung der GPD-Verteilungsfunktion in Kombination mit der Peak-Over-Threshold-Methode bestimmt. In DNV-RP-C205 (2010), einer wichtigen Richtlinie für die Auslegung von Offshore-Windenergieanlagen, wird dagegen explizit von einer Anwendung der GPD in Verbindung mit der Peak-Over-Threshold-Methode bei der Analyse extremer signifikanter Wellenhöhen abgeraten. Gründe für diese Empfehlung werden nicht aufgeführt.

Auf Basis der genannten Literaturangaben und üblicher Verteilungsfunktionen für die Extremwertanalyse werden in Tab. 5-1 voraussichtlich geeignete Verteilungsfunktionen zur Beschreibung extremer Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen zusammengefasst. Die aufgeführten Verteilungsfunktionen werden mit den in Abschnitt 5.1.1 ausgewählten Schätzverfahren, Maximum-Likelihood-Methode und Momentenmethode, an Extremwerte der betrachteten Zufallsvariablen angepasst. Die Extremwerte werden mit der Block-Maxima-Methode und der Peak-Over-Threshold-Methode aus den Messzeitreihen der Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe des zehn- bzw. vierjährigen Beobachtungszeitraums beider Standorte bestimmt, vgl. Kapitel 4. Für das Bezugszeitintervall der nach der Block-Maxima-Methode bestimmten Extremwerte wird bei dem zehnjährigen Beobachtungszeitraum acht Wochen und bei dem vierjährigen Beobachtungszeitraum vier Wochen angenommen. Für die Peak-Over-Threshold-Methode wird für die Windgeschwindigkeiten ein Schwellenwert von  $x_0 > 30$  m/s und für die signifikanten Wellenhöhen  $x_0 >$ 5 m für beide Standorte angesetzt. Auf die Wahl der Bezugszeitintervalle und Schwellenwerte wird in Abschnitt 5.1.3.2 eingegangen. Zur Wahl von Verteilungsfunktionen, die optimal zur Beschreibung von extremen Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen geeignet sind, werden im Folgenden die Ergebnisse der Extremwertanalysen nach der Block-Maxima-Methode und der Peak-Over-Threshold-Methode aufgeführt.

Verteilung <sup>1), 2)</sup>	Verteilungsdichte	Verteilungsfunktion	Werte- bereich	Parameter- begrenzung
Exponential	$f_X(x) = \lambda \exp[-\lambda(x-\tau)]$	$F_X(x) = 1 - exp[-\lambda(x-\tau)]$	$\tau \leq x < +\infty$	$\lambda > 0$
Frechet II max	$f_X(x) = \frac{k}{(v-\tau)} \left(\frac{v-\tau}{x-\tau}\right)^{k+1} exp\left[-\left(\frac{v-\tau}{x-\tau}\right)^k\right]$	$F_X(x) = exp\left[-\left(\frac{v-\tau}{x-\tau}\right)^k\right]$	$\tau < x < +\infty$	$\begin{array}{l} k > 0 \\ v > \tau \end{array}$
Gamma <sup>3)</sup>	$f_X(x) = \frac{1}{\Gamma(k)} \lambda(\lambda x)^{k-1} exp(-\lambda x)$	$F_X(x) = \frac{\Gamma(\lambda x, k)}{\Gamma(k)}$	$\infty + > x \ge 0$	$\begin{array}{l} k>0\\ \lambda>0 \end{array}$
Gumbel I max	$f_X(x) = \alpha \exp[-\alpha(x-u) - \exp[-\alpha(x-u)]]$	$F_X(x) = exp[-exp(-\alpha(x-u))]$	$-\infty < x < +\infty$	$\alpha > 0$
Pareto	$f_X(x) = \frac{a  k^a}{x^{a+1}}$	$F_X(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^a$	$k \leq x < +\infty$	$\begin{array}{l} \alpha > 0 \\ k > 0 \end{array}$
Rayleigh	$f_X(x) = \frac{x-\tau}{\alpha^2} exp\left[-\frac{(x-\tau)^2}{2\alpha^2}\right]$	$F_X(x) = 1 - exp\left[-\frac{(x-\tau)^2}{2\alpha^2}\right]$	$\tau \leq x < +\infty$	α > 0
Weibull III max	$\frac{f_X(x) =}{\frac{k}{(\omega - w)} \left(\frac{\omega - x}{\omega - w}\right)^{k-1} exp\left[-\left(\frac{\omega - x}{\omega - w}\right)^k\right]$	$F_X(x) = exp\left[-\left(\frac{\omega-x}{\omega-w}\right)^k\right]$	$-\infty < x < \omega$	$\begin{array}{l} k > 0 \\ \omega > w \end{array}$
Weibull III min	$f_X(x) = \frac{k}{(\omega - \tau)} \left(\frac{x - \tau}{w - \tau}\right)^{k-1} exp\left[-\left(\frac{x - \tau}{w - \tau}\right)^k\right]$	$F_X(x) = 1 \cdot exp\left[-\left(\frac{x-\tau}{w-\tau}\right)^k\right]$	$\tau \leq x < +\infty$	$\begin{array}{l} k > 0 \\ w > \tau \end{array}$

Tab. 5-1: Ausgewählte Verteilungsfunktionen für die Extremwertanalyse

<sup>1)</sup> Die römischen Ziffern geben den Verteilungstyp an <sup>2)</sup> Min/max kennzeichnet die Verteilungen für Kleinst- bzw. Größtwerte <sup>3)</sup> Gammafunktion:  $\Gamma(a) = \int_0^{+\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$  bzw.  $\Gamma(x, a) = \int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt$ 

#### Verteilungsfunktionen für Stichproben nach der Block-5.1.2.1 Maxima-Methode

Für die Wahl geeigneter Verteilungsfunktionen zur Beschreibung von Windgeschwindigkeiten nach der Block-Maxima-Methode wurden Extremwertanalysen mittels der in Tab. 5-1 aufgeführten Verteilungsfunktionen mit dem Programm Statrel durchgeführt. In Tab. 5-2 und Tab. 5-3 sind die Ergebnisse von Extremwertanalysen für die drei Verteilungsfunktionen mit den höchsten Anpassungsgüten aufgeführt. Dargestellt sind die mittels der aufgeführten Verfahren Maximum-Likelihood-Methode (MLM) und Momentenmethode (MM) geschätzten Verteilungsparameter und Anpassungsgüten sowie die charakteristischen Werte V<sub>ref</sub> als Ergebnis der Extremwertanalyse. Für die nach der Maximum-Likelihood-Methode (MLM) geschätzten Verteilungsparameter werden zudem Konfidenzintervalle (KI) angegeben, siehe GOLLWITZER (2007). Der durch die obere und untere Intervallgrenze gebildete Wertebereich enthält den zu schätzenden Parameter mit einer Wahrscheinlichkeit von P = 0.95 bzw. 1- $\alpha = 0.95$ , vgl. Gl. (5-1). Außerdem werden obere Konfidenzgrenzen (KG) für die charakteristischen Werte Vref angegeben, was bedeutet, dass der charakteristische Wert mit einer Wahrscheinlichkeit P = 0.95 bzw.  $1-\alpha = 0.95$  kleiner ist als die angegebene Konfidenzgrenze, vgl. Abschnitt 5.1.1. Eine vollständige Auflistung der Ergebnisse der Extremwertanalysen unter Ansatz der in Tab. 5-1 aufgeführten Verteilungsfunktionen befindet sich im Anhang B.1.

#### Kapitel 5

#### Kennwerte der Extremwertanalyse der Windgeschwindigkeit nach der Block-Maxima-Tab. 5-2: Methode an den Standorten FINO1 und FINO3

FINOI								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparam	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	Vref	95%- KG V <sub>ref</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m/s	m/s
		<i>k</i> = 23,863	<i>k</i> = 36,278	<i>k</i> = 48,693	0,443	0,294	37,8	44,4
	MLM	$\lambda = 0,953$	$\lambda = 1,453$	$\lambda = 1,954$				
Gamma		-	<i>k</i> = 32,989	-	0 171	0.205	20.5	45.5
	MM	-	$\lambda = 1,322$	-	0,171	0,305	38,5	45,5
	1011	<i>u</i> = 22,191	<i>u</i> = 23,017	u = 23,843	0,261	0,787	41,7	53,6
Gumbel I max	MLM	$\alpha = 0,249$	$\alpha = 0,309$	$\alpha = 0,370$				
		-	u = 23,004	-	0.144			
	MM	-	$\alpha = 0,295$	-	0,144	0,880	42,6	55,1
		<i>w</i> = 22,226	<i>w</i> = 23,074	<i>w</i> = 23,922				
	MLM	<i>k</i> = -43,069	<i>k</i> = 33,874	<i>k</i> = 110,817	0,102	0,822	40,6	50,8
		$\omega = -114,472$	ω = 134,679	ω = 383,829				
Weibull III max		-	<i>w</i> = 23,031	-				
	MM	-	<i>k</i> = 33,244	-	0,144	0,790	41,7	52,6
		-	$\omega = 140,00^{2}$	-				
FINO3								
Vortailungsfunktion	Schätz	Verteilungsparameter		X²-	K-S-		95%-	
ventenungsrunktion	verf.	Verteilungsparam	neter		Test 3)	Test	Vref	KG V <sub>ref</sub>
venenungsrunktion	verf.	95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)	Test <sup>3)</sup>	Test	V <sub>ref</sub> m/s	KG V <sub>ref</sub>
venenungstunktion	verf.	95%- KI (untere Grenze) u = 19,901	Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913	95%- KI (obere Grenze) <i>u</i> = 21,926	Test <sup>3</sup>	Test	V <sub>ref</sub> m/s	KG V <sub>ref</sub> m/s
venenungstunktion	verf. MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 $\alpha = 0,223$	Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 $\alpha = 0,283$	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$	Test <sup>3</sup> ) 0,943	Test 0,999	V <sub>ref</sub> m/s 43,8	KG V <sub>ref</sub> m/s 64,4
Gumbel I max	verf. MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 $\alpha = 0,223$ -	Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 $\alpha = 0,283$ u = 20,913	95%- KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$	Test <sup>3)</sup> 0,943	Test 0,999	V <sub>ref</sub> m/s 43,8	KG V <sub>ref</sub> m/s 64,4
Gumbel I max	verf. MLM MM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 $\alpha = 0,223$ -	Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 $\alpha = 0,283$ u = 20,913 $\alpha = 0,282$	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ -	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943	Test 0,999 0,999	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8	KG V <sub>ref</sub> m/s           64,4           64,4
Gumbel I max	verf. MLM MM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 $\alpha = 0,223$ - - w = 19,912	Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 $\alpha = 0,283$ u = 20,913 $\alpha = 0,282$ w = 20,964	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943	Test 0,999 0,999	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8	KG V <sub>ref</sub> m/s           64,4           64,4
Gumbel I max	verf. MLM MM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - - w = 19,912 k = -94,717	Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 $\alpha = 0,283$ u = 20,913 $\alpha = 0,282$ w = 20,964 k = 32,383	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016 k = 159,483	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857	Test 0,999 0,999 0,997	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8	KG V <sub>ref</sub> m/s           64,4           64,4           58,8
Gumbel I max	verf. MLM MM MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 $\alpha = 0,223$ - - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$	Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 $\alpha = 0,283$ u = 20,913 $\alpha = 0,282$ w = 20,964 k = 32,383 $\omega = 136,076$	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857	Test 0,999 0,999 0,997	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8	KG V <sub>ref</sub> m/s           64,4           64,4           58,8
Gumbel I max Weibull III max	verf. MLM MM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$ -	theter Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 $\alpha = 0,283$ u = 20,913 $\alpha = 0,282$ w = 20,964 k = 32,383 $\omega = 136,076$ w = 20,943	95%- KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857	Test 0,999 0,999 0,997	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8	KG V <sub>ref</sub> m/s           64,4           64,4           58,8
Gumbel I max Weibull III max	verf. MLM MM MLM MMM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$ - -	theter Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 a = 0,283 u = 20,913 a = 0,282 w = 20,964 k = 32,383 $\omega = 136,076$ w = 20,943 k = 31,222	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$ -	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857 0,943	Test 0,999 0,999 0,997 1,000	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8 42,5	KG V <sub>ref</sub> m/s           64,4           64,4           58,8           59,9
Gumbel I max Weibull III max	verf. MLM MM MLM MM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$ - -	the ter Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 $\alpha = 0,283$ u = 20,913 $\alpha = 0,282$ w = 20,964 k = 32,383 $\omega = 136,076$ w = 20,943 k = 31,222 $\omega = 136,00^{-2}$	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$ - -	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857 0,943	Test 0,999 0,999 0,997 1,000	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8 42,5	KG V <sub>ref</sub> m/s       64,4       64,4       58,8       59,9
Gumbel I max Weibull III max	verf. MLM MM MLM MM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$ - - w = 22,542	heter         Ergebnis PktSchätzung $u = 20,913$ $a = 0,283$ $u = 20,913$ $a = 0,282$ $w = 20,964$ $k = 32,383$ $\omega = 136,076$ $w = 20,943$ $k = 31,222$ $\omega = 136,00^{-2)}$ $w = 23,962$	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$ - - - - w = 25,382	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857 0,943	Test 0,999 0,999 0,997 1,000	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8 42,5	KG V <sub>ref</sub> m/s         64,4         64,4         58,8         59,9
Gumbel I max Weibull III max	verf. MLM MM MLM MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$ - - w = 22,542 k = 1,341	heter Ergebnis Pkt Schätzung u = 20,913 a = 0,283 u = 20,913 a = 0,282 w = 20,964 k = 32,383 $\omega = 136,076$ w = 20,943 k = 31,222 $\omega = 136,00^{2}$ w = 23,962 k = 1,856	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$ - - - - w = 25,382 k = 2,370	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857 0,943 0,943	Test 0,999 0,999 0,997 1,000	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8 42,5 39,7	KG V <sub>ref</sub> m/s         64,4         64,4         58,8         59,9         51,6
Gumbel I max Weibull III max	verf. MLM MM MLM MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$ - - w = 22,542 k = 1,341 T = 13,850	heter         Ergebnis PktSchätzung $u = 20,913$ $a = 0,283$ $u = 20,913$ $a = 0,282$ $w = 20,964$ $k = 32,383$ $\omega = 136,076$ $w = 20,943$ $k = 31,222$ $\omega = 136,00^{-2)}$ $w = 23,962$ $k = 1,856$ $T = 14,922$	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 $\alpha = 0,343$ - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$ - - - w = 25,382 k = 2,370 T = 15,993	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857 0,943 0,943	Test 0,999 0,999 0,997 1,000 0,985	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8 42,5 39,7	KG V <sub>ref</sub> m/s         64,4         64,4         58,8         59,9         51,6
Gumbel I max Weibull III max Weibull III min	verf. MLM MM MLM MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$ - w = 22,542 k = 1,341 T = 13,850 -	LeterErgebnis Pkt Schätzung $u = 20,913$ $a = 0,283$ $u = 20,913$ $a = 0,282$ $w = 20,964$ $k = 32,383$ $\omega = 136,076$ $w = 20,943$ $k = 31,222$ $\omega = 136,00^{-2)}$ $w = 23,962$ $k = 1,856$ $T = 14,922$ $w = 23,951$	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 a = 0,343 - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$ - - - w = 25,382 k = 2,370 T = 15,993 -	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857 0,943 0,943	Test 0,999 0,999 0,997 1,000 0,985	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8 42,5 39,7	KG V <sub>ref</sub> m/s         64,4         64,4         58,8         59,9         51,6
Gumbel I max Weibull III max	verf. MLM MM MLM MLM MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) u = 19,901 a = 0,223 - w = 19,912 k = -94,717 $\omega = -306,926$ - - w = 22,542 k = 1,341 T = 13,850 -	The terminate the second state of the second	95% - KI (obere Grenze) u = 21,926 a = 0,343 - - w = 22,016 k = 159,483 $\omega = 579,077$ - - - - w = 25,382 k = 2,370 T = 15,993 -	Test <sup>3)</sup> 0,943 0,943 0,857 0,943 0,943 0,549 0,813	Test 0,999 0,999 0,997 1,000 0,985 0,985	V <sub>ref</sub> m/s 43,8 43,8 41,8 42,5 39,7 40,1	KG V <sub>ref</sub> m/s         64,4         64,4         58,8         59,9         51,6         52,5

<sup>1)</sup> durchgeführt mit acht Klassen
 <sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen
 <sup>3)</sup> durchgeführt mit sieben Klassen

In Tab. 5-2 ist an den Ergebnissen der Anpassungstests zu erkennen, dass insbesondere die Weibull-IIImax-Verteilung und die Gumbel-I-max-Verteilung sehr gut die extremen Windgeschwindigkeiten am Standort FINO1 und FINO3 beschreiben. Beide Verteilungsfunktionen erzielen ähnlich hohe Anpassungsgüten, welche zum Teil deutlich über den Anpassungsgüten der anderen Verteilungsfunktionen aus Tab. 5-1 liegen, vgl. Anhang B.1. Die tendenziell höheren Anpassungsgüten am Standort FINO3 sind möglicherweise auf die Abhängigkeit der Anpassungstests vom Stichprobenumfang zurückzuführen, vgl. FISCHER (2001). Der Stichprobenumfang der untersuchten extremen Windgeschwindigkeit ist kleiner am Standort FINO3, vgl. Kapitel 4. Insgesamt führt die Schätzung der Verteilungsparameter mit der Momentenmethode bzw. der Maximum-Likelihood-Methode zu annähernd identischen Windgeschwindigkeiten Vref. Unter Ansatz der Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion wird die Windgeschwindigkeit V<sub>ref</sub> tendenziell etwas höher abgeschätzt. Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen eignen sich für beide untersuchten Messstandorte sowohl die Weibull-III-max-Verteilungsfunktion als auch die Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion zur Beschreibung von extremen Windgeschwindigkeiten nach der Block-Maxima-Methode. Für die folgenden Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeit nach der Block-Maxima-Methode wird die Weibull-III-max-Verteilungsfunktion gewählt. Die hohe Anpassungsgüte nach den durchgeführten Anpassungstests wird durch eine visuelle Beurteilung der Anpassung bestätigt, siehe Abb. 5-6. Die Verteilungsfunktion beschreibt die empirische Häufigkeitsverteilung auch im Bereich hoher (und niedriger) Quantilwerte sehr gut.



Abb. 5-6: Empirische Häufigkeitsverteilung der Acht-Wochen-Extremwerte der Windgeschwindigkeit *V* am Standort FINO1 (links) und der Vier-Wochen-Extremwerte der Windgeschwindigkeit *V* am Standort FINO3 (rechts) sowie angepasste Weibull-III-max-Verteilungsfunktionen

Die Ergebnisse der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe nach der *Block-Maxima-Methode* sind in Tab. 5-3 aufgeführt. Auch bei der signifikanten Wellenhöhe werden insbesondere mit der Weibull-III-max-Verteilungsfunktion und Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion hohe Anpassungsgüten erreicht. Die Anpassungsgüten bei Verwendung anderer Verteilungsfunktionen fallen zum Teil deutlich geringer aus, vgl. Anhang B.2. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Windgeschwindigkeit ist die Streuung der Ergebnisse der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe stärker. Dabei unterscheiden sich auch die Ergebnisse unter Ansatz der unterschiedlichen Schätzverfahren bei gleicher Verteilungsfunktion stärker. Als Ursache wird der kleinere Stichprobenumfang der über drei Stunden gemittelten signifikanten Wellenhöhen vermutet.

#### Kapitel 5

#### Tab. 5-3: Kennwerte der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe nach der Block-Maxima-Methode an den Standorten FINO1 und FINO3

Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	Hs50	95%- KG H <sub>s50</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m	m
		<i>k</i> = 5,750	<i>k</i> = 8,754	k = 11,757	0,736	0.970	10,0	13,2
0	MLM	$\lambda = 1,229$	$\lambda = 1,900$	$\lambda = 2,571$		0,870		
Gamma		-	<i>k</i> = 8,754	-	0.704	0.070	10.0	10.0
	ММ	-	$\lambda = 1,900$	-	0,736	0,870	10,0	13,2
	1/7.1/	<i>u</i> = 3,541	<i>u</i> = 3,888	<i>u</i> = 4,235	0,736	0,805	11,6	16,6
Gumbel I max	MLM	$\alpha = 0,614$	$\alpha = 0,751$	$\alpha = 0,887$				
		-	<i>u</i> = 3,906	-	0 4 40	0.044	10.0	
	ММ	-	$\alpha = 0,824$	-	0,469	0,964	10,9	15,5
		<i>w</i> = 3,596	<i>w</i> = 3,961	<i>w</i> = 4,326				
	MLM	<i>k</i> = -4,013	<i>k</i> = 9,666	<i>k</i> = 23,346	0,446	0,918	9,8	12,6
		<i>ω</i> = -0,692	ω = 16,958	$\omega = 34,609$				
Weibull III max		-	<i>w</i> = 3,947	-				
	MM	-	<i>k</i> = 9,518	-	0,736	0,890	9,9	12,7
		-	$\omega = 16,96^{2}$	-				
FINO3								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	$H_{s50}$	95%- KG H <sub>s50</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95% - KI (obere Grenze)			m	m
	1/7.1/	<i>u</i> = 3,076	<i>u</i> = 3,373	u = 3,671	0,823	0,910	10.0	16.1
	MLM						10.0	1 < 1
G 1 1 1		$\alpha = 0,752$	$\alpha = 0,974$	<i>α</i> = 1,197	0,823	0,910	10,0	16,1
Gumbel I max	MLM	$\alpha = 0,752$	$\alpha = 0,974$ u = 3,330	α = 1,197	0,823	0,910	10,0	16,1
Gumbel I max	MM	α = 0,752 -	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$	α = 1,197 -	0,823 0,221	0,910 0,891	10,0 11,0	16,1 18,0
Gumbel I max	MM	α = 0,752 - - w = 3,089	$\alpha = 0.974$ u = 3.330 $\alpha = 0.843$ w = 3.398	α = 1,197 - - w = 3,706	0,823	0,910 0,891	10,0 11,0	16,1 18,0
Gumbel I max	MLM MM MLM	$\alpha = 0,752$ - - w = 3,089 k = -14,824	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$ w = 3,398 k = 28,943	$\alpha = 1,197$ - - w = 3,706 k = 72,711	0,823 0,221 0,678	0,910 0,891 0,888	10,0 11,0 9,6	16,1 18,0 14,6
Gumbel I max	MLM MM MLM	$\alpha = 0,752$ - - w = 3,089 k = -14,824 $\omega = -11,019$	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$ w = 3,398 k = 28,943 $\omega = 34,170$	$\alpha = 1,197$ - - w = 3,706 k = 72,711 $\omega = 79,359$	0,823 0,221 0,678	0,910 0,891 0,888	10,0 11,0 9,6	16,1 18,0 14,6
Gumbel I max Weibull III max	MLM MM MLM	$\alpha = 0,752$ - - w = 3,089 k = -14,824 $\omega = -11,019$	$\alpha = 0.974$ u = 3.330 $\alpha = 0.843$ w = 3.398 k = 28.943 $\omega = 34.170$ w = 3.343	$\alpha = 1,197$ - - w = 3,706 k = 72,711 $\omega = 79,359$	0,823 0,221 0,678	0,910 0,891 0,888	10,0 11,0 9,6	16,1 18,0 14,6
Gumbel I max Weibull III max	MLM MM MLM MM	$\alpha = 0,752$ - - w = 3,089 k = -14,824 $\omega = -11,019$ -	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$ w = 3,398 k = 28,943 $\omega = 34,170$ w = 3,343 k = 24,746	$\alpha = 1,197$ - - w = 3,706 k = 72,711 $\omega = 79,359$ -	0,823 0,221 0,678 0,093	0,910 0,891 0,888 0,791	10,0 11,0 9,6 10,4	16,1 18,0 14,6 16,1
Gumbel I max	MLM MM MLM MM	$\alpha = 0,752$ - - - - - - - - - - -	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$ w = 3,398 k = 28,943 $\omega = 34,170$ w = 3,343 k = 24,746 $\omega = 34,20^{2}$	$\alpha = 1,197$ - - w = 3,706 k = 72,711 $\omega = 79,359$ - -	0,823 0,221 0,678 0,093	0,910 0,891 0,888 0,791	10,0 11,0 9,6 10,4	16,1 18,0 14,6 16,1
Gumbel I max Weibull III max	MLM MM MLM MM	$\alpha = 0,752$ - w = 3,089 k = -14,824 $\omega = -11,019$ - - w = 3,762	a = 0,974 u = 3,330 a = 0,843 w = 3,398 k = 28,943 $\omega = 34,170$ w = 3,343 k = 24,746 $\omega = 34,20^{2}$ w = 4,232	$\alpha = 1,197$ - - w = 3,706 k = 72,711 $\omega = 79,359$ - - - w = 4,701	0,823 0,221 0,678 0,093	0,910 0,891 0,888 0,791	10,0 11,0 9,6 10,4	16,1 18,0 14,6 16,1
Gumbel I max Weibull III max	MLM MM MLM MM	$\alpha = 0,752$ - w = 3,089 k = -14,824 $\omega = -11,019$ - - w = 3,762 k = 1,099	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$ w = 3,398 k = 28,943 $\omega = 34,170$ w = 3,343 k = 24,746 $\omega = 34,20^{2}$ w = 4,232 k = 1,440	$\alpha = 1,197$	0,823 0,221 0,678 0,093 0,160	0,910 0,891 0,888 0,791 0,937	10,0 11,0 9,6 10,4	16,1 18,0 14,6 16,1 15,6
Gumbel I max Weibull III max	MLM MM MLM MLM	$\alpha = 0,752$ - w = 3,089 k = -14,824 $\omega = -11,019$ - - w = 3,762 k = 1,099 T = 1,823	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$ w = 3,398 k = 28,943 $\omega = 34,170$ w = 3,343 k = 24,746 $\omega = 34,20^{2}$ w = 4,232 k = 1,440 T = 1,943	$\alpha = 1,197$	0,823 0,221 0,678 0,093 0,160	0,910 0,891 0,888 0,791 0,937	10,0 11,0 9,6 10,4	16,1 18,0 14,6 16,1 15,6
Gumbel I max Weibull III max Weibull III min	MLM MM MLM MLM	$\alpha = 0,752$ - w = 3,089 k = -14,824 $\omega = -11,019$ - - w = 3,762 k = 1,099 T = 1,823 -	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$ w = 3,398 k = 28,943 $\omega = 34,170$ w = 3,343 k = 24,746 $\omega = 34,20^{2)}$ w = 4,232 k = 1,440 T = 1,943 w = 4,208	$\alpha = 1,197$	0,823 0,221 0,678 0,093 0,160	0,910 0,891 0,888 0,791 0,937	10,0 11,0 9,6 10,4	16,1 18,0 14,6 16,1 15,6
Gumbel I max Weibull III max Weibull III min	MLM MM MLM MLM MMM	$\alpha = 0,752$ - w = 3,089 k = -14,824 $\omega = -11,019$ - - w = 3,762 k = 1,099 T = 1,823 - -	$\alpha = 0,974$ u = 3,330 $\alpha = 0,843$ w = 3,398 k = 28,943 $\omega = 34,170$ w = 3,343 k = 24,746 $\omega = 34,20^{2}$ w = 4,232 k = 1,440 T = 1,943 w = 4,208 k = 1,373	$\alpha = 1,197$ - w = 3,706 k = 72,711 $\omega = 79,359$ - - w = 4,701 k = 1,782 T = 2,064 -	0,823 0,221 0,678 0,093 0,160 0,571	0,910 0,891 0,888 0,791 0,937 0,827	10,0 11,0 9,6 10,4 10,3 10,8	16,1 18,0 14,6 16,1 15,6 16,6

<sup>1)</sup> durchgeführt mit sieben Klassen
 <sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen
Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wird auch für die Extremwertanalysen der signifikanten Wellenhöhe nach der *Block-Maxima-Methode* die Weibull-III-max-Verteilungsfunktion gewählt. Die Eignung dieser Verteilungsfunktion ist durch die Darstellung der empirischen Häufigkeitsverteilungen und Verteilungsfunktionen in Abb. 5-7 veranschaulicht.



Abb. 5-7: Häufigkeitsverteilung der Acht-Wochen-Extremwerte der signifikanten Wellenhöhe *H<sub>s</sub>* am Standort FINO1 (links) und der Vier-Wochen-Extremwerte der signifikanten Wellenhöhe *H<sub>s</sub>* am Standort FINO3 (rechts) sowie angepasste Weibull-III-max-Verteilungsfunktionen

In Abb. 5-7 (rechts) wird die empirische Häufigkeitsverteilung für hohe signifikante Wellenhöhen etwas besser durch den flacheren Verlauf der Verteilungsfunktion, deren Parameter durch die *Momenten-methode* geschätzt werden, beschrieben. Da die Anpassungstests ein Maß für die Anpassung über den gesamten Verlauf (Chi-Quadrat-Anpassungstest) bzw. ein Maß für die größte Abweichung zwischen empirischer Verteilung und Verteilungsfunktion (Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstest) liefern, werden Anpassungen in Teilbereichen der Verteilungsfunktion unter Umständen nicht durch die Anpassungstests ausgedrückt. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher bei jeder Extremwertanalyse zusätzlich eine visuelle Beurteilung der Anpassung vorgenommen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Weibull-III-max-Verteilungsfunktion in Kombination mit der *Block-Maxima-Methode* sehr gut die Einwirkungsparameter Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe sowohl für den Standort FINO1 als auch FINO3 beschreibt. Es ist anzumerken, dass eine Abschätzung von Extremwerten mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren, basierend auf einem vier Jahre umfassenden Beobachtungszeitraum (FINO3), mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

# 5.1.2.2 Verteilungsfunktionen für Stichproben nach der Peak-Over Threshold-Methode

Zur Wahl geeigneter Verteilungsfunktionen für die Beschreibung von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen nach der *Peak-Over-Threshold-Methode* wurden Extremwertanalysen mittels der in Tab. 5-1 aufgeführten Verteilungsfunktionen durchgeführt. In Tab. 5-4 und Tab. 5-5 sind die Ergebnisse der Extremwertanalysen für die drei Verteilungsfunktionen mit den höchsten Anpassungsgüten aufgeführt.

#### Kapitel 5

#### Kennwerte der Extremwertanalyse der Windgeschwindigkeit mit der Peak-Over-Tab. 5-4: Threshold-Methode ( $V_0 > 30$ m/s) an den Standorten FINO1 und FINO3

FINO1								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	Vref	95%- KG V <sub>ref</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt 95%- KI Schätzung (obere Grenze)				m/s	m/s
	MT M	$\tau = 30,020$	$\tau = 30,020$	$\tau = 30,020$	0.220	0.521	40.2	16 1
		$\lambda = 0,471$	$\lambda = 0,596$	$\lambda = 0,720$	0,329	0,551	40,2	40,4
Exponential		-	$\tau = 29,817$	-	0.019	0.220	41.2	10 7
	ММ	-	$\lambda = 0,532$	-	0,018	0,239	41,5	40,2
	MIM	a = 14,992	a = 18,952	a = 22,912	0 165	0 702	41.4	40.4
Donoto	MLM	k = 30,020	k = 30,020	k = 30,020	0,105	0,705	41,4	49,4
Pareto		-	a = 17,882	-	0 228	0 696	42.1	50.7
	ММ	-	k = 29,925	-	0,228	0,080	42,1	50,7
		w = 31,278	w = 31,662	w = 32,046				
Weibull III min	MLM	k = 0,804	k = 0,956	k = 1,108	0,349	0,641	41,0	47,9
		-	$T = 30,00^{2}$	-				
	ММ	-	w = 31,618	-				
		-	k = 0,904	-	0,391	0,768	41,9	49,9
		-	$T = 30,00^{2}$	-				
FINO3								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>3)</sup>	K-S- Test	Vref	95%- KG V <sub>ref</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m/s	m/s
	MIM	τ = -	$\tau = 30,00^{2}$	τ = -	0.840	0 690	29.6	44.2
E	MLM	$\lambda = 0,496$	$\lambda = 0,662$	$\lambda = 0,828$	0,849	0,080	38,0	44,2
Exponential	1414	-	$\tau = 30,00^{2}$	-	0.144	0.027	27.6	10.5
	11111	-	$\lambda = 0,75^{(2)}$	-	0,144	0,237	57,0	42,3
	MIM	a = 15,506	a = 20,701	a = 25,896	0.642	0.502	20.5	16.6
Donoto	MLM	-	k = 30,00 <sup>2)</sup>	-	0,042	0,392	39,3	40,0
Pareto	1414	-	a = 20,850	-	0 5 4 0	0.574	20.5	16.1
	IVI IVI	-	k = 30,00 <sup>2)</sup>	-	0,540	0,574	39,5	40,4
Weibull III min		w = 31,205	w = 31,570	w = 31,936				
	MLM	k = 0,896	k = 1,114	k = 1,332	0,837	0,985	37,4	41,7
		T = 30,026	T = 30,026	T = 30,026				
		-	w = 31,582	-				
	ММ	-	k = 1,136	-	0,931	0,989	37,3	41,5
		-	$T = 30,00^{2}$	-				

<sup>1)</sup> durchgeführt mit neun Klassen
 <sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen
 <sup>3)</sup> durchgeführt mit sieben Klassen

Eine vollständige Auflistung der Ergebnisse der Extremwertanalysen unter Ansatz der in Tab. 5-1 aufgeführten Verteilungsfunktionen befindet sich in Anhang B.1 und Anhang B.2. Die extremen Windgeschwindigkeiten an den Standorten FINO1 und FINO3 werden nach den durchgeführten Untersuchungen am optimal durch eine Weibull-III-min-Verteilung beschrieben, vgl. Tab. 5-4. Diese Verteilungsfunktion erzielt unter allen untersuchten Verteilungen nach Tab. 5-1 die höchsten Anpassungsgüten. Die Schätzung mit der *Momentenmethode* bzw. der *Maximum-Likelihood-Methode* führt dabei zu weitgehend identischen Verteilungsparametern. Demzufolge stimmen auch die resultierenden Windgeschwindigkeiten  $V_{ref}$  für beide Schätzverfahren gut überein. Die Approximation der empirischen Häufigkeitsverteilungen durch die Verteilungsfunktionen ist in Abb. 5-8 veranschaulicht.



Abb. 5-8: Empirische Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten V nach der *Peak-Over-Threshold-Methode* ( $V_0 > 30$  m/s) an den Standorten FINO1 (links) und FINO3 (rechts) sowie angepasste Weibull-III-min-Verteilungen

In Abb. 5-8 ist zu erkennen, dass die empirische Häufigkeitsverteilung auch im Bereich hoher Windgeschwindigkeiten gut beschrieben wird. Der übereinstimmende Verlauf der dargestellten Verteilungsfunktion veranschaulicht die nahezu identische Schätzung der Verteilungsparameter.

Die Ergebnisse der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe nach der *Peak-Over-Threshold-Methode* sind in Tab. 5-5 aufgeführt. Es fällt auf, dass trotz insgesamt hoher Anpassungsgüten die resultierenden charakteristischen Werte zum Teil deutlich voneinander abweichen. Anschaulich zeigen das die Ergebnisse unter Ansatz der Pareto-Verteilungsfunktion im Vergleich zu den Ergebnissen unter Ansatz der Exponential-Verteilungsfunktion oder der Weibull-III-min-Verteilungsfunktion in Tab. 5-5. Grund hierfür sind die geringfügig abweichenden Verläufe der Verteilungsfunktionen im oberen Quantilbereich. Durch den flachen Verlauf der Verteilungsfunktion in diesem Bereich führen bereits kleine Änderungen in den Quantilen zu nicht unerheblichen Abweichungen bei den Quantilwerten. Insgesamt werden auch bei der signifikanten Wellenhöhe die höchsten Anpassungsgüten mit der Weibull-III-min-Verteilungsfunktion erzielt.

#### Kapitel 5

#### Kennwerte der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe mit der Peak-Over-Tab. 5-5: Threshold-Methode ( $H_{s,0} > 5$ m) an den Standorten FINO1 und FINO3

FINO1								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparameter			X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	$H_{s50}$	95%- KG H <sub>s50</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m	m
	147.14	$\tau = 5,000$	$\tau = 5,000$	$\tau = 5,000$	0 727	0.000	10 C	12.7
	MLM	$\lambda = 1,005$	$\lambda = 1,192$	$\lambda = 1,378$	0,737	0,966	10,6	15,7
Exponential		-	$\tau = 4,999$	-	0.792	0.000	10.0	12.7
	ММ	-	$\lambda = 1,183$	-	0,782	0,980	10,6	13,7
	MIM	a = 5,769	a = 6,839	a = 7,908	0.745	0.622	12.0	20.4
Domoto	MLM	-	$k = 4,999^{2}$	-	0,745	0,623	13,2	20,4
Pareto		-	a = 6,946	-	0.716	0.500	12.1	20.0
	ММ	-	k = 4,999 <sup>2)</sup>	-	0,716	0,506	13,1	20,0
		w = 5,688	w = 5,828	w = 5,969				
	MLM	k = 0,849	k = 0,969	k = 1,088	0,824	0,955	10,9	14,2
<b>XX7 '1 11 TTT '</b>		-	$T = 4,999^{2}$	-				
Weibull III min		-	w = 5,838	-		0,980	10,6	
	ММ	-	k = 0,995	-	0,810			13,8
		-	T = 4,999 <sup>2)</sup>	-				
FINO3								
FINO3 Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>3)</sup>	K-S- Test	$H_{s50}$	95%- KG H <sub>s50</sub>
FINO3 Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze)	neter Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)	X <sup>2</sup> - Test <sup>3)</sup>	K-S- Test	<i>H</i> <sub>s50</sub> m	95%- KG H <sub>s50</sub> m
FINO3 Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$	heter Ergebnis Pkt Schätzung τ = 5,000	95%- KI (obere Grenze) τ = 5,000	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> )	K-S- Test	H <sub>s</sub> 50 m	95%- KG H <sub>s50</sub> m
FINO3 Verteilungsfunktion	Schätz verf. MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$	95%- KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$	X <sup>2</sup> - Test <sup>3)</sup> 0,907	K-S- Test 0,999	H <sub>s50</sub> m 9,7	95%- KG <i>H</i> s50 m 12,9
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential	Schätz verf.	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907	K-S- Test 0,999	H <sub>350</sub> m 9,7	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential	Schätz verf. MLM MM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ -	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$	95%- KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907 0,994	K-S- Test 0,999 0,984	H <sub>550</sub> m 9,7 9,9	95%- KG <i>H</i> <sub>550</sub> m 12,9 13,1
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential	Schätz verf. MLM MM	Verteilungsparan 95% - KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - - a = 4,940	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907 0,994	K-S- Test 0,999 0,984	H <sub>s50</sub> m 9,7 9,9	95%- KG H <sub>s50</sub> m 12,9 13,1
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential	Schätz verf. MLM MM MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - a = 4,940 -	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 -	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907 0,994 0,992	K-S- Test 0,999 0,984 0,972	H <sub>s50</sub> m 9,7 9,9	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential Pareto	Schätz verf. MLM MM MLM	Verteilungsparan 95% - KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - - a = 4,940 -	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$ a = 6,866	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 -	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907 0,994 0,992	K-S- Test 0,999 0,984 0,972	H <sub>550</sub> m 9,7 9,9 11,4	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential Pareto	Schätz verf. MLM MM MLM MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - - a = 4,940 - -	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$ a = 6,866 $k = 4,999^{-2}$	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 - -	X <sup>2</sup> - Test <sup>3)</sup> 0,907 0,994 0,992 0,875	K-S- Test 0,999 0,984 0,972 0,945	H <sub>s50</sub> m 9,7 9,9 11,4 11,3	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6 17,3
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential Pareto	Schätz verf. MLM MM MLM MLM	Verteilungsparan 95% - KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - - a = 4,940 - - w = 5,600	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$ a = 6,866 $k = 4,999^{-2}$ w = 5,844	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 - - - w = 6,08819	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907 0,994 0,992 0,875	K-S- Test 0,999 0,984 0,972 0,945	H <sub>550</sub> m 9,7 9,9 11,4 11,3	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6 17,3
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential Pareto	Schätz verf. MLM MM MLM MLM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - - a = 4,940 - - w = 5,600 k = 0,775	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$ a = 6,866 $k = 4,999^{-2}$ w = 5,844 k = 0,981	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 - - - - w = 6,08819 k = 1,187	X <sup>2</sup> - Test <sup>3)</sup> 0,907 0,994 0,992 0,875 0,944	K-S- Test 0,999 0,984 0,972 0,945 1,000	H <sub>s50</sub> m 9,7 9,9 11,4 11,3 9,9	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6 17,3 13,1
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential Pareto	Schätz verf. MLM MM MLM MLM	Verteilungsparan 95% - KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - - a = 4,940 - - w = 5,600 k = 0,775 -	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$ a = 6,866 $k = 4,999^{-2}$ w = 5,844 k = 0,981 $T = 4,999^{-2}$	95%- KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 - - - w = 6,08819 k = 1,187 -	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907 0,994 0,992 0,875 0,944	K-S- Test 0,999 0,984 0,972 0,945 1,000	H <sub>s50</sub> m 9,7 9,9 11,4 11,3 9,9	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6 17,3 13,1
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential Pareto Weibull III min	Schätz verf. <i>MLM</i> <i>MM</i> <i>MLM</i> <i>MLM</i>	Verteilungsparan 95% - KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - - a = 4,940 - - w = 5,600 k = 0,775 - -	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$ a = 6,866 $k = 4,999^{-2}$ w = 5,844 k = 0,981 $T = 4,999^{-2}$ w = 5,842	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 - - - w = 6,08819 k = 1,187 -	X <sup>2</sup> - Test <sup>3)</sup> 0,907 0,994 0,992 0,875 0,944	K-S- Test 0,999 0,984 0,972 0,945 1,000	H <sub>s50</sub> m 9,7 9,9 11,4 11,3 9,9	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6 17,3 13,1
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential Pareto Weibull III min	Schätz verf. MLM MM MLM MM	Verteilungsparan 95%- KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - a = 4,940 - w = 5,600 k = 0,775 - - -	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$ a = 6,866 $k = 4,999^{-2}$ w = 5,844 k = 0,981 $T = 4,999^{-2}$ w = 5,842 k = 0,975	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 - - - w = 6,08819 k = 1,187 - - -	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907 0,994 0,992 0,875 0,944	K-S- Test 0,999 0,984 0,972 0,945 1,000	H <sub>s50</sub> m 9,7 9,9 11,4 11,3 9,9	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6 17,3 13,1 13,2
FINO3 Verteilungsfunktion Exponential Pareto Weibull III min	Schätz verf. MLM MM MLM MLM MLM	Verteilungsparan 95% - KI (untere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 0,860$ - - a = 4,940 - - w = 5,600 k = 0,775 - - - -	heter Ergebnis Pkt Schätzung $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,176$ $\tau = 4,977$ $\lambda = 1,144$ a = 6,760 $k = 4,999^{-2}$ a = 6,866 $k = 4,999^{-2}$ w = 5,844 k = 0,981 $T = 4,999^{-2}$ w = 5,842 k = 0,975 $T = 4,999^{-2}$	95% - KI (obere Grenze) $\tau = 5,000$ $\lambda = 1,493$ - - a = 8,580 - - - w = 6,08819 k = 1,187 - - - -	X <sup>2</sup> - Test <sup>3</sup> ) 0,907 0,994 0,992 0,875 0,944 0,944	K-S- Test 0,999 0,984 0,972 0,945 1,000	H <sub>550</sub> m 9,7 9,9 11,4 11,3 9,9 9,9	95%- KG <i>H</i> <sub>s50</sub> m 12,9 13,1 17,6 17,3 13,1 13,2

<sup>1)</sup> durchgeführt mit zwölf Klassen
 <sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen
 <sup>3)</sup> durchgeführt mit sieben Klassen

Wie bereits bei den Windgeschwindigkeiten führt die Schätzung mit der *Momentenmethode* bzw. der *Maximum-Likelihood-Methode* zu nahezu identischen Verteilungsparametern. Demzufolge stimmen die resultierenden signifikanten Wellenhöhen  $H_{s50}$  für beide Schätzverfahren weitestgehend überein. Die gute Übereinstimmung der empirischen Häufigkeitsverteilungen und Weibull-III-min-Verteilungsfunktionen zeigt Abb. 5-9. Auch im Bereich hoher signifikanter Wellenhöhen bleibt die gute Übereinstimmung bestehen.



Abb. 5-9: Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  nach der *Peak-Over-Threshold-Methode* ( $H_{s,0} > 5$  m) an den Standorten FINO1 (links) und FINO3 (rechts) und angepasste Weibull-III-min-Verteilungen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die betrachteten Einwirkungsparameter bei einer Stichprobenerhebung nach der *Peak-Over-Threshold-Methode* optimal durch eine Weibull-III-min-Verteilungsfunktion beschrieben werden. Dies gilt sowohl für die extremen Windgeschwindigkeiten als auch die signifikanten Wellenhöhen an den Standorten FINO1 und FINO3. Die bereits im vorherigen Kapitel genannten Unsicherheiten bei der Abschätzung von Extremwerten mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren, basierend auf einem vier Jahre umfassenden Beobachtungszeitraum, gelten entsprechend.

# 5.1.2.3 Zusammenfassung Verteilungsfunktionen

Der Schluss von einer Stichprobe einer Zufallsvariable auf die Grundgesamtheit wird durch Verteilungsfunktionen möglich. Die optimale Beschreibung der empirischen Verteilung in den Bereichen seltener Ereignisse ist insbesondere für Extremwertanalysen entscheidend, da bereits kleine Änderungen im Verlauf der Verteilungsfunktion zu deutlichen Änderungen der charakteristischen Einwirkungsparameter führen können. Die Eignung verschiedener Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der Zufallsvariablen extreme Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe in der Deutschen Bucht wird in den Abschnitten 5.1.2.1 und 5.1.2.2 untersucht. Die Datengrundlage bilden Extremwerte, die mittels der *Block-Maxima-Methode* bzw. der *Peak-Over-Threshold-Methode* aus langjährigen Messzeitreihen der Standorte FINO1 und FINO3 ermittelt werden. Die in Tab. 5-1 aufgeführten Verteilungsfunktionen werden mit der *Momentenmethode* und der *Maximum-Likelihood*-

*Methode* an die empirischen Häufigkeitsverteilungen angepasst. Die Anpassung wird visuell durch die Darstellung der empirischen Häufigkeitsverteilung und der approximierten Verteilungsfunktion sowie durch die verteilungsunabhängigen Chi-Quadrat-Anpassungstest und Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstests bewertet. In Tab. 5-6 sind die Verteilungsfunktionen aufgeführt, welche aufgrund der durchgeführten Untersuchungen für die Extremwertanalyse der genannten Einwirkungsparameter in der südlichen Nordsee empfohlen werden. Die Eignung der Verteilungsfunktionen unterscheidet sich nach den Verfahren der Stichprobenerhebung. Es sei darauf hingewiesen, dass die Einwirkungsparameter an anderen Standorten aufgrund zahlreicher, standortabhängiger Einflussfaktoren unter Umständen durch andere Verteilungsfunktionen geeigneter approximiert werden können.

Tab. 5-6:Verteilungsfunktionen für Extremwertanalysen von Windgeschwindigkeiten und<br/>signifikanten Wellenhöhen in der Deutschen Bucht

Methode der Extremwertanalyse	Einwirkungsparameter	Verteilungsfunktion
Dlack Maning Matheda	V	Weibull III max
Block-Maxima-Methode	$H_s$	Weibull III max
Pook Quer Threehold Methodo	V	Weibull III min
Peak-Over-Inresnoia-Meinoae	Hs	Weibull III min

Die in Tab. 5-6 aufgeführten Verteilungsfunktionen werden für alle weiteren Extremwertanalysen von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen in dieser Arbeit verwendet.

# 5.1.3 Datengrundlage

# 5.1.3.1 Stochastisch unabhängige Daten

Stochastische und statistische Modelle sind im Allgemeinen für stochastisch unabhängige Zufallsvariablen gültig. Die Messwerte der hier betrachteten Zeitreihen aufeinander folgender Zehn-Minuten und Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe weisen jedoch eine hohe stochastische Abhängigkeit auf, vgl. Abb. 5-11. Als Maß für die stochastische Abhängigkeit kann die Autokorrelationsfunktion verwendet werden. Die Autokorrelationsfunktion zum zeitlichen Versatz (Lag)  $\tau$  beschreibt die Korrelation zwischen den Werten  $x_i$  und  $x_{i+\tau}$  einer Zeitreihe. Ein Lag gibt demzufolge an, um wie viele Stellen eine Zeitreihe gegenüber sich selbst verschoben ist, siehe Abb. 5-10.

Zeitreihe mit Messwerten $x_1, x_2,, x_n$	<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>4</sub>	<i>x</i> <sub>5</sub>	<i>x</i> <sub>6</sub>	<i>x</i> <sub>7</sub>		<i>x</i> <sub>n</sub>	
Um $\tau$ verschobene Zeitreihe mit Messwerten $x_1, x_2,, x_n$		<i>x</i> <sub>1</sub>	<i>x</i> <sub>2</sub>	<i>x</i> <sub>3</sub>	<i>x</i> <sub>4</sub>	<i>x</i> <sub>5</sub>	<i>x</i> <sub>6</sub>	<i>x</i> <sub>7</sub>		x <sub>n</sub>
	τ.									

Abb. 5-10: Schematische Darstellung einer gegenüber sich selbst um  $\tau$  verschobenen Zeitreihe

Voraussetzung ist eine konstante Abtastrate bei der Messwerterfassung. Eine Zeitreihe, die nicht verschoben ist, weist einen Lag von null auf. Zur Berechnung der Autokorrelationsfunktion wird zunächst die Autokovarianzfunktion  $C(\tau)$  berechnet. Liegt eine Zeitreihe x(t) mit *n* Messwerten  $x_1$ ,  $x_2$  ...  $x_n$  vor, so ergibt sich die Autokovarianzfunktion  $C(\tau)$  zu Gl. (5-2), vgl. auch SPAETHE (1992), SANTEL (2006) und GLOVER et al. (2011).

$$C(\tau) = \frac{1}{n - \tau} \sum_{i=1}^{n - \tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x})$$
(5-2)

Dabei sind  $x_i$  die Messwerte zum Zeitpunkt  $t_i$  mit i = 1, 2, ..., n und  $\bar{x}$  der Mittelwert der betrachteten Zeitreihe. Die Autokorrelationsfunktion  $R(\tau)$  ist die normierte Autokovarianzfunktion und ergibt sich zu Gl. (5-3).

$$R(\tau) = \frac{C(\tau)}{C(0)}$$
(5-3)

Die Autokorrelationsfunktion kann Werte zwischen  $|R(\tau)| \rightarrow 0$ , keine Korrelation zwischen den Zeitreihenwerten, und  $|R(\tau)| = 1$ , starke Korrelation bzw. Übereinstimmung der Zeitreihenwerte, annehmen. Die Autokorrelationsfunktion für die untersuchten Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe sind in Abb. 5-11 für verschiedene Lags dargestellt. Die Dauer der Messzeitreihen beträgt zehn Jahre. Dargestellt sind Lags von bis zu 32 bzw. 64 Stunden.



Abb. 5-11: Autokorrelationsfunktion der Messzeitreihen der Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit (links) und Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe (rechts) am Standort FINO1

Für beide Zufallsvariablen ergeben sich bei einem Lag von wenigen Stunden hohe Werte für die Autokorrelationsfunktion. Es ist von einer hohen stochastischen Abhängigkeit der Werte der Messzeitreihen auszugehen. Mit zunehmendem Lag nimmt die Korrelation der Messwerte ab, was bei der Windgeschwindigkeit schneller geschiet als bei der signifikanten Wellenhöhe. Die schnellere Abnahme ist plausibel, da sich Seegangsverhältnisse langsamer ändern als Windverhältnisse. Die Eigenschaft einer Zeitreihe, einen Zustand beizubehalten, wird auch als Erhaltungsneigung bezeichnet. Nach BÜHL (2014) gelten Korrelationskoeffizienten von  $|R(\tau)| < 0,5$  im Allgemeinen als Hinweis auf eine geringe Korrelation zwischen den Werten einer Zeitreihe. Nach MATHIESEN et al. (1994) wird zur Sicherstellung stochastisch unabhängiger Daten bei der *Peak-Over-Threshold-Methode* die Einhaltung eines bestimmten Zeitintervalls zwischen den Extremwerten empfohlen. Das Zeitintervall soll mindestens dem Lag entsprechen, für den die Autokorrelationsfunktion 0,3 bis 0,5 ergibt. Mathiesen et al. beziehen sich dabei auf Extremwertanalysen von signifikanten Wellenhöhen. In HANSEN (2004) ist angegeben, dass die stochastische Abhängigkeit von Messdaten der Windgeschwindigkeit im Allgemeinen nach sechs bis zwölf Stunden abgeklungen ist. Aus den angeführten Gründen kann etwa ab einem Korrelationskoeffizienten von  $|R(\tau)| < 0,5$  von weitgehend stochastisch unabhängigen Daten ausgegangen werden.

Für Stichproben nach der Block-Maxima-Methode ist diese Anforderung in aller Regel automatisch erfüllt. Bei den untersuchten Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen gelten Extremwerte ab einem Bezugszeitintervall von wenigen Tagen bereits als gering korreliert. Zur Sicherstellung stochastisch unabhängiger Daten für Stichproben nach der Peak-Over-Threshold-Methode ist dagegen unter Umständen eine Selektion von Messwerten erforderlich. Eine Anwendung der Peak-Over-Extremwerte mit einem Bezugszeitintervall von ein bis drei Tagen Threshold-Methode auf gewährleistet nach den durchgeführten Untersuchungen gering korrelierte Zufallsvariablen. Nicht berücksichtigt in den Untersuchungen ist die Höhe des Schwellenwerts. Mit zunehmendem Schwellenwert nimmt die stochastische Abhängigkeit der Zufallsvariablen oberhalb des gewählten Schwellenwerts ab. In SCHMIDT et al. (2015) wird anhand von Extremwertanalysen bei Messzeitreihen von Windgeschwindigkeiten gezeigt, dass es vorwiegend bei niedrigen Schwellenwerten einen Unterschied macht ob die Peak-Over-Threshold-Methode auf Zehn-Minuten-Mittelwerte oder auf Tagesextremwerte angewendet wird. Die Ergebnisse der Extremwertanalyse auf Grundlage der Tagesextremwerte stimmen in diesem Fall besser mit den Ergebnissen von Extremwertanalysen mit einem hohen Schwellenwert (und stochastisch unabhängigen Daten) überein. Bei Ansatz eines hohen Schwellenwerts führen dagegen sowohl die Ergebnisse der Extremwertanalyse auf Grundlage von Zehn-Minuten-Mittelwerten als auch von Tagesextremwerten zu übereinstimmenden Ergebnissen. Ob dieses Ergebnis allein auf die stochastische Abhängigkeit der Zehn-Minuten-Mittelwerte oder (auch) auf den Ansatz extremerer Ereignisse bei Ansatz der Tagesextremwerte zurückzuführen ist, wird in SCHMIDT et al. (2015) nicht untersucht. Der bei der Peak-Over-Threshold-Methode beobachtete Einfluss des Schwellenwerts gilt entsprechend für zunehmende Bezugszeitintervalle bzw. "Blockgrößen" bei der Block-Maxima-Methode. Die Untersuchungen zum Einfluss der Bezugszeitintervalle bzw. Schwellenwerte auf die Extremwertanalyse in Abschnitt 5.1.3.2 bestätigen die Ergebnisse von SCHMIDT et al. (2015). Die Gewährleistung stochastisch unabhängiger Daten durch ausreichend lange Bezugszeitintervalle bzw. hohe Schwellenwerte hat gegenüber einer vorherigen Selektion der Daten den Vorteil einer größeren Datengrundlage und einer damit verbundenen zuverlässigeren Extremwertanalyse.

# 5.1.3.2 Einfluss der Datengrundlage auf die Extremwertanalyse

Die Datengrundlage der Extremwertanalyse wird mittels der *Block-Maxima-Methode* oder der *Peak-Over-Threshold-Methode*, vgl. auch Abschnitte 3.1.3 und 3.1.2, aus den Messdaten des Beobachtungszeitraums bestimmt. Dabei beeinflusst die "Blockgröße", also das Bezugszeitintervall der Extremwerte, bzw. der Schwellenwert die Extremwertanalyse. Für eine möglichst präzise Extremwertanalyse sind daher geeignete Bezugszeitintervalle bzw. Schwellenwerte entscheidend. Um den Einfluss beider Größen zu beurteilen, werden Extremwertanalysen auf Grundlage von Extremwerten mit unterschiedlich langen Bezugszeitintervallen bzw. Extremwerten, die unterschiedliche Schwellenwerte überschreiten, durchgeführt. In Abb. 5-12 sind Windgeschwindigkeiten *V<sub>ref</sub>* als Ergebnis von Extremwertanalysen abgebildet, welche auf Extremwerten unterschiedlicher Bezugszeitintervalle basieren. Zusätzlich zu der in Abschnitt 5.1.2 gewählten Weibull-III-max-Verteilungsfunktion wird vergleichend der Einfluss bei Ansatz der Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion untersucht.



Abb. 5-12: Einfluss der Datengrundlage der Extremwertanalyse (Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle) auf die Referenzwindgeschwindigkeit V<sub>ref</sub> am Standort FINO1

Deutlich zu erkennen ist eine asymptotische Annäherung an eine Referenzwindgeschwindigkeit von etwa  $V_{ref} = 42,0$  m/s bei Extremwerten mit zunehmender Größe der Bezugszeitintervalle. Die extrapolierte Referenzwindgeschwindigkeit stimmt für Stichproben von Extremwerten ab einem Bezugszeitintervall von vier Wochen weitgehend überein. Werden die Verteilungsparameter mit der *Momentenmethode* geschätzt, wird die oben genannte Referenzwindgeschwindigkeit mit der Gumbel-I-max-Verteilung bereits auf Grundlage von Extremwerten ab einem Bezugszeitintervall von einer Woche erfolgreich bestimmt. Werden Extremwerte kürzerer Bezugszeitintervalle zugrunde gelegt, ist die Streuung der Ergebnisse der Extremwertanalyse wesentlich stärker. Das kann sowohl zu einer Überals auch einer Unterschätzung der Referenzwindgeschwindigkeit und somit zu konservativen als auch zu unsicheren Ergebnissen führen. Sehr viel längere Bezugszeitintervalle, von einem oder mehreren Jahr(en), führen bei dem zugrunde gelegten Beobachtungszeitraum der Messdaten ebenfalls zu unsicheren Ergebnissen. Bei dem vorliegenden Stichprobenumfang würden die Verteilungsfunktionen bei Ansatz von Jahresextremwerten an nur zehn Extremwerte angepasst. Eine solche Anpassung ist mit großen Unsicherheiten bei der Wahl einer geeigneten Verteilungsfunktion verbunden und kann zu abweichenden charakteristischen Werten führen, vgl. Abschnitt 3.1.3.

Der Einfluss von Extremwerten unterschiedlicher Bezugszeitintervalle auf die Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}$  ist in Abb. 5-13 dargestellt. Abgebildet sind die Ergebnisse für Bezugszeitintervalle von bis zu acht Wochen.



Abb. 5-13: Einfluss der Datengrundlage der Extremwertanalyse (Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle) auf die signifikante Wellenhöhe *H*<sub>s50</sub> am Standort FINO1

Trotz größerer Streuungen in den Ergebnissen der Extremwertanalyse für die verschiedenen Verteilungsfunktionen ist auch bei den signifikanten Wellenhöhen  $H_{s50}$  eine asymptotische Annäherung an einen Grenzwert für Extremwerte mit längeren Bezugszeitintervallen zu erkennen. So stimmen die extrapolierten Extremwerte auf Grundlage der Vier-Wochen-Extremwerte und der Acht-Wochen-Extremwerte in Abb. 5-13 weitgehend überein. Wie bei den Windgeschwindigkeiten erreicht die Gumbel-I-max-Verteilung diesen ungefähren Grenzwert bereits ab einem Bezugszeitintervall von einer Woche, falls die Verteilungsparameter mit der *Momentenmethode* geschätzt werden.

Für Extremwerte mit Bezugszeitintervallen von mehr als einer Woche kann bei den untersuchten Zufallsvariablen von stochastisch unabhängigen Daten ausgegangen werden, vgl. Abschnitt 5.1.3.1. Für Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe nach der *Block-Maxima-Methode* werden nach den durchgeführten Untersuchungen Extremwerte mit einem Bezugszeitintervall

von vier bis acht Wochen empfohlen. Liegt ein größerer Stichprobenumfang vor, können auch Extremwerte mit längeren Bezugszeitintervallen der Extremwertanalyse zugrunde gelegt werden.

Wie zuvor das Bezugszeitintervall bei der *Block-Maxima-Methode* beeinflusst der Schwellenwert bei der *Peak-Over-Threshold-Methode* das Ergebnis der Extremwertanalyse. In Abb. 5-14 ist der Einfluss unterschiedlicher Schwellenwerte auf die Referenzwindgeschwindigkeit  $V_{ref}$  als Ergebnis der Extremwertanalyse dargestellt. Die *Peak-Over-Threshold-Methode* wird in den dargestellten Untersuchungen sowohl auf Zehn-Minuten-Mittelwerte als auch Tagesextremwerte der Windgeschwindigkeit angewendet. Der Ansatz von Tagesextremwerten als Datengrundlage gewährleistet auch für niedrige Schwellenwerte stochastisch unabhängige Zufallsvariablen, vgl. Abschnitt 5.1.3.1.



Abb. 5-14: Einfluss des Schwellenwerts V<sub>0</sub> auf die Windgeschwindigkeit V<sub>ref</sub> am Standort FINO1

In Abb. 5-14 ist mit zunehmendem Schwellenwert deutlich eine asymptotische Annäherung an eine Windgeschwindigkeit von etwa  $V_{ref} = 41,5$  m/s zu erkennen. Dabei weichen die Ergebnisse der Extremwertanalyse ab einem Schwellenwert von etwa  $V_0 \ge 15$  m/s nur geringfügig voneinander ab. Bei Ansatz von Tagesextremwerten werden bereits ab einem Schwellenwert von  $V_0 \ge 10$  m/s weitgehend übereinstimmende Ergebnisse erzielt. Kleinere Schwellenwerte führen bei den dargestellten Auswertungen sowohl zu konservativen als auch zu unsicheren Ergebnissen. Die abweichenden Ergebnisse im Bereich niedriger Schwellenwerte können sowohl in ungeeigneten Verteilungsfunktionen für weniger extreme Windgeschwindigkeiten als auch in der stochastischen Abhängigkeit der Zufallsvariablen begründet sein. Mit zunehmendem Schwellenwert sinkt die stochastische Abhängigkeit der zugrunde gelegten Zufallsvariablen. Da ab einem Schwellenwert von etwa  $V_0 \ge 15$  m/s weitgehend übereinstimmende Ergebnisse auf Grundlage der Tagesextremwerte und Zehn-Minuten-Mittelwerte erzielt werden, kann davon ausgegangen werden, dass Extremwerte oberhalb dieses Schwellenwerts weitgehend stochastisch unabhängig sind bzw. die stochastische Abhängigkeit keinen Einfluss auf das Ergebnis der Extremwertanalyse hat. Eine wie in Abschnitt 5.1.3.1 aufgeführte Selektion der Messwerte ist bei der betrachteten Zufallsvariable ab diesem Schwellenwert nicht mehr

erforderlich. Die in Abb. 5-14 nicht aufgeführten Windgeschwindigkeiten  $V_0 > 30$  m/s erzeugen bei der vorliegenden Datengrundlage sehr kleine und statistisch nur unsicher zu beschreibende Stichproben.

Der Einfluss des Schwellenwerts auf die signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  ist in Abb. 5-15 dargestellt. Entsprechend den vorherigen Untersuchungen wird die *Peak-Over-Threshold-Methode* auf Drei-Stunden-Mittelwerte und Tagesextremwerte der signifikanten Wellenhöhe angewendet.



Abb. 5-15: Einfluss des Schwellenwerts H<sub>s,0</sub> auf die signifikante Wellenhöhe H<sub>s50</sub> am Standort FINO1

Auch bei den signifikanten Wellenhöhen  $H_{s50}$  ist deutlich eine asymptotische Annäherung mit zunehmendem Schwellenwert zu erkennen. Ab einem Schwellenwert von etwa  $H_{s,0} \ge 1$  m wird unter Ansatz der dargestellten Stichproben und Verteilungsfunktionen übereinstimmend eine signifikante Wellenhöhe von etwa  $H_{s50} = 10,5$  m berechnet. Dabei unterscheiden sich die Ergebnisse bei Ansatz der Drei-Stunden-Mittelwerte und Tagesextremwerte nicht signifikant. Daher kann kein Einfluss durch stochastisch abhängige Eingangsdaten für die dargestellte Untersuchung der signifikanten Wellenhöhen festgestellt werden. Nach den durchgeführten Untersuchungen erzielen Extremwertanalysen basierend auf Extremwerten möglichst langer Bezugszeitintervalle bzw. oberhalb hoher Schwellenwerte die am besten übereinstimmenden Ergebnisse. Gleichzeitig ist ein Stichprobenumfang erforderlich, der eine zuverlässige Anpassung geeigneter Verteilungsfunktionen an die empirische Häufigkeitsverteilung sicherstellt. In FISCHER (2001) sind vereinzelt Angaben zum erforderlichen Stichprobenumfang enthalten. Darüber hinaus kann der Stichprobenumfang so bestimmt werden, dass ein Konfidenzintervall mit einer vorgegebenen Breite nicht überschritten wird. Nach den durchgeführten statistischen Untersuchungen stellt ein Stichprobenumfang von ca. 40 bis 100 Messwerten einen sinnvollen Kompromiss zwischen den diametralen Forderungen nach einem langen Bezugszeitintervall bzw. hohen Schwellenwert und nach einem großen Stichprobenumfang für die Inferenz dar. Weitere stochastische Untersuchungen werden im Rahmen dieser Arbeit daher mit Extremwerten durchgeführt, welche die in Tab. 5-7 dargestellten Bezugszeitintervalle oder Schwellenwerte aufweisen.

Methode der Extremwertanalyse	Einwirkungs- parameter	Bezugszeitintervalle bzw. Schwellenwerte am Standort FINO1	Bezugszeitintervalle bzw. Schwellenwerte am Standort FINO3	
Block Maxima Methode	V	Acht Wochen	Vier Wochen	
	$H_s$	Acht Wochen	Vier Wochen	
Peak Over Threshold Methode	V	30 m/s	30 m/s	
	$H_s$	5 m	5 m	

Tab. 5-7:Bezugszeitintervalle oder Schwellenwerte der Extremwerte für die statistischen<br/>Untersuchungen der Messzeitreihen an den Standorten FINO1 und FINO3

Bei der in Tab. 5-7 aufgeführten Datengrundlage kann aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen von stochastisch unabhängigen Zufallsvariablen ausgegangen werden. Daher wird auf eine vorherige Selektion der Extremwerte nach der *Peak-Over-Threshold-Methode* zugunsten eines größeren Stichprobenumfangs verzichtet.

# 5.1.4 Extremwertbestimmung

Für die Entwicklung der in Kapitel 6 vorgestellten Kombinationsansätze für extreme Windgeschwindigkeiten und extreme signifikante Wellenhöhen ist ein einheitliches methodisches Vorgehen in der Extremwertanalyse erforderlich. Hierzu wurden in den vorangegangenen Kapiteln relevante Methoden zur Stichprobenerhebung, zur Schätzung der Verteilungsparameter sowie Verteilungsfunktionen für Extremwertanalyse vergleichend untersucht. Die Eignung der einzelnen Methoden und Verteilungsfunktionen zur optimalen mathematischen Beschreibung empirischer Extremwertverteilungen von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen in der deutschen Bucht wurde durch einen visuellen Vergleich der empirischen Verteilung und der approximierten Verteilungsfunktion sowie durch verteilungsunabhängige Anpassungstests bewertet. Basierend auf diesen umfassenden statistischen Untersuchungen wurden Methoden und Verteilungsfunktionen für die Extremwertanalyse festgelegt. Sofern nicht anders angegeben, wird für weitere Extremwertanalysen im Rahmen der Methodenentwicklung das in Abb. 5-16 dargestellte Verfahren verwendet. Für einzelne Stichproben kann eine andere Methode oder Verteilungsfunktion zu einer höheren Anpassungsgüte und gegebenenfalls zu einer genaueren Extremwertabschätzung führen. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist in dem Fall jedoch nicht mehr gegeben.

Es werden Extremwerte verschiedener Bezugszeitintervalle für die Extremwertanalyse verwendet, vgl. Abb. 5-16, um für die unterschiedlich langen Beobachtungszeiträume an den Standorten FINO1 und FINO3 optimale Datengrundlagen für die Extremwertanalyse sicherzustellen. Der Einfluss der Datengrundlage auf die Extremwertanalyse wurde in Abschnitt 5.1.3 untersucht. Am Standort FINO1 werden statistische Analysen aufgrund des längeren Beobachtungszeitraums an Extremwerten mit einem Bezugszeitintervall von acht Wochen durchgeführt. Am Standort FINO3 werden für die statistischen Analysen der Messwerte des kürzeren Beobachtungszeitraums Extremwerte mit einem Bezugszeitintervall von vier Wochen verwendet.

Extremwertanalysen mit der *Block-Maxima-Methode* und der *Peak-Over-Threshold-Methode* liefern, insbesondere bei großen Stichproben, trotz unterschiedlicher Verteilungsfunktionen gut übereinstimmende Ergebnisse, vgl. Abschnitt 5.1.2. Für die Entwicklung eines zuverlässigen Kombinationsansatzes auf Grundlage richtungs- und zeitabhängiger Extremereignisse wurde die *Block-Maxima-Methode* gewählt. Bei der Anwendung des Kombinationsansatzes auf Stichproben, die statt mit der *Block-Maxima-Methode* mit der *Peak-Over-Threshold-Methode* erhoben werden, werden weitgehend übereinstimmende Ergebnisse für die Kombinationen der betrachteten Einwirkungsparameter erwartet.



Abb. 5-16: Flussdiagramm des verwendeten Verfahrens für die Extremwertanalyse und dessen Bewertung

# 5.2 Windgeschwindigkeit $V_{ref}$ und signifikante Wellenhöhe $H_{s50}$

Die Ergebnisse der separaten Extremwertanalysen der gemessenen Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen in der deutschen Bucht sind nachfolgend zusammengefasst. Für die Extremwertanalysen wird das zuvor gewählte Verfahren unter Anwendung der *Block-Maxima-Methode* verwendet, vgl. Abschnitt 5.1. Die sich hierfür ergebenden Referenzwindgeschwindigkeiten  $V_{ref}$  an den Standorten FINO1 und FINO3 sind in Tab. 5-8 aufgeführt.

Tab. 5-8:	Windgeschwindigkeit	$V_{ref}$ and	den Standorten	FINO1	und FINO3
140.00	"Inageben "Inaigheit	r rej an	a den standorten	1 11 10 1	and I m too

Messstandort	Verteilungsfunktion	Schätzverfahren	V <sub>ref</sub> in m/s
FINO1	XX7 '1 11 TT		41,7
FINO3	weidun max	IVIIVI	42,5

Die sich entsprechend ergebenden signifikanten Wellenhöhen  $H_{s50}$  an den Standorten FINO1 und FINO3 sind in Tab. 5-9 aufgeführt.

Tab.	5-9:	Signifikante	Wellenhöhe <i>H</i> <sub>s50</sub>	an den	Standorten	FINO1	und FINO3

Messstandort	Verteilungsfunktion	Schätzverfahren	Hs50 in m
FINO1	W.:	MM	9,9
FINO3	welduli III max	MINI	10,4

Für die Einordnung der Ergebnisse sind in Tab. 5-10 die Referenzwindgeschwindigkeit  $V_{ref}$  und signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  im Vergleich zu Untersuchungen anderer Wissenschaftler am Standort FINO1 zusammengestellt. Soweit bekannt, sind auch die verwendeten Methoden zur Extremwertanalyse, die Verteilungsfunktionen und die zugrunde gelegten Stichproben aufgeführt. Ergebnisse von Extremwertanalysen auf Grundlage von Hindcastdaten sind in Tab. 5-10 als solche gekennzeichnet.

Tab. 5-10:Vergleich der Ergebnisse mit weiteren Untersuchungen der Windgeschwindigkeit und<br/>signifikanten Wellenhöhe am Standort FINO1

Parameter	Quelle	Methode	Verteilung	X50	Δ	Bemerkung
	-	BMM	Weibull III max	41,7 m/s	-	Siehe Abschnitt 5.1.2.1
$V_{raf}$	-	POT	Weibull III min	41,9 m/s	0 %	Siehe Abschnitt 5.1.2.2
V ref	Türk (2008)	Modifizierte Gumbel-Methode	Gumbel I max	41,8 m/s	0 %	4 Jahre FINO1-Daten
	-	ВММ	Weibull III max	9,9 m	-	Siehe Abschnitt 5.1.2.1
	-	POT	Weibull III min	10,6 m	7 %	Siehe Abschnitt 5.1.2.2
Hs50	Emeis und Türk (2009)	Gumbel-Papier	Gumbel I max	9,0-11,0 m	0-11%	3 Jahre FINO1-Daten, Ergebnisse für unter- schiedliche Richtungen
	Mittendorf (2006)	Total-Sample- Methode	Rayleigh	7,5 m	24 %	20 Monate FINO1-Daten
	Mittendorf (2006)	Total-Sample- Methode	Rayleigh	8,2 m	17 %	Hindcast über 11 Jahre

Die Ergebnisse der Extremwertanalyse von TÜRK (2008) und EMEIS und TÜRK (2009) von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen werden durch die durchgeführten Extremwertanalysen unabhängiger Extremereignisse bestätigt. Die Untersuchungen von MITTENDORF (2006) zu extremen signifikanten Wellenhöhen führen im Vergleich zu niedrigeren signifikanten Wellenhöhen  $H_{s50}$ . Diese Untersuchungen wurden auf Grundlage sehr kurzer Beobachtungszeiträume bzw. Hindcastdaten mit der *Total-Sample-Methode* durchgeführt. Sowohl der geringe Stichprobenumfang als auch die Nachteile der *Total-Sample-Methode*, vgl. Abschnitt 3.1.1, führen im Allgemeinen zu einer wenig zuverlässigen Referenzwindgeschwindigkeit  $V_{ref}$  und signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}$ . Die aufgeführten Ergebnisse anderer Wissenschaftler deuten insgesamt auf eine gute Eignung des gewählten Extremwertanalyseverfahrens für die Abschätzung extremer Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen hin. Wie sich das gewählte Verfahren bei kleineren Stichproben verhält wurde nicht untersucht.

# 5.3 Einfluss der Einwirkungsparameter $V_{ref}$ und $H_{s50}$ auf die Strukturbeanspruchung

Die Berechnung von Strukturbeanspruchungen verdeutlich die Bedeutung einer präzisen Bestimmung der Einwirkungsparameter Referenzwindgeschwindigkeit  $V_{ref}$  und signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}$  sowie ihrer wirklichkeitsnahen Kombination. Beide Einwirkungsparameter beeinflussen Strukturbeanspruchungen nichtlinear, d. h. mit zunehmender Windgeschwindigkeit und signifikanter Wellenhöhe steigen die resultierenden Strukturbeanspruchungen überproportional an.

Die überproportionale Zunahme der Strukturbeanspruchung infolge einer steigenden Windgeschwindigkeit verdeutlicht die Berechnung des zu einer Windgeschwindigkeit gehörenden Windgeschwindigkeitsdrucks q(v), siehe Gl. (5-4). Der Windgeschwindigkeitsdruck steigt mit linear zunehmender Windgeschwindigkeit quadratisch. Für die Luftdichte  $\rho$  kann dabei 1,25 kg/m<sup>3</sup> angenommen werden, vgl. DIN EN 1991-1-4 (2010).

$$q(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \tag{5-4}$$

Der Einfluss einer linear zunehmenden (signifikanten) Wellenhöhe auf die Strukturbeanspruchung wird an einem Berechnungsbeispiel verdeutlicht. Am Beispiel des in VORPAHL et al. (2011) beschriebenen "UpWind reference jacket" werden Normal- und Querkräfte eines Ankerpfahls einer Jacketgründung untersucht. Der Anschluss der Jacketstruktur an die Gründungspfähle wird im betrachteten Beispiel vereinfacht als gelenkig gewählt. Die Struktur wird außerdem als unbeweglich angenommen und ihr Eigengewicht wird in der hydrodynamischen Berechnung vernachlässigt. Die Normal- und Querkräfte des betrachteten Ankerpfahls resultieren somit ausschließlich aus den hydrodynamischen Kräften auf die Struktur infolge der Einwirkung aus Einzelwellen. Die im Finite-Elemente-Programm Poseidon, vgl. BÖKER (2010), modellierte Jacketgründung wird diagonal angeströmt. Der Einfluss der Einwirkungsparameter  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  wird an dem zuerst angeströmten Ankerpfahl untersucht, vgl. Abb. 5-17.



Abb. 5-17: Hydrodynamische Berechnungen an einer Jacketstruktur

Hydrodynamische Kräfte, die auf zylindrische Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen wirken, werden im Allgemeinen mit der Morsion-Gleichung bestimmt, vgl. Gl. (5-5). Das Verfahren nach MORISON et al. (1950) liefert hydrodynamische Kräfte f(t) je Längeneinheit, die orthogonal zur Mittelachse eines Zylinders wirken. Dabei ist  $\rho$  die Dichte des Wassers, D der Durchmesser des umströmten Zylinders und v(t) die horizontale (Orbital-) Geschwindigkeit in der Welle. Die hydrodynamischen Koeffizienten für die Strömungsdruckkraft  $c_D$  und Beschleunigungskraft  $c_M$  berücksichtigen die Rauigkeit des Zylinders bzw. die durch den Zylinder verdrängte Wassermasse und die zu beschleunigende hydrodynamische Masse. Unter anderem sind in CHAKRABATI (2006), WOLFRAM und NAGHIPOUR (1999) sowie SUMER und FREDSØE (1999) Angaben zur Wahl der hydrodynamischen Koeffizienten anch Morison gilt für Verhältnisse des Strukturdurchmessers D zur Wellenlänge L von  $D/L \leq 1/5$ . Bei Verhältnissen D/L > 1/5 werden Einflüsse aus der Deformation der Welle signifikant und sind in der Berechnung der hydrodynamischen Kräfte zu berücksichtigen. Das Verfahren nach MORISON et al. (1950) berücksichtigt diese sogenannten Diffraktionseffekte nicht. Auf den Einfluss von Diffraktionseffekten wird in SCHMIDT et al. (2014) eingegangen.

$$f(t) = c_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \frac{\partial v(t)}{\partial t} + c_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot D \cdot / v(t) / \cdot v(t)$$
(5-5)

Die hydrodynamischen Berechnungen werden unter Ansatz einer Stromfunktion elfter Ordnung nach DEAN (1965) für Wassertiefen von 28 m, 39 m und 50 m durchgeführt. Die Wellenperiode  $T_D$  bestimmt sich gemäß GL-IV-2 (2012) mit Gl. (5-6). Für die Berechnung wird die untere Grenze von Gl. (5-6) als maßgebende Wellenperiode festgelegt. Mit den aufgeführten Randbedingungen führen kürzere Wellenperioden zu größeren Wellenlasten.

$$11, 1\sqrt{H_s/9,81} \le T_D \le 14, 3\sqrt{H_s/9,81} \tag{5-6}$$

Für die in der Berechnung angesetzte extreme Wellenhöhe wird  $H_D = 1,86 \cdot H_s$  angenommen, vgl. DIN EN 61400-3 (2010). Die maximalen Zugnormalkräfte  $N_{2,max}$  im untersuchten Gründungspfahl beim Passieren von Einzelwellen unterschiedlicher Höhen  $H_D$  sind in Abb. 5-18 dargestellt.



Abb. 5-18: Maximale Normalkraft  $N_{2,max}$  im Pfahl auf Höhe des Meeresgrunds aufgrund unterschiedlich hoher Wellen in unterschiedlichen Wassertiefen aus der Berechnung mit dem Finite-Elemente-Programm Poseidon

Die maximale Querkraft  $V_{2,max}$  im untersuchten Gründungspfahl infolge unterschiedlich hoher Einzelwellen ist in Abb. 5-19 dargestellt. Es gelten die zuvor genannten Berechnungsannahmen.



Abb. 5-19: Maximale Querkraft V<sub>2,max</sub> im Pfahl auf Höhe des Meeresgrunds aufgrund unterschiedlich hoher Wellen in unterschiedlichen Wassertiefen aus der Berechnung mit dem Finite-Elemente-Programm Poseidon

In Abb. 5-18 und Abb. 5-19 sind die exponentielle Zunahme der Pfahlzugnormalkraft  $N_{2,max}$  und Querkraft  $V_{2,max}$  mit linear zunehmender Wellenhöhe zu erkennen. Insbesondere bei hohen Wellen treten somit große Unterschiede in den dargestellten Schnittgrößen auf. In Abb. 5-18 unterscheiden sich für

unterschiedliche Wassertiefen die Pfahlzugnormalkräfte  $N_{2,max}$  bei gleicher Wellenhöhe. Diese Unterschiede resultieren aus dem zunehmenden Hebelarm der Wellenlastresultierenden mit zunehmender Wassertiefe. Auf die Querkraft  $V_{2,max}$  hat die Wassertiefe bei Wellenhöhen bis etwa  $H_D = 8,0$  m keinen Einfluss. Mit zunehmenden Wellenhöhen kommt es für die dargestellten Wassertiefen zu geringen Abweichungen der resultierenden Querkraft im untersuchten Gründungspfahl. Wellenhöhen von mehr als  $H_D = 20$  m können bei einer Wassertiefe von 28 m vom verwendeten Wellengenerator nicht mehr korrekt berechnet werden. Bei einer Wassertiefe von d = 28 m, der nach Gl. (5-6) zugrunde gelegten Wellenperiode und den genannten Wellenhöhen ist mit einem Brechen der Welle zu rechnen, vgl. Abb. **5-20**.



Abb. 5-20: Wellentheorien und Brecherkriterien für Wellen mit unterschiedlicher Höhe *H* und Wellenperioden *T* in Wassertiefen *d*, aus DNV-OS-J101 (2007)

Linear zunehmende Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen haben einen exponentiellen Einfluss auf die resultierenden Beanspruchungen in Offshore-Gründungsstrukturen. Bereits kleine Änderungen der Einwirkungsparameter Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  und signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  führen daher zu nicht unerheblichen Änderungen in den Strukturbeanspruchungen. Für eine sichere und wirtschaftliche

## Kapitel 5

Auslegung von Offshore-Strukturen ist daher eine präzise Beschreibung beider Einwirkungsparameter und deren Kombination von großer Bedeutung.

# 6 Methoden zur Kombination extremer Einwirkungsparameter

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für Ansätze zur Entwicklung von Kombinationsmethoden. Extreme Beanspruchungen in Tragstrukturen treten im Allgemeinen infolge gleichgerichteter und zeitgleich wirkender Einwirkungen auf. Denkbar sind demzufolge Kombinationsmethoden basierend auf richtungsbedingten, zeitbedingten sowie richtungs- und zeitbedingten Extremereignissen. Hinsichtlich einer wirtschaftlichen Strukturbemessung ist insbesondere der letztgenannte Ansatz wertvoll, liefert er doch die theoretisch genaueste Beschreibung der Kombination unterschiedlicher Einwirkungen. Voraussetzung für einen solchen Ansatz sind jedoch sehr lange, synchrone Messungen relevanter Einwirkungsparameter, was einen solchen Ansatz unter Umständen wenig praktikabel macht. Für die Entwicklung eines messdatenbasierten Kombinationsmodells werden daher zunächst die richtungs- und zeitbedingten Einzelansätze untersucht und anschließend die Möglichkeit einer Zusammenführung geprüft.

# 6.1 Richtungsbedingter Kombinationsansatz

Extreme Wind- und Seegangseinwirkungen sind aufgrund atmosphärischer Luftzirkulationen bzw. maritimer Strömungssysteme, Einflüssen nahe gelegener Landmassen und der topographischen Gestalt des Meeresbodens richtungsabhängig, vgl. auch ZIELKE et al. (2007) sowie EMEIS und TÜRK (2009). In der deutschen Bucht ist überwiegend mit Winden aus westlicher Richtung zu rechnen, besonders für hohe Windgeschwindigkeiten, siehe auch Abb. 6-1. Winderregte Wellen großer Höhe sind demzufolge ebenfalls aus westlicher Richtung zu erwarten. Dabei stehen extreme Höhen von Einzelwellen in direktem Zusammenhang mit den hier untersuchten signifikanten Wellenhöhen. Gleichungen, welche beide Einwirkungsparameter ineinander überführen, sind unter anderem in DIN EN 61400-3 (2010) aufgeführt. Messungen bestätigen hohe signifikante Wellenhöhen aus westlicher Richtung, noch höhere signifikante Wellenhöhen treten jedoch aus nordnordwestlicher Richtung auf, vgl. Abb. 6-1. Der untersuchte Messstandort weist in dieser Richtung größere Wirklängen des Windes auf, da die Nordsee in nordnordöstlicher Richtung in den nördlichen Atlantik übergeht, vgl. auch Abb. 4-1. Da die Höhe winderregter Wellen maßgeblich durch die Windgeschwindigkeit, Windeinwirkdauer und die Wirklänge des Windes bestimmt wird, diese Parameter je nach Umgebungsbedingungen aber für verschiedene Wirkrichtungen unterschiedlich ausfallen, ist mit unterschiedlichen Hauptbelastungsrichtungen für die Einwirkungsparameter Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe zu rechnen. Dieser am Beispiel der Deutschen Bucht in Abb. 6-1 veranschaulichte Zusammenhang gilt für viele weitere Standorte weltweit.



Abb. 6-1: Richtungsverteilung der mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten (links) bzw. der mittleren und maximalen signifikanten Wellenhöhe (rechts) am Standort FINO1

Selten nur treten Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen bei Sturmereignissen gleichzeitig mit stark unterschiedlichen Wirkrichtungen auf, siehe auch Abschnitt 6.1.1. Die Richtungsabhängigkeit beider Einwirkungen, die unterschiedlichen Hauptbelastungsrichtungen und das gleichgerichtete Auftreten bei Sturmereignissen führen zu der Hypothese, dass die Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  in einer Wirkrichtung  $\theta$  gemeinsam mit einer gleichgerichteten signifikanten Wellenhöhe  $H_{s,R,\theta} < H_{s50}$  auftritt und umgekehrt, vgl. Abb. 6-2.



Abb. 6-2: Richtungsbedingter Kombinationsansatz für richtungsabhängige Einwirkungen  $E_{i,\theta}$ 

Zur Entwicklung einer Methode zur Kombination der Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  und der signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}$  auf Grundlage der Richtungsabhängigkeit beider Einwirkungsparameter werden richtungsabhängige Extremwertanalysen auf Basis der Messdaten der Forschungsplattform FINO1 durchgeführt.

# 6.1.1 Richtungsabhängigkeit extremer Wind- und Wellenereignisse

Die Richtungsabhängigkeit von Wind- und Wellenereignissen hängt maßgeblich von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit ab. Hohe Windgeschwindigkeiten beeinflussen die Wellenentstehung stärker und beide Ereignisse weisen eine größere Übereinstimmung ihrer Wirkrichtungen auf. Bei hohen Windgeschwindigkeiten während eines Sturmereignisses ist außerdem von einer längeren Windeinwirkdauer auf die Meeresoberfläche auszugehen, was ebenfalls ein gleichgerichtetes Auftreten begünstigt. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf Abweichungen zwischen Wind- und Wellenrichtungen wird anhand von Windgeschwindigkeitsklassen untersucht. Der prozentuale Anteil von Richtungsabweichungen von maximal 60° ist in Abb. 6-3 für drei Windgeschwindigkeitsklassen dargestellt.



Abb. 6-3: Anteil der Richtungsdifferenzen  $\Delta \theta \le 60^{\circ}$  und  $\Delta \theta > 60^{\circ}$  zwischen zeitgleich gemessenen Wind- und Wellenrichtungen am Beispiel von drei Windgeschwindigkeitsklassen am Standort FINO1

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt der Anteil großer Richtungsabweichungen ab. Dieser Zusammenhang wird durch Untersuchungen weiterer Richtungsdifferenzen  $\Delta\theta$  bestätigt, vgl. Anhang C. Gleichzeitig wächst bei hohen Windgeschwindigkeiten der Anteil kleinerer Richtungsabweichungen und -übereinstimmungen. Der dargestellte Zusammenhang zunehmender Übereinstimmung von Windund Wellenrichtung mit steigender Windgeschwindigkeit wird von FISCHER et al. (2010) durch Untersuchungen an einem weiteren Standort in der Nordsee nachgewiesen. Insbesondere für Windgeschwindigkeiten mit mittleren Wiederholungsperioden von mehreren Jahrzehnten ist von einem weitgehend gleichgerichteten Auftreten auszugehen.

# 6.1.2 Methodenentwicklung

Zur Bestimmung der Kombination gleichgerichteter Einwirkungsparameter werden Richtungssektoren konstanter Größe festgelegt. Die gemessenen Zehn-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit und Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhe werden in diese Richtungssektoren klassiert. Voraussetzung für diese Klassierung ist, dass die Wind- und Wellenrichtung gleichzeitig gemessen wurde. Anschließend werden für jeden Sektor Extremwerte nach der *Block-Maxima-Methode* bestimmt. Die Richtungsunterteilung und anschließende Erhebung der Stichproben stellen eine konstante Anzahl Messwerte  $n_i$  in den einzelnen Sektoren sicher, vgl. Gl. (6-1).

$$n_i = \frac{N}{n_s} \tag{6-1}$$

In Gl. (6-1) gibt N die Anzahl der Messwerte eines Einwirkungsparameters bei gleichzeitig gemessener Richtung und  $n_s$  die Anzahl der Sektoren an. Eine Abweichung der Anzahl der Messwerte je Richtungssektor  $n_i$  ergibt sich lediglich, wenn innerhalb eines Bezugszeitintervalls keine gleichzeitig gemessene Geschwindigkeits- bzw. Höhenwerte und zugehörige Richtungswerte vorliegen. Bei Extremwerten kurzer Bezugszeitintervalle, wie beispielsweise Tagesextremwerten kommt dies aufgrund von Messausfällen häufiger vor als bei Extremwerten mit langen Bezugszeitintervallen. Für die in Kapitel 4 beschriebene Datengrundlage ist die Anzahl der Wind- und Wellenmesswerte je Richtungssektor bei Ansatz von Acht-Wochen-Extremwerten weitgehend konstant und entspricht annähernd der maximal möglichen Anzahl an Messwerten innerhalb des Beobachtungszeitraums.

Ebenfalls denkbar ist es, zunächst richtungsunabhängige Extremwerte eines Bezugszeitintervalls zu bestimmen und diese anschließend nach ihren Wirkrichtungen zu klassieren. Ein solches Vorgehen führt zu einer unterschiedlichen Anzahl von Messdaten in den verschiedenen Richtungssektoren und erfordert eine sektorspezifische Anpassung der Quantile. Bei der richtungsunabhängigen Extremwertanalyse ergibt sich die mittlere Wiederholungsperiode  $\lambda$  direkt aus der Anzahl möglicher Ereignisse pro Jahr, vgl. Gl. (3-6). Bei der richtungsabhängigen Extremwertanalyse wird die mittlere Wiederholungsperiode  $\lambda(\theta)$  für jeden Richtungssektor benötigt, da die Anzahl der gemessenen oder simulierten Ereignisse richtungsabhängig ist. Hierzu wird die mittlere Wiederholungsperiode  $\lambda$  nach Gl. (3-6) um den Anteil der gemessenen Ereignisse im betrachteten Sektor ergänzt. Dabei ist  $n_{X,\theta}$  die Anzahl der gemessenen Extremereignisse im betrachteten Sektor und  $n_X$  die Gesamtanzahl richtungsunabhängig gemessener Extremereignisse des gleichen Bezugszeitintervalls.

$$\lambda(\theta) = \frac{n_{X,\theta}}{n_X} \cdot \frac{N_T}{K}$$
(6-2)

Dieser Näherung der mittleren richtungsabhängigen Wiederholungsperiode  $\lambda(\theta)$  liegt die Annahme zugrunde, dass Messausfälle unabhängig von der Wirkrichtung des Messparameters auftreten. Ein wesentlicher Nachteil bei einer zuerst durchgeführten Extremwertanalyse und anschließenden Richtungsklassierung der Extremwerte ist die stark variierende Anzahl der Messwerte je Richtungssektor. Für ein Bezugszeitintervall von wenigen Wochen führt dies bei den untersuchten richtungsabhängigen Einwirkungsparametern dazu, dass zwar im Richtungssektor der Hauptbelastungsrichtung ausreichend Messwerte für eine zuverlässige Extremwertanalyse vorliegen, in den anderen Sektoren jedoch nur eine unzureichende Anzahl an entsprechenden Extremwerten vorliegt. Um auch in Richtungssektoren mit weniger extremen Messwerten eine ausreichende Datengrundlage für Extremwertanalysen zu erreichen, wäre die Wahl von sehr kurzen Bezugszeitintervallen erforderlich, was jedoch zu weniger zuverlässigen Ergebnissen bei den Extremwertanalysen führen würde, vgl. Abschnitt 5.1.3.2. Das Bezugszeitintervall müsste im Sinne einer zuverlässigen Extremwertanalyse in Abhängigkeit der Anzahl der Messwerte eines Richtungssektors festgelegt werden. Sowohl das Verfahren, bei dem zunächst eine Richtungsunterteilung aller Messwerte eines Beobachtungszeitraums und anschließend die Block-Maxima-Methode zur Stichprobenerhebung angewendet wird, wie auch das umgekehrte Verfahren, führt unter Ansatz geeigneter Bezugszeitintervalle bei Richtungssektoren mit vielen Messwerten zu gut übereinstimmenden Ergebnissen. In Abb. 6-4 sind die richtungsabhängigen Windgeschwindigkeiten  $V_{ref,\theta}$  des Richtungssektors 270° bis 300° abgebildet. Dargestellt sind zum einen die Ergebnisse von Extremwertanalysen auf Grundlage von Messdaten, die zunächst nach Richtungen klassiert und deren Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle anschließend mittels Block-Maxima-Methode festgelegt wurden. Zum anderen sind die Windgeschwindigkeiten  $V_{ref,\theta}$ des gleichen Sektors auf Grundlage von Messdaten, deren Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle mittels Block-Maxima-Methode festgelegt und anschließend nach Richtungen klassiert wurden, dargestellt. Darüber hinaus sind richtungsunabhängige Windgeschwindigkeiten V<sub>ref</sub> auf Grundlage von Extremwerten unterschiedlicher Bezugszeitintervalle abgebildet. Die im Diagramm aufgeführten Zahlenwerte geben die Anzahl der Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle an, welche der Extremwertanalyse zugrunde gelegt werden.



Bezugszeitintervall der Extremwerte in Wochen

Abb. 6-4: Richtungsabhängige Windgeschwindigkeiten  $V_{ref,\theta}$  aus 270° bis 300° ermittelt aus unterschiedlich erhobenen Stichproben und richtungsunabhängige Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  (die Zahlenwerte im Diagramm geben die Anzahl der zugrunde gelegten Messwerte für unterschiedliche Bezugszeitintervallen an)

Die in Abb. 6-4 dargestellten Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren zur Bestimmung richtungsabhängiger Extremwerte stimmen für geeignete Bezugszeitintervalle gut überein. Der beispielhaft dargestellte Richtungssektor 270° bis 300° der Windgeschwindigkeit ist mit der vorliegenden Datengrundlage der Sektor mit der höchsten richtungsabhängigen Windgeschwindigkeit V<sub>ref.0</sub>. Das Verfahren, bei dem zuerst die Block-Maxima-Methode und anschließend eine Richtungsklassierung durchgeführt wird (BMM-Richtung), liefert bereits bei sehr kleinen Bezugszeitintervallen (hier Wochenextremwerte) richtungsabhängige Windgeschwindigkeiten  $V_{ref,\theta}$ , die etwa  $V_{ref}$  entsprechen. Längere Bezugszeitintervalle führen im dargestellten Fall zu sehr kleinen Stichproben und erschweren eine zuverlässige Bestimmung der Verteilungsparameter. Der dargestellte Richtungssektor enthält mit 10 % bis 14 % aller gemessenen Extremwerte eines Bezugszeitintervalls im Vergleich zu den übrigen elf Richtungssektoren überdurchschnittlich viele Messdaten. Für andere Richtungssektoren sind bei gleicher Datengrundlage deutlich kleinere Bezugszeitintervalle zu wählen. Zuverlässige Extremwertanalysen aufgrund eines konstanten Bezugszeitintervalls in allen Richtungssektoren sind mit diesem Verfahren nicht möglich. Das Verfahren, bei dem zuerst die Richtungsklassierung und anschließend die Block-Maxima-Methode durchgeführt wird (Richtung-BMM), liefert dagegen übereinstimmende Windgeschwindigkeiten  $V_{ref,\theta}$  bei längeren Bezugszeitintervallen (hier Acht-Wochen Extremwerte). Bei diesem Vorgehen ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messwerte für ein Bezugszeitintervall weitgehend unabhängig vom betrachteten Richtungssektor. Für den im Folgenden dargestellten richtungsbedingten Kombinationsansatz werden die Messwerte zunächst in Richtungssektoren klassiert, und anschließend werden Extremwerte für jeden Sektor nach der Block-Maxima-Methode bestimmt. Auf diese Weise wird der Extremwertanalyse eine weitgehend konstante Anzahl an Messwerten je Richtungssektor zugrunde gelegt.

Für die Entwicklung eines richtungsbedingten Kombinationsansatzes werden Extremwertanalysen für Messwerte der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe jedes Richtungssektors durchgeführt. Außerdem werden Extremwertanalysen für Messwerte des Beobachtungszeitraums unabhängig von ihrer Wirkrichtung durchgeführt. Hierzu wird das in Abschnitt 5.1 gewählte Verfahren angewendet. Das Ergebnis umfasst die richtungsunabhängigen Extremwerte  $x_R$  und  $n_s$ richtungsabhängige Extremwerte  $x_{R,\theta}$  für jeden Einwirkungsparameter, siehe Abb. 6-5. Die Extremwerte  $x_R$  und  $x_{R,\theta}$  haben jeweils die zuvor festgelegte mittleren Wiederholungsperiode R.



Abb. 6-5: Kombinationsansatz mit richtungsabhängigen und richtungsunabhängigen Extremwerten  $x_{R,\theta}$  bzw.  $x_R$  der mittleren Wiederholungsperiode *R* am Beispiel eines Einwirkungsparameters und Richtungssektors (240° bis 270°)

Die unterschiedliche Anzahl von Messwerten bei der nach Sektoren getrennten Betrachtung und der richtungsunabhängigen Betrachtung wird in den Extremwertanalysen durch Gl. (3-5) berücksichtigt. Damit liefert das Verfahren vergleichbare Extremwerte  $x_R$  und  $x_{R,\theta}$  und ist unabhängig von der Größe der Richtungssektoren. Mit dem dargestellten Vorgehen können richtungsabhängige Faktoren  $\psi_{i,\theta}$  zur Abminderung (oder Erhöhung) der Einwirkungsparameter  $x_{i,R}$  für jeden Richtungssektor  $\theta$  bestimmt werden, vgl. Gl. (6-3).

$$\Psi_{i,\theta} = \frac{x_{i,R,\theta}}{x_{i,R}} \tag{6-3}$$

Der maßgebende Faktor  $ma\beta g. \psi_{i,\theta}$  eines Einwirkungsparameters im Sinne einer sicheren Strukturbemessung entspricht dem maximalen  $\psi_{i,\theta}$  der  $n_s$  Richtungssektoren, siehe Gl. (6-4). Der Faktor  $ma\beta g. \psi_{i,\theta}$  berechnet sich also für  $max x_{i,R,\theta}$ .

maßg. 
$$\Psi_{i,\theta} = max\left\{\frac{x_{i,R,\theta_1}}{x_{i,R}}, \frac{x_{i,R,\theta_2}}{x_{i,R}} \dots \frac{x_{i,R,\theta_{n_s}}}{x_{i,R}}\right\}$$
 (6-4)

Für den Richtungssektor mit den höchsten gemessenen oder simulierten Einwirkungsparametern gilt  $ma\beta g. \psi_{i,\theta} \approx 1$ . Die richtungsabhängige Extremwertanalyse kann jedoch auch zu höheren Extremwerten führen als die richtungsunabhängige Analyse  $(x_{i,R,\theta} > x_{i,R})$ . Der Wertebereich  $0 \le \psi_{i,\theta} \le 1$  gilt daher nicht zwingend. Die Ursache für diesen Effekt sind die unterschiedlichen Datengrundlagen der Extremwertanalysen, vgl. Abb. 6-5. Die eingangs beschriebene Richtungsunterteilung und anschließende Bestimmung von Extremwerten führt dazu, dass die richtungsunabhängigen Extremwerte eines Bezugszeitintervalls im Mittel größer oder gleich sind wie die richtungsabhängigen Extremwerte des gleichen Bezugszeitintervalls. Dies lässt sich an den Jahresextremwerten eines zehnjährigen Beobachtungszeitraums veranschaulichen. Die zehn größten Messwerte des Beobachtungszeitraums sind die Datengrundlage der richtungsunabhängigen Extremwertanalyse. Dass diese Datengrundlage der Grundlage der richtungsabhängigen Extremwertanalyse eines Sektors entspricht, gilt nur für den Sonderfall, dass alle Jahresextremwerte in dem betrachteten Richtungssektor liegen. Liegt jedoch mindestens ein Jahresextremwert in einem anderen Richtungssektor, so gilt für den ursprünglich betrachteten Sektor:  $\bar{x}_{i,R,\theta} < \bar{x}_{i,R}$ . Anders als der Mittelwert kann die Standardabweichung der Extremwerte eines Richtungssektors sowohl über als auch unter der Standardabweichung der richtungsunabhängigen Extremwerte liegen. In Abb. 6-5 ist dies durch die unterschiedlichen Verläufe der Dichteverteilungen angedeutet. Liegen die Extremwerte innerhalb eines Richtungssektors im Mittel nur geringfügig unter den richtungsunabhängigen Extremwerten des gleichen Bezugszeitintervalls, die Standardabweichung jedoch über der richtungsunabhängigen Extremwerte, kann es zu Ergebnissen  $x_{i,R,\theta} > x_{i,R}$  kommen. Um weiterhin die Zuverlässigkeit einer richtungsunabhängigen Betrachtung sicherzustellen, werden die richtungsabhängigen Kombinationswerte  $\psi_{i,\theta}$  auf den richtungsunabhängigen Extremwert xi,R normiert. Anschaulich ausgedrückt werden also alle richtungsabhängigen Extremwerte  $x_{i,R,\theta}$  um das Verhältnis des maßgebenden richtungsabhängigen Extremwerts in die Richtung des richtungsunabhängigen Extremwerts verschoben, siehe Gl. (6-5).

$$\Psi_{i,\theta} = \frac{x_{i,R,\theta}}{x_{i,R}} - \left(ma \&g. \ \Psi_{i,\theta} - 1\right)$$
(6-5)

Durch die dargestellte Normierung gilt für den maßgebenden Richtungssektor  $x_{i,R,\theta} = x_{i,R}$ , und für die Kombinationswerte gilt der Wertebereich  $0 \le \psi_{i,\theta} \le 1$ . Die Anwendung der Kombinationswerte im Rahmen einer Strukturbemessung erfolgt in diesem Fall auf die zuverlässig zu bestimmenden richtungsunabhängigen Extremereignisse  $x_{i,R}$ .

Da sowohl eine Windgeschwindigkeit als auch eine signifikante Wellenhöhe maßgeblich die Strukturbeanspruchung beeinflussen können, ist der Ansatz von Leit- und Begleiteinwirkungen denkbar. Ob ein entsprechender Ansatz wie bei der Kombinationsmethode nach TURKSTRA (1970) zweckmäßig ist, wird durch eine Anwendung dieser Methode auf die Messzeitreihen der Forschungsplattform FINO1 im Abschnitt 6.1.3 untersucht. Hierzu wird jede richtungsabhängige veränderliche Einwirkung einmal mit  $ma\beta g. \psi_{I,\theta} \cdot x_{I,R}$  als Leiteinwirkung, und weitere Einwirkungen mit  $\psi_{i,\theta} \cdot x_{i,R}$  als Begleiteinwirkungen des gleichen Richtungssektors  $\theta$  angesetzt. Die Anzahl der möglichen Kombinationen entspricht somit der Anzahl der richtungsabhängigen veränderlichen Einwirkungen. Die zeitliche Korrelation veränderlicher Einwirkungen wird durch die beschriebene richtungsbedingte Kombinationsmethode nicht berücksichtigt.

# 6.1.3 Anwendung und Verifizierung der Methode

Die vorgestellte Methode zur richtungsabhängigen Kombination veränderlicher Einwirkungen wird auf Messzeitreihen der Forschungsplattform FINO1 angewendet. Dabei soll der Ansatz, welcher die Wirkrichtungen von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen für die Beschreibung der Einwirkungskombination benutzt, verifiziert und zahlenmäßig ausgewertet werden. Für die Untersuchung werden 30° und 60° große Sektoren angesetzt, vgl. Tab. 6-1. Durch den Ansatz von einander jeweils um eine halbe Sektorbreite überschneidende Sektoren wird die Anzahl der Richtungssektoren verdoppelt. Bei gleicher Sektorgröße wird so eine höhere Richtungsauflösung erzielt. Datengrundlage der Extremwertanalyse je Richtungssektor bilden Acht-Wochen Extremwerte. Damit wird eine weitgehend konstante Anzahl von Messwerten je Richtungssektor für eine zuverlässige Extremwertanalyse sichergestellt, vgl. Abschnitt 6.1.2.

Sektorbezeichnung	Sektorgröße	Sektorausrichtung/-überschneidung	Sektorenanzahl ns	Messwerte je Sektor <sup>1)</sup>
"30°-Sektoren (versetzt)"	30°	Sektor alle 15°, bei Nord (0°) beginnend, im Uhrzeigersinn umlaufend	24	64
"60°-Sektoren (versetzt)"	60°	Sektor alle 30°, bei Nord (0°) beginnend, im Uhrzeigersinn umlaufend	12	64

<sup>1)</sup> Anzahl der 8-Wochen Extremwerten je Richtungssektor

Die Sektorgröße orientiert sich an richtungsabhängigen Ermüdungsuntersuchungen an Offshore-Windenergieanlagen. Übliche Regelwerke und Richtlinien schreiben hierfür eine maximale Sektorgröße von 30° vor, vgl. u. a. DIN EN 61400-3 (2010) und GL-IV-2 (2012). Der Ansatz kleinerer Sektoren führt zu einer höheren Richtungsauflösung, wobei die Extremwerte des festgelegten Bezugszeitintervalls im Allgemeinen unter denen größerer Sektoren liegen. Der Ansatz von 60° großen Sektoren führt durch die Verwendung extremerer Messwerte zu zuverlässigeren Extremwertanalysen in den Sektoren, vgl. auch Abschnitt 5.1.3, es sinkt jedoch gleichzeitig die Richtungsauflösung. Der Einfluss der Größe der Richtungssektoren wird durch den Vergleich der Ergebnisse abgeschätzt. Die richtungsabhängigen Kombinationswerte  $\psi_{Vref;\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  nach Gl. (6-5) sind in Abb. 6-6 für unterschiedlich ausgerichtete 30°-Sektoren dargestellt.



 $\psi_{Vref,\theta} = V_{ref}(\theta) / V_{ref} - (max \ V_{ref}(\theta) - 1) \text{ mit: } 0 < \psi_{Vref,\theta} \le 1$  $\psi_{Hs50,\theta} = H_{s50}(\theta) / H_{s50} - (max \ H_{s50}(\theta) - 1) \text{ mit: } 0 < \psi_{Hs50,\theta} \le 1$ 

Abb. 6-6: Richtungsabhängige Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  nach Gl. (6-5) für unterschiedlich ausgerichtete 30°-Sektoren am Standort FINO1

Die in Abb. 6-6 dargestellten Ergebnisse bestätigen die Annahme unterschiedlicher Hauptbelastungsrichtungen von Wind- und Welleneinwirkungen am untersuchten Standort. Die maximale Windgeschwindigkeit tritt demnach bei Winden aus 240° bis 300° auf. Gemäß der durchgeführten Untersuchungen ist die maximale signifikante Wellenhöhe aus 300° bis 345° zu erwarten. Die ermittelten Kombinationswerte nach Gl. (6-5) sind für diese Wirkrichtungen jeweils eins. Die Einwirkungsparameter aus anderen Wirkrichtungen sind bei gleicher mittlerer Wiederholungsperiode zum Teil deutlich niedriger. Die Kombinationswerte betragen mindestens  $\psi_{Vref,\theta} = 0.52$  bzw.  $\psi_{Hs50,\theta} = 0.25$ . Insgesamt weisen die signifikanten Wellenhöhen eine höhere Richtungsabhängigkeit auf als die Windgeschwindigkeiten. Dies ist plausibel, da anders als beim Wind die Strecke auf der sich eine signifikante Wellenhöhe aufbauen kann durch die Küstenlinie begrenzt ist. Die Untersuchungsergebnisse der versetzten Richtungssektoren lassen darauf schließen, dass einige wenige extreme Messwerte innerhalb eines Teilbereichs eines Sektors maßgeblich das Ergebnis der Extremwertanalyse dieses Sektors beeinflussen. Betrachtet man beispielsweise den Teilsektor 345° bis 360° des Kombinationswerts  $\psi_{Hs50,\theta}$ , so sind in Abb. 6-6 deutlich abweichende Ergebnisse zu sehen. Die Auswertung der Daten, welche der Extremwertanalyse zugrunde gelegt werden, zeigt, dass der hohe Kombinationswert des Sektors 330° bis 360° maßgeblich auf extreme Messwerte des Teilsektors 330° bis 345° zurückzuführen ist. Die Darstellung konstanter Kombinationswerte über die gesamte Sektorbreite ist daher als konservativ anzusehen. Die zum Teil widersprüchlich erscheinenden Ergebnisse von Teilsektoren sind auf den eben genannten Effekt und die Darstellung der sich überschneidenden Sektoren zurückzuführen. Auf den Einfluss von extremen Messwerten in kleinen Sektorbereichen wird im Folgenden noch einmal detailliert eingegangen, vgl. Abb. 6-8.

Die richtungsabhängigen Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  für eine Sektorgröße von 60° sind in Abb. 6-7 dargestellt. Wie zuvor sind zusätzlich die Ergebnisse von Sektoren, welche um die halbe Sektorbreite versetzt ausgerichtet sind, aufgeführt.



Abb. 6-7: Richtungsabhängige Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  nach Gl. (6-5) für 60°-Sektoren unterschiedlicher Richtungen

Nach Abb. 6-7 treten die höchsten Windgeschwindigkeiten aus 240° bis 300° bzw. aus 270° bis 330° auf. Die höchsten signifikanten Wellen treten für die zugrunde gelegten Daten bei Wellenrichtungen um 330° auf, vgl. Abb. 6-6 und Abb. 6-7 (links). In Abb. 6-7 (rechts) führt dies zu hohen richtungsabhängigen signifikanten Wellenhöhen  $H_{s50}(\theta)$  sowohl im Richtungssektor 270° bis 330° als auch im Richtungssektor 330° bis 30°. Die Untersuchung mit kleineren Richtungssektoren, vgl. Abb. **6-6**, zeigt jedoch, dass ab 345° mit sehr viel niedrigeren signifikanten Wellenhöhen  $H_{s50}(\theta)$  zu rechnen ist. Wie sehr extreme Messwerte in Randbereichen von Richtungssektoren die Extremwertanalyse beeinflussen, wird beim Vergleich des nördlichen 30°- bzw. 60°-Sektors deutlich. Die für die Extremwertanalyse beider Sektoren zugrunde gelegten Messwerte der signifikanten Wellenhöhen des rot hervorgehobenen Bereichs der Wellenrichtungen zwischen 330° und 345° zu erkennen. In der Extremwertanalyse von  $H_{s50}(330°-30°)$  werden diese Werte berücksichtigt, in der Extremwertanalyse von  $H_{s50}(345°-15°)$  nicht. Diese zusätzlichen Messwerte im 60° großen Sektor sind maßgebend verantwortlich für die deutlichen Abweichungen zwischen  $\psi_{Hs50,330°-30°}$  und  $\psi_{Hs50,345°-15°}$ .



Abb. 6-8: Gemessene signifikante Wellenhöhen aus 300° bis 60° sowie Bereich der Messwerte, der in der Extremwertanalyse von  $H_{s50,330^{\circ}-30^{\circ}}$  verwendet wird (rot hinterlegt)

Da innerhalb eines Sektors die Richtungsinformation nicht betrachtet wird und bei Extremwertanalysen vorzugsweise Extremwerte langer Bezugszeitintervalle angesetzt werden, vgl. Abschnitt 5.1.3.2, beeinflussen einige wenige ähnlich gerichtete Extremwerte das Ergebnis der Extremwertanalyse des gesamten Sektors. Durch diesen Effekt geht der Vorteil einer richtungsdifferenzierten Betrachtung mit zunehmender Sektorgröße verloren, und der Ansatz der ungünstigsten Wirkrichtung innerhalb der Sektoren führt zu zunehmend konservativen Kombinationen. Bei Ansatz einer ausreichend großen Stichprobe sind daher kleinere Richtungssektoren vorzuziehen. Voraussetzung für eine zuverlässige Extremwertanalyse ist eine ausreichende Anzahl von extremen Mess- oder Simulationswerten je Sektor. Denkbar ist außerdem der Ansatz von Richtungsextremwerten innerhalb eines Sektors anstatt des Ansatzes von Extremwerten eines Bezugszeitintervalls. So könnte beispielsweise ein Richtungssektor von 60° in eine feste Anzahl kleinerer Sektoren unterteilt werden. Die Maxima oder eine konstante Anzahl n größter Werte dieser Untersektoren bilden die Datengrundlage für die richtungsabhängige Extremwertanalyse des 60°-Sektors. Ein solches Vorgehen würde die Richtungsinformation innerhalb eines Sektors ausnutzen und richtungsbedingte Extremwertanalysen auf Grundlage einiger weniger, unter Umständen ähnlich gerichteter Extremwerte verhindern. Ein wesentlicher Nachteil dieses Ansatzes ist, dass durch Verwendung der Maximalwerte je Richtung unter Umständen der Extremwertanalyse nicht die höchsten Werte zugrunde gelegt werden. Das Ergebnis einer richtungsabhängigen Extremwertanalyse auf Basis einer auf diese Weise erhobenen Stichprobe ist mitunter unsicher. Zur Validierung dieser Form der Stichprobenerhebung im Rahmen des richtungsbedingten Kombinationsansatzes wären weitere Untersuchungen erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit werden die in den 30°-Sektoren enthaltenen Extremwerte mit den in Abschnitt 5.1.3 festgelegten Bezugszeitintervallen für den richtungsbedingten Kombinationsansatz verwendet.

Für die Wahl von richtungsabhängigen Kombinationswerten für extreme Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen in der deutschen Bucht sind die Wirkrichtungen von 240° bis 360° maßgebend. Die genannten Einwirkungsparameter dieser Wirkrichtungen führen zu den höchsten Strukturbeanspruchungen, sofern eine annähernd rotationssymmetrische Tragstruktur vorliegt. Für diesen Bereich sind die richtungsabhängigen Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$ , basierend auf 30° und 60° großen Sektoren, in Abb. 6-9 dargestellt. Die Methode zur Berechnung der Kombinationswerte ist in Abschnitt 6.1.2 beschrieben. Das Verfahren der Extremwertanalyse und die Abschätzung der richtungsunabhängigen Extremwerte  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  sind in den Abschnitten 5.1 und 5.2 beschrieben.



Abb. 6-9: Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  nach Gl. (6-5) für die Wirkrichtungen 240° bis 360° basierend auf 30° und 60° großen Richtungssektoren

Die unterschiedlich großen Sektoren führen zu weitgehend übereinstimmenden Kombinationswerten. Insbesondere für die auslegungsrelevanten Richtungssektoren von 270° bis 330° stimmen die Kombinationswerte  $\psi_{i,\theta}$  gut überein. Auf die einzige bedeutsame Abweichung bei den signifikanten Wellenhöhen aus 360° (Nord) wurde zuvor eingegangen, vgl. Abb. 6-8. In Tab. 6-2 sind die Kombinationswerte  $\psi_{i,\theta}$  nach Gl. (6-5) auf Basis der versetzten 30°- und 60°-Sektoren für die maßgebenden Wirkrichtungen zwischen 240° und 360° aufgelistet.

Tab. 6-2:Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  auf Grundlage von versetzten 30°- und 60°-Sektorenam Standort FINO1 sowie die Differenz  $\Delta \psi_{i,\theta}$  der Ergebnisse der 30°- und 60°-Sektoren

Wirkrichtung	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°	360°
$\psi_{Vref,\theta}$ (30°-Sektoren)	0,93	0,99	1,00	0,99	0,96	0,92	0,79	0,70	0,64
$\psi_{Vref,\theta}$ (60°-Sektoren)	0,90	-	1,00	-	0,96	-	0,86	-	0,63
$\psi_{Hs50,\theta}$ (30°-Sektoren)	0,46	0,65	0,77	0,84	0,91	1,00	1,00	0,94	0,49
$\psi_{Hs50,\theta}$ (60°-Sektoren)	0,62	-	0,83	-	0,92	-	1,00	-	0,92
$\Delta \psi_{Vref,\theta}$ (30°-/60°-Sektoren)	0,026		0,000		0,000		0,074		0,008
$\Delta \psi_{Hs50,\theta}$ (30°-/60°-Sektoren)	0,16		0,06		0,01		0,00		0,43

Die Abweichung der in Tab. 6-2 dargestellten Ergebnisse der 30°- und 60°-Sektoren beträgt bei der Windgeschwindigkeit im Mittel  $\Delta \psi_{Vref,\theta} = 0,02$  und weist eine Varianz von  $Var(\Delta \psi_{Vref,\theta}) = 0,001$  auf. Bei den signifikanten Wellenhöhen beträgt die Abweichungen der Ergebnisse im Mittel  $\Delta \psi_{Hs50,\theta} = 0,13$ und weist eine Varianz von  $Var(\Delta \psi_{Hs50,\theta}) = 0,031$  auf. Die im Vergleich zur Windgeschwindigkeit im Mittel höhere und stärker streuende Abweichung bei der signifikanten Wellenhöhe ist zum Teil auf die zuvor beschriebene große Abweichung im Nordsektor zurückzuführen. Unter Vernachlässigung dieses Sektors ergibt sich für die Abweichung ein Mittelwert von  $\Delta \psi_{Hs50,\theta} = 0,06$  und eine Varianz von  $Var(\Delta \psi_{Hs50,\theta}) = 0,006$ . In und zwischen den Hauptbelastungsrichtungen (maximale  $\psi_{i,\theta}$ ) weisen die Ergebnisse auf Basis der 30°- und 60°-Sektoren eine weitgehende Übereinstimmung auf.

Unter Ansatz von Leit- und Begleiteinwirkungen, vgl. Abschnitt 6.1.2, ergeben sich am untersuchten Standort die in Gl. (6-6) (bei Ansatz von 30°-Sektoren) und Gl. (6-7) (bei Ansatz von 60°-Sektoren) dargestellten Einwirkungskombinationen. In den Gleichungen (6-6) und (6-7) dargestellt ist nur die Kombination der Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  und der signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}$ . Weitere Einwirkungen sind gegebenenfalls zusätzlich zu berücksichtigen.

$$E_{d} = max\{E[V_{ref} "+"0, 77 \cdot H_{s50}], E[H_{s50}"+"0, 92 \cdot V_{ref}]\}$$
(6-6)

$$E_{d} = max \{ E[V_{ref} "+"0.83 \cdot H_{s50}], E[H_{s50}"+"0.86 \cdot V_{ref}] \}$$
(6-7)

Beim Ansatz von Leit- und Begleiteinwirkungen im Bemessungskonzept des klassischen Hochbaus wird vernachlässigt, dass die ungünstigste Situation zu einem Zeitpunkt oder in diesem Fall aus einer Richtung auftreten kann, die nicht durch das Maximum einer der beteiligten Einwirkungen charakterisiert ist. Diese Vernachlässigung führt bei den durchgeführten Untersuchungen zu unsicheren Ergebnissen. So ergeben sich nach Tab. 6-2 die Kombinationswerte für die Wirkrichtung von 270° zu  $ma\beta g$ .  $\psi_{Vref,\theta} = 1,0$  und  $\psi_{Hs50,\theta} = 0,77$ . Werden stattdessen die Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta} = 0,99$  und  $\psi_{Hs50,\theta} = 0,84$  für die Wirkrichtung von 285° verwendet, vgl. Tab. 6-2, stellt sich unter Umständen eine ungünstigere Strukturbeanspruchung ein. Dies gilt für Strukturen, die annähernd zu gleichen Anteilen von Wind und Wellen beansprucht werden. Für eine sichere Kombination der untersuchten Einwirkungsparameter mit dem richtungsbedingten Kombinationsansatz sind daher auch Kombinationen zu berücksichtigen, welche nicht durch das Maximum einer der Einwirkungen charakterisiert werden.

Gemäß der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen können kleinere wie auch größere Richtungssektoren zu konservativen als auch unsicheren Ergebnissen führen. Darüber hinaus ist die Sektorgröße durch den Stichprobenumfang begrenzt. Durch die in Abschnitt 6.1.2 beschriebene zuerst durchgeführte Richtungsunterteilung und anschließende Stichprobenerhebung nach der *Block-Maxima-Methode* können trotz einer feinen Richtungsunterteilung Extremwerte langer Bezugszeitintervalle verwendet werden. Die zugrunde gelegten Extremwerte einer Stichprobe sind bei kleinen Sektoren trotz gleichen Bezugszeitintervalls jedoch weniger extrem als bei größeren Richtungssektoren. Auf den Ansatz wenig extremer Werte wird in Abschnitt 5.1.3 eingegangen. Größere Sektoren führen demnach zu zuverlässigeren Extremwertanalysen. Da der ermittelte Extremwert jedoch in der ungünstigsten Wirkrichtung des jeweiligen Sektors anzusetzen ist, kann der Vorteil einer richtungsdifferenzierten Extremwertanalyse aufgehoben werden. Dies gilt insbesondere für Standorte, für die die betrachteten Einwirkungsparameter nur gering voneinander abweichende Hauptbelastungsrichtungen aufweisen.

## 6.1.4 Methodenbewertung

Es konnte gezeigt werden, dass die Extremwerte  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  am Standort FINO1 unterschiedliche Wirkrichtungen aufweisen und dies zur Beschreibung der Einwirkungskombination genutzt werden kann. Der Ansatz von unterschiedlich großen Sektoren führt zu weitgehend übereinstimmenden Ergebnissen, insbesondere im Bereich maßgebender Wirkrichtungen. Da für eine sichere Auslegung von Tragstrukturen die ungünstigste Wirkrichtung innerhalb eines Sektors anzusetzen ist, kann es bei Ansatz von großen Sektoren und ähnlichen Hauptbelastungsrichtungen zu konservativen Kombinationswerten kommen. Die tatsächliche Kombination wird dann nicht richtig wiedergeben. Für eine realistische Kombination wird der Einsatz möglichst kleiner Sektoren empfohlen. Voraussetzung ist eine Datengrundlage, die auch für kleine Sektoren noch eine zuverlässige Extremwertanalyse sicherstellt. Die Wahl der Sektorgröße ist außerdem abhängig von der Hauptbelastungsrichtung der betrachteten veränderlichen Einwirkungen. Bei zwei oder mehr veränderlichen Einwirkungen mit ähnlichen Hauptbelastungsrichtungen kann die richtungsabhängige Kombination nur durch sehr kleine Richtungssektoren zweckmäßig beschrieben werden. Bei stark abweichenden Hauptbelastungsrichtungen führen (auch) größere Richtungssektoren zu einer zweckmäßigen Beschreibung der gleichgerichteten Kombination der veränderlichen Einwirkungen. Die maximale Sektorgröße sollte sich daher an der Abweichung der Hauptbelastungsrichtungen der betrachteten Einwirkungen voneinander orientieren, vorausgesetzt es liegt eine ausreichend große Datengrundlage für Extremwertanalysen in diesen Sektoren vor. Ein alternatives Verfahren wird aufgezeigt, bei dem die Richtungsinformation auch innerhalb der Sektoren erhalten bleibt. Eine Untersuchung und Bewertung dieses Ansatzes hinsichtlich seiner Eignung zur Bestimmung der richtungsabhängigen Kombination von Extremereignissen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Der Ansatz von Leit- und Begleiteinwirkungen wird aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen nicht empfohlen. Unter Annahme annähernd gleicher Lastanteile aus Wind und Welle führt ein solches Vorgehen bei den untersuchten Daten zu unsicheren Kombinationen. Bei Ansatz einer veränderlichen Einwirkung mit ihrem auf ein vorgegebenes Bezugszeitintervall bezogenen richtungsunabhängigen Extremwert liegen die zugehörigen richtungsabhängigen Kombinationswerte für Vref und Hs50 am Standort FINO1 zwischen  $\psi_{i,\theta} = 0.77$  und  $\psi_{i,\theta} = 0.92$ . Der Kombinationswert für die Windgeschwindigkeit wird dabei aufgrund der höheren Anzahl an Messdaten zuverlässiger bestimmt. Das zeigt sich bei der richtungsunabhängigen Extremwertanalyse, vgl. Abschnitt 5.1, und in der geringeren Sensitivität gegenüber unterschiedlich großen Richtungssektoren. Eine zeitliche Korrelation veränderlicher Einwirkungen wird bei der dargestellten Methode nicht berücksichtigt.

Die dargestellte Methode ermöglicht die Kombination von extremen Einwirkungsparametern unter Berücksichtigung von deren Wirkrichtung. Sie ist auf beliebige gemessene oder simulierte Einwirkungsparameter anwendbar, für die eine gleichzeitig erfasste Wirkrichtung vorliegt. Das Ergebnis sind Kombinationswerte  $0 \le \psi_{i,\theta} \le 1$  veränderlicher und richtungsabhängiger Einwirkungen mit unterschiedlichen Hauptbelastungsrichtungen. Die resultierenden Kombinationswerte sind als konservativ einzuschätzen, da die zeitliche Korrelation der betrachteten Einwirkungsparameter unberücksichtigt bleibt – die ungünstigsten gleichgerichtet wirkenden Einwirkungsparameter werden als gleichzeitig wirkend angenommen. Außerdem stellt der Ansatz der ungünstigsten Wirkrichtung innerhalb eines Sektors eine konservative Annahme dar.

Der dargestellte Kombinationsansatz wird für die kombinierte Extrembelastung von rotationssysmmetrischen Strukturen entwickelt. Für die richtungsabhängige Extrembelastung von stark unsymmetrischen Strukturen wird auf den Ansatz von FORRISTALL (2004) verwiesen. Dem Ansatz nach FORRISTALL (2004) liegt folgende Überlegung zugrunde: Es wird angenommen, dass eine Offshore-Tragstruktur mit unsymmetrischem Querschnitt in jeder Wirkrichtung genau bei der Wellenhöhe mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 100 Jahren ihre Grenztragfähigkeit erreicht. Wird die Wellenhöhe mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 100 Jahren für n<sub>s</sub> Richtungssektoren berechnet, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Wellenhöhe  $H_{100}(\theta)$  innerhalb eines Jahres in einem der Sektoren überschritten wird  $P(H \ge H_{100}) > 1/100$ . Um für einen solchen richtungsabhängigen Ansatz die gleiche Auftrittswahrscheinlichkeit zu erhalten wie bei einem richtungsunabhängigen Ansatz, berechnet Forristall die Wellenhöhen unter Ansatzes einer Auftrittswahrscheinlichkeit von  $P(Jahr.Sektor) = 0.99^{1/n_s}$ . In FORRISTALL (2004) werden  $n_s = 8$  Richtungssektoren verwendet, womit Auftrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Welle jedes sich die Richtungssektors zu P(Jahr, Sektor) = 0.998744 ergibt, was jeweils einer mittleren Wiederholungsperiode von über 800 Jahren entspricht. Dass diese sehr viel größere richtungsabhängige Wellenhöhe zu der gleichen richtungsabhängigen Versagenswahrscheinlichkeit führt, veranschaulicht Forristall neben den aufgeführten theoretischen Überlegungen am Beispiel von Messzeitreihen richtungsabhängiger Wellenhöhen. Da für unterschiedliche Richtungen in aller Regel auch unterschiedliche Wellenhöhen zu erwarten sind, vgl. Abschnitt 6.1, ist dieser Ansatz relevant für Strukturen mit unterschiedlichen Tragwiderständen in verschiedenen Wirkrichtungen. Der am Beispiel von Wellenhöhen entwickelte Ansatz von FORRISTALL (2004) ist auf beliebige richtungsabhängige Einwirkungen anwendbar. Eine vergleichende Anwendung des Ansatzes nach Forristall auf die in Kapitel 4 beschriebenen Windgeschwindigkeiten führt ebenfalls zu einer Erhöhung des betrachteten Einwirkungsparameters, vgl. Abb. 6-10. Für diesen Vergleich werden Windgeschwindigkeiten verwendet, da durch den im Vergleich zu den signifikanten Wellenhöhen größeren Stichprobenumfang die Extremwerte zuverlässiger bestimmt werden können. Auch bei der im Vergleich zu FORRISTALL (2004) kleineren Stichprobe überschreitet der richtungsabhängige maximale Einwirkungsparameter nach der in FORRISTALL (2004) beschriebenen Anpassung der Quantilwerte den richtungsunabhängigen Einwirkungsparameter in mehreren Wirkrichtungen.


Abb. 6-10: Richtungsabhängige Windgeschwindigkeiten  $V_{ref}(\theta)$  nach dem Ansatz nach FORRISTALL (2004), wobei das Produkt der Auftrittswahrscheinlichkeiten der Windgeschwindigkeiten jedes Richtungssektors gleich der richtungsunabhängigen Auftrittswahrscheinlichkeit ist

Dem Ansatz nach FORRISTALL (2004) liegt die Annahme einer asymetrischen Struktur zugrunde, deren Versagen bei Einwirken der Wellenhöhe mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 100 Jahren eines beliebigen Sektors eintritt. Bei einer solchen eher theoretischen Tragstruktur ist das Versagen durch die kleinste Wellenhöhe  $H_{100}(\theta)$  in einer Richtung genauso wahrscheinlich wie durch die höchste Wellenhöhe  $H_{100}(\theta)$  in einer beliebigen anderen Richtung. Herkömmliche Tragstrukturen werden im Grenzzustand der Tragfähigkeit für ein extremes Einzelereignis der ungünstigsten Wirkrichtung ausgelegt. Die Versagenswahrscheinlichkeiten infolge weniger extremer Ereignisse anderer Wirkrichtungen, wie sie in dem beschriebenen Ansatz angesetzt werden, werden im Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht betrachtet. Bei annähernd symmetrischen Strukturen führen extreme Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen anderer Wirkrichtungen zu kleineren Strukturbeanspruchungen. Bei unsymmetrischen Querschnitten, die ähnliche Versagenswahrscheinlichkeiten in mehreren Wirkrichtungen aufweisen, ist ein richtungsabhängiger Bemessungsansatz jedoch zusätzlich zu berücksichtigen, vgl. auch WEI et al. (2016).

# 6.1.5 Richtungsbedingter Kombinationsansatz am Standort FINO3

Durch Anwendung des richtungsbedingten Kombinationsansatzes auf Daten der Forschungsplattform FINO3 werden dessen Ortsabhängigkeit und der Einfluss eines geringeren Stichprobenumfangs untersucht. Die Forschungsplattform FINO3 befindet sich nördlich der Forschungsplattform FINO1 und weist damit abweichende Wirklängen des Windes auf. Neben ihrer nördlicheren Lage unterscheidet sie sich durch die Wassertiefe von ca. 23 m vom Standort FINO1. Die genaue Lage des Messstandorts und die erfassten Messzeitreihen sind in Kapitel 4 beschrieben. Im Vergleich zur Forschungsplattform FINO3 liegt am Standort FINO3 ein sehr viel kürzerer Beobachtungszeitraum vor. Den statistischen

Auswertungen werden Messzeitreihen mit einer Dauer von vier Jahren zugrunde gelegt. Die Messwerte des Beobachtungszeitraums werden wie zuvor in 30° große und sich um 15° überschneidende Richtungssektoren unterteilt. Insgesamt werden somit ebenfalls  $n_s = 24$  Richtungssektoren gebildet, vgl. Tab. 6-1. Für die Auswertungen werden Extremwerte mit einem Bezugszeitintervall von vier Wochen nach der *Block-Maxima-Methode* bestimmt. Die richtungsabhängigen Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  nach Gl. (6-5) sind in Abb. 6-11 für unterschiedlich ausgerichtete 30°-Sektoren dargestellt. Auf die zusätzliche Auswertung von 60° großen Sektoren wie am Standort FINO1 wird verzichtet, da diese größeren Sektoren keinen wesentlichen Erkenntnisgewinn brachten.



 $\psi_{H_{s50,\theta}} = H_{s50}(\theta) / H_{s50} - (max H_{s50}(\theta) - 1) \text{ mit: } 0 < \psi_{H_{s50}}(\theta) \le 1$ 

Abb. 6-11: Richtungsabhängige Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  nach Gl. (6-5) für 30°-Sektoren unterschiedlicher Richtungen am Standort FINO3

Die Wirkrichtungen der maximalen Windgeschwindigkeiten am Standort FINO3 stimmen mit denen am Standort FINO1 weitgehend überein. Je nach Ausrichtung der 30°-Sektoren ergeben die durchgeführten Extremwertanalysen für die Richtungssektoren 240° bis 270° bzw. 285° bis 315° die maximalen Windgeschwindigkeiten  $V_{ref}(\theta)$  und Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta} = 1,0$ . Die Wirkrichtung der maximalen signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}(\theta)$  unterscheidet sich deutlich von der am Standort FINO1. Die maximale signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}(\theta)$  ist gemäß der durchgeführten Untersuchungen der FINO3-Messdaten aus 255° bis 285° bzw. aus 270° bis 300° zu erwarten. Damit sind die Extremereignisse dieses Einwirkungsparameters aus ähnlichen Richtungen zu erwarten wie die maximale Windgeschwindigkeit. Die signifikanten Wellenhöhen aus südlicheren Richtungen führen zu ähnlichen Kombinationswerten für die betrachteten Einwirkungsparameter in diesem Bereich, vgl. Abb. 6-12. In dieser Abbildung sind die Kombinationswerte der sich überschneidenden Richtungssektoren dargestellt. Die Normierung erfolgt jeweils mit den maximalen Extremwerte jedes Einwirkungsparameters  $x_{i,R,\theta}$  aller 24 Sektoren, vgl. Abschnitt 6.1.2.



Abb. 6-12: Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  nach Gl. (6-5) für Wirkrichtungen 210° bis 330° am Standort FINO3, basierend auf 30° großen Richtungssektoren

Die Wirkrichtungen der maximalen Windgeschwindigkeit  $V_{ref}(\theta)$  und signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}(\theta)$ am Standort FINO3 unterscheiden sich gemäß der durchgeführten Untersuchungen lediglich um ca. 15°. Die Kombinationswerte der umliegenden Richtungen fallen gegenüber dem maximalen  $\psi_{i,\theta}$  nur geringfügig ab. Am untersuchten Standort werden die betrachteten Einwirkungsparameter daher bei Ansatz der richtungsbedingten Kombinationsmethode kaum gegenüber den richtungsunabhängigen Parametern  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  abgemindert, vgl. auch Tab. 6-3. In Abb. 6-12 zu erkennen sind die im Vergleich unsteteren Verläufe der Kombinationswerte auf Basis der FINO3-Messwerte. Als deren Ursache ist die deutlich kleinere Datengrundlage anzunehmen. Die Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  am Standort FINO3 sind in Tab. 6-3 zahlenmäßig aufgeführt.

Tab. 6-3: Kombinationswerte  $\psi_{Vref,\theta}$  und  $\psi_{Hs50,\theta}$  auf Basis von versetzten 30°-Sektoren

Wirkrichtung	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°
$\psi_{Vref,\theta}$ (30°-Sektoren)	0,79	0,78	0,89	1,00	0,92	0,96	0,94	0,82	0,75
$\psi_{Hs50,\theta}$ (30°-Sektoren)	0,53	0,61	0,93	1,00	0,96	0,88	0,79	0,59	0,45

Die im Vergleich durchgeführte Anwendung des richtungsbedingten Kombinationsansatzes auf Messzeitreihen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe am Standort FINO3 zeigt deutlich die Ortsabhängigkeit des Ansatzes. Insbesondere die Wirkrichtung der signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}(\theta)$  unterscheidet sich deutlich. Hydrodynamische Effekte, die trotz weitgehend gleichgerichteter Windeinwirkungen für abweichende Wellenrichtungen verantwortlich sind, sind u. a. in COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (Hrsg.) (1984) und LUND (2006) aufgeführt. Eine mögliche Ursache für die abweichenden Wirkrichtungen von extremen signifikanten Wellenhöhen ist die Refraktion. An beiden Messstandorten sind die höchsten signifikanten Wellenhöhen etwa rechtwinklig zur Küstenlinie zu erwarten. Ein orthogonal zur Küstenlinie ansteigender Meeresgrund würde eine solche Wellenrichtung bei Wellen mit Grundberührung hervorrufen. Bei den untersuchten Wellen extremer Höhe ist demnach

eine solche Grundberührung wahrscheinlich. Der Zusammenhang zwischen Wellenhöhe und ungestörter Tiefwasser-Wellenhöhe in Abhängigkeit der Wassertiefe und Wellenlänge ist unter anderem in MALCHEREK (2010) aufgeführt. Unter Berücksichtigung der vorherrschenden Wassertiefe und auftretenden Wellenlängen am Standort FINO1 ist von einer Beeinflussung der Welle und Wellenrichtung durch den Meeresboden auszugehen. Die Häufigkeit unterschiedlicher Wellenlängen am Standort FINO1 wird in SCHMIDT et al. (2014) aus gemessenen Wellenperioden bestimmt. Für eine Überprüfung der Refraktion als mögliche Ursache für die abweichenden Hauptbelastungsrichtungen der signifikanten Wellenhöhen an den untersuchten Messstandorten ist eine genaue Kenntnis der Bathymetrie in den Bereichen der Messstandorte erforderlich. Denkbar ist auch, dass die extremen signifikanten Wellenhöhen am Standort FINO3 maßgeblich durch die Refraktion und am Standort FINO1 maßgeblich durch die größte Windeinwirklänge beeinflusst werden. Aufgrund der unterschiedlichen Wassertiefen an den untersuchten Standorten sind verschiedene Ursachen oder ein Zusammenspiel mehrerer Ursachen für die beobachteten Einwirkungsrichtungen denkbar. Die in Abb. 6-12 abgebildeten unsteten Verläufe von  $\psi_{Vref,\theta}$ und  $\psi_{Hs50,\theta}$  der Einwirkungsparameter an der FINO3-Plattform sind ein Hinweis auf eine (zu) kleine Datengrundlage für die durchgeführten Extremwertanalysen. Zur Wahl einer sinnvollen Mindestdauer des Beobachtungszeitraums für eine zuverlässige Anwendung der vorgestellten Kombinationsmethode sind weitere Untersuchungen notwendig. Die beschriebene richtungsbedingte Kombinationsmethode kann sowohl auf Messwerte als auch auf geeignete Datensätze simulierter Hindcast-Daten angewendet werden.

#### 6.2 Zeitlich bedingter Kombinationsansatz

Seegang setzt sich aus der aktuell vom Wind erzeugten Windsee und älterer bzw. ins betrachtete Seegebiet eingetragener Dünung zusammen. Die Entwicklung eines Seegangs ist daher abhängig von der Windgeschwindigkeit, der Dauer der Windeinwirkung und der Wirklänge des Windes über Wasser. Der Einfluss dieser Parameter auf die sich einstellende signifikante Wellenhöhe im Flachwasser kann vereinfacht mit den Gleichungen nach BRETSCHNEIDER und REID (1953) dargestellt werden, vgl. Abschnitt 2.5.1 bzw. COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (Hrsg.) (1984). Die sich einstellende Wellenhöhe ist somit eine Reaktion auf die Windeinwirkung, wobei zwischen der maximalen Windgeschwindigkeit eines Sturmes und der sich einstellenden maximalen signifikanten Wellenhöhe ein zeitlicher Versatz auftritt. Messzeitreihen von Stürmen und Orkanen am Standort FINO1 verdeutlichen diesen Zusammenhang, siehe Abb. 6-13. In dieser Abbildung dargestellt sind Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe im zeitlichen Verlauf. Zu erkennen ist der annähernd parallele, jedoch zeitlich versetzte Verlauf der Messzeitreihen beider Einwirkungsparameter. Bei den dargestellten Sturm- und Orkanereignissen beträgt der zeitliche Versatz der maximalen Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe zwischen einer und fünf Stunde(n). Der zeitliche Versatz der Extremwerte der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe bildet die Grundlage des zeitlich bedingten Kombinationsansatzes. Für die Bemessung einer Offshore-Struktur sind zeitgleich auftretende extreme Einwirkungen maßgebend. In der Stochastik lassen sich diese als (zeitlich) bedingte Zufallsvariablen ausdrücken.



Abb. 6-13: Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe im zeitlichen Verlauf für den Sturm Britta sowie die Orkane Christian und Erwin am Standort FINO1

# 6.2.1 Methodenentwicklung

Die kritische Kombination mehrerer Zufallsvariablen kann durch bedingte Ereignisse ausgedrückt werden. Stehen die Zufallsvariablen beispielsweise für zwei auf eine Struktur wirkende Einwirkungen, dann kann für die Bemessung das

- Maximum  $x_i$  der Zufallsvariable X und der zeitgleich mit  $x_i$  auftretende Wert  $y_i$  der Zufallsvariable Y oder das
- Maximum  $y_i$  der Zufallsvariable Y und der zeitgleich mit  $y_i$  auftretende Wert  $x_i$  der Zufallsvariable X

angesetzt werden, vgl. auch FISCHER (2001). Für eine sichere Bemessung ist die ungünstigere Kombination der aufgeführten Varianten maßgebend. Im Allgemeinen liegen zu wenige Messwerte vor, um auf diese Weise die kritische Kombination mehrerer Zufallsvariablen mit mittleren Wiederholungsperioden von 50 oder 100 Jahren empirisch zu bestimmen. Stattdessen werden stochastische Methoden zur Extremwertextrapolation angewendet. Dabei wird angenommen, dass die Form von Verteilungsfunktionen unabhängig ist vom Bezugszeitintervall der Extremwerte, die sie beschreibt. Dies ist anschaulich bei der in GRÜNBERG und GöHLMANN (2010) durchgeführten Extremwertanalyse von signifikanten Wellenhöhen beschrieben. Grünberg und Göhlmann passen eine Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion an beobachtete quasi-stationäre Seegangszustände eines Bezugszeitintervalls von  $T_B = 3$  Stunden an. Um die Jahresextremwertverteilung  $(T_B = 1 \text{ Jahr})$  zu erhalten, verschieben Grünberg und Göhlmann die Verteilungsfunktion auf der Achse der betrachteten Zufallsvariable (hier die signifikante Wellenhöhe) um den Betrag ln(N)/a, vgl. in Abb. 6-14 und Gl. (3-9). Das heißt, Mittel- und Modalwert der Verteilungsfunktion verschieben sich gegenüber der Ausgangsverteilung, wohingegen die Standardabweichung unverändert bleibt. Nach der Verschiebung ergibt sich aus der Jahresextremwertverteilung der charakteristische Wert mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren zu  $x_{50} = F^{-1}(0,98)$ , vgl. Gl. (3-4).



Abb. 6-14: Verschiebung einer Gumbel-I-max-Verteilungsfunktion zur Approximation von Extremwerten eines Bezugszeitintervalls  $T_B < 1$  Jahr auf eine Jahresextremwertverteilung und charakteristischer Wert  $x_{50}$ 

Gleichwertig mit der Verschiebung der Verteilungsfunktion ist die Anpassung des Quantilwerts, vgl. Abschnitt 3.1. Hierbei wird der charakteristische Wert einer definierten mittleren Wiederholungsperiode mit einem an diese Wiederholungsperiode angepassten Quantilwert direkt aus der Ausgangsverteilung bestimmt. Ist der Beobachtungszeitraum größer oder gleich der mittleren Wiederholungsperiode des zu bestimmenden charakteristischen Werts, kann der charakteristische Wert empirisch als der Extremwert des der mittleren Wiederholungsperiode entsprechenden Bezugszeitintervalls, bestimmt werden. Im Allgemeinen ist der Beobachtungszeitraum sehr viel kleiner als die mittlere Wiederholungsperiode der charakteristischer Werte der Einwirkungsparameter. Um solche charakteristischen Werte der Einwirkungsparameter dennoch bestimmen zu können, wird davon ausgegangen, dass die Verteilung von Extremwerten kürzerer Bezugszeitintervalle auch die Verteilung von Extremwerten sehr viel längerer Bezugszeitintervalle repräsentiert. Diese Unabhängigkeit vom Bezugszeitintervall wird durch die Untersuchungen im Abschnitt 5.1.3.2 bestätigt. Sofern dieser Zusammenhang nicht nur für Extremwerte, sondern auch für bedingte Werte gilt, kann vom Verhältnis von randverteilten zu bedingt verteilten Ereignissen kleiner Bezugszeitintervalle auf die Kombination gleichzeitig auftretender Ereignisse großer mittlerer Wiederholungsperioden geschlossen werden. Um diesen Ansatz zu validieren, werden die charakteristischen Werte einer definierten mittleren Wiederholungsperiode verglichen, die aus Stichproben extremer und bedingter Werte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle ermittelt werden, siehe Abb. **6-16**. Hierzu werden zunächst die Extremwerte einer Zufallsvariable und die gleichzeitig auftretenden (zeitlich bedingten) Werte einer weiteren Zufallsvariable für verschiedene Bezugszeitintervalle  $T_B$ bestimmt, vgl. Abb. 6-15.



Abb. 6-15: Extremwerte  $x_i$  mit Bezugszeitintervall  $T_B$  und bedingten Werten  $y_i | max x_i$  am Beispiel zweier Zeitreihen

Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einwirkungsparameter Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe ergeben sich für verschiedene Bezugszeitintervalle  $T_B$  so jeweils vier Stichproben:  $V(T_B)$ ,  $H_s | V(T_B)$ ,  $H_s(T_B)$  und  $V | H_s(T_B)$ . Die Stichproben  $V(T_B)$  und  $H_s(T_B)$  bestehen aus den Extremwerten der Einzelereignisse mit einem Bezugszeitintervall  $T_B$ . Die Stichproben  $H_s | V(T_B)$  und  $V | H_s(T_B)$  bestehen aus den signifikanten Wellenhöhen, welche zeitgleich mit den maximalen Windgeschwindigkeiten bzw. aus den Windgeschwindigkeiten, welche zeitgleich mit den maximalen signifikanten Wellenhöhen des Bezugszeitintervalls  $T_B$  auftreten. Auf Basis dieser Stichproben werden Extremwertanalysen durchgeführt und die Parameter  $V_{ref}$ ,  $H_{s50}(V_{ref})$ ,  $H_{s50}$  und  $V_{ref}(H_{s50})$  bestimmt. Aus dem Verhältnis eines bedingten und eines extremen Ereignisses einer Zufallsvariable mit mittleren Wiederholungsperiode R werden für verschiedene Bezugszeitintervalle  $T_B$  die zeitlich bedingten Kombinationswerte  $\psi_{Y|X}(T_B)$  bzw.  $\psi_{X|Y}(T_B)$  gebildet.

*Block-Maxima-Methode* mit unterschiedlichen Bezugszeitintervallen für x, y, y/x und x/y Extremwertanalysen auf Basis unterschiedlicher Bezugszeitintervalle für x, y, y/x und x/y



Verlauf der Kombinationswerte für zunehmende Bezugszeitintervalle



Abb. 6-16: Vorgehen zur Abschätzung zeitlich bedingter Kombinationswerte

Das Vorgehen zur Abschätzung zeitlich bedingter Kombinationswerte ist in Abb. 6-16 exemplarisch für zwei Zufallsvariablen dargestellt. Eine der Zufallsvariablen wird dabei als randverteilt angenommen. Die Methode ist auf eine beliebige Anzahl von Zufallsvariablen anwendbar, wobei für eine sichere Abschätzung der Kombination jede Zufallsvariable einmal als randverteilt anzunehmen ist. Wie im unteren Diagramm von Abb. 6-16 angedeutet, ist das in schwarz dargestellte extreme Einzelereignis weitgehend unabhängig vom Bezugszeitintervall der zugrunde gelegten Extremwerte. Das Verhältnis von extremen Einzelereignissen mit einer mittleren Wiederholungsperiode, ermittelt auf Grundlage von Extremwerten unterschiedlicher Bezugszeitintervalle  $T_{B,i}$ , ergibt sich zu  $\psi(T_B) \approx 1,0$ , vgl. Gl. (6-8). Dieser Zusammenhang ist eine wesentliche Grundlage für die Extrapolation von Extremwerten in einer Extremwertanalyse.

$$\Psi(T_B) = \frac{x_R(T_{B,i})}{x_R} \tag{6-8}$$

Diese wesentliche Voraussetzung wird in Abschnitt 5.1.3.2 bestätigt. Ab einem ausreichend langen Bezugszeitintervall bzw. einem ausreichend hohen Schwellenwert der zugrunde gelegten Extremwerte werden übereinstimmende Extremwerte  $x_R$  der mittleren Wiederholungsperiode R abgeschätzt, vgl. Abb. 5-12 bis Abb. 5-15. Dass diese Unabhängigkeit auch für die zeitlich bedingten Kombinationswerte gilt, ist die Grundlage des zeitlich bedingten Kombinationsansatzes. Das Verhältnis eines aus einer bedingten Verteilung bestimmten Extremwerts zum unabhängig bestimmten Extremwert der gleichen Zufallsvariable wird durch Gl. (6-9) beschrieben. Dabei ist anzunehmen, dass die zeitbedingte Kombination bei konstanter mittlerer Wiederholungsperiode und längeren Bezugszeitintervallen zunehmend zuverlässig beschrieben wird und sich dem empirischen Kombinationswert annähert. Für den in der Regel eher theoretischen Fall, dass das betrachtete Bezugszeitintervall größer oder gleich der betrachteten mittleren Wiederholungsperiode ist, gibt Gl. (6-9) direkt die zeitlich bedingte Kombination an. In einem solchen Fall kann der Kombinationswert  $\psi(T_B = R)$  nach Gl. (6-9) empirisch aus den synchron erfassten Messzeitreihen ermittelt werden.

$$\Psi(T_B) = \frac{\left(x_t(T_B) \middle| \max y_t(T_B)\right)_R}{x_R}$$
(6-9)

Um die Hypothese zu überprüfen, dass die Unabhängigkeit des Ergebnisses der Extremwertanalyse vom Bezugszeitintervall der zugrunde gelegten Extremwerte auch für bedingte Ereignisse gilt, werden Stichproben zeitlich bedingter Zufallsvariablen ausgewertet. Die Werte  $y \mid max x(T_B)$  bzw.  $x \mid max y(T_B)$  jedes betrachteten Bezugszeitintervalls  $T_B$  stellen die Grundlage für die weiteren Untersuchungen dar. Je länger das betrachtete Bezugszeitintervall ist, desto geringer ist die Anzahl der bedingten Werte innerhalb einer Stichprobe. Die auf Basis dieser Stichproben ermittelten bedingten Werte mit einer mittleren Wiederholungsperiode von R Jahren werden anschließend ins Verhältnis zum (nicht bedingten) Extremwert der gleichen Zufallsvariable gesetzt, vgl. Gl. (6-9). Bleibt dieses Verhältnis für unterschiedliche Bezugszeitintervalle konstant, dann sind auch die betrachteten extremen bedingten Zufallsvariable zum Extremwert derselben Zufallsvariable ist konstant für verschiedene Bezugszeitintervalle. Bei einem konstanten Verhältnis für zunehmende Bezugszeitintervalle ist davon auszugehen, dass

dieses Verhältnis auch für Extremwerte bzw. bedingte Extremwerte mit mittleren Wiederholungsperioden gilt, die größer sind als das zugrunde gelegte Bezugszeitintervall. Die Kombination eines Ereignisses mit einer mittleren Wiederholungsperiode von beispielsweise 50 oder 100 Jahren und eines gleichzeitig auftretenden weiteren Ereignisses kann somit durch das in Gl. (6-9) dargestellte Verhältnis abgeschätzt werden. Demzufolge können Kombinationswerte für Extremereignisse der mittleren Wiederholungsperiode R auf Grundlage von gleichzeitig auftretenden Extremwerten eines Bezugszeitintervalls  $T_B < R$  abgeschätzt werden.

Zusätzlich zu den so ermittelten Werten  $x_R$ ,  $x / y_R$ ,  $y_R$  und  $y / x_R$  sind maßgebende Kombinationen im Wertebereich  $x / y_R < x < x_R$  bzw.  $y / x_R < y < y_R$  möglich (rote, gestrichelte Linie), vgl. Abb. 6-17.



Abb. 6-17: Gleichzeitig auftretende Zufallsvariablen (schwarz) und mit dem zeitlich bedingten Kombinationsansatz ermittelte Extremwerte und bedingte Werte der mittleren Wiederholungsperiode *R* (rot)

Die in Abb. 6-17 dargestellten Ereignisse  $y_R$  und  $x_R$  sind Zufallsvariablen mit der mittleren Wiederholungsperiode *R*. Sie stellen Extremstellen der jeweiligen Zufallsvariablen dar, d. h. die Tangentensteigung einer Funktion, die den Wertebereich  $(x / y)_R < x < x_R$  bzw.  $(y / x)_R < y < y_R$  beschreibt, ist in den Punkten mit den Koordinaten  $y_R$  und  $(x / y)_R$  bzw.  $x_R$  und  $(y / x)_R$  null bzw. unendlich. Für eine vereinfachte mathematische Beschreibung des Wertebereichs zwischen den Einzelextremereignissen wird die Gleichung eines Kegelschnitts verwendet, siehe Gl. (6-10). Je nach Lage der in Abb. 6-17 dargestellten Extremwerte und bedingten Werte wird der Bereich zwischen den Einzelextremereignissen durch eine Kreis- oder Ellipsengleichung beschrieben.

$$\frac{(x - (x|y)_R)^2}{(x_R - (x|y)_R)^2} + \frac{(y - (y|x)_R)^2}{(y_R - (y|x)_R)^2} = 1$$
(6-10)

Für Gl. (6-10) gilt der Wertebereiche  $(x | y)_R < x < x_R$  und  $(y | x)_R < y < y_R$ . Mit dieser Gleichung können auch Kombinationen von Einwirkungsparametern, welche nicht durch ein extremes Einzelereignis gekennzeichnet sind, erfasst werden.

# 6.2.2 Anwendung und Verifizierung der Methode

Um die zuvor beschriebene Methode zur Kombination gleichzeitig auftretender Umweltereignisse zu verifizieren, werden bedingte Ereignisse ermittelt. Hierzu werden Extremwerte der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe für unterschiedliche Bezugszeitintervalle nach der *Block-Maxima-Methode* bestimmt. Außerdem wird die zeitgleich mit dem Extremwert der Windgeschwindigkeit auftretende signifikante Wellenhöhe bzw. die zeitgleich mit dem Extremwert der signifikanten Wellenhöhe auftretende Windgeschwindigkeit in einem Bezugszeitintervall ermittelt, vgl. Abb. 6-15. Die Anzahl der Extremwerte und bedingten Werte der so erhobenen Stichproben sind in Tab. 6-4 aufgeführt.

Bezugszeitintervall	V	Hs / V	Hs	$V / H_s$
1 Tag	2.898	2.898	2.933	2.933
1 Woche	418	418	435	435
2 Wochen	210	210	227	227
3 Wochen	140	140	153	153
4 Wochen	106	106	119	119
5 Wochen	88	88	95	95
6 Wochen	73	73	80	80
7 Wochen	62	62	70	70
8 Wochen	55	55	61	61
9 Wochen	49	49	54	54
10 Wochen	45	45	49	49
26 Wochen	16	16	20	20
52 Wochen	9	9	10	10

Tab. 6-4: Anzahl der Messwerte der Stichproben für die Extremwertanalyse

Die zugrunde gelegten Windgeschwindigkeiten liegen als Zehn-Minuten-Mittelwerte und die signifikanten Wellenhöhen als Drei-Stunden-Mittelwerte vor, vgl. Kapitel 4. Unter der Annahme, dass die signifikante Wellenhöhe randverteilt ist, wird der maximale Zehn-Minuten-Mittelwert innerhalb des maßgebenden Drei-Stunden-Zeitintervalls als bedingte Windgeschwindigkeit angesetzt. Wird die Windgeschwindigkeit als randverteilt angenommen, so wird der Drei-Stunden-Mittelwert der signifikanten Wellenhöhe, welche zum Zeitpunkt der maßgebenden Zehn-Minuten-Windgeschwindigkeit herrscht, als bedingte signifikante Wellenhöhe angesetzt. Bei der signifikanten Wellenhöhe traten in den zugrunde gelegten Daten mehr Messausfälle auf als bei der Windgeschwindigkeit, vgl. Kapitel 4. Da bei einer als randverteilt angenommenen Zufallsvariable bereits ein einziger Messwert im Bezugszeitintervall für die Stichprobenerhebung ausreicht, bei der als bedingt

verteilt angenommenen Zufallsvariable aber stets der zeitgleich mit dem Extremwert auftretende Messwert vorliegen muss, liegen im Allgemeinen bei der als randverteilt angenommenen Stichprobe mit mehr Messausfällen mehr Wertepaare vor. Diese Stichprobe ist in diesem Fall die als randverteilt angenommene signifikante Wellenhöhe, vgl. Tab. 6-4. Für den zugrunde gelegten Beobachtungszeitraum von zehn Jahren sind aufgrund der Datenanzahl ab einem Bezugszeitintervall von etwa zehn Wochen zunehmend unzuverlässige Ergebnisse zu erwarten, vgl. Abschnitt 5.1.3.2. Die Stichproben von Extremwerten mit Bezugszeitintervallen von 26 und 52 Wochen werden hier zu Vergleichszwecken ausgewertet. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der in Tab. 6-4 aufgeführten Stichproben sind für die Windgeschwindigkeit in Abb. 6-18 und für die signifikante Wellenhöhe in Abb. 6-19 aufgeführter.



Abb. 6-18: Mittelwert und Standardabweichung der Extremwerte und bedingten Werte der Stichproben der Windgeschwindigkeit für verschiedene Bezugszeitintervalle



Abb. 6-19: Mittelwert und Standardabweichung der Extremwerte und bedingten Werte der Stichproben der signifikanten Wellenhöhe für verschiedene Bezugszeitintervalle

Bei den Stichproben sowohl der Windgeschwindigkeit als auch der signifikanten Wellenhöhe steigt der Mittelwert mit zunehmendem Bezugszeitintervall an. Die Standardabweichung bleibt hingegen für verschiedene Bezugszeitintervalle konstant. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Form der Verteilungsfunktion für Stichproben von Extremwerten unterschiedlicher Bezugszeitintervalle weitgehend identisch ist. Die Annahme, dass die empirische Verteilung von Extremwerten sehr langer mittlerer Wiederholungsperioden durch die Verteilung von Extremwerten kürzerer mittlerer Wiederholungsperioden abgeschätzt werden kann, wird damit bestätigt. Dies gilt sowohl für die Stichproben der Extremwerte als auch für die Stichproben der bedingten Werte. Die Extremwerte mit mittleren Wiederholungsperioden von 50 oder 100 Jahren, ermittelt auf Grundlage von Stichproben unterschiedlicher Bezugszeitintervalle, sind somit vom Mittelwert der Stichprobe und kaum von der Standardabweichung abhängig. In Tab. 6-5 sind die ermittelten (bedingten) Extremwerte mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren, ermittelt auf Grundlage der in Tab. 6-4 aufgeführten Stichproben, zusammengefasst. Die Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe werden jeweils einmal als randverteilt angenommen. Für die Extremwertanalyse wird das in Abschnitt 5.1.4 gewählte Vorgehen verwendet, welches ursprünglich für die Beschreibung der Häufigkeitsverteilung unabhängiger extremer Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen gewählt wurde. Die bedingten Verteilungen der genannten Zufallsvariablen werden damit jedoch ebenfalls sehr gut angenähert, siehe Abb. 6-20.



Abb. 6-20: Empirische Häufigkeitsverteilung der durch die Acht-Wochen-Extremwerte bedingten signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  / V und Windgeschwindigkeit V /  $H_s$  am Standort FINO1 sowie angepasste Weibull-III-max-Verteilungsfunktionen

Die Anpassungsgüten liegen im Bereich der unabhängigen Extremereignisse, vgl. Anhang D. Die bedingten Werte stellen im Allgemeinen keine Maximalwerte des betrachteten Bezugszeitintervalls dar. Aufgrund der Korrelation der betrachteten Einwirkungsparameter gehören sie jedoch zu den größeren Werten, vgl. auch Abb. 6-13.

In Tab. 6-5 ist die Unabhängigkeit der Ergebnisse der Extremwertanalyse vom Bezugszeitintervall der zugrunde gelegten Extremwerte zu erkennen.

Bezugszeitintervall	Vref in m/s	$(H_s/V)_{50}$ in m	$H_{s50}$ in m	$(V/H_s)_{50}$ in m/s
1 Tag	36,7	8,7	7,2	35,0
1 Woche	38,5	9,5	10,1	35,3
2 Wochen	41,5	9,3	10,3	35,8
3 Wochen	39,4	8,8	10,3	36,1
4 Wochen	42,4	8,5	9,9	36,5
5 Wochen	42,1	8,3	10,3	35,8
6 Wochen	42,0	7,8	9,7	36,1
7 Wochen	42,1	7,9	9,6	36,4
8 Wochen	42,4	8,0	9,9	36,2
9 Wochen	42,5	8,2	9,9	37,2
10 Wochen	42,1	8,1	10,3	35,0
26 Wochen	41,5	7,8	9,9	32,5
52 Wochen	41,2	8,0	10,1	33,5

Tab. 6-5:Extremwerte und bedingte Werte der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe<br/>mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren

Außer für sehr kurze und zum Teil sehr lange Bezugszeitintervalle werden übereinstimmende Ergebnisse erzielt. Für den zugrunde gelegten Beobachtungszeitraum von zehn Jahren bilden die Extremwerte mit einem Bezugszeitintervall von acht Wochen eine Datengrundlage mit geeignetem Stichprobenumfang, vgl. Tab. 6-4. Darüber hinaus werden bei diesen Stichproben sehr hohe Anpassungsgüten erzielt, vgl. Anhang D. Die sich auf Grundlage dieser Stichproben ergebenden Kombinationswerte nach Gl. (6-8) und Gl. (6-9) sind exemplarisch in Abb. 6-21 dargestellt.



Abb. 6-21: Kombinationswerte nach Gl. (6-8) und Gl. (6-9) für die extreme Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  bzw. die zeitgleich auftretende signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  auf Basis unterschiedlicher Bezugszeitintervalle

Deutlich zu erkennen ist der konstante Verlauf der dargestellten Kombinationswerte ab einem Bezugszeitintervall von  $T_B > 4$  Wochen (Windgeschwindigkeit) bzw.  $T_B > 6$  Wochen (bedingte signifikante Wellenhöhe). Die Kombinationswerte auf Basis von Extremwerten mit Bezugszeitintervallen von  $T_B < 4$  Wochen bzw.  $T_B < 6$  Wochen weichen voneinander ab. Für sehr viel größere Bezugszeitintervalle von  $T_B = 26$  Wochen bzw.  $T_B = 52$  Wochen ergeben sich gemäß der dargestellten Untersuchungen ebenfalls weitgehend konstante Kombinationswerte, vgl. Abb. 6-21 (gestrichelte Linie). Aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten werden diese Ergebnisse als wenig zuverlässig eingestuft, vgl. Tab. 6-4. Die Ergebnisse der für kleinere Bezugszeitintervalle ermittelten Kombinationswerte werden dennoch bestätigt. Bei Extremwertanalysen von unabhängigen Einzelereignissen werden Extremwerte langer mittlerer Wiederholungsperioden unter Ansatz von Verteilungsfunktionen ermittelt, die Extremwerte kürzerer Bezugszeitintervalle beschreiben. Diese Annahme gilt gemäß der durchgeführten Untersuchungen auch für bedingte Ereignisse. Mit dem in Abb. 6-21 gezeigten Kombinationswert kann die gleichzeitig mit der Windgeschwindigkeit Vref auftretende signifikante Wellenhöhe bestimmt werden. Die übereinstimmenden Ergebnisse für Bezugszeitintervalle von  $T_B < 52$  Wochen und  $T_B = 52$  Wochen (Jahresextremwerte) deuten zudem auf einen geringen Einfluss jahreszeitlicher Effekte bei den dargestellten Extremwertanalysen hin. Gemäß der durchgeführten Untersuchungen ist am Standort FINO1 bei einem 50-jährigen Windereignis mit einer signifikanten Wellenhöhe zu rechnen, die 80 % des extremen Einzelereignisses  $H_{s50}$  beträgt.

Die Kombinationswerte nach Gl. (6-8) und Gl. (6-9) für die extreme signifikante Wellenhöhe und die gleichzeitig zu erwartende Windgeschwindigkeit sind in Abb. 6-22 dargestellt. Die Ergebnisse sind wie zuvor für unterschiedliche Bezugszeitintervalle  $T_B$  dargestellt und gelten für eine mittlere Wiederholungsperiode von 50 Jahren am Standort FINO1.



Abb. 6-22: Kombinationswerte nach Gl. (6-8) und Gl. (6-9) für die extreme signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  bzw. die gleichzeitig auftretende Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  auf Basis unterschiedlicher Bezugszeitintervalle

Für die extreme signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  und die gleichzeitig zu erwartende Windgeschwindigkeit  $V | H_{s50}$  stellen sich bereits ab einem Bezugszeitintervall von  $T_B \ge 1$  Woche weitgehend konstante Kombinationswerte ein. Insgesamt stellt sich ein unsteterer Verlauf der Kombinationswerte  $\psi_{Vref}(T_B)$ und  $\psi_{Hs50}(T_B)$  im Vergleich zu den Kombinationswerten nach Abb. 6-21 ein. Dennoch ist in Abb. 6-22 ein weitgehend konstantes Verhältnis zwischen der extremen Windgeschwindigkeit H<sub>s50</sub> und der gleichzeitig auftretenden signifikanten Wellenhöhe  $V \mid H_{s50}$  für zunehmende Bezugszeitintervalle zu erkennen. Der Kombinationswert der bedingt auftretenden Windgeschwindigkeit bei einem Bezugszeitintervall von 26 bzw. 52 Wochen fällt gegenüber den zuverlässigeren Ergebnissen für kürzere Bezugszeitintervalle etwas ab. Ein auf Grundlage von Extremwerten mit einem Bezugszeitintervall von beispielsweise  $T_B = 8$  Wochen ermittelter Kombinationswert ist gegenüber diesen sehr langen Bezugszeitintervallen als konservativ anzusehen. Als Ursache für den leichten Abfall der Kombinationswerte wird der kleine Stichprobenumfang, vgl. Tab. 6-4, und die in der Folge unzuverlässig zu bestimmenden Verteilungsfunktionen vermutet. Gemäß der durchgeführten Untersuchungen ist an diesem Standort, bei einer 50-jährigen signifikanten Wellenhöhe mit einer gleichzeitig auftretenden Windgeschwindigkeit, mit einer Wellenhöhe zu rechnen, die 85 % des extremen Einzelereignisses Vref beträgt. Weitere, unter Umständen maßgebende Einwirkungskombinationen, die nicht durch ein extremes Einzelereignis gekennzeichnet sind, können nach Gl. (6-10) bestimmt werden.

#### 6.2.3 Methodenbewertung

Der Extremwert eines Einwirkungsparameters kann für gemessene oder simulierte Zeitreihen mit einem Beobachtungszeitraum empirisch bestimmt werden, der mindestens der Dauer der mittleren Wiederholungsperiode entspricht. Dies gilt auch für die Kombination von extremen Einwirkungsparametern, falls Zeitreihen mehrerer zeitgleich erfasster Einwirkungsparameter vorliegen. Im Bauwesen übliche mittlere Wiederholungsperioden von Einwirkungen und Einwirkungsparametern sind 50 oder 100 Jahre. Derart umfangreiche Messzeitreihen liegen im Allgemeinen weder für einzelne noch für mehrere zeitgleich erfasste Einwirkungsparameter vor. Zur Abschätzung von extremen Einzelereignissen mit derart langen mittleren Wiederholungsperioden wird daher angenommen, dass die Verteilung von Extremwerten kleinerer Bezugszeitintervalle auch für Extremwerte sehr viel längerer Bezugszeitintervalle repräsentativ ist. Die im Rahmen dieser Arbeit für verschiedene Bezugszeitintervalle und Schwellenwerte durchgeführten Extremwertanalysen von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen stützen diese Annahme. Diese Unabhängigkeit vom Bezugszeitintervall gilt auch für zeitlich bedingte Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen, vgl. Abschnitt 6.2.2. In den dort aufgeführten Untersuchungen ergeben Extremwertanalysen der bedingten Windgeschwindigkeiten  $V \mid max H_s$  und signifikanten Wellenhöhen  $H_s \mid max V$  für Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle übereinstimmende Ergebnisse. Da sowohl das unabhängige Extremereignis als auch das zeitlich bedingte Ereignis einer definierten mittleren Wiederholungsperiode unabhängig vom Bezugszeitintervall bestimmt werden kann, ist auch die resultierende Kombination beider Werte unabhängig vom Bezugszeitintervall. Da die gleichen

Annahmen wie bei der Analyse eines extremen Einzelereignisses zugrunde gelegt werden, entspricht der Datenbedarf dieser zeitlich bedingten Kombinationsmethode dem der Extremwertanalyse von unabhängigen Einzelereignissen. Die beschriebene Kombinationsmethode ist somit im Vergleich zu derzeitigen Konturplotverfahren, vgl. JOHANNESSEN et al. (2001), auch für sehr viel kürzere Messzeitreihen geeignet. Die Ergebnisse des zeitlich bedingten Kombinationsansatzes sind dabei als zuverlässiger einzustufen als die des genannten Konturplotverfahrens, vgl. Abschnitt 6.3. Für die Kombination von Einwirkungsparametern, welche nicht durch ein Extremereignis eines der betrachteten Parameter gekennzeichnet sind, wird eine Näherungsgleichung angegeben, vgl. Gl. (6-10). Auf diese Weise können mögliche maßgebende Kombinationen von Einwirkungsparametern bestimmt und in derzeit gebräuchlichen Simulationsrechnungen zur Beanspruchungsermittlung angesetzt werden. Bei Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen ist es wahrscheinlich, dass eine nicht durch ein extremes Einzelereignis gekennzeichnete Kombination maßgebend wird. Aufgrund des dynamischen Tragverhaltens dieser Anlagen sind die Strukturbeanspruchungen stark vom Verhältnis der Eigenfrequenz zur Frequenz der dynamischen Einwirkung abhängig. Letztere ist an die Höhe des betrachteten Einwirkungsparameters gekoppelt. Würde sich bei einer quasi-statischen Bemessung die maßgebende Beanspruchung aus einer extremen Einwirkung in Kombination mit weiteren, weniger extremen Einwirkung ergeben, ist dies bei einer Bemessung unter Berücksichtigung des dynamischen Tragverhaltens nicht zwangsläufig der Fall. Eine Beschreibung des gesamten Bereichs möglicher Kombinationen extremer Einwirkungsparameter ist daher für eine sichere Auslegung von Offshore-Windenergieanlagen entscheidend und mit der dargestellten Methode möglich. Für die zeitlich bedingte Kombinationsmethode gelten die gleichen Annahmen und Randbedingungen zum Stichprobenumfang, wie für die Analyse von Einzelextremereignissen. Falls der Beobachtungszeitraum einer solchen Datenbasis ausreichend für die zuverlässige Bestimmung eines extremen Einzelereignisses ist, kann daher mit dem beschriebenen Verfahren auch die Kombination zuverlässig bestimmt werden.

Eine mögliche Richtungsabhängigkeit der betrachteten Einwirkungsparameter berücksichtigt die zeitlich bedingte Kombinationsmethode nicht.

### 6.2.4 Zeitlich bedingter Kombinationsansatz am Standort FINO3

Die zeitlich bedingte Kombinationsmethode wird zusätzlich auf Daten der Forschungsplattform FINO3 angewendet. An diesem Standort wird ein Beobachtungszeitraum von vier statt zehn Jahren betrachtet, vgl. Kapitel 4. Die Anwendung der Kombinationsmethode auf Messzeitreihen dieses Standorts lässt Erkenntnisse zum Einfluss des Beobachtungszeitraums und zur Ortsabhängigkeit erwarten. Wie zuvor werden Extremwerte der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe für unterschiedliche Bezugszeitintervalle nach der *Block-Maxima-Methode* bestimmt. Außerdem wird die zeitgleich mit dem Extremwert der Windgeschwindigkeit auftretende signifikante Wellenhöhe bzw. die zeitgleich mit dem Extremwert der signifikanten Wellenhöhe auftretende Windgeschwindigkeit ermittelt, vgl. auch Abschnitt 6.2.2. Der Umfang der sich so ergebenen Stichprobe ist in Tab. 6-6 aufgeführt.

Bezugszeitintervall	V	$H_s / V$	$H_s$	$V / H_s$
1 Tag	1.193	1.193	1.189	1.189
1 Woche	176	176	178	178
2 Wochen	87	87	94	94
3 Wochen	58	58	65	65
4 Wochen	44	44	48	48
5 Wochen	36	36	39	39
6 Wochen	27	27	33	33
7 Wochen	25	25	28	28
8 Wochen	22	22	25	25
9 Wochen	18	18	23	23
10 Wochen	16	16	21	21

 Tab. 6-6:
 Anzahl der Messwerte von Stichproben für die Extremwertanalyse

Auf die Gründe, weshalb bei einer als randverteilt angenommenen signifikanten Wellenhöhe mehr Messwerte als bei einer als randverteilt angenommenen Windgeschwindigkeit vorliegen, wird in Abschnitt 6.2.3 eingegangen. Für Extremwerte mit einem Bezugszeitintervall von mindestens vier Wochen liefern auch die Extremwertanalysen zur Abschätzung der unabhängigen Extremereignisse  $V_{ref}$ und  $H_{s50}$  weitgehend übereinstimmende Ergebnisse, vgl. Abschnitt 5.1.3.2. Die auf Grundlage dieser Stichproben ermittelten Extremwerte mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren sind in Tab. 6-7 aufgeführt. Die Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe werden jeweils einmal als randverteilt angenommen. Die Extremwertanalyse erfolgt mit dem in Abschnitt 5.1.4 gewählten Verfahren. Die Anpassungsgüten bei Verwendung des gewählten Verfahrens auf die hier beschriebenen Stichproben liegen im Bereich der Anpassungsgüten der unabhängigen Extremereignisse. Für die Auswertung der extremen und bedingten Windgeschwindigkeiten sowie der signifikanten Wellenhöhen eignet sich auch für diese Stichproben die Weibull-III-max-Verteilungsfunktion, vgl. Abb. 6-20.

Tab. 6-7:Extremwerte und bedingte Werte der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellen-<br/>höhe mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren

Bezugszeitintervall	Vref in m/s	$(H_s/V)_{50}$ in m	$H_{s50}$ in m	$(V/H_s)_{50}$ in m/s
1 Tag	35,3	7,7	8,3	34,5
1 Woche	41,8	9,2	9,5	38,4
2 Wochen	42,4	8,7	10,2	39,1
3 Wochen	42,9	8,4	10,4	37,6
4 Wochen	42,0	7,9	10,5	35,9
5 Wochen	42,5	7,7	10,7	36,8
6 Wochen	41,5	7,2	10,5	35,9
7 Wochen	41,1	7,2	10,5	35,4
8 Wochen	41,6	7,3	10,9	37,0
9 Wochen	42,0	7,4	10,8	35,5
10 Wochen	41,7	7,4	11,0	36,7

Auch am Standort FINO3 stellen sich mit zunehmendem Bezugszeitintervall weitgehend konstante extreme und bedingte Einwirkungsparameter einer mittleren Wiederholungsperiode ein, vgl. Tab. 6-7. Die in Abb. 6-24 dargestellten Kombinationswerte für die extreme signifikante Wellenhöhe und die durch die signifikante Wellenhöhe bedingte Windgeschwindigkeit variieren für längere Bezugszeitintervalle von acht, neun oder zehn Wochen stärker. Mögliche Ursache für die etwas stärker streuenden bzw. leicht abfallenden Ergebnisse ist die geringe Anzahl von Messwerten, welche den Extremwertanalysen zugrunde gelegt werden und zu einer unsicheren Bestimmung der Verteilungsfunktionen führen. Konstante Kombinationswerte stellen sich ab Extremwerten mit Bezugszeitintervallen von sechs Wochen, vgl. Abb. 6-23, und vier Wochen, vgl. Abb. 6-24, ein, wobei sehr wenige Messwerte für eine statistische Auswertung der resultierenden Stichprobe vorliegen. Dass sich dennoch konstante Kombinationswerte einstellen, deutet auf den vergleichsweise geringen Datenbedarf der beschriebenen Kombinationsmethode hin. Trotz der geringen Stichprobenumfänge bestätigen auch die Messwerte dieses Standorts die in Abschnitt 6.2 aufgestellte Hypothese, dass das Ergebnis der Extremwertanalyse unabhängig vom Bezugszeitintervall der zugrunde gelegten Extremwerte und bedingten Werte ist.

Als Bezugsgröße für die nach Gl. (6-8) und Gl. (6-9) zu bestimmenden Kombinationswerte werden die Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  und signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  auf Basis von Vier-Wochen-Extremwerten gewählt. Für die betrachteten Einwirkungsparameter ergeben sich so Stichproben von 44 bzw. 48 Messwerten, vgl. Tab. 6-6. Die resultierenden Kombinationswerte für zunehmende Bezugszeitintervalle sind in Abb. 6-23 dargestellt.



Abb. 6-23: Kombinationswerte nach Gl. (6-8) und Gl. (6-9) für die extreme Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  bzw. die gleichzeitig auftretende signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  auf Basis unterschiedlicher Bezugszeitintervalle am Standort FINO3

Auch für die kürzeren Messzeitreihen am Standort FINO3 stellen sich für lange Bezugszeitintervalle konstante Kombinationswerte für die unabhängige Windgeschwindigkeit und die bedingte

signifikante Wellenhöhe ein. In Abb. 6-24 sind die Kombinationswerte für die unabhängige signifikante Wellenhöhe und die bedingte Windgeschwindigkeit aufgeführt.



Abb. 6-24: Kombinationswerte nach Gl. (6-8) und Gl. (6-9) für die extreme signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  bzw. die gleichzeitig auftretende Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  auf Basis unterschiedlicher Bezugszeitintervalle am Standort FINO3

Gemäß der durchgeführten Untersuchungen ist am Standort FINO3 bei einer Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren mit einer gleichzeitig auftretenden signifikanten Wellenhöhe zu rechnen, welche 75 % des unabhängigen Einwirkungsparameters  $H_{s50}$  beträgt. Eine signifikante Wellenhöhe mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren ist gemäß den dargestellten Untersuchungen mit einer Windgeschwindigkeit zu kombinieren, welche 86 % des unabhängigen Einwirkungsparameters  $V_{ref}$  beträgt. Der Vergleich der ermittelten Kombinationswerte  $\psi_{Vref}$  an beiden Standorten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung und lässt demnach auf eine weitgehende Unabhängigkeit vom Ort schließen.

Nach den durchgeführten Untersuchungen wird für die mit  $H_{s50}$  zu kombinierenden Windgeschwindigkeiten in der Deutsche Bucht ein Kombinationswert von  $\psi_{Vref} = 0,86$  vorgeschlagen. Die Strukturauslegung auf Grundlage des vorgeschlagenen Kombinationswerts wird als sicher eingeschätzt, da dieser nicht die Wirkrichtungen der betrachteten Parameter berücksichtigt, welche nach aktuellen Richtlinien, vgl. u. a. DIN EN 61400-3 (2010) und GL-IV-2 (2012), in ihrer ungünstigsten Kombination anzusetzen sind.

Der Kombinationswert  $\psi_{Hs50}$  unterscheidet sich für beide Standorte, vgl. auch Abb. 6-21 und Abb. 6-23. Der Kombinationswert ist am Standort FINO1 größer als am Standort FINO3. Dies ist vor allem auf die höhere unabhängige signifikante Wellenhöhe  $H_{s50}$  zurückzuführen. Die absoluten signifikanten Wellenhöhen an beiden Standorten weichen weniger stark voneinander ab. Eine stärkere Abweichung der Kombinationswerte  $\psi_{Hs50}$  ist vor dem Hintergrund abweichender Windeinwirklängen und einer geringeren Wassertiefe am Standort FINO3 plausibel. Insbesondere der Einfluss von der Wassertiefe auf die maximale signifikante Wellenhöhe wird als wesentliche Ursache für die größere Ortsabhängigkeit der Kombinationswerte  $\psi_{Hs50}$  angesehen. Da die Wassertiefe in der Deutschen Bucht stark ortsabhängig ist, wird für den Kombinationswerte  $\psi_{Hs50}$  eine ortsabhängige Betrachtung empfohlen.

#### 6.3 Kombinationsansätze im Vergleich

Bei der Betrachtung von Extremereignissen mit mittleren Wiederholungsperioden von mehreren Jahrzehnten ist aufgrund zu kurzer Beobachtungszeiträume im Allgemeinen eine direkte Verifizierung durch Messdaten nicht möglich. Die Verifizierung der ermittelten Parameter kann daher nur indirekt durch den Vergleich mit Ergebnissen anderer Methoden sowie durch theoretische Überlegungen erfolgen. Von den in Abschnitt 2.5 aufgeführten Verfahren zur Beschreibung der Kombination von Wind- und Seegangsereignissen sind die Konturplotverfahren nach WINTERSTEIN et al. (1993) und JOHANNESSEN et al. (2001) die einzigen Verfahren, welche für die Beschreibung des kombinierten Auftretens von extremen Umweltereignissen langer mittlerer Wiederholungsperioden geeignet sind, vgl. MITTENDORF (2006). Zur Einordnung der Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und beschriebenen richtungs- und zeitlich bedingten Kombinationsmethode wird das in Abschnitt 2.5.3 beschriebene Konturplotverfahren auf dieselbe Datengrundlage der synchron gemessenen Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen des Standorts FINO1 angewendet. Den Auswertungen werden die Drei-Stunden-Mittelwerte der signifikanten Wellenhöhen und die in diesem Zeitraum auftretenden maximalen Zehn-Minuten-Mittelwerte zugrunde gelegt. Die Häufigkeitsverteilung der Messwerte wird, wie bei den beschriebenen zeit- und richtungsbedingten Kombinationsmethoden, durch die Weibull-III-max-Verteilungsfunktion beschrieben. Die Verteilungsparameter werden mit der Momentenmethode geschätzt. Anders als in JOHANNESSEN et al. (2001) wird das Konturplotverfahren auf zwei statt drei Einwirkungsparameter angewendet, wobei einmal die Windgeschwindigkeit und einmal die signifikante Wellenhöhe als randverteilt angenommen wird. Eine allgemeine Darstellung von dem Vorgehen bei der Berechnung der Konturlinien mit dem so angepassten Verfahren ist in Anhang A abgebildet. Für die randverteilte Windgeschwindigkeit wird eine Klassenbreite von 2 m/s und für die randverteilte signifikante Wellenhöhe eine Klassenbreite von 0,5 m festgelegt, vgl. DIN EN 61400-3 (2010). Die Anzahl der bedingten Messwerte in jeder Klasse sind Tab. 6-8 aufgelistet.

#### Kapitel 6

Klassen der Windgeschwindigkeit	Anzahl bedingter Messwerte <i>H</i> s	Klassen der signifikanten Wellenhöhe	Anzahl bedingter Messwerte V
0 - 2 m/s	78	0,0 - 0,5 m	2.240
2 - 4 m/s	1.000	0,5 - 1,0 m	6.524
4 - 6 m/s	2.090	1,0 - 1,5 m	5.189
6 - 8 m/s	3.016	1,5 - 2,0 m	3.772
8 - 10 m/s	3.605	2,0 - 2,5 m	2.294
10 - 12 m/s	3.571	2,5 - 3,0 m	1.335
12 - 14 m/s	3.247	3,0 - 3,5 m	721
14 - 16 m/s	2.489	3,5 - 4,0 m	380
16 - 18 m/s	1.748	4,0 - 4,5 m	194
18 - 20 m/s	974	4,5 - 5,0 m	99
20 - 22 m/s	583	5,0 - 5,5 m	68
22 - 24 m/s	277	5,5 - 6,0 m	38
24 - 26 m/s	139	6,0 - 6,5 m	23
26 - 28 m/s	51	6,5 - 7,0 m	11
28 - 30 m/s	13	7,0 - 7,5 m	4
30 - 32 m/s	14		

Tab. 6-8:Anzahl bedingter Messwerte in den einzelnen Klassen der als randverteilt angenommenenEinwirkungsparameter beim Konturplotverfahren

Die Verteilungsparameter der als randverteilt angenommenen Windgeschwindigkeit ergeben sich zu w = 9,280, k = 8,439 und  $\omega = 45,376$ . Die Verteilungsparameter der als randverteilt angenommenen signifikanten Wellenhöhe ergeben sich zu w = 1,050, k = 95,196 und  $\omega = 70,000$ . Die Verteilungsparameter der bedingt verteilten signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit sind in Abb. 6-25 dargestellt. Die Verteilungsparameter der bedingt verteilten Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe sind in Abb. 6-26 dargestellt.



Abb. 6-25: Parameter der Weibull-III-max-Verteilung in Abhängigkeit der als randverteilt angenommenen Windgeschwindigkeit



Abb. 6-26: Parameter der Weibull-III-max-Verteilung in Abhängigkeit der als randverteilt angenommenen signifikanten Wellenhöhe

Die in Abb. 6-25 und Abb. 6-26 dargestellten Näherungsgleichungen beschreiben die Verteilungsparameter in Abhängigkeit des jeweils als randverteilt angenommenen Einwirkungsparameters. Für eine als randverteilt angenommene Windgeschwindigkeit bzw. signifikante Wellenhöhe sind die zugehörigen Gleichungen in Tab. 6-9 aufgeführt.

Tab. 6-9: Näherungsgleichungen der Parameter der Weibull-III-max-Verteilungsfunktion in Abhängigkeit der als randverteilt angenommenen Windgeschwindigkeit bzw. signifikanten Wellenhöhe

V randverteilt	Näherungsgleichung des Verteilungsparameters				
	$w(V) = \frac{51}{10.000} \cdot V^2 - \frac{9}{5.000} \cdot V + \frac{973}{2.000}$				
Hs / V	$k(V) = \frac{391}{10.000} \cdot V^2 - \frac{13.129}{10.000} \cdot V + \frac{16.093}{1.000}$				
	$\omega(V) = \frac{7}{10.000} \cdot V^3 - \frac{1}{10.000} \cdot V^2 - \frac{741}{5.000} \cdot V + \frac{39}{8}$				
H <sub>s</sub> randverteilt	Näherungsgleichung des Verteilungsparameters				
	$w(H_s) = -\frac{1.919}{10.000} \cdot {H_s}^2 + \frac{2.748}{625} \cdot H_s + \frac{19.939}{5.000}$				
$V/H_s$	$k(H_s) = \frac{423}{1.250} \cdot {H_s}^2 - \frac{2.167}{1.250} \cdot H_s + \frac{2.933}{400}$				
	$\omega(H_s) = -\frac{1.193}{10.000} \cdot {H_s}^3 + \frac{20.977}{10.000} \cdot {H_s}^2 - \frac{33.259}{6.250} \cdot H_s + \frac{658.477}{20.000}$				

Die aufgeführten Näherungsgleichungen ersetzen in den inversen Verteilungsfunktionen der bedingten Einwirkungsparameter die Verteilungsparameter. Damit sind die inversen Verteilungsfunktionen der beiden betrachteten Einwirkungsparameter lediglich vom randverteilten Einwirkungsparameter abhängig. Die Wertepaare des Konturplots bei einer als randverteilt angenommenen Windgeschwindigkeit ergeben sich durch Auswertung von Gl. (2-5) und Gl. (2-6). Bei der Annahme, dass die signifikante Wellenhöhe randverteilt ist, sind die beiden Gleichungen sinngemäß zu verwenden. Die Quantilwerte ergeben sich für die standardnormalverteilten Zufallsvariablen  $U_1$  und  $U_2$  nach Gl. (2-3). Für die hier betrachteten Drei-Stunden-Mittelwerte bei einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren ergibt sich  $\beta = 4,3488$ , vgl. Gl. (2-4). Das Ergebnis umfasst zwei Konturplots, denen das gemeinsame Auftreten der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe für eine mittlere Wiederholungsperiode von 50 Jahren entnommen werden kann, vgl. Abb. 6-27. Die Ergebnisse der zeit- und richtungsbedingten Kombinationsmethode sowie des Konturplotverfahrens nach JOHANNESSEN et al. (2001) werden anhand der bedingten zeit- oder richtungsgleich auftretenden Einwirkungsparameter verglichen, welche durch das Maximum des jeweils anderen Parameters gekennzeichnet sind. Es wird demnach jeweils die zeit- oder richtungsgleich mit der extremen Windgeschwindigkeit auftretende signifikante Wellenhöhe und die zeit- oder richtungsgleich mit der extremen signifikanten Wellenhöhe auftretende Windgeschwindigkeit angegeben, vgl. Tab. 6-10. Die bedingten Einwirkungsparameter werden für die zeit- und richtungsbedingten Kombinationsmethoden den Tab. 6-5 und Tab. 6-2 sowie dem ermittelten Konturplot entnommen. Die Ergebnisse der zeitlich bedingten Kombinationsmethode werden dabei als Referenzwerte angesetzt.

Tab. 6-10:Vergleich der Ergebnisse der entwickelten Kombinationsmethoden mit Ergebnissen des<br/>Konturplotverfahrens nach JOHANNESSEN et al. (2001) für den Standort FINO1

Parameter	Quelle	Methode	Wert	Diff.	Bemerkung
$(H_s/V)_{50}$	JOHANNESSEN et al. (2001)	Konturplotverfahren	7,3 m	9 %	V randverteilt
$(H_s/V)_{50}$	JOHANNESSEN et al. (2001)	Konturplotverfahren	6,0 m	25 %	H <sub>s</sub> randverteilt
$H_{s50,\theta}$	Abschnitt 6.1	Richtungsbedingte Kombinationsmethode	8,3 m	4 %	Ergebnisse nach Tab. 6-2 werden zugrunde gelegt
$(H_s/V)$ 50	Abschnitt 6.2	Zeitlich bedingte Kombinationsmethode	8,0 m	0 %	Ergebnisse nach Tab. 6-5 (Acht-Wochen-EW)
(V/ H <sub>s</sub> )50	JOHANNESSEN et al. (2001)	Konturplotverfahren	29,5 m/s	19 %	H <sub>s</sub> randverteilt
$(V H_s)_{50}$	JOHANNESSEN et al. (2001)	Konturplotverfahren	30,9 m/s	15 %	V randverteilt
$V_{ref, heta}$	Abschnitt 6.1	Richtungsbedingte Kombinationsmethode	39,0 m/s	8 %	Ergebnisse nach Tab. 6-2 werden zugrunde gelegt
$(V H_s)_{50}$	Abschnitt 6.2	Zeitlich bedingte Kombinationsmethode	36,2 m/s	0%	Ergebnisse nach Tab. 6-5 (Acht-Wochen-EW)

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Kombinationsmethoden unterscheiden sich deutlich, vgl. Tab. 6-10. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die drei aufgeführten Kombinationsverfahren auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen beruhen. Zudem berücksichtigen die zeitlich bedingte Kombinationsmethode und das Konturplotverfahren keine Richtungsinformationen. Die richtungsbedingte Kombinationsmethode berücksichtigt wiederum nicht, ob die ermittelten gleichgerichteten Einwirkungsparameter auch gleichzeitig auftreten. Die methodischen Ansätze sind daher nicht vergleichbar, jedoch ist ein Vergleich der Ergebnisse hilfreich für eine Bewertung der unterschiedlichen Methoden. Dies gilt insbesondere für das Konturplotverfahren und die zeitlich bedingte Kombinationsmethode, da beide Verfahren auf gleichzeitig auftretenden Extremereignissen beruhen. Unabhängig davon, welcher Einwirkungsparameter als randverteilt angenommen wird, liefert das Konturplotverfahren niedrigere bedingte Einwirkungsparameter, vgl. Tab. 6-10. Außerdem unterscheiden sich die maximale Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe des Konturplotverfahrens deutlich von den unabhängigen Einzelextremereignissen, vgl. Abb. 6-27. Die extremen Einzelereignisse der zeitlich bedingten Kombinationsmethode entsprechen den unabhängig bestimmten Einwirkungsparametern  $V_{ref}$ und  $H_{s50}$ , vgl. Tab. 6-5, bei einem Bezugszeitintervall von acht Wochen.



Abb. 6-27: Vergleich der Ergebnisse des Konturplotverfahrens und der zeitlich bedingten Kombinationsmethode (in Rot dargestellt) am Beispiel von extremen Wind- und Seegangsereignissen mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren

Die extremen Einzelereignisse  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  sind für den zugrunde gelegten Beobachtungszeitraum vergleichsweise zuverlässig zu bestimmende Einwirkungsparameter. Dies belegen weitgehend übereinstimmende Ergebnisse von Extremwertanalysen unter Verwendung anderer Methoden sowie Untersuchungen von TÜRK (2008) und EMEIS und TÜRK (2009) an diesem Standort, vgl. Tab. 5-10. Bei einer als randverteilt angenommenen Windgeschwindigkeit liegt das extreme Einzelereignis der Windgeschwindigkeit des Konturplots deutlich unter der unabhängig bestimmten Windgeschwindigkeit Vref, vgl. Abb. 6-27. Die maximale signifikante Wellenhöhe des Konturplots liegt dagegen deutlich über der unabhängig bestimmten signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}$ . Wird anstatt der Windgeschwindigkeit die signifikante Wellenhöhe als randverteilt angenommen, liegen beim Konturplotverfahren beide maximalen Einwirkungsparameter deutlich unterhalb der unabhängig bestimmten Einzelereignisse V<sub>ref</sub> und H<sub>s50</sub>. Bei den in Abb. 6-27 abgebildeten Konturplots liegen zudem zahlreiche Messwerte außerhalb der Konturlinie. So wird beispielsweise die maximale Windgeschwindigkeit des zehnjährigen Beobachtungszeitraums nicht von den Konturplots mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren abgedeckt. Dass bei einem Beobachtungszeitraum von zehn Jahren mehrere Messwerte außerhalb der Konturlinien mit einer gemeinsamen mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren liegen, ist ein Hinweis dafür, dass die Kombination von Extremereignissen auf Basis der verwendeten Datengrundlage nur unsicher zu bestimmen ist. Eine Ursache für die Unsicherheit bei den dargestellten Konturlinien ist die geringe Anzahl an Messwerten in Klassen hoher Werte einer randverteilten Zufallsvariable, siehe Abb. 6-27 und Tab. 6-8. Da die Anzahl der Messwerte in diesen Klassen so gering ist, wird eine zuverlässige Extremwertanalyse schwierig bis unmöglich. Die höchsten Klassen der randverteilten Zufallsvariable werden daher häufig außer Acht gelassen, womit beim Konturplotverfahren genau die Messwerte mit der größten Bedeutung in der Extremwertanalyse vielfach unberücksichtigt bleiben. Bei Ansatz von Messdaten eines sehr viel

längeren Beobachtungszeitraums wird mit zuverlässigeren Ergebnissen des Konturplotverfahrens gerechnet. Dies gilt insbesondere für auslegungsrelevante Kombinationen sehr hoher Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen. Der Effekt, dass die maximale randverteilte Windgeschwindigkeit des Konturplots deutlich unter dem extremen, unabhängig bestimmten Einzelextremereignis gleicher mittlerer Wiederholungsperiode liegt, tritt auch bei den Untersuchungen von JOHANNESSEN et al. (2001) auf. Der Beobachtungszeitraum, der bei Johannessen zugrunde gelegten zusammengesetzten Messzeitreihen, beträgt 26 Jahre. Für die untersuchten, synchron erfassten Messzeitreihen liefert gemäß der dargestellten Untersuchungen die zeitlich bedingte Kombinationsmethode im Vergleich zum Konturplotverfahren sehr viel plausiblere Kombinationen.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

# 7.1 Zusammenfassung

Im Zuge des Ausbaus der Offshore-Windenergie wurden in den vergangenen Jahren mehrere Messbojen und Forschungsplattformen in der Nord- und Ostsee installiert. Die daraus hervorgegangenen mehrjährigen Messzeitreihen ermöglichen eine zunehmend zuverlässige Abschätzung von extremen Einwirkungsparametern mit mittleren Wiederholungsperioden von mehreren Jahrzehnten. In der Vergangenheit wurden die extremen Einzelereignisse meist unabhängig voneinander ermittelt und anschließend konservativ überlagert. Anders als in der quasi-statischen Bemessung im Hochbau werden bei den hochgradig dynamischen Strukturen von Windenergieanlagen nicht Einwirkungen, sondern Einwirkungsparameter wie Windgeschwindigkeit, Wellenhöhe etc. kombiniert, und Strukturbeanspruchungen anschließend durch Simulationsrechnungen im Zeitbereich bestimmt. Kombinationsansätze aus dem Hochbau sind aus diesem Grund nicht auf Offshore-Windenergieanlagen übertragbar. Um die spezifische Beanspruchungsermittlung bei Offshore Windenergieanlagen zu gewährleisten, sind Kombinationsmethoden für extreme, gemeinsam auftretende Einwirkungsparameter erforderlich. Über die Kombination dieser extremen Einwirkungsparameter gibt es nur wenige Kenntnisse, vermutlich aufgrund der geringeren Relevanz und fehlenden Datengrundlage vor dem Ausbau der Offshore-Windenergie. Durch die in der Nordsee installierte Forschungsplattform FINO1 liegen erstmals zeitgleich erfasste Messzeitreihen der Windgeschwindigkeit in derzeitigen Nabenhöhen und signifikanter Wellenhöhen für über zehn Jahre vor. Diese neue Datengrundlage ermöglicht es, rein auf Messdaten basierende Kombinationsmethoden zu entwickeln.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methodik zur Kombination extremer Einwirkungsparameter für Offshore-Bauwerke zu entwickeln, welche das gleichzeitige Auftreten bzw. die Richtungsabhängigkeit der Parameter einbezieht und zuverlässige Ergebnisse bei gleichzeitig möglichst geringem Datenbedarf erzielt. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die Methodik auch auf Messzeitreihen und nicht nur auf simulierte Zeitreihen mit den systemimmanenten Modellungenauigkeiten angewendet werden kann. Die Methodik sollte darüber hinaus auf unterschiedliche Standorte übertragbar und an beliebige mittlere Wiederholungsperioden der kombinierten Extremereignisse anpassbar sein.

Die Kombinationsmethoden wurden auf Grundlage synchron erfasster Messzeitreihen der Forschungsplattform FINO1 entwickelt. Auf diese Weise wurden Modellunsicherheiten, wie sie bei Verwendung simulierter Hindcastdaten oder bei zusammengesetzten Zeitreihen mehrerer Messstandorte entstehen, ausgeschlossen. Als Grundlage für die Auswertungen wurde eine Datenbank zeitgleich gemessener Windgeschwindigkeiten und -richtungen sowie signifikanter Wellenhöhen und Wellenrichtungen angelegt. Der Beobachtungszeitraum beträgt zehn Jahre. Für die Wahl eines einheitlichen methodischen Vorgehens wurden in über 170 systematisch durchgeführten Extremwertanalysen unterschiedliche Analyseverfahren, Verteilungsfunktionen und Methoden zur Parameterschätzung an Messzeitreihen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe verglichen. Die Untersuchungen wurden sowohl für Messzeitreihen der Forschungsplattform FINO1 als auch der Forschungsplattform FINO3 durchgeführt. Ziel ist ein einheitliches Vorgehen in der Extremwertanalyse, bei dem die betrachteten Einwirkungsparameter bestmöglich beschrieben werden und eine Vergleichbarkeit der betrachteten Standorte gewährleistet ist. Als Maß für die Eignung einer Verteilungsfunktion oder Schätzmethode wurde die Anpassungsgüte nach verteilungsunabhängigen Anpassungstests, dem Chi-Quadrat- und dem Kolmogorow-Smirnow-Test, verwendet. Auf Grundlage der Untersuchungen wurde die Block-Maxima-Methode zur Stichprobenerhebung in Kombination mit der Weibull-III-max-Verteilungsfunktion für die Extremwertanalyse der Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen festgelegt. Für die Parameterschätzung wurde die Momentenmethode festgelegt. Mit diesem einheitlichen Vorgehen sind für die Einwirkungsparameter an den untersuchten Standorten vergleichbare Extremwertanalysen gewährleistet, welche auf geeigneten und optimal angepassten Verteilungsfunktionen basieren.

Die Analysen extremer Windgeschwindigkeiten und signifikanter Wellenhöhen haben gezeigt, dass Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle bzw. oberhalb unterschiedlicher Schwellenwerte übereinstimmende Extremwerte einer definierten mittleren Wiederholungsperiode liefern. Der Vergleich der Ergebnisse der Extremwertanalyse nach dem festgelegten Verfahren mit Ergebnissen einer von der Jahreszeit unabhängigen Stichprobenerhebung mittels der Peak-Over-Threshold-Methode und der Annual-Maxima-Methode, deuten auf einen geringen Einfluss jahreszeitlicher Effekte hin. Voraussetzung für eine zuverlässige Extremwertanalyse sind Extremwerte ausreichend langer Bezugszeitintervalle bzw. oberhalb ausreichend hoher Schwellenwerte. Bei den hier betrachteten Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen am Standort FINO1 sollten Bezugszeitintervalle von mindestens vier Wochen bzw. Messwerte  $V \ge 15 m/s$  und  $H_s \ge 1 m$  der Extremwertanalyse zugrunde gelegt werden. Außerdem ist eine ausreichende Anzahl an Messwerten für eine zuverlässige Bestimmung einer geeigneten Verteilungsfunktion erforderlich. Die Ergebnisse nach der Block-Maxima-Methode und der Peak-Over-Threshold-Methode stimmen für die untersuchten Parameter bei Einhaltung dieser Randbedingungen und der Verwendung geeigneter Verteilungsfunktionen gut überein. Die Ergebnisse von Extremwertanalysen mit der Total-Sample-Methode weichen von diesen Ergebnissen ab. Dieses Resultat bestätigt die Ergebnisse der Untersuchungen von Wellenhöhen in VAN VLEDDER et al. (1993), wonach Stichprobenerhebungen mit der Peak-Over-Threshold-Methode und der Total-Sample-Methode zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Extremwertanalyse führen. Mögliche Ursachen sind der Einfluss kleiner Messwerte und die stochastische Abhängigkeit der Daten bei der Total-Sample-Methode. Mit dem oben genannten einheitlichen Vorgehen bei der Extremwertanalyse wurden die voneinander unabhängigen Einwirkungsparameter  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  für die untersuchten Messstandorte zuverlässig bestimmt. Die Kombinationsmethoden wurden ebenfalls mit dem dargestellten Verfahren entwickelt. Sie sind jedoch allgemein gültig und können auch mit anderen

Verteilungsfunktionen, Schätzmethoden oder anderen Verfahren der Extremwertanalyse verwendet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Ansätze für die Entwicklung von Kombinationsmethoden für extreme Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen verfolgt. Im sogenannten richtungsbedingten Kombinationsansatz wird die Richtungsabhängigkeit der Einwirkungsparameter für die Beschreibung der Kombination verwendet. Wind- und Welleneinwirkungen sind richtungsabhängige Einwirkungen, wobei sich die Wirkrichtungen der maximalen Einwirkungsparameter für viele Standorte unterscheidet. Grund für die unterschiedlichen Wirkrichtungen von Maximalereignissen sind die örtliche Meteorologie, die richtungsabhängige Einwirklänge des Windes und die Bathymetrie des betrachteten Seegebiets. Im richtungsbedingten Kombinationsansatz wird die Kombination aus Extremwerten einer definierten mittleren Wiederholungsperiode eines Richtungssektors und dem richtungsunabhängigen Extremwert derselben mittleren Wiederholungsperiode ermittelt. Zur Bestimmung der Kombination werden Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe für 30° und 60° große Richtungssektoren durchgeführt. Die gleichen Analysen werden außerdem für richtungsversetzte Sektoren durchgeführt. Anhand der statistischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass für eine definierte mittlere Wiederholungsperiode unterschiedliche Extremwerte in unterschiedlichen Wirkrichtungen auftreten und sich die Richtungen der maximalen Extremwerte beider Einwirkungsparameter unterscheiden. Für jeden Richtungssektor werden Kombinationswerte ermittelt. welche den richtungsabhängigen Einwirkungsparameter in Abhängigkeit richtungsunabhängig ermittelten Einwirkungsparameter beschreiben. Eine geeignete Sektorgröße ist in Abhängigkeit des Standorts und des Beobachtungszeitraums festzulegen. Für die Bestimmung der richtungsabhängigen Kombinationswerte werden sich überschneidende Sektoren empfohlen. Auf diese Weise liegen bei gleicher Sektorgröße und mittlerer Anzahl an Messwerten je Richtungssektor eine größere Anzahl an Richtungssektoren vor und die Kombinationswerte können so präziser für eine bestimmte Richtung ermittelt werden. Der Vergleich der Ergebnisse dieser Kombinationsmethode für unterschiedliche Standorte zeigt, dass dieser Kombinationsansatz stark ortsabhängig ist.

Bei der zeitlich bedingten Kombinationsmethode werden zeitgleich auftretende Extremereignisse als Extrapolationsgrundlage verwendet und statistisch ausgewertet. Es wird gezeigt, dass die Unabhängigkeit des Ergebnisses einer Extremwertanalyse vom Bezugszeitintervall auch für zeitlich bedingte Werte gilt. Das heißt, dass Extremwertanalysen auf Basis der zeitgleich mit den Extremwerten eines Bezugszeitintervalls auftretenden weiteren Einwirkungsparameter zu konstanten bedingten Werten einer definierten mittleren Wiederholungsperiode führen. Der erforderliche Beobachtungszeitraum ist dabei bei den untersuchten Messzeitreihen sehr viel kürzer (hier 1/5 bei den Auswertungen der FINO1-Daten) als die festgelegte mittlere Wiederholungsperiode. Ausgehend von dieser Erkenntnis werden Kombinationswerte für zeitgleich auftretende extreme Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen in Abhängigkeit von den extremen Einzelereignissen bestimmt. Das Ergebnis umfasst Kombinationswerte, welche die Höhe einer signifikanten Wellenhöhe angeben, die zeitgleich mit einer Windgeschwindigkeit einer definierten werten Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von den extremen Einzelereignissen bestimmt. Das Ergebnis umfasst Kombinationswerte, welche die Höhe einer signifikanten Wellenhöhe angeben, die zeitgleich mit einer Windgeschwindigkeit einer definierten mittleren Wiederholungsperiode  $v_{ref}$  auftretende

signifikante Wellenhöhe  $H_s$  und die gleichzeitig mit der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  auftretende Windgeschwindigkeit *V* für die Standorte FINO1 und FINO3 abgeschätzt. Der Kombinationswert für die gleichzeitig mit der signifikanten Wellenhöhe  $H_{s50}$  auftretende Windgeschwindigkeit stimmt mit  $\psi_{Vref} = 0.85$  (FINO1) und  $\psi_{Vref} = 0.86$  (FINO3) für die beiden Standorte sehr gut überein und der größere beider Werte wird für die Deutsche Bucht empfohlen. Der stärker ortsabhängige Kombinationswert für die gleichzeitig mit der Windgeschwindigkeit  $V_{ref}$  auftretende signifikante Wellenhöhe variiert mit  $\psi_{Hs50} = 0.80$  (FINO1) und  $\psi_{Hs50} = 0.75$  (FINO3) stärker. Für den Kombinationswert  $\psi_{Hs50}$  wird eine ortsabhängige Betrachtung empfohlen. Da insbesondere bei dynamischen Tragstrukturen Kombinationen maßgebend sein können, welche nicht durch das Maximum einer der Einwirkungsparameter gekennzeichnet sind, wird für den Bereich zwischen den genannten Extremwertkombinationen eine Näherungsgleichung angegeben. Die in dieser Arbeit entwickelte zeitlich bedingte Kombinationsmethode ist standort- und parameterunabhängig. Mit ihr können gemeinsam auftretende Extremereignisse beliebiger mittlerer Wiederholungsperioden bestimmt werden. Der Datenbedarf der entwickelten Kombinationsmethode entspricht dem Datenbedarf einer Extremwertanalyse eines unabhängigen Einzelereignisses.

Abschließend werden die Ergebnisse der entwickelten Kombinationsmethoden mit Ergebnissen des sogenannten Konturplotverfahrens verglichen. Das Konturplotverfahren basiert ebenfalls auf zeitgleich gemessenen Einwirkungsparametern und ist somit direkt mit dem zeitlich bedingten Kombinationsansatz vergleichbar. Das Konturplotverfahren ist eine stochastische Methode, bei der die Konturen von zwei oder mehr gemeinsam auftretenden Zufallsvariablen mit einer gemeinsamen mittleren Wiederholungsperiode bestimmt werden, vgl. u. a. JOHANNESSEN et al. (2001). Das Verfahren nach Johannessen et al. wird für die vergleichenden Untersuchungen auf die Messzeitreihen der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe der Forschungsplattform FINO1 angewendet. Je nachdem, welcher Einwirkungsparameter beim Konturplotverfahren als randverteilt angenommen wird, liegt die maximale signifikante Wellenhöhe unter- oder oberhalb der mit dem zeitlich bedingten Kombinationsansatz ermittelten signifikanten Wellenhöhe. Die mit dem Konturplotverfahren ermittelte maximale Windgeschwindigkeit liegt sowohl für eine als randverteilt angenommene Windgeschwindigkeit als auch für eine als randverteilt angenommene signifikante Wellenhöhe unterhalb des entsprechenden Ergebnisses des zeitlich bedingten Kombinationsansatzes. Die maximalen Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen des Konturplotverfahrens weichen damit für die untersuchte Datengrundlage auch deutlich von solchen Einzelereignissen ab, welche zuverlässiger bestimmt werden können. Zahlreiche Messwerte des zehnjährigen Beobachtungszeitraums liegen zudem außerhalb der eine gemeinsame mittlere Wiederholungsperiode von 50 Jahren repräsentierenden Kontur. Beide Auffälligkeiten deuten darauf hin, dass sich für die untersuchte Datengrundlage die Kombination der extremen Einwirkungsparameter mit dem Konturplotverfahren nur sehr unsicher bestimmen lässt. Die Kombination nach dem zeitlich bedingten Kombinationsansatz berücksichtigt die unabhängig zu bestimmenden Einzelereignisse und liefert für die angesetzte Datengrundlage realistischere Ergebnisse.

### 7.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden am Beispiel der Windgeschwindigkeit und signifikanten Wellenhöhe zwei Kombinationsmethoden für extreme Einwirkungsparameter entwickelt. Die Methoden beruhen auf unterschiedlichen Ansätzen. Die eine Methode nutzt die Richtungsabhängigkeit der Einwirkungsparameter, während die andere Methode das gleichzeitige Auftreten beider Einwirkungsparameter zur Beschreibung der Kombination verwendet. Für eine sichere und wirtschaftliche Strukturauslegung sind zeit- und richtungsgleich auftretende Extremereignisse maßgebend. Die Zusammenführung beider Kombinationsansätze stellt theoretisch eine noch naturgetreuere Beschreibung der Einwirkungskombination dar. Eine solche zeit- und richtungsbedingte Kombination könnte bestimmt werden, indem zunächst die Stichprobe wie beim richtungsbedingten Kombinationsansatz in Richtungssektoren unterteilt wird. Anschließend wäre der zeitlich bedingte Kombinationsansatz auf gemessene oder simulierte Werte jedes Richtungssektors anzuwenden. Je nach Anzahl der Richtungssektoren und des verwendeten Bezugszeitintervalls reduziert sich die Anzahl der Messwerte für die einzelnen Extremwertanalysen deutlich. Für eine zuverlässige Abschätzung der Einwirkungskombination durch einen solchen kombinierten Ansatz wären synchron erfasste Messzeitreihen oder simulierte Hindcastdaten mehrerer Jahrzehnte erforderlich. Liegen entsprechende Daten vor, liefert die Verknüpfung der dargestellten Kombinationsansätze weitere Erkenntnisse zur realistischen Einwirkungskombination.

Zeitlich bedingte Kombinationen von Einwirkungsparametern, die nicht durch ein extremes Einzelereignis gekennzeichnet sind, werden in dieser Arbeit durch eine Näherungsgleichung beschrieben. Da bei dynamisch sensitiven Tragstrukturen die maßgebende Strukturbeanspruchung durch die Amplitude und die Frequenz der Einwirkung bestimmt wird, ist eine solche Beschreibung von gemeinsam auftretenden Einwirkungsparametern unterhalb der extremen Einzelereignisse wichtig. Für die Validierung dieser Näherungsgleichung bzw. für deren Anpassung sind weitere Untersuchungen durchzuführen. Ein möglicher Ansatz könnte von der Erkenntnis ausgehen, dass Extremwertanalysen auf Grundlage von Extremwerten und bedingten Werten unabhängig vom Bezugszeitintervall zu jeweils übereinstimmenden Werten einer definierten mittleren Wiederholungsperiode führen. Überträgt man diesen Zusammenhang auf Wertepaare in einem festgelegten zeitlichen Abstand zu dem Ereignis, das durch ein extremes Einzelereignis gekennzeichnet ist, dann können auch Wertepaare zwischen den Kombinationen ( $H_s/V$ )<sub>50</sub> und ( $V/H_s$ )<sub>50</sub> gemäß Abb. 6-27 beschrieben werden. Auf diese Weise kann die angegebene Näherungsgleichung validiert bzw. ein angepasster Verlauf bestimmt werden.

Die vergleichende Untersuchung des Konturplotverfahrens mit der zeitlich bedingten Kombinationsmethode erfolgt auf dem zehn Jahre umfassenden Beobachtungszeitraum, der allen Untersuchungen dieser Arbeit zugrunde gelegt wird. In der Folge werden beim Konturplotverfahren die bedingten Verteilungsfunktionen der oberen Klassen des randverteilten Einwirkungsparameters auf Grundlage einer sehr geringen Anzahl von Messwerten bestimmt. Die Ergebnisse des Konturplotverfahrens sind daher insbesondere für die Kombination extremer Einwirkungsparameter mit großen Unsicherheiten behaftet. Für einen statistisch abgesicherten Vergleich sollten daher beide Verfahren unter Ansatz eines sehr viel längeren Beobachtungszeitraums untersucht werden. Der angesetzte Beobachtungszeitraum zeigt deutlich den Vorteil der zeitlich bedingten Kombinationsmethode bei kürzeren Beobachtungszeiträumen auf. Inwieweit sich die Ergebnisse beider Verfahren bei längeren Beobachtungszeiträumen annähern, ist durch weitere Untersuchungen zu klären.

Generell sind weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Beobachtungszeiträumen sinnvoll, um Erkenntnisse zur Sensitivität der vorgestellten Kombinationsmethoden gegenüber unterschiedlich großen Stichproben zu erhalten. Die mit abnehmendem Beobachtungszeitraum zunehmende Unschärfe der Kombinationswerte bzw. Angaben zu einem Mindestbeobachtungszeitraum sind wichtige Anhaltspunkte für eine praktische Anwendung der Kombinationsmethoden. Idealerweise sollten weitere Untersuchungen an synchron erfassten Messzeitreihen oder auch simulierten Hindcastdaten sehr viel längerer Beobachtungszeiträume erfolgen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die dargestellten Kombinationsmethoden auf Grundlage von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen entwickelt und für zwei Messstandorte in der südlichen Nordsee auf diese Einwirkungsparameter angewendet. Sofern geeignete Datensätze synchron erfasster Einwirkungsparameter und ihrer Wirkrichtungen vorliegen, sind die entwickelten Kombinationsmethoden auf beliebige Parameter übertragbar. Die Kombination extremer Strömungsgeschwindigkeiten mit den untersuchten Einwirkungsparametern liefert wesentliche Erkenntnisse zu gemeinsam auftretenden Umweltereignissen bei Offshore-Windenergieanlagen. Die vorgestellten Methoden können zudem Ausgangspunkt für weitere vergleichende Untersuchungen mit bestehenden Kombinationsansätzen darstellen.

# 8 Literaturverzeichnis

AIRY (1845) Airy, G.: Tides and Waves. Encyclopædia metropolitana (1845), S. 241–396

BARTHELMIE et al. (2006) Barthelmie, R. J.; Larsen, G. C.; Frandsen, S. T.; Folkerts, L.; Rados, K.; Pryor, S. C.; Lange, B.; Schepers, G.: Comparison of Wake Model Simulations with Offshore Wind Turbine Wake Profiles Measured by Sodar. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (2006), Heft 7, S. 888–901

BÖKER (2010) Böker, C.: Load simulation and local dynamics of support structures for offshore wind turbines. Dissertation, Leibniz Universität Hannover. Shaker-Verlag, 2010

BORGES und CASTANHETA (1971) Borges, J. F.; Castanheta, M.: Structural safety. 2. Aufl., Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, 1971

BRETSCHNEIDER (1952) Bretschneider, C. L.: Revised wave forecasting relationships. ASCE (Hrsg.), (Proceedings of the Second Conference on Coastal Engineering), 1952

BRETSCHNEIDER (1958) Bretschneider, C. L.: Revisions in Wave Forecasting: Deep and Shallow Water. ASCE (Hrsg.), (Proceedings of the Sixth Conference on Coastal Engineering), 1958

BRETSCHNEIDER und REID (1953) Bretschneider, C. L.; Reid, R. O.: Change in Wave Height Due to Bottom Friction, Percolation and Refraction. (34th Annual Meeting of American Geophysical Union), 1953

BRONŠTEJN et al. (1993) Bronštejn, I. N.; Semendjaev, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: Taschenbuch der Mathematik. 1. Aufl., 1993

BÜHL (2014) Bühl, A.: SPSS 22 - Einführung in die moderne Datenanalyse ; [Extras online]. 14., aktualisierte Aufl., Pearson, Hallbergmoos, 2014

BUSINGER et al. (1971) Businger, J. A.; Wyngaard, J. C.; Izumi, Y.; Bradley, E. F.: Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. Journal of the Atmospheric Sciences (1971), Heft 28, S. 181–189

CAIRES (2011) Caires, S.: Extreme Value Analysis: Wave Data. JCOMM Technical Report No. 57. 2011

CERC (1984) COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER: Shore Protection Manual - Volume I. 4. Aufl., Washington D.C., 1984

CHAKRABATI (2006) Chakrabati, S. K.: Handbook of Offshore Engineering. Elsevier Verlag, 2006

CLAUSS et al. (1988) Clauss, G.; Lehmann, E.; Östergaard, C.: Meerestechnische Konstruktionen -Mit 25 Tabellen. Springer, Berlin, 1988

COLES (2001) Coles, S.: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Verlag, London, 2001

CORNELL (1969) Cornell, C. A.: Probability-Based Structural Code. ACI Journal (1969), S. 974-985

CSANADY (2001) Csanady, G. T.: Air-Sea Interaction - Laws and Mechanisms. London, 2001

DEAN (1965) Dean, R. G.: Stream Function Representation of Nonlinear Ocean Waves. Journal of Geophysical Research (1965), Heft 18, S. 4561–4572

DEAN und DALRYMPLE (1991) Dean, R. G.; Dalrymple, R. A.: Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists (Advanced series on ocean engineering ; v. 2). World Scientific, 1991

DNV-OS-J101 (2007) DET NORSKE VERITAS (Hrsg.): Design of Offshore Wind Turbine Structures. Hovik, Norway, 2007

DNV-RP-C205 (2010) DET NORSKE VERITAS (Hrsg.): Environmental Conditions and Environmental Loads. Hovik, Norway, 2010

DIN EN 61400-3 (2010) DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (Hrsg.): Windenergieanlagen - Teil3: Auslegungsanforderungen für Windenergieanlagen auf offener See. VDE Verlag, Berlin, 2010

DIN EN 1991-1-4 (2010) DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (Hrsg.): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten. Beuth Verlag, Berlin, 2010

DIN EN 1990 (2010) DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (Hrsg.): Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag, Berlin, 2010

EMEIS und TÜRK (2009) Emeis, S.; Türk, M.: Wind-driven wave heights in the German Bight. Ocean Dynamics (2009), Heft 3, S. 463–475

FISCHER (1999) Fischer, L.: Sicherheitskonzept für neue Normen - ENV und DIN-neu - Grundlagen und Hintergrundinformationen Teil 8: Extremwerttheorie und Einwirkungsbeschreibung. Bautechnik (1999), Heft 9, S. 816–827

FISCHER (2001) Fischer, L.: Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen - Ein Leitfaden für Bauingenieure, Architekten und Studenten. Ernst & Sohn, Berlin, 2001

FISCHER (2010) Fischer, A. M.: Bestimmung modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte zur semiprobabilistischen Bemessung von Stahlbetonkonstruktionen im Bestand. Dissertation. Kaiserslautern, 2010

FISCHER et al. (2010) Fischer, T.; de Vries, W.; Schmidt, B.: Upwind Design Basis - WP4: Offshore Foundations and Support Structures. Stuttgart, 2010

FORRISTALL (2004) Forristall, G.: On the Use of Directional Wave Criteria. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering (2004), Heft 5, S. 272–275

GASCH et al. (2005) Gasch, R.; Twele, J.; Bade, P.; Conrad, W.; Heilmann, C.; Kaiser, K.; Kortenkamp, R.; Kühn, M.; Langreder, W.; Liersch, J.; Maurer, J.; Reuter, A.; Schubert, M.; Sundermann, B.; Stoffel, A.: Windkraftanlagen. 4. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2005

GL-IV-2 (2012) GERMANISCHER LLOYD (Hrsg.): Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines. GL Renewables Certification, Hamburg, 2012

GERSTNER (1809) Gerstner, F. J.: Abhandlung über die Theorie der oberschlächtigen Wasserräder. 1809

GLOVER et al. (2011) Glover, D. M.; Jenkins, W. J.; Doney, S. C.: Modeling methods for marine science. Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2011

GLOVER und NEWTON (1991) Glover, M. H.; Newton, W. H.: Evaluation of a multiple-sensor weighin-motion system. TRRL - Transport and Road Research Laboratory (Hrsg.), (Research Report 307), Crowthorne, 1991

GODA (2010) Goda, Y.: Random seas and design of maritime structures. 3. ed., World Scientific Publishing, Singapore, 2010

GOLLWITZER (2007) Gollwitzer, S.: Strurel - A Structural Reliability Analysis Program-System - Statrel: Users Manual. RCP GmbH (Hrsg.), München, 2007

GRÜNBERG (2004) Grünberg, J.: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau - Erläuterungen zu DIN 1055-100. 1. Aufl., Beuth, Berlin, 2004

GRÜNBERG und GÖHLMANN (2010): Windenergieanlagen in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise. In: BERGMEISTER, Konrad; FINGERLOOS, Frank; WÖRNER, Johann-Dietrich (Hrsg.): Betonkalender 2011 // Beton-kalender 2011 : Kraftwerke, Faserbeton // Schwerpunkte. [S.l.] : Wilhelm Ernst & Sohn Verl. 2010

HANSEN (2004) Hansen, M.: Zur Auswirkung von Überwachungsmaßnahmen auf die Zuverlässigkeit von Betonbauteilen. Dissertation, Leibniz Universität Hannover. Fraunhofer IRB Verlag, 2004

HAPEL (1990) Hapel, K.-H.: Festigkeitsanalyse dynamisch beanspruchter Offshore-Konstruktionen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, s.l., 1990

HARTUNG et al. (1995) Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik ; mit zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen. 10., durchges. Aufl., Oldenbourg, München, 1995

HASSELMANN et al. (1973) Hasselmann, K.; Barnett, T. P.; Bouws, E.; Carlson, H.; Cartwright, D. E.; Enke, K.; Ewing, J. A.; Gienapp, H.; Hasselmann, D. E.; Kruseman, P.; Meerburg, A.; Müller, P.; Olbers, D. J.; Richter, K.; Sell, W.; Walden, H.: Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsche Hydrographische Zeitschrift (1973), Heft 12 HOLTHUIJSEN et al. (2003) Holthuijsen, L. H.; Booij, N.; RIS, R.C., HAAGSMA, IJ.G.; Kieftenburg, A.; Kriezi, E. E.; Zijlema, M.: SWAN Cycle III version 40.20 - User Manual. 2003

HOSKING und WALLIS (2005) Hosking, J. R. M.; Wallis, J. R.: Regional frequency analysis - An Approach Based on L-Moments. Cambridge University Press, Cambridge, 2005

JOHANNESSEN et al. (2001) Johannessen, K.; Meling, T. S.; Haver, S.: Joint Distribution for Wind and Waves in the Northern North Sea. Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference. Chung, Jin S. (Hrsg.), Stavanger, Norway, 2001

KETTLE (2013) Kettle, A. J.: FINO1-Research Platform in the North Sea. 2013

KLINGMÜLLER und BOURGUND (1992) Klingmüller, O.; Bourgund, U.: Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau. Vieweg +Teubner Verlag, Wiesbaden, 1992

LANGE et al. (2004) Lange, B.; Larsen, S.; Hojstrup, J.; Barthelmie, R.: The influence of thermal effects on the wind speed profile of the coastal marine boundary layer. Boundary-Layer Meteorology (2004), Heft 112, S. 587–617

LUND (2006) Lund, B.: Untersuchung des Seegangs an der Südspitze der Nordseeinsel Sylt mit Hilfe des radargestützten Wellenbeobachtungssystems WaMoS II. Geesthacht, 2006

MAAT et al. (1991) Maat, N.; Kraan, C.; Oost, W. A.: The Roughness of Wind Waves. Boundary-Layer Meteorology (1991), Heft 54, S. 89–103

MAC CAMY und FUCHS (1954) Mac Camy, R. C.; Fuchs, R. A.: Waves forces on piles: a diffraction theory. (Technical Memorandum No. 69), Washington D.C., 1954

MALCHEREK (2010) Malcherek, A.: Gezeiten und Wellen - Die Hydromechanik der Küstengewässer. 1. Aufl., Vieweg+Teubner (GWV), s.l., 2010

MATHIESEN et al. (1994) Mathiesen, M.; Goda, Y.; Hawkes, P. J.; Mansard, E.; Martín, M. J.; Peltier, E.; Thompson, E. F.; van Vledder, G.: Recommended practice for extreme wave analysis. Journal of Hydraulic Research (1994), Heft 6, S. 803–814

MELING et al. (2000) Meling, T. S.; Johannessen, K.; Haver, S.; Larsen, K.: Mooringa analysis of a semi-submersible by use of iFORM and contour surfaces. Conference Proceedings. American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.), (ASME Symposia Volumes. OMAE OMAE2000/OSU OFT-4141), New York, 2000

MITTENDORF et al. (2002) Mittendorf, K.; Nguyen, B.; Zielke, W.: Seegang und Seegangsbelastung - 2. Gigawind-Symposium. 2002

MITTENDORF et al. (2004) Mittendorf, K.; Nguyen, B.; Zielke, W.: Seegang und Seegangsbelastung II. 2004

MITTENDORF (2006) MITTENDORF: Hydromechanical Design Parameters and Design Loads for Offshore Wind Energy Converters : Dissertation. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen. 2006 – Überprüfungsdatum 2012-01-16
MORISON et al. (1950) Morison, J. R.; O'Brien, M. P.; Johnson, J. W.; Schaaf, S. A.: The force exerted by surface waves on Piles. Petroleum Transactions, AIME (1950), Heft 189, S. 149–154

NEUMANN et al. (2004) Neumann, T.; Nolopp, K.; Herklotz, K.: Erste Betriebserfahrungen mit der FINO1-Forschungsplattform in der Nordsee. DEWI Magazin (2004), Heft 24, S. 27–34

NEUMANN et al. (2009) Neumann, T.; Emeis, S.; Grigutsch, K.; Riedel, V.; Türk, M.: OWID - Offshore Wind Design Parameter. DEWI Magazin (2009), Heft 35, S. 73–79

NEUMANN und PIERSON (1966) Neumann, G.; Pierson, W. J.: Principles of physical oceanography. Prentice-Hall, Engelwood Cliffs, NJ, 1966

PIERSON und MOSKOWITZ (1963) Pierson, W. J.; Moskowitz, L.: A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii. U. S. Naval Oceanographic Office (Hrsg.), New York, 1963

PLATE (1993) Plate, E. J.: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1993

RACKWITZ (1997) Rackwitz, R.: Einwirkungen auf Bauwerke. 1997

RAGAN und MANUEL (2007) Ragan, P.; Manuel, L.: Statistical Extrapolation Methods for Estimating Wind Turbine Extreme Loads. Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics (Hrsg.), 2007

SANDERSE et al. (2011) Sanderse, B.; Pijl, S. P.; Koren, B.: Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics. Wind Energy (2011), Heft 7, S. 799–819

SANTEL (2006) SANTEL: Automatische Bestimmung von Wasseroberflächen in der Brandungszone aus Bildsequenzen mittels digitaler Bildzuordnung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover. 2006

SCHAUMANN et al. (2004) Schaumann, P.; Kleineidam, P.; Wilke, F.: Fatigue Design bei Offshore-Windenergieanlagen. Stahlbau (2004), Heft 73, S. 716–726

SCHAUMANN et al. (2007) Schaumann, P.; Böker, C.; Rutkowski, T.; Wilke, F.: Tragstrukturen für Windenergieanlagen. Leibniz Universität Hannover (Hrsg.), (Stahlbaukalender), Hannover, 2007

SCHEUERMANN (2002) Scheuermann, G.: Beitrag zur Kombination klimatischer Lasten. Dissertation, Technische Hochschule Aachen. Shaker Verlag, 2002

SCHMIDT et al. (2014) Schmidt, B.; Marx, S.; Göhlmann, J.; Göthel, O.; Grünberg, J.: Wellenbeanspruchung auf hydrodynamisch kompakte Betonstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen. Beton- und Stahlbetonbau (2014), Heft 4, S. 265–274

SCHMIDT et al. (2015) Schmidt, B.; Hansen, M.; Marx, S.: Directional Dependence of Extreme Load Parameters for Offshore Wind Turbines. Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers (Hrsg.), Hawaii, USA, 2015 SCHWARTZ (1974) Schwartz, L. W.: Computer extension and analytic continuation of Stokes' expansion for gravity waves. Journal of Fluid Mechanics (1974), Heft 03, S. 553–578

SEIDEL und KELMA (2012) Seidel, M.; Kelma, S.: Stochastic modelling of wind and wave induced loads on jacket piles. Stahlbau (2012), Heft 9, S. 705–710

SIMIU und HECKERT (1996) Simiu, E.; Heckert, N. A.: Extreme Wind Distribution Tails: A "Peaks over Threshold" Approach. Journal of Structural Engineering (1996), Heft 5, S. 539–547

SMITH (1980) Smith, S. D.: Wind Stress and Heat Flux over the Ocean in Gale Force Winds. Journal of Physical Oceanography (1980), Heft 10, S. 709–726

SOBEY (1989) Sobey, R. J.: Variations on Fourier wave theory. International Journal for Numerical Methods in Fluidsods in Fluids) (1989), Heft 12, S. 1453–1467

SOBEY (1992) Sobey, R. J.: A local Fourier approximation method for irregular wave kinematics. Applied Ocean Research (1992), Heft 14, S. 93–105

SPAETHE (1992) Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Zweite, neubearbeitete Auflage, Springer Verlag, Vienna, 1992

SUMER und FREDSØE (1999) Sumer, B. M.; Fredsøe, J.: Hydrodynamics around cylindrical structures. 1. repr, World Scientific Publishing, Singapore, 1999

SVERDRUP und MUNK (1947) Sverdrup, H. U.; Munk, W. H.: Wind, Sea and Swell : Theory of Relations for Forecasting. Technical Report No. 601. U. S. Hydrographic Office (Hrsg.), Washington, DC, 1947

TOLMAN (2009) Tolman, H. L.: User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III Version 3.14. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Centers for Environmental Prediction (Hrsg.), (OMB contribution No. 276), Washington, D.C., 2009

TUCKER und PITT (2001) Tucker, M. J.; Pitt, E. G.: Waves in ocean engineering. Auszug. Elsevier Verlag, Amsterdam, 2001

TÜRK (2008) Türk, M.: Ermittlung designrelevanter Belastungsparameter für Offshore-Windkraftanlagen. Dissertation, Universität Köln. 2008

TURKSTRA (1970) Turkstra, C. J.: Theory of structural design decisions. Waterloo, Ontario, 1970

VAN VLEDDER et al. (1993) van Vledder, G.; Goda, Y.; Hawkes, P.; Mansard, E.; Martin, M. H.; Mathiesen, M.; Peltier, E.; Thompson, E.: Case studies of extreme wave analysis - A comparative analysis. Proceeding of the 2nd International Symposium of Ocean Wave Measurement and Analysis. New Orleans, 1993

VORPAHL et al. (2011) Vorpahl, F.; Popko, W.; Kaufer, D.: Description of a basic model of the Upwind reference jacket for code comparison in the OC4 project under IEA Wind Annex XXX. 2011

VORPAHL et al. (2013) Vorpahl, F.; Schwarze, H.; Fischer, T.; Seidel, M.; Jonkman, J.: Offshore wind turbine environment, loads, simulation, and design. WIREs Energy Environ (2013), Heft 5, S. 548–570

WEBER (1992) Weber, H.: Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieure. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, s.l., 1992

WEI et al. (2016) Wei, K.; Myers, A. T.; Arwade, S. R.; Myers, A. T.; Valamanesh, V.: Directional effects on the reliability of non-axisymmetric support structures for offshore wind turbines under extreme wind and wave loadings. Engineering Structures (2016), Heft 106, S. 68–79

WINTERSTEIN et al. (1993) Winterstein, S. R.; Ude, T. C.; Cornell, C. A.; Bjerager, P.; Haver, S.: Environmental Parameters for extreme response: Inverse FORM with omission factors. Proceedings of the ICOSSAR. Innsbruck, Österreich, 1993

WOLFRAM und NAGHIPOUR (1999) Wolfram, J.; Naghipour, M.: On the estimation of Morison force coefficients and their predictive accuracy for very rough circular cylinders. Applied Ocean Research (1999), Heft 6, S. 311–328

WU (1985) Wu, J.: Roughness elements of the sea surface - their spectral composition. Tellus (1985), 38 A, S. 178–188

YELLAND und TAYLOR (1996) Yelland, M.; Taylor, P. K.: Wind Stress Measurements from the Open Ocean. Journal of Physical Oceanography (1996), Heft 26, S. 541–558

ZIELKE et al. (2004) Zielke, W.; Gerasch, W. J.; Schaumann, P.; Richwien, W.: Bau- und umwelttechnische Aspekte von Offshore-Windenergieanlagen - Jahresbericht 2003. GIGAWIND. Hannover, 2004

ZIELKE et al. (2007) Zielke, W.; Rolfes, R.; Schaumann, P.; Richwien, W.: Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen anhand der Messdaten der Messplattformen FINO 1 und FINO 2 - Abschlussbericht 2004 – 2006. GIGAWINDplus. Hannover, 2007

ZILCH und ZEHETMAIER (2010) Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010

ZIMMERMANN et al. (2004) Zimmermann, C.; Paesler, C.; Mai, S.: Wellen und Seegang an Küsten und Küstenbauwerken - mit Seegangsatlas der Deutschen Nordseeküste. Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (Hrsg.), Hannover, 2004

## A. Anhang Konturplotverfahren

Gemeinsame Wahrscheinlichkeitsmodelle, wie das Konturplotverfahren nach JOHANNESSEN et al. (2001), können verwendet werden, um gleichzeitig auftretende extreme Einwirkungsparameter darzustellen, vgl. Abschnitt 2.5.3. In Abschnitt 6.3 wird das genannte Konturplotverfahren auf die Einwirkungsparameter Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe für vergleichende Untersuchungen angewendet. Anders als in JOHANNESSEN et al. (2001) werden in dieser Arbeit zwei anstatt drei Zufallsvariablen beschrieben und für die optimale Approximation der betrachteten Häufigkeitsverteilungen wird die Weibull-III-max-Verteilungsfunktion verwendet. Die Berechnung von Konturlinien für die Windgeschwindigkeit und signifikante Wellenhöhe in der südlichen Nordsee mit einem auf diese Weise angepassten Konturplotverfahren nach JOHANNESSEN et al. (2001) ist nachfolgend schematisch dargestellt.



Abb. A-1: Berechnung mit dem angepassten Konturplotverfahren

# B. Anhang Extremwertanalyse

Die Ergebnisse von den durchgeführten Extremwertanalysen der Acht-Wochen-Extremwerte (FINO1) und Vier-Wochen-Extremwerte (FINO3) der Windgeschwindigkeit sowie der Windgeschwindigkeiten von mehr als 30 m/s sind in Anhang B.1 tabellarisch zusammengefasst. Die Ergebnisse von den durchgeführten Extremwertanalysen der Acht-Wochen-Extremwerte (FINO1) und Vier-Wochen-Extremwerte (FINO3) der signifikanten Wellenhöhe sowie der signifikanten Wellenhöhe von mehr als 5 m sind in Anhang B.2 tabellarisch zusammengefasst. Für die Extremwertanalysen wird die Software STATREL von der Firma RCP verwendet, vgl. GOLLWITZER (2007). Die Extremwertanalysen wurden mit den in Tab. 5-1 aufgeführten Verteilungsfunktionen durchgeführt. Die Schätzung der Verteilungsparameter erfolgte mit der Maximum-Likelihood-Methode (MLM) und der Momentenmethode (MM). Dargestellt sind die mittels der aufgeführten Methoden geschätzten Verteilungsparameter und Anpassungsgüten sowie die charakteristischen Werte  $V_{ref}$  und  $H_{s50}$  als Ergebnis der Extremwertanalyse. Für die nach der Maximum-Likelihood-Methode (MLM) geschätzten Verteilungsparameter werden zudem Konfidenzintervalle (KI) angegeben. Der durch die obere und untere Intervallgrenze gebildete Wertebereich enthält den zu schätzenden Parameter mit einer Wahrscheinlichkeit von P = 0.95 bzw. 1- $\alpha = 0.95$ , vgl. Gl. (5-1). Außerdem werden obere Konfidenzgrenzen für die charakteristischen Werte  $V_{ref}$ und H<sub>s50</sub> angegeben, was bedeutet, dass der charakteristische Wert mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit kleiner ist als die angegebene Konfidenzgrenze. Verteilungsfunktion für die keines der aufgeführten Schätzverfahren eine Anpassungsgüte von mindestens fünf Prozent erreicht, werden als ungeeignet gekennzeichnet.

### B.1 Windgeschwindigkeit

Die Ergebnisse von den richtungsunabhängigen Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeiten an den Standorten FINO1 und FINO3 sind für Stichproben, die mittels der *Block-Maxima-Methode* bestimmt wurden, in Tab. B-1 und Tab. B-2 zusammengefasst. Die Ergebnisse von den richtungsunabhängigen Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeiten an beiden Standorten für Stichproben, die mittels der *Peak-Over-Threshold-Methode* bestimmt wurden, in Tab. B-3 und Tab. B-4 zusammengefasst.

### Anhang

Tab. B-1:	Ergebnisse von der Extremwertanalyse der Windgeschwindigkeit mit der Block-Maxima-
	Methode (Acht-Wochen-Extremwerte) am Standort FINO1

Verteilungsfunktion         Schätz verf.         Verteilungsparameter $X^{2-}$ Test <sup>1</sup> ) $K-S-$ Test <sup>1</sup> ) $V_{ref}$ $95\%$ - KG $V_{ref}$ 95% - KI (untere Grenze) $Schätzung$ $95\%$ - KI (obere Grenze) $m/s$ $m/s$ $MLM$ $u = 22,191$ $u = 23,017$ $u = 23,843$ $0,261$ $0,787$ $41,7$ $53,6$ $Gumbel I max$ $ u = 23,004$ $ 0,144$ $0,880$ $42,6$ $55,1$ $ a = 0,295$ $ 0,144$ $0,880$ $42,6$ $55,1$ $ a = 0,295$ $ 0,144$ $0,880$ $42,6$ $55,1$ $ a = 0,295$ $ 0,144$ $0,882$ $40,6$ $50,8$ $w = 22,226$ $w = 23,074$ $w = 23,922$ $w = -43,069$ $w = 33,874$ $k = 110,817$ $0,102$ $0,822$ $40,6$ $50,8$ $w = -114,472$ $w = 23,031$ $ w = 23,031$ $ w = 23,031$ $ w = 140,00^{-2}$ $ w = 26,864$ <td< th=""><th>FINO1</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th></td<>	FINO1								
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	Vref	95%- KG V <sub>ref</sub>
Gumbel I max $u = 22,191$ $a = 0,249$ $u = 23,017$ $a = 0,309$ $u = 23,843$ $a = 0,370$ $0,261$ $0,787$ $0,787$ $41,7$ $53,6$ $MM$ - $ u = 23,004$ $-$ $-$ - $0,144$ $0,880$ $42,6$ $42,6$ $55,1$ $Weibull III max$ $w = 22,226$ $MLM$ $w = 23,074$ $k = -43,069$ $w = 23,074$ $w = 23,074$ $w = 23,922$ $\omega = 134,679$ $\omega = 383,829$ $ w = 23,031$ $-$ $W = 23,031$ $w = 23,031$ $ w = 23,031$ $ w = 23,031$ $ w = 24,406$ $w = 25,635$ $w = 26,864$			95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m/s	m/s
Gumbel I max $a = 0,249$ $a = 0,309$ $a = 0,370$ $0,201$ $0,787$ $41,7$ $33,6$ $MM$ - $u = 23,004$ - $0,144$ $0,880$ $42,6$ $55,1$ - $a = 0,295$ - $0,144$ $0,880$ $42,6$ $55,1$ $w = 22,226$ $w = 23,074$ $w = 23,922$ $w = 23,922$ $MLM$ $k = -43,069$ $k = 33,874$ $k = 110,817$ $0,102$ $0,822$ $40,6$ $50,8$ $w = -114,472$ $\omega = 134,679$ $\omega = 383,829$ $\omega = -114,472$ $\omega = 134,679$ $\omega = 383,829$ $\omega = -114,472$ $MM$ - $k = 33,244$ - $0,144$ $0,790$ $41,7$ $52,6$ $ w = 24,406$ $w = 25,635$ $w = 26,864$ $w = 26,864$		MIM	u = 22,191	u = 23,017	u = 23,843	0.261	0 797	41.7	52.6
Outlined T max- $u = 23,004$ -0,1440,88042,655,1- $\alpha = 0,295$ -0,1440,88042,655,1 $w = 22,226$ $w = 23,074$ $w = 23,922$ $w = 23,922$ MLM $k = -43,069$ $k = 33,874$ $k = 110,817$ 0,1020,82240,650,8 $\omega = -114,472$ $\omega = 134,679$ $\omega = 383,829$ MM- $k = 33,244$ -0,1440,79041,752,6- $\omega = 140,00^{2}$ $w = 24,406$ $w = 25,635$ $w = 26,864$	Gumbel I max	IVILIVI	$\alpha = 0,249$	$\alpha = 0,309$	$\alpha = 0,370$	0,201	0,787	41,7	55,0
Weibull III max $ \begin{array}{ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Guinder I max	мм	-	u = 23,004	-	0 144	0.880	12.6	55 1
$w = 22,226$ $w = 23,074$ $w = 23,922$ MLM $k = -43,069$ $k = 33,874$ $k = 110,817$ $0,102$ $0,822$ $40,6$ $50,8$ Weibull III max $\omega = -114,472$ $\omega = 134,679$ $\omega = 383,829$ $   w = 23,031$ $-$ MM $ k = 33,244$ $ 0,144$ $0,790$ $41,7$ $52,6$ $ w = 24,406$ $w = 25,635$ $w = 26,864$ $ -$		101101	-	$\alpha = 0,295$	-	0,144	0,000	42,0	55,1
MLM $k = -43,069$ $k = 33,874$ $k = 110,817$ $0,102$ $0,822$ $40,6$ $50,8$ Weibull III max $\omega = -114,472$ $\omega = 134,679$ $\omega = 383,829$ $  w = 23,031$ $-$ MM $ k = 33,244$ $ 0,144$ $0,790$ $41,7$ $52,6$ $ \omega = 140,00^{-2}$ $ w = 26,864$ $w = 26,864$			<i>w</i> = 22,226	w = 23,074	<i>w</i> = 23,922				
Weibull III max $\omega = -114,472$ $\omega = 134,679$ $\omega = 383,829$ - $w = 23,031$ -MM- $k = 33,244$ $\omega = 140,00^{2}$ -w = 24,406 $w = 25,635$ $w = 26,864$		MLM	<i>k</i> = -43,069	<i>k</i> = 33,874	k = 110,817	0,102	0,822	40,6	50,8
$w = 23,031 - w = 23,031 - 0,144 - 0,790 + 1,7 - 52,6 - \omega = 140,00^{-2)} - w = 24,406 - w = 25,635 - w = 26,864$	Weihell III and		$\omega = -114,472$	$\omega = 134,679$	$\omega = 383,829$				
$MM - k = 33,244 - 0,144 0,790 41,7 52,6$ $- \omega = 140,00^{2}) - $ $w = 24,406 \qquad w = 25,635 \qquad w = 26,864$	welduli III max		-	w = 23,031	-				
$- \omega = 140,00^{2}) - $ w = 24,406 w = 25,635 w = 26,864		MM	-	<i>k</i> = 33,244	-	0,144	0,790	41,7	52,6
w = 24,406 $w = 25,635$ $w = 26,864$			-	$\omega = 140,00^{20}$	-				
	Weibull III min		w = 24,406	<i>w</i> = 25,635	<i>w</i> = 26,864				
$MLM \qquad k = 1,141 \qquad \qquad k = 1,497 \qquad \qquad k = 1,854 \qquad 0,009 \qquad 0,936  41,4  51,1$		MLM	<i>k</i> = 1,141	<i>k</i> = 1,497	<i>k</i> = 1,854	0,009	0,936	41,4	51,1
$\tau = 18,082$ $\tau = 18,564$ $\tau = 19,046$			$\tau = 18,082$	$\tau = 18,564$	$\tau = 19,046$				
Weibull III min $- w = 25,648 -$			-	w = 25,648	-				
MM - $k = 1,499$ - $0,033$ $0,928$ $41,4$ $51,1$		MM	-	<i>k</i> = 1,499	-	0,033	0,928	41,4	51,1
- $ au = 18,564^{-2}$ -			-	$\tau = 18,564^{-2}$	-				
$\alpha = 5,050$ $\alpha = 6,030$ $\alpha = 7,009$			$\alpha = 5,050$	$\alpha = 6,030$	$\alpha = 7,009$		0,325	38,1	44,6
$mLM = 16,535 \qquad \tau = 17,601 \qquad \tau = 18,667 \qquad 0,615 \qquad 0,325 \qquad 38,1 \qquad 44,6$		MLM	$\tau = 16,535$	$\tau = 17,601$	$\tau = 18,667$	0,615			
Rayleigh - $\alpha = 6,633$ -	Rayleigh		-	$\alpha = 6,633$	-				
$MM = - \tau = 16,646 - 0,064 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,066 = 0,000 = 0,000 = 0,000 = 0,000 = 0,000 = 0,000 = 0,000 = 0,000 = $		MM	-	$\tau = 16,646$	-	0,064	0,541	39,2	46,4
k = 23,863 $k = 36,278$ $k = 48,693$			<i>k</i> = 23,863	<i>k</i> = 36,278	<i>k</i> = 48,693				
$MLM \qquad \qquad 0,443  0,294  37,8  44,4 \qquad \qquad 0,443  0,294  37,8  44,4$		MLM	$\lambda = 0,953$	$\lambda = 1,453$	$\lambda = 1,954$	0,443	0,294	37,8	44,4
Gamma - $k = 32,989$ -	Gamma		-	k = 32,989	-				
$MM \qquad $		MM	-	$\lambda = 1,322$	-	0,171	0,305	38,5	45,5
Pareto Die Verteilungsfunktion ist ungeeignet zur Beschreibung der Stichprobe	Pareto	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur H	Beschreibung der St	ichprobe			
Exponential Die Verteilungsfunktion ist ungeeignet zur Beschreibung der Stichprobe	Exponential	Die Ver	teilungsfunktion ist	t ungeeignet zur H	Beschreibung der St	tichprobe			
y = 21.844 $y = 22.656$ $y = 23.468$			v = 21.844	v = 22.656	v = 23.468	1			
$MLM  k = 0.993 \qquad k = 4.558 \qquad k = 8.124 \qquad 0.015  0.782  57.6  96.8$		MLM	k = 0.993	k = 4.558	k = 8.124	0.015	0.782	57.6	96.8
$\tau = -1.608$ $\tau = 8.984$ $\tau = 19.577$			$\tau = -1.608$	$\tau = 8.984$	$\tau = 19.577$	-,	-,	.,.	, 0,0
Frechet II max $y = 22.446$ -	Frechet II max		-	v = 22.446	-				
$MM$ - $k = 4.5585^{-2}$ - 0.450 0.600 56.8 95.5		ММ	-	$k = 4.5585^{2}$	-	0.450	0.600	56.8	95.5
$\tau = 8.9844^{-2}$ -		-	-	$\tau = 8,9844^{-2}$	-	-,	- ,		,-'

#### Kennwerte von der Extremwertanalyse der Windgeschwindigkeit mit der Block-Maxima-Tab. B-2: Methode (Vier-Wochen-Extremwerte) am Standort FINO3

FINO3								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	Vref	95%- KG V <sub>ref</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m/s	m/s
	MIM	<i>u</i> = 19,901	u = 20,913	u = 21,926	0.042	0.000	12.0	64.4
Gumbal I may	<i>MLM</i>	$\alpha = 0,223$	$\alpha = 0,283$	$\alpha = 0,343$	0,945	0,999	43,8	04,4
Guinder I max	1414	-	u = 20,913	-	0.042	0.000	12.9	61 1
	1/11/1	-	$\alpha = 0,282$	-	0,943	0,999	43,0	04,4
		<i>w</i> = 19,912	w = 20,964	<i>w</i> = 22,016				
	MLM	<i>k</i> = -94,717	<i>k</i> = 32,383	<i>k</i> = 159,483	0,857	0,997	41,8	58,8
Weibull III max		$\omega = -306,926$	$\omega = 136,076$	$\omega = 579,077$				
		-	<i>w</i> = 20,943	-				
	MM	-	<i>k</i> = 31,222	-	0,943	1,000	42,5	59,9
		-	$\omega = 136,00^{2}$	-				
		<i>w</i> = 22,542	<i>w</i> = 23,962	<i>w</i> = 25,382				
Weibull III min	MLM	<i>k</i> = 1,341	<i>k</i> = 1,856	<i>k</i> = 2,370	0,549	0,985	39,7	51,6
		$\tau = 13,850$	$\tau = 14,922$	<i>τ</i> =15,993				
		-	<i>w</i> = 23,951	-				
	MM	-	<i>k</i> = 1,815	-	0,813	0,982	40,1	52,5
		-	$\tau = 15,00^{2}$	-				
	MLM	<i>α</i> = 5,545	a = 6,660	<i>α</i> = 7,776		0,971	38,7	49,4
		$\tau = 13,629$	$\tau = 14,679$	$\tau = 15,729$	0,764			
Rayleigh		-	$\alpha = 6,931$	-				
	MM	-	$\tau = 14,270$	-	0,617	0,961	39,2	50,4
		<i>k</i> = 17,298	<i>k</i> = 28,010	<i>k</i> = 38,723				
	MLM	$\lambda = 0,749$	$\lambda = 1,220$	$\lambda = 1,691$	0,764	0,928	37,9	48,7
Gamma		-	<i>k</i> = 25,561	-				
	MM	-	$\lambda = 1,113$	-	0,617	0,925	38,7	50,2
		<i>v</i> = 19,590	v = 20,606	<i>v</i> = 21,621				
	MLM	k = 0.967	k = 5.958	k = 10,948	0,792	0,965	60,8	120
		$\tau = -16.390$	$\tau = 0.153$	$\tau = 16.697$	- ,	- ,	, -	
Frechet II max		-	v = 20.355	-				
	ММ	_	$k = 6.00^{2}$	_	0.833	0.719	59.6	117.2
	*	-	$\tau = 0.15^{2}$	-	-,500	-,>	,0	· <b>,-</b>
Pareto	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur F	Beschreibung der St	ichprobe			
Exponential	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur F	Beschreibung der St	ichprobe			

#### Anhang

#### Kennwerte von der Extremwertanalyse der Windgeschwindigkeit mit der Peak-Over-Tab. B-3: *Threshold-Methode* (V > 30 m/s) am Standort FINO1

FINO1										
Verteilungsfunktio n	Schätz verf.	Verteilungsparar	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	Vref	95%- KG V <sub>ref</sub>		
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m/s	m/s		
	MLM	u = 30,734	u = 30,963	u = 31,193	0.002	0.066	37.4	41.3		
Gumbel I max	1012/01	$\alpha = 0,770$	$\alpha = 0,942$	$\alpha = 1,114$	0,002	0,000	57,4	-1,5		
Guinoer Finax	ММ	-	u = 30,852	-	0.000	0.011	39.8	45.2		
	101101	-	$\alpha = 0,682$	-	0,000	0,011	37,0	13,2		
Weibull III max	Die Verteilungsfunktion ist ungeeignet zur Beschreibung der Stichprobe									
		<i>w</i> = 31,278	w = 31,662	<i>w</i> = 32,04610						
	MLM	k = 0,804	k = 0,956	k = 1,10776	0,349	0,641	41,0	47,9		
Weibull III min		au= -	$\tau = 30,00^{2}$	au= -						
weibun minim		-	<i>w</i> = 31,618	-						
	MM	-	<i>k</i> = 0,904	-	0,391	0,768	41,9	49,9		
		-	$\tau = 30,00^{2}$	-						
Rayleigh	Die Ver	eilungsfunktion ist ungeeignet zur Beschreibung der Stichprobe								
Gamma	Die Ver	teilungsfunktion is	t ungeeignet zur H	Beschreibung der S	tichprobe					
		<i>a</i> = 14,992	<i>a</i> = 18,952	<i>a</i> = 22,912	0.165	0,703	41.4	40.4		
Danata	MLM	<i>k</i> = 30,020	<i>k</i> = 30,02	<i>k</i> = 30,020	0,105		41,4	49,4		
Faleto	1414	-	<i>a</i> = 17,882	-	0.000	0.000	40.1	50.7		
	111111	-	k = 29,925	-	0,228	0,080	42,1	50,7		
	MIM	$\tau = 30,020$	$\tau = 30,02$	$\tau = 30,020$	0.220	0.521	40.2	16.1		
E	MLM	$\lambda = 0,471$	$\lambda = 0,596$	$\lambda = 0,720$	0,529	0,331	40,2	40,4		
Exponential	101	-	$\tau = 29,817$	-	0.010	0.020	41.2	48.0		
	MM	-	$\lambda = 0,532$	-	0,018	0,239	41,5	48,2		
		<i>v</i> = 30,363	<i>v</i> = 30,511	<i>v</i> = 30,658						
	MLM	<i>k</i> = 0,671	k = 0,785	<i>k</i> = 0,899	0,004	0,108	1241	6917		
		au= -	$\tau = 29,99^{-2})$	τ = -						
Frechet II max		-	<i>v</i> = 30,958	-						
	MM	-	$k = 2,01^{2}$	-	0,000	0,000	50,0	86,6		
		-	$\tau = 29,99^{-2})$	-						

#### Kennwerte von der Extremwertanalyse der Windgeschwindigkeit mit der Peak-Over-Tab. B-4: *Threshold-Methode* (V > 30 m/s) am Standort FINO3

FINO3								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	Vref	95%- KG V <sub>ref</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m/s	m/s
		u = 30,735	u = 30,960	u = 31,186	0.005	0.5(1	25.0	20.1
Cumbal I may	MLM	$\alpha = 0,917$	$\alpha = 1,160$	$\alpha = 1,404$	0,225	0,561	35,9	39,1
Guindel I max		-	u = 30,911	-	0.146	0 (11	26.0	40.7
	1/11/1	-	$\alpha = 0,962$	-	0,140	0,011	30,9	40,7
		<i>w</i> = 30,740	<i>w</i> = 30,971	<i>w</i> = 31,201				
	MLM	<i>k</i> = -57,985	<i>k</i> = 62,871	<i>k</i> = 183,728	0,095	0,518	35,8	38,7
<b>XX7 '1 11 TTT</b>		ω = -18,493	$\omega = 86,223$	$\omega = 190,939$				
weibuli iii max		-	<i>w</i> = 30,959	-				
	MM	-	<i>k</i> = 7,528	-	0,004	0,241	35,8	37,8
		-	$\omega = 40,00^{2}$	-				
Weibull III min		<i>w</i> = 31,205	<i>w</i> = 31,570	<i>w</i> = 31,936				
	MLM	<i>k</i> = 0,896	<i>k</i> = 1,114	<i>k</i> = 1,332	0,837	0,985	37,4	41,7
		$\tau = 30,026$	$\tau = 30,026$	$\tau = 30,026$				
		-	<i>w</i> = 31,582	-				
	MM	-	<i>k</i> = 1,136	-	0,931	0,989	37,3	41,5
		-	$\tau = 30,000$	-				
	MLM	<i>α</i> = 1,417	<i>α</i> = 1,720	<i>α</i> = 2,023				
		$\tau = 29,112$	$\tau = 29,470$	$\tau = 29,828$	0,122	0,089	35,3	37,2
Rayleigh		-	<i>α</i> = 2,035	-				
	MM	-	$\tau = 28,961$	-	0,002	0,263	35,8	38,1
		<i>k</i> = 360,100	<i>k</i> = 558,782	<i>k</i> = 757,465				
-	MLM	$\lambda = 11,425$	$\lambda = 17,733$	$\lambda = 24,041$	0,000	0,080	35,3	37,0
Gamma		-	<i>k</i> = 558,782	-				
	MM	-	$\lambda = 17,733$	-	0,000	0,080	35,3	37,0
		<i>a</i> = 15,506	<i>a</i> = 20,701	<i>a</i> = 25,896				
_	MLM	<i>k</i> = -	$k = 30,00^{2}$	<i>k</i> = -	0,642	0,592	39,5	46,6
Pareto		-	<i>a</i> = 20,850	-				
	MM	-	$k = 30,00^{2}$	-	0,540	0,574	39,5	46,4
		τ = -	$\tau = 30,00^{2}$	τ = -				
	MLM	$\lambda = 0,496$	$\lambda = 0,662$	$\lambda = 0,828$	0,849	0,680	38,6	44,2
Exponential		-	$\tau = 30,00^{2}$	-				
	ММ	-	$\lambda = 0,75^{(2)}$	-	0,144	0,237	37,6	42,5
Frechet II max	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur E	Beschreibung der St	ichprobe			

### B.2 Signifikante Wellenhöhe

Die Ergebnisse von den richtungsunabhängigen Extremwertanalysen der signifikanten Wellenhöhe an den Standorten FINO1 und FINO3 sind für Stichproben, die mittels der *Block-Maxima-Methode* bestimmt wurden, in Tab. B-5 und Tab. B-6 zusammengefasst. Die Ergebnisse von den richtungsunabhängigen Extremwertanalysen der signifikanten Wellenhöhe an beiden Standorten für Stichproben, die mittels der *Peak-Over-Threshold-Methode* bestimmt wurden, in Tab. B-7 und Tab. B-8 zusammengefasst.

FINO1								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	$H_{s50}$	95%- KG <i>H</i> s50
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m	m
	MIM	<i>u</i> = 3,541	<i>u</i> = 3,888	<i>u</i> = 4,235	0.726	0.805	11.6	16.6
Gumbal I may	IVI LIVI	$\alpha = 0,614$	$\alpha = 0,751$	$\alpha = 0,887$	0,750	0,805	11,0	10,0
Guinder I max	1/1/	-	u = 3,906	-	0.460	0.064	10.0	15 5
	1/11/1	-	$\alpha = 0,824$	-	0,409	0,904	10,9	15,5
Weibull III max		<i>w</i> = 3,596	w = 3,961	<i>w</i> = 4,326				
	MLM	<i>k</i> = -4,013	<i>k</i> = 9,666	<i>k</i> = 23,346	0,446	0,918	9,8	12,6
		$\omega = -0,692$	$\omega = 16,958$	$\omega = 34,609$				
		-	<i>w</i> = 3,947	-				
	MM	-	<i>k</i> = 9,518	-	0,736	0,890	9,9	12,7
		-	$\omega = 16,96^{2}$	-				
		<i>w</i> = 4,647	<i>w</i> = 5,085	<i>w</i> = 5,523				
	MLM	<i>k</i> = 1,926	<i>k</i> = 2,633	<i>k</i> = 3,340	0,485	0,676	9,2	11,3
Weihull III min		$\tau = 0,031$	$\tau = 0,727$	$\tau = 1,423$				
weldun in him		-	<i>w</i> = 5,091	-				
	MM	-	<i>k</i> = 2,686	-	0,655	0,629	9,1	11,1
		-	$\tau = 0,73^{2}$	-				
Rayleigh	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur E	Beschreibung der St	ichprobe			
		<i>k</i> = 5,750	<i>k</i> = 8,754	<i>k</i> = 11,757	0.726	0.870	10.0	12.0
Comme	MLM	$\lambda = 1,229$	$\lambda = 1,900$	$\lambda = 2,571$	0,730	0,870	10,0	13,2
Gamma	1414	-	<i>k</i> = 8,754	-	0.726	0.070	10.0	12.2
	IVI IVI	-	$\lambda = 1,900$	-	0,730	0,870	10,0	13,2
Pareto	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur E	Beschreibung der St	ichprobe			
Exponential	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur E	Beschreibung der St	ichprobe			
Frechet II max	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur E	Beschreibung der St	ichprobe			

Tab. B-5:Kennwerte von der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe mit der Block-<br/>Maxima-Methode (Acht-Wochen-Extremwerte) am Standort FINO1

1) durchgeführt mit sieben Klassen

<sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen

Tab. B-6:	Kennwerte von der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe mit der Block-
	Maxima-Methode (Vier-Wochen-Extremwerte) am Standort FINO3

FINO3								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	$H_{s50}$	95%- KG H <sub>s50</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m	m
		<i>u</i> = 3,076	<i>u</i> = 3,373	<i>u</i> = 3,671	0.000	0.010	10.0	161
~	MLM	$\alpha = 0,752$	$\alpha = 0,974$	$\alpha = 1,197$	0,823	0,910	10,0	16,1
Gumbel I max		-	u = 3,330	-		0.004		10.0
	MM	-	$\alpha = 0,843$	-	0,221	0,891	11,0	18,0
		<i>w</i> = 3,089	<i>w</i> = 3,398	<i>w</i> = 3,706				
	MLM	<i>k</i> = -14,824	<i>k</i> = 28,943	<i>k</i> = 72,711	0,678	0,888	9,6	14,6
		$\omega = -11,019$	$\omega = 34,170$	$\omega = 79,359$				
Weibull III max		-	<i>w</i> = 3,343	-				
	ММ	-	<i>k</i> = 24,746	-	0,093	0,791	10,4	16,1
		-	$\omega = 34,20^{2}$	-				
		<i>w</i> = 3,762	<i>w</i> = 4,232	<i>w</i> = 4,701				
	MLM	k = 1,099	<i>k</i> = 1,440	k = 1,782	0,160	0,937	10,3	15,6
		$\tau = 1,823$	$\tau = 1,943$	$\tau = 2,064$				
Weibull III min		-	w = 4,208	-				
	MM	-	<i>k</i> = 1,373	-	0,571	0,827	10,8	16,6
		-	$\tau = 1,950^{-2}$	-	,	,	ŗ	
		$\alpha = 1,632$	$\alpha = 2,011$	$\alpha = 2,390$				
	MLM	$\tau = 1.173$	$\tau = 1,602$	$\tau = 2.031$	0,721	0,474	8,8	12,2
Rayleigh		-	$\alpha = 2,322$	-				
	MM	-	$\tau = 1,104$	-	0,059	0,533	9,5	13,3
		<i>k</i> = 5.253	k = 8.536	<i>k</i> = 11.819				
	MLM	$\lambda = 1.284$	$\lambda = 2.126$	$\lambda = 2.968$	0,130	0,828	9,3	13,6
Gamma		_	k = 6.963	-				
	MM	_	$\lambda = 1.734$	_	0,093	0,677	10,0	15
Pareto	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur F	Beschreibung der St	ichprobe			
	210 101	τ	$\frac{\tau - 1.98^{2}}{\tau}$	τ	Improce			
	MLM	2 = -	l = 1,50 $l = 0.55^{2}$	2 = -	0,058	0,022	13,5	24,1
Exponential		<i>x</i> = -	$\pi = 0.03^{-1}$	x = -				
	MM	-	$l = 1,98^{-1}$	-	0,058	0,022	13,5	24,1
		- 	n = 0,00					
	NAT NA	v = 2,940	v = 3,220 k = 2,520	v = 5,510	0.501	0.004	20.1	52.0
	MLM	k = 0.897	k = 5,529	k = 0,100	0,301	0,994	20,1	55,9
Frechet II max		$\tau = -2,510$	$\tau = 0.020$	$\tau = 2,350$				
	MA	-	v = 3,140	-	0.504	0.973	20.0	52.0
	MM	-	$\kappa = 3,30^{-2}$	-	0,504	0,862	20,0	53,9
		-	$\tau = 0,00^{-20}$	-				

Tab. B-7:	Kennwerte von der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe mit der Peak-Over-
	<i>Threshold-Methode</i> ( $H_s > 5$ m) am Standort FINO1

FINO1								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	$H_{s50}$	95%- KG H <sub>s50</sub>
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m	m
Gumbel I max	Die Ver	teilungsfunktion ist	t ungeeignet zur E	Beschreibung der St	tichprobe			
Weibull III max	Die Ver	teilungsfunktion ist	t ungeeignet zur E	Beschreibung der St	tichprobe			
		<i>w</i> = 5,688	<i>w</i> = 5,828	<i>w</i> = 5,969				
	MLM	<i>k</i> = 0,849	<i>k</i> = 0,969	k = 1,088	0,824	0,955	10,9	14,2
Weibull III min		au= -	$\tau = 4,999^{-2}$	au= -				
		-	<i>w</i> = 5,838	-				
	MM	-	<i>k</i> = 0,995	-	0,810	0,980	10,6	13,8
		-	$\tau = 4,999^{-2}$	-				
Rayleigh	Die Ver	teilungsfunktion ist	t ungeeignet zur E	Beschreibung der St	tichprobe			
Gamma	Die Ver	teilungsfunktion ist	t ungeeignet zur E	Beschreibung der St	tichprobe			
	MIM	a = 5,769	a = 6,839	a = 7,908	0.745	0 622	12.0	20.4
Darato	IVI LIVI	-	$k = 4,999^{2}$	-	0,743	0,025	15,2	20,4
Faleto	мм	-	a = 6,946	-	0.716	0 506	12.1	20.0
	101101	-	$k = 4,999^{2}$	-	0,710	0,500	15,1	20,0
	MIM	$\tau = 5,000$	$\tau = 5,000$	$\tau = 5,000$	0 737	0.066	10.6	13.7
		$\lambda = 1,005$	$\lambda = 1,192$	$\lambda = 1,378$	0,737	0,900	10,0	13,7
Exponential	мм	-	$\tau = 4,999$	-	0 782	0.080	10.6	12.7
	MM	-	λ = 1,183	-	0,782	0,980	10,6	13,7
Frechet II max	Die Ver	teilungsfunktion is	ungeeignet zur E	Beschreibung der St	tichprobe			

#### Kennwerte von der Extremwertanalyse der signifikanten Wellenhöhe mit der Peak-Over-Tab. B-8: *Threshold-Methode* ( $H_s > 5$ m) am Standort FINO3

FINO1								
Verteilungsfunktion	Schätz verf.	Verteilungsparan	neter		X <sup>2</sup> - Test <sup>1)</sup>	K-S- Test	$H_{s50}$	95%- KG Hs50
		95%- KI (untere Grenze)	Ergebnis Pkt Schätzung	95%- KI (obere Grenze)			m	m
	MIM	<i>u</i> = 5,354	<i>u</i> = 5,503	<i>u</i> = 5,651	0.201	0.002	05	10.4
Cumbal I may	MLM	$\alpha = 1,457$	$\alpha = 1,891$	$\alpha = 2,326$	0,581	0,095	8,5	10,4
Guindel I max	мм	-	u = 5,458	-	0.001	0 227	0.2	11.9
	1/11/1	-	$\alpha = 1,467$	-	0,001	0,227	9,5	11,0
		<i>w</i> = 5,359	<i>w</i> = 5,514	<i>w</i> = 5,669				
	MLM	<i>k</i> = -9,960	<i>k</i> = 36,534	<i>k</i> = 83,027	0,242	0,622	8,4	10,1
Weibull III max		$\omega = 0,845$	$\omega = 25,708$	$\omega = 50,572$				
		-	<i>w</i> = 5,464	-				
	MM	-	<i>k</i> = 28,435	-	0,000	0,184	9,1	11,2
		-	$\omega = 25,71^{2}$	-				
Weibull III min		<i>w</i> = 5,600	<i>w</i> = 5,844	<i>w</i> = 6,088				
	MLM	k = 0,775	<i>k</i> = 0,981	k = 1,187	0,944	1,00	9,9	13,1
		au= -	$\tau = 4,999^{-2}$	au= -				
		-	<i>w</i> = 5,842	-				
	MM	-	<i>k</i> = 0,975	-	0,944	1,00	9,9	13,2
		-	$\tau = 4,999^{-2}$	-				
	MLM	$\alpha = 0,889$	<i>α</i> = 1,099	<i>α</i> = 1,309	0.000			
		$\tau = 4,306$	$\tau = 4,561$	$\tau = 4,815$	0,086	0,049	8,2	9,4
Rayleigh		-	<i>α</i> = 1,334	-				10,1
	MM	-	$\tau = 4,179$	-	0,000	0,084	8,6	
		<i>k</i> = 33,467	<i>k</i> = 52,979	<i>k</i> = 72,491				
	MLM	$\lambda = 5,703$	$\lambda = 9,055$	$\lambda = 12,406$	0,000	0,106	8,2	9,5
Gamma		-	<i>k</i> = 44,819	-				
	ММ	-	$\lambda = 7,660$	-	0,000	0,113	8,5	9,8
		<i>a</i> = 4,940	<i>a</i> = 6,760	<i>a</i> = 8,580				
	MLM	<i>k</i> = -	$k = 4,999^{-2}$	<i>k</i> = -	0,992	0,972	11,4	17,6
Pareto		-	<i>a</i> = 6,866	-				
	MM	-	<i>k</i> = 4,999	-	0,875	0,945	11,3	17,3
		$\tau = 5.000$	$\tau = 5.000$	$\tau = 5.000$				
	MLM	$\lambda = 0.860$	$\lambda = 1.176$	$\lambda = 1.493$	0,907	0,999	9,7	12,9
Exponential			$\tau = 4.977$	-				
	MM	-	$\lambda = 1.144$	-	0,994	0,984	9,9	13,1
Frechet II max	Die Ver	teilungsfunktion ist	ungeeignet zur E	Beschreibung der St	tichprobe			

# C. Anhang richtungsabhängige Extremereignisse

Ergänzend zu Abb. 6-3 ist in Abb. C-1 die relative Häufigkeit von unterschiedlichen Richtungsdifferenzen für verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen dargestellt. Es ist eine Abnahme der Anzahl großer Differenzen der Wind- und der Wellenrichtung mit zunehmender Windgeschwindigkeit zu erkennen.



Abb. C-1: Häufigkeit von Richtungsdifferenzen zwischen Wind- und Wellenrichtung für verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen

# D. Anhang zeitlich bedingte Extremereignisse

### D.1 Verteilung der extremen und bedingten Messwerte

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der empirischen Verteilungen der extremen und bedingten Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen sind für verschiedenen Bezugszeitintervalle in Tab. D-1 aufgelistet. Die Ergebnisse sind graphisch in Abb. 6-18 und Abb. 6-19 dargestellt.

	V	in m/s	Hs	/Vinm	H	Is in m	V/I	H <sub>s</sub> in m/s
Bezugszeitintervall	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
1 Tag	14,31	4,71	1,66	1,06	1,86	1,11	12,81	5,05
1 Woche	19,17	4,34	2,38	1,32	2,87	1,36	16,50	5,08
2 Wochen	21,02	4,32	2,74	1,50	3,37	1,46	18,07	5,07
3 Wochen	22,12	4,54	2,95	1,54	3,72	1,49	18,92	5,15
4 Wochen	23,14	4,43	3,14	1,57	3,90	1,57	19,41	5,55
5 Wochen	23,63	4,43	3,40	1,58	4,20	1,51	20,38	5,14
6 Wochen	24,04	4,46	3,36	1,48	4,27	1,44	20,59	5,26
7 Wochen	24,66	4,44	3,48	1,49	4,36	1,49	20,98	5,11
8 Wochen	25,04	4,53	3,52	1,58	4,62	1,58	21,31	5,18
9 Wochen	25,43	4,56	3,55	1,57	4,71	1,40	21,95	4,96
10 Wochen	25,25	4,59	3,65	1,53	4,81	1,51	21,72	4,36
26 Wochen	30,10	4,02	4,77	1,50	6,21	1,39	25,20	3,89
52 Wochen	32,36	3,55	4,95	1,70	7,10	1,24	27,04	3,14

 Tab. D-1:
 Mittelwerte und Standardabweichungen der Stichproben extremer und bedingter Werte verschiedener Bezugszeitintervalle am Standort FINO1

### D.2 Windgeschwindigkeit

Die Ergebnisse von den Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeiten und der durch die signifikanten Wellenhöhen bedingte Windgeschwindigkeit sind in Tab. D-2 und Tab. D-3 zusammengefasst. Grundlage der Extremwertanalysen sind mittels der *Block-Maxima-Methode* bestimmte Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle. Dargestellt sind die Verteilungsparameter, die Anpassungsgüten für die verschiedenen Stichproben, die Windgeschwindigkeiten  $V_{ref}$  bzw.  $V/H_s$  mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren und die oberen Konfidenzgrenzen.

Bezugszeitintervall	Verteilungsparameter	X <sup>2</sup> -Test <sup>1)</sup>	K-S-Test	Vref in m/s	95%-KI Vref
	<i>w</i> = 12,337	0,126 (53)	0,891	36,7	
1 Tag	<i>k</i> = 8,529				42,2
C C	$\omega = 48,000^{-20}$				
	<i>w</i> = 17,308				
1 Woche	<i>k</i> = 11,116	0,042 (20)	0,614	38,5	46,1
	$\omega = 59,078^{-20}$				
	<i>w</i> = 19,109		0,851	41,5	52,8
2 Wochen	<i>k</i> = 29,868	0,653 (14)			
	$\omega = 124,068^{-2}$				
	<i>w</i> = 20,206			39,4	47,2
3 Wochen	<i>k</i> = 9,190	0,049 (11)	0,537		
	$\omega = 57,000^{-20}$				
	<i>w</i> = 21,176			42,4	54,6
4 Wochen	<i>k</i> = 37,221	0,575 (10)	0,766		
	$\omega = 154,056^{-2})$				
	w = 21,663		0,559	42,1	54,0
5 Wochen	<i>k</i> = 33,244	0,349 (9)			
	$\omega = 140,811^{-2})$				
	w = 22,064	0,483 (8)	0,882	42,0	54,0
6 Wochen	<i>k</i> = 31,698				
	$\omega = 136,641^{-2})$				
	w = 22,693	0,185 (7)	0,747	42,1	54,0
7 Wochen	<i>k</i> = 30,051				
	$\omega = 131,126^{2}$				
	<i>w</i> = 23,037	0,151 (7)	0,669	42,4	54,4
8 Wochen	<i>k</i> = 29,077				
	$\omega = 130,180^{-20}$				
	w = 23,405	0,246 (7)	0,816	42,5	54,7
9 Wochen	<i>k</i> = 28,540				
	$\omega = 129,481^{-20}$				
10 Wochen	<i>w</i> = 23,213	0,334 (6)	0,688	42,1	54,2
	<i>k</i> = 27,304				
	$\omega = 125,565^{-2)}$				
26 Wochen	<i>w</i> = 28,377	0,883 (5)	1,000	41,5	50,9
	k = 11,117				
	$\omega = 67,000^{-20}$				
52 Wochen	<i>w</i> = 30,802		1,000	41,2	50,7
	<i>k</i> = 20,121	zu wenig Messwerte			
	$\omega = 90,000^{-2})$				

#### Ergebnisse von den Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeit mit der Block-Tab. D-2: Maxima-Methode für unterschiedliche Bezugszeitintervalle am Standort FINO1

<sup>1)</sup> Wert in Klammern gibt die Anzahl der zugrunde gelegten Klassen an
 <sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen

Bezugszeitintervall	Verteilungsparameter	X <sup>2</sup> -Test <sup>1)</sup>	K-S-Test	$(V/H_s)_{50}$ in m/s	95%-KI (V/Hs)50
	w = 10,737				,
1 Tag	k = 7,067	0,177 (54)	0,611	35,0	39,7
	$\omega = 43,121^{-2})$	, , ,			
	<i>w</i> = 14,453				
1 Woche	<i>k</i> = 6,178	0,156 (20)	0,832	35,3	40,6
	$\omega = 43,418^{-20}$				
	<i>w</i> = 16,022				
2 Wochen	<i>k</i> = 6,117	0,253 (15)	0,588	35,8	41,5
	$\omega = 44,689^{\ 2)}$				
	<i>w</i> = 16,861				
3 Wochen	<i>k</i> = 5,892	0,045 (12)	0,587	36,1	42,1
	$\omega = 45,040^{-20}$				
	<i>w</i> = 17,242				
4 Wochen	<i>k</i> = 5,096	0,450 (10)	0,788	36,5	42,2
	$\omega = 44,061^{-20}$				
	<i>w</i> = 18,380				
5 Wochen	<i>k</i> = 4,999	0,677 (9)	0,612	35,8	41,2
	$\omega = 42,813^{(2)}$				
	<i>w</i> = 18,545				
6 Wochen	<i>k</i> = 5,000	0,221 (8)	0,754	36,1	41,8
	$\omega = 43,542^{-2})$				
	<i>w</i> = 18,955				
7 Wochen	<i>k</i> = 5,542	0,318 (8)	0,606	36,4	42,6
	$\omega$ =45,500 $^{2)}$				
	<i>w</i> = 19,297				
8 Wochen	<i>k</i> = 5,018	0,368 (7)	0,890	36,2	42,1
	$\omega = 44,000^{-20}$				
	<i>w</i> = 19,931				
9 Wochen	<i>k</i> = 6,618	0,830 (7)	0,990	37,2	44,6
	$\omega = 50,000^{-20}$				
10 Wochen	<i>w</i> = 19,936				
	k = 6,807	0,736 (7)	0,975	35,0	41,7
	$\omega = 47,000^{-20}$				
26 Wochen	<i>w</i> = 24,127				
	k = 2,100	0,819 (4)	0,910	32,5	34,3
	$\omega = 33,500^{-20}$				
52 Wochen	<i>w</i> = 26,017				
	$k = 2,200^{-2}$	0,549 (4)	0,842	33,5	36,0
	$\omega = 35,000^{-20}$				

Ergebnisse von den Extremwertanalysen der Windgeschwindigkeit bedingt durch die Tab. D-3: maximale signifikante Wellenhöhe mit der Block-Maxima-Methode für unterschiedliche Bezugszeitintervalle am Standort FINO1

<sup>1)</sup> Wert in Klammern gibt die Anzahl der zugrunde gelegten Klassen an
 <sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen

## D.3 Signifikante Wellenhöhe

Die Ergebnisse von den Extremwertanalysen der signifikanten Wellenhöhe und der durch die Windgeschwindigkeit bedingten signifikanten Wellenhöhe sind in Tab. D-4 und Tab. D-5 zusammengefasst. Grundlage der Extremwertanalysen sind mittels der *Block-Maxima-Methode* bestimmte Extremwerte unterschiedlicher Bezugszeitintervalle. Dargestellt sind die Verteilungsparameter, die Anpassungsgüten für die verschiedenen Stichproben, die Windgeschwindigkeiten  $H_{s50}$  bzw.  $H_s/V$  mit einer mittleren Wiederholungsperiode von 50 Jahren und die oberen Konfidenzgrenzen.

$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Bezugszeitintervall	Verteilungsparameter	$X^2$ -Test <sup>1)</sup>	K-S-Test	$H_{s50}$ in m	95%-KI Hs50
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		<i>w</i> = 1,39339				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1 Tag	<i>k</i> = 8,49862	0,000 (53)	0,000	7,2	8,4
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		$\omega = 9,812^{-2})$				
		<i>w</i> = 2,27337				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1 Woche	$k = 42,000^{-2}$	0,722 (20)	0,599	10,1	13,7
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		$\omega = 48,000^{-20}$				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		<i>w</i> = 2,73259				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2 Wochen	$k = 37,601^{-2}$	0,804 (15)	0,777	10,3	14,0
		$\omega = 46,066^{-20}$				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		w = 3,06585				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	3 Wochen	$k = 28,000^{2}$	0,842 (12)	0,856	10,3	14,0
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		$\omega = 36,820^{-20}$				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		w = 3,22543				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	4 Wochen	k = 11,53870	0,131 (10)	0,830	9,9	12,9
		$\omega = 18,854^{-2}$				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		w = 3,53839				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	5 Wochen	k = 22,96890	0,626 (9)	0,975	10,3	14,0
		$\omega = 32,000^{-20}$				
		w = 3,64630				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	6 Wochen	k = 13,47280	0,441 (8)	0,964	9,7	12,6
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		$\omega = 20,200^{2}$				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		w = 3,72559				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	7 Wochen	k = 10,05840	0,125 (8)	0,930	9,6	12,3
		$\omega = 16,832^{2}$				
8 Wochen $k = 9,32682$ $0,819(7)$ $0,872$ $9,9$ $12,8$ $\omega = 16,895^{-2})$ $w = 4,09594$ $w = 4,09594$ $w = 4,09594$ $w = 4,09594$ 9 Wochen $k = 26,69060$ $0,432(7)$ $0,877$ $9,9$ $13,5$ $\omega = 34,625^{-2})$ $w = 4,14982$ $w = 4,14982$ $u = 4,14982$ $u = 32,016^{-2}$ $u = 5,64624$ $u = 5,64624$ $u = 5,64624$ 26 Wochen $k = 6,53334$ $0,174(7)$ $0,855$ $9,9$ $12,2$ $\omega = 14,000^{-2}$ $w = 6,56934$ $u = 0,890$ $10,1$ $12,9$ 52 Wochen $k = 11,12940$ $Zu wenig Messwerte$ $0,890$ $10,1$ $12,9$		w = 3,95291				
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	8 Wochen	k = 9,32682	0,819 (7)	0,872	9,9	12,8
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		$\omega = 16,895^{-2)}$				
9 Wochen $k = 26,69060$ 0,432 (7) 0,877 9,9 13,5 $\omega = 34,625^{-2}$ w = 4,14982 10 Wochen $k = 22,41460$ 0,222 (7) 0,983 10,3 14,0 $\omega = 32,016^{-2}$ w = 5,64624 26 Wochen $k = 6,53334$ 0,174 (7) 0,855 9,9 12,2 $\omega = 14,000^{-2}$ w = 6,56934 52 Wochen $k = 11,12940$ Zu wenig $\omega = 18,500^{-2}$		w = 4,09594				
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	9 Wochen	k = 26,69060	0,432 (7)	0,877	9,9	13,5
$w = 4,14982$ 10 Wochen $k = 22,41460 0,222 (7) 0,983 10,3 14,0 0 = 32,016^{-2)} w = 5,64624 26 Wochen k = 6,53334 0,174 (7) 0,855 9,9 12,2 0 = 14,000^{-2)} w = 6,56934 52 Wochen k = 11,12940 u = 18,500^{-2)} $		$\omega = 34,625^{(2)}$				
10 Wochen $k = 22,41460$ 0,222 (7)0,98310,314,0 $\omega = 32,016^{-2}$ $w = 5,64624$ $w = 5,64624$ 12,226 Wochen $k = 6,53334$ 0,174 (7)0,8559,912,2 $\omega = 14,000^{-2}$ $w = 6,56934$ 10,112,952 Wochen $k = 11,12940$ $zu wenig Messwerte$ 0,89010,112,9 $\omega = 18,500^{-2}$ $\omega = 18,500^{-2}$ $\omega = 10,000^{-2}$ $\omega = 10,000^{-2}$ $\omega = 10,000^{-2}$		w = 4,14982				
$\omega = 32,016^{2}$ $w = 5,64624$ 26 Wochen $k = 6,53334 \qquad 0,174 (7) \qquad 0,855 \qquad 9,9 \qquad 12,2$ $\omega = 14,000^{2}$ $w = 6,56934$ 52 Wochen $k = 11,12940 \qquad zu \text{ wenig} \\ Messwerte \qquad 0,890 \qquad 10,1 \qquad 12,9$ $\omega = 18,500^{2}$	10 Wochen	k = 22,41460	0,222 (7)	0,983	10,3	14,0
$w = 5,64624$ 26 Wochen $k = 6,53334$ $0,174 (7)$ $0,855$ $9,9$ $12,2$ $\omega = 14,000^{2)}$ $w = 6,56934$ $52 Wochen$ $k = 11,12940$ $\omega = 18,500^{2)}$ $2^{U} wenig$ $Messwerte$ $0,890$ $10,1$ $12,9$		$\omega = 32,016^{2}$				
26 Wochen $k = 6,53334$ 0,174 (7) 0,855 9,9 12,2 $\omega = 14,000^{-2}$ w = 6,56934 52 Wochen $k = 11,12940$ Zu wenig $\omega = 18,500^{-2}$ 0,890 10,1 12,9	26 Wochen	w = 5,64624				
$\omega = 14,000^{2}$ $w = 6,56934$ 52 Wochen $k = 11,12940$ $\omega = 18,500^{2}$ $u wenig$ Messwerte $0,890$ $10,1$ $12,9$ $0,890$ $10,1$ $12,9$ $10,1$		k = 6,53334	0,174 (7)	0,855	9,9	12,2
$ \begin{aligned} w &= 6,56934 \\ 52 \text{ Wochen} & k &= 11,12940 \\ \omega &= 18,500^{-2} \end{aligned} \qquad \begin{array}{c} zu \text{ wenig} \\ Messwerte \\ Messwerte \\ \end{array} 0,890 \qquad 10,1 \qquad 12,9 \end{aligned} $		$\omega = 14,000^{2}$				
52 Wochen $k = 11,12940$ $zu wenig Messwerte 0,890$ 10,1 12,9 $\omega = 18,500^{-2}$	52 Wochen	w = 6,56934		0,890	10,1	12,9
$\omega = 18,500^{-2}$		k = 11,12940	zu wenig Messwerte			
		$\omega = 18,500^{2}$				

Tab. D-4:Ergebnisse von den Extremwertanalysen der signifikanten Wellenhöhe mit der Block-<br/>Maxima-Methode für unterschiedliche Bezugszeitintervalle am Standort FINO1

<sup>1)</sup> Wert in Klammern gibt die Anzahl der zugrunde gelegten Klassen an

<sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen

Bezugszeitintervall	Verteilungsparameter	X <sup>2</sup> -Test <sup>1)</sup>	K-S-Test	( <i>H</i> <sub>s</sub> / <i>V</i> )50 in m	95%-KI (Hs/V)50
-	<i>w</i> = 1,200				
1 Tag	$k = 72,000^{-2}$	0,000 (53)	0,000	8,7	11,6
0	$\omega = 60,000^{-20}$				
	w = 1,788				
1 Woche	$k = 48,484^{2}$	0,023 (20)	0,112	9,5	13,1
	$\omega = 52,981^{-2}$				
	w = 2,092				
2 Wochen	k = 15,046	0,118 (14)	0,309	9,3	12,5
	$\omega = 21,156$				
	w = 2,297				
3 Wochen	<i>k</i> = 8,944	0,012 (11)	0,403	8,8	11,4
	$\omega = 14,473$				
	w = 2,497				
4 Wochen	k = 7,031	0,467 (10)	0,679	8,5	10,8
	$\omega = 12,500^{-20}$				
	w = 2,770				
5 Wochen	<i>k</i> = 5,578	0,188 (9)	0,725	8,3	10,2
	$\omega = 11,000^{-2}$				
	w = 2,777				
6 Wochen	<i>k</i> = 5,154	0,124 (8)	0,774	7,8	9,5
	$\omega = 10,000^{-20}$				
	w = 2,893				
7 Wochen	<i>k</i> = 5,425	0,630 (7)	0,939	7,9	9,8
	$\omega = 10,500^{-2}$				
	w = 2,918				
8 Wochen	<i>k</i> = 4,690	0,70903 (7)	0,991	8,0	9,7
	$\omega = 10,025^{(2)}$				
	w = 2,916				
9 Wochen	<i>k</i> = 5,818	0,06477 (7)	0,806	8,2	10,4
	$\omega = 11,443^{(2)}$				
10 Wochen	<i>w</i> = 3,043				
	<i>k</i> = 5,552	0,86534 (6)	0,872	8,1	10,2
	$\omega = 11,000^{-20}$				
26 Wochen	<i>w</i> = 4,295				
	k = 2,756	0,64565 (5)	1,000	7,8	9,0
	$\omega = 8,600^{2}$				
52 Wochen	w = 4,440				
	<i>k</i> = 2,562	zu wenig	1,000	8,0	9,5
	$\omega = 9,000^{2}$	111035 WELLE			

Ergebnisse von den Extremwertanalysen der signifikanten Wellenhöhe bedingt durch die Tab. D-5: maximale Windgeschwindigkeit mit der Block-Maxima-Methode für unterschiedliche Bezugszeitintervalle am Standort FINO1

<sup>1)</sup> Wert in Klammern gibt die Anzahl der zugrunde gelegten Klassen an
 <sup>2)</sup> Parameter wird als bekannt angenommen