

# Bachelorarbeit

---

## Vertikalprofil und Jahresgang der verfügbaren Windenergie in der Deutschen Bucht

Meike Bilstein

10.10.2009



Betreuer: Prof. Dr. Stefan Emeis,  
Prof. Dr. Michael Kerschgens,  
Prof. Dr. Susanne Crewell



## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Messungen und Ergebnisse der Windverhältnisse (10 min-Windgeschwindigkeitsmittel) zwischen 30 und 100 m über See im Gebiet der Deutschen Bucht auf Basis von einer Datenmenge über vier Jahre präsentiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Weibull-Verteilung, die ein verbreitetes Hilfsmittel im Bereich der Windenergie ist.

Die beiden Parameter der Weibull-Verteilung werden hier graphisch für Monate, Jahreszeiten und Jahre ermittelt und in Beziehung zueinander gesetzt, wodurch

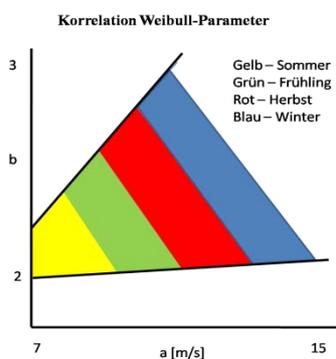


Abb.0. 1: Schematische Darstellung der Korrelation der Weibull-Parameter, wobei  $a$  der Skalierungsparameter und  $b$  der Formparameter ist.

Wertebereiche für die beiden Parameter festgelegt werden konnten. Innerhalb der Monate liegen diese Wertebereiche für den Formparameter  $b$  zwischen 1,75 und 3,25 und für den Skalierungsparameter etwa zwischen 7 und 13 m/s. Eine aussagekräftige Korrelation ergab sich aus den Auswertungen für die einzelnen Jahreszeiten, da mit Hilfe dieser ein Jahrgang der Parameter dargestellt werden konnte (s. Abb.0.1). Zudem wurden Analysen des Vertikalprofils der Parameter mit einer Auflösung von 10 m gemacht, die mit Vertikalprofilen über Land verglichen wurden. Dabei ist eine geringere Dicke der Prandtl-Schicht über See als über Land festgestellt worden.

Außerdem wurden die durch die Weibull-Verteilung berechnete mittleren Windgeschwindigkeiten und Energieflussdichten mit denen direkt aus den Zeitreihen berechneten Werten verglichen. Dabei ist eine Unterschätzung der direkt berechneten durch die aus den Weibull-Parameter berechneten Werte von bis zu 10 % bei Datensätzen von einem Jahr Länge analysiert worden.



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung.....	7
2 Datengrundlage.....	9
3 Methodik der Auswertung .....	11
3.1 Weibull –Verteilung.....	11
3.1.1 Formeln der Weibull-Verteilung.....	11
3.1.2 Graphische Ermittlung der Weibull-Parameter .....	12
3.1.3 Fehlerrechnung .....	13
3.1.4 Ermittlung der Schrittweite einer Klasseneinteilung.....	14
3.1.5 Regressionsgeraden.....	15
3.2 Direkte Bestimmung von Mittelwert und Energieflussdichte aus den Zeitreihen der Windgeschwindigkeit .....	16
4 Ergebnisse.....	18
4.1 Approximation durch die Weibull-Verteilung .....	18
4.1.1 Monate .....	18
4.1.2 Jahreszeiten.....	20
4.1.3 Jahre .....	23
4.2 Analyse der Parameter .....	25
4.2.1 Korrelation .....	25
4.2.2 Vertikalprofile.....	30
4.2.2.1 Formparameter .....	30
4.2.2.2 Skalierungsparameter .....	32
4.3 Vergleich der Auswertemethoden für Windmittel und Windenergie .....	35
4.3.1 Mittelwert.....	35
4.3.2 Energieflussdichte.....	37

5	Fazit.....	42
6	Ausblick.....	44
	Literaturverzeichnis .....	45
	Eidesstattliche Erklärung .....	47
	Danksagung.....	49

# 1 Einleitung

Erneuerbare Energien sind auf Grund des Klimawandels, sowie der Verknappung und der dadurch verursachten Verteuerung fossiler Brennstoffe seit einigen Jahren auf dem Vormarsch. Nachdem das Kyoto-Protokoll 2005 in Kraft trat, welches eine Reduktion des  $CO_2$ - Ausstoßes fordert, und die Deutsche Bundesregierung das „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ (EEG) verabschiedet hat, ist es das Ziel der Bundesregierung, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis auf 20 % im Jahr 2020 und auf 50 % im Jahr 2050, im Vergleich zum Jahr 2000, zu erhöhen<sup>1</sup>.

Auf Grund der schon weitgehend ausgeschöpften Binnenstandorte für Windenergie, wenn von Repowering einmal abgesehen wird, sind die Erschließungen neuer Standorte (offshore - auf See) unumgänglich. Offshore-Parks haben einige Vorteile gegenüber den Binnenstandorten: sie haben eine höhere mittlere Windgeschwindigkeit und verfügen, auf Grund einer geringeren Rauigkeit der umgebenden Oberflächenstruktur, über relativ gleichmäßige Ressourcen. Zudem stellen sie nur eine Landschaftsbeeinträchtigung dar, wodurch den Protesten von Anwohnern aus dem Weg gegangen wird. Allerdings spielt der viel größere Kostenaufwand bei der Errichtung und dem Betrieb einer solchen Offshore-Anlage eine große Rolle. Da der Kenntnisstand der meteorologischen Verhältnisse über See noch unzureichend war, bewilligte das Bundesumweltministerium (BMU) 2001 drei Messplattformen (FINO1, 2 und 3). Anhand von Untersuchungen und Messungen an den Plattformen FINO1, 2 und 3 soll die Wirtschaftlichkeit von Offshore-Parks ermittelt, Konzepte für den Küsten- und Umweltschutz erarbeitet, sowie gebietspezifische innovative Betriebsprinzipien entwickelt werden. Das Offshore-Testfeld „alpha-ventus“, welches sich in der Nähe der FINO1-Plattform 45 km nördlich von Borkum befindet, ist ein erstes Ergebnis dieser Arbeit (erste von zwölf Windkraftanlagen im Juli 2009 errichtet) und schon 2010 soll der Windpark „Borkum-West II“ in Betrieb genommen werden. Auch in der Ostsee, in der Nähe von FINO2 (nördlich der Insel Rügen), wurde nun mit dem Bau der Netzanbindung für den Offshore-Park Baltic1 begonnen, dieser soll möglichst noch 2010 in Betrieb genommen werden.

---

<sup>1</sup> <http://www.fino-offshore.de> → Offshore-Strategien der Bundesregierung, Entwicklung der Offshore-Windenergienutzung (gelesen am 09.09.09)

Außerdem wurde im Juli 2009 FINO3 (80 km vor Sylt) fertiggestellt, sodass demnächst noch mehr Daten über die marine Atmosphäre zur Verfügung stehen<sup>2</sup>.

Im Bereich der Windenergie ist die zweiparametrische Weibull-Verteilung ein beliebtes statistisches Hilfsmittel. Sie dient zur Beschreibung der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten. Zudem können aus den beiden Parametern die mittlere Windgeschwindigkeit und die zur Verfügung stehende Windenergie direkt berechnet werden.

In dieser Arbeit soll evaluiert werden, in wie weit dieses statistische Hilfsmittel die wirklich zur Verfügung stehende Windenergie approximiert, und in welchen Zeiträumen im Jahr die Abweichungen von dieser Approximation am größten sind. Außerdem soll ermittelt werden, ab welcher Größe eines Datensatzes die Weibull-Verteilung benutzt werden kann. Zudem werden Vertikalprofile der Weibull-Parameter erstellt, um ihr Verhalten in der marinen Atmosphäre zu analysieren und mit der über Land zu vergleichen. Fragestellungen innerhalb dieser Arbeit sind daher:

- Sind Monatsdatensätze mit 10 min-Daten ausreichend für eine Analyse mit der Weibull-Verteilung? Ab welcher Datenmenge ist die Approximation der Weibull-Verteilung sinnvoll?
- Wie ist das Verhalten von Form- und Skalierungsparameter der Weibull-Verteilung in verschiedenen Jahreszeiten, sowie im Vertikalprofil? Korrelieren die beiden Parameter miteinander?
- Wie groß ist die Abweichung der mit der Weibull-Verteilung berechneten Windgeschwindigkeitsmittel und der Windenergie zu den nicht approximierten Mittelwerten und Energieflüssen? Wird hier ein zufälliger oder ein systematischer Fehler in Kauf genommen?

---

<sup>2</sup> <http://www.offshore-wind.de> (gelesen am 09.09.09)

## 2 Datengrundlage

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten werden seit September 2003 kontinuierlich an der Forschungsplattform FINO1 (Forschungsplattform in Nord- & Ostsee) 45 km nördlich von Borkum gemessen (Abb.2.1). Der über 100 m hohe Mast (über NN) steht in einer Wassertiefe von ca. 30 m auf dem Borkumer Riff („Borkum West“, N 54° 0,86‘ E 6° 35,26‘) und ist somit eine der wenigen Datengrundlagen für die Entwicklung von Offshore-Parks auf hoher See. Zwar existieren international schon Offshore-Parks, diese stehen allerdings in Küstennähe und nur in einer Wassertiefe von ca. 15 m.<sup>3</sup>



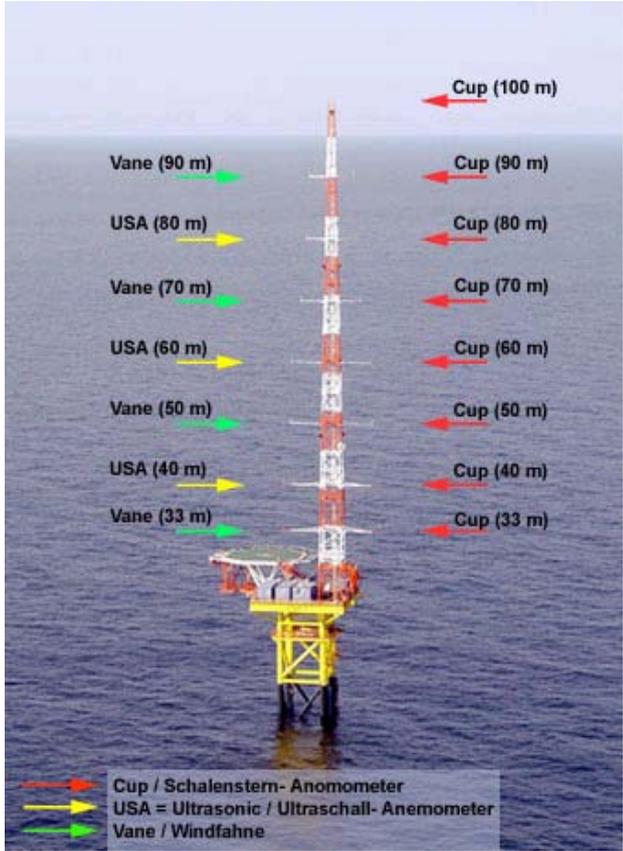
Abb. 2.1: Standorte der FINO-Plattformen<sup>4</sup>, die grauen Flächen in der Nordsee kennzeichnen die geplanten Windparks.

Die meteorologischen Messgrößen (Windgeschwindigkeit, -richtung, Lufttemperatur, Luftdichte, Luftdruck, Luftfeuchte, Niederschlag, Globalstrahlung, UV-Strahlung, Sichtweite und Blitze) werden in acht Messhöhen von 30 - 100 m ermittelt (s. Tab.2.1, Abb.2.2) und auf zentralen Datenbanken am Deutschen Windenergieinstitut (DEWI) gespeichert. Sie stellen die Grundlage für die technische Auslegung der Windkraftanlagen und die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines Offshore-Parks in dieser Region dar und dienen zusätzlich als Datenverbesserung für die Wettervorhersagen. In dieser Arbeit werden nur die 10 min-Mittel der Windgeschwindigkeiten aus dem Zeitraum September 2003 bis August 2007 verwendet.

<sup>3</sup> <http://www.fino-offshore.de> (gelesen am 09.09.09)

<sup>4</sup> <http://www.fino3.de> ; <http://www.offshore-wind.de> (gelesen am 09.09.09)

Tab.2.1: Messhöhe der meteorologischen Parameter am Messmast FINO1 (Neumann, Nolopp, & Herklotz, 2004).

<i>Meteorologische Messgröße</i>	<i>Höhe der Messung</i>	
Windgeschwindigkeit* (Cup, Schalenkreuz-Anemometer)	33, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 m	 <p>Abb.2.2: FINO1 Sensoren-Bestückung zur Erfassung von Windgeschwindigkeiten &amp; -richtung (Neumann &amp; Nolopp, 2007).</p>
Windgeschwindigkeit (USA, Ultra-Schall-Anemometer, 10Hz)	40, 60, 80 m	
Windrichtung* (Vane)	33, 50, 70, 90 m	
Lufttemperatur*	33, 40, 50, 70, 100 m	
Luftdruck *	20, 100 m	
Luftfeuchte *	33, 50, 100 m	
Globalstrahlung *	33 m	
UV-A-Strahlung *	33 m	
*-10 min-Mittelwerte		

Neben den meteorologischen Messungen werden auch hydrologische Untersuchungen durchgeführt, die beim Bundesamt für Seeschifffahrt & Hydrographie (BSH) gespeichert werden. Sie sollen vor allem Aufschluss über die Einwirkung der Strömung und des Wellengangs auf die Gründungsstruktur geben. Zusätzlich kann so aber auch der Zustand der Deutschen Bucht (z.B. Wasserqualität) überwacht werden (Abschlussbericht TeMeFINO, 2005)<sup>5</sup>. Außerdem finden als Begleitstudien biologische Untersuchungen zur Feststellung des Einfluss von Offshore-Parks auf Flora und Fauna (z.B. Vogelzug) statt.

<sup>5</sup> <http://www.bmu.de> → Abschlussbericht: „Weiterer Ausbau der Windenergienutzung im Hinblick auf den Klimaschutz.“ (gelesen am 09.09.09)

### 3 Methodik der Auswertung

In diesem Kapitel werden die Auswertemethoden zur Ermittlung der beiden Parameter der Weibull-Verteilung, sowie zur Berechnung der Energieflussdichte, die in dieser Arbeit verwendet worden sind, vorgestellt.

#### 3.1 Weibull –Verteilung

Um die Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeiten über einen gewissen Zeitraum zu approximieren, wird im Allgemeinen, auf Grund von früheren Erfahrungswerten (Troen & Petersen, 1989) und um geeignete Vergleichsparameter für verschiedene Standorte zu haben, die zwei-parametrische Weibull-Verteilung verwendet.

##### 3.1.1 Formeln der Weibull-Verteilung

Die Weibull-Verteilung (Wilker, 2004) ist eine Häufigkeitsverteilung aus der Gruppe der Gammaverteilungen (Bronstein & Semendjajew, 1975) mit der Form:

$$F(u) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{u}{a}\right)^b\right) \quad (3.1)$$

wobei  $u$  die Windgeschwindigkeit,  $a$  der Skalierungsparameter und  $b$  der Formparameter ist. Die dazugehörige Verteilungsdichtefunktion lautet:

$$f(u) = \frac{dF(u)}{du} = b * \left(\frac{u^{b-1}}{a^b}\right) * \exp\left(-\left(\frac{u}{a}\right)^b\right) \quad (3.2)$$

sowie das davon abgeleitete 1.& 2.Moment (Mittelwert/Varianz) der Weibull-Verteilung:

$$\mu = a * \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \quad (3.3)$$

$$\sigma^2 = a^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right) \right] \quad (3.4)$$

Aus den zwei Parametern  $a$  (Skalierungsparameter, abhängig von der mittleren Windgeschwindigkeit) und  $b$  (Formparameter;  $b = f * \frac{a}{\sigma}$ , mit  $f \cong 0,94$ ; (Wieringa, 1989), s. Tab.4.3), sowie der Luftdichte  $\rho$ , lässt sich nun die Energieflussdichte pro Volumeneinheit [ $W/m^2$ ] wie folgt berechnen:

$$E_{Wind} = \frac{1}{2} \rho a^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{b}\right) \quad (3.5)$$

### 3.1.2 Graphische Ermittlung der Weibull-Parameter

Um die Weibull-Parameter zu ermitteln, gibt es mehrere Verfahrensweisen, wie z.B. die analytischen Methoden (Verfahren nach Gumbel, Regressionsanalyse, Momenten-Methode und die Maximum-Likelihood-Methode) oder die graphische Ermittlung ebenfalls über eine Regression (Wilker, 2004), welche in dieser Arbeit angewandt worden ist.

Durch Umformen von (3.1) ergibt sich:

$$\frac{1}{1-F(u)} = \exp\left(\frac{u}{a}\right)^b \quad (3.6)$$

Mittels einer doppelten Logarithmierung dieser Gleichung wird diese in die Form einer Geradengleichung gebracht:

$$\ln\left(\frac{1}{1-F(u)}\right) = \left(\frac{u}{a}\right)^b \quad (3.7)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(u)}\right)\right) = b * \ln\left(\frac{u}{a}\right) = b(\ln(u) - \ln(a)) \quad (3.8)$$

Die Formel (3.8) hat nun die Form einer Gerade:  $y = m * x + c$  (mit  $m \rightarrow$  Steigung,  $c \rightarrow$  y-Achsenabschnitt und  $x = \ln(u) - \ln(a)$ ), wobei die Steigung  $m$  der Geraden dem Formparameter  $b$  entspricht und der Schnittpunkt mit der x-Achse dem natürlichen Logarithmus des Skalierungsparameters  $a$  (gezeigt in (3.9)).

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(u)}\right)\right) = 0$$

$$\Rightarrow \ln(u) - \ln(a) = \frac{c}{m} \quad (3.9)$$

$$a = \exp\left(\frac{c}{m}\right); \quad b = m \quad (3.10)$$

### 3.1.3 Fehlerrechnung

Wird die Regressionsgerade anhand dieser Graphik ermittelt, so ergeben sich die folgenden statistischen Fehler für die beiden Parameter der Weibull-Verteilung, hergeleitet aus den Fehlern für die Regressionsgerade<sup>6</sup> ( $\sigma_y \rightarrow$  Abweichung des y-Wertes von der Geraden,  $\sigma_m \rightarrow$  Fehler der Steigung,  $\sigma_c \rightarrow$  Fehler des y-Achsenabschnittes,  $N \rightarrow$  Anzahl der Werte).

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (mx_i + c - y_i)^2}{N-2}} \quad (3.11)$$

$$\sigma_m = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=0}^N x_i^2 - (\sum_{i=0}^N x_i)^2}} \quad (3.12)$$

$$\sigma_c = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N x_i^2}{N \sum_{i=0}^N x_i^2 - (\sum_{i=0}^N x_i)^2}} \quad (3.13)$$

Der Skalierungsparameter  $a$  hat, auf Grund der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung, einen statistischen Fehler von (3.14) und der Fehler des Formparameters entspricht dem statistischen Fehler der Steigung  $m$  der Geradengleichung (3.12).

$$\sigma_a = \left| \frac{1}{m} \exp^{\frac{c}{m}} \right| \sigma_c + \left| -\frac{b}{m^2} \exp^{\frac{c}{m}} \right| \sigma_m \quad (3.14)$$

$$\sigma_b = \sigma_m$$

Damit und mit dem statistischen Fehler für die Dichte der Luft  $\rho$  (3.15):

$$\rho = \frac{p}{R_T T} \rightarrow \Delta \rho = \left| \frac{1}{R_T T} \right| \Delta p + \left| -\frac{p}{R_T T^2} \right| \Delta T \quad (3.15)$$

(mit  $p \rightarrow$  Druck ( $\Delta p = \pm 10$  Pa),  $R_T \rightarrow$  Gaskonstante für trockene Luft ( $287 \frac{J}{kg K}$ ) und  $T \rightarrow$  Temperatur ( $\Delta T = \pm 0.1$  K)), ergibt sich aus der Formel für die Energieflussdichte (3.5) und der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung der Fehler der Energieflussdichte (3.16).

$$\Delta E_{Wind} = \left| \frac{1}{2} a^3 \Gamma(1 + \frac{3}{b}) \right| \Delta \rho + \left| \frac{3}{2} \rho a^2 \Gamma(1 + \frac{3}{b}) \right| \Delta a + \left| \frac{1}{2} \rho a^3 \right| \Delta \Gamma(1 + \frac{3}{b}) \quad (3.16)$$

<sup>6</sup> [http://chemie-graz.at/PC-1\\_Fehler\\_abschaetzung.pdf](http://chemie-graz.at/PC-1_Fehler_abschaetzung.pdf) (gelesen am 09.09.09)

Der abgeschätzten Fehler für die Gammafunktion ist  $\Delta\Gamma = \pm 0,02$ . Dies ist ein Maximalfehler, der anhand von Abweichungen der Gammafunktion bei festem  $b$ , aber variierendem Fehler von  $b$ , ermittelt wurde. Der Fehler für die Windenergieflussdichte liegt mit üblichen Werten, wie  $a = 10,8$  m/s,  $b = 2,21$ ,  $T = 15$  °C, etwa in einer Größenordnung von 40 - 50 W/m<sup>2</sup>.

### 3.1.4 Ermittlung der Schrittweite einer Klasseneinteilung

Um eine graphische Ermittlung der Weibull-Parameter nach (3.8) durchführen zu können, muss zuerst aus den vorhandenen 10-min-Mittelwerten der Windgeschwindigkeit eine Häufigkeitsverteilung erstellt werden. Hierzu wird eine geeignete Klasseneinteilung benötigt, deren Gitter nicht allzu großmaschig ist, aber noch genügend Werte (ca. >100, innerhalb eines Monats) in einen Klassenintervall aufnimmt, um noch eine aussagekräftige Verteilung zu erhalten. Da die kleinsten zu analysierenden Datensätze Monate sind, wurde anhand deren Verteilung die Schrittweite für die Häufigkeitsverteilung festgesetzt (s. Tab.3.1).

Tab. 3.1: Analyse der Schrittweite für die Klasseneinteilung (++ sehr gut, + gut, o befriedigend, - ausreichend, -- mangelhaft).

<i>Schrittweite von <math>\ln(u)</math></i>	<i>Auslastung der Klassen</i>	<i>Regressionsgerade für kleine <math>u</math></i>	<i>Regressionsgerade für große <math>u</math></i>
0,03	50 – 120	++	-
0,04	90 – 180	+	o
0,05	120 – 150	o	o
0,07	150 – 250	--	--

Für diesen Test wurden Monate mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten (Bsp.: Jan.05, Nov.06), sowie mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten (Bsp.: Jul.04, Jul.06) getestet und die Ergebnisse (Tab.3.1) ausgewertet. Auf Grund der zu geringen Aussagekraft bei einer Schrittweite von 0,03 (s. Auslastung der Klassen in Tab.3.1) und der ab einer Schrittweite von 0,05 unzureichenden Genauigkeit der Regressionsgeraden wurde eine Schrittweite für die Klasseneinteilung von 0,04 gewählt und in dieser Arbeit verwendet.

### 3.1.5 Regressionsgeraden

Nachdem die Klassenintervalle festgelegt wurden, sind die Häufigkeiten der auftretenden Windgeschwindigkeiten festgestellt und die daraus folgenden Summenhäufigkeiten (3.17), sowie die relativen Summenhäufigkeiten (3.18) berechnet worden.

$$G_i(u) = \sum_{j=1}^i \frac{k_j}{N} \quad ; \text{ für } i = 1, \dots, K \quad (3.17)$$

$$g_i(u) = \frac{k_i}{N} \quad ; \text{ für } i = 1, \dots, K \quad (3.18)$$

Mit  $k_i \rightarrow$  Anzahl der Werte in der  $i$ -ten Klasse,  $K \rightarrow$  Anzahl der Klassen und  $N \rightarrow$  Gesamtanzahl der Werte. Aufgabe ist es nun die Verteilung  $G$  (3.17) durch die Weibull-Verteilung  $F$  (3.1) zu approximieren.

Dies gelingt nur, wenn der Datensatz jeweils um 10 % am unteren und oberen Rand der ermittelten gewichteten Häufigkeitsverteilung gekürzt wird, da diese Daten nicht der Weibull-Verteilung folgen und somit die Regressionsgerade verfälschen würden (s. Abb.3.1).

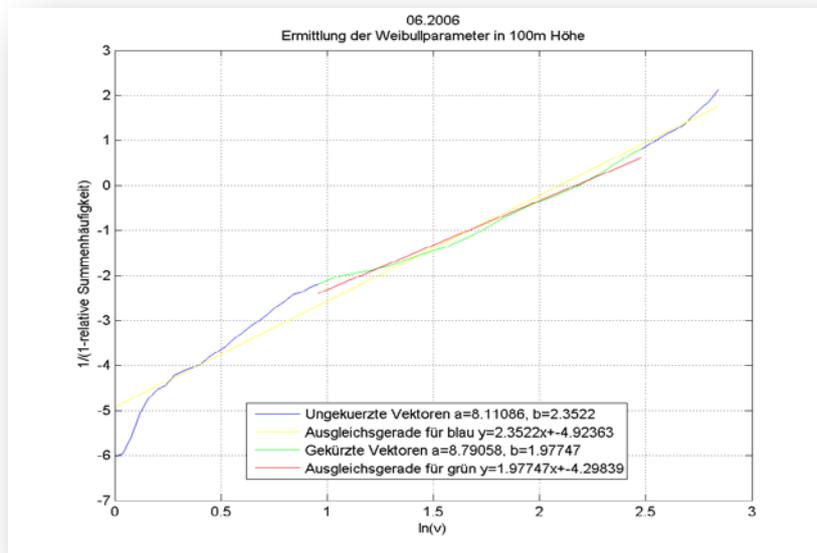


Abb. 3.1: Ermittlung der Regressionsgeraden zur Bestimmung der Weibull-Parameter. Hier wird veranschaulicht, welcher Fehler gemacht werden würde, wenn der Datensatz nicht gekürzt wäre (Vergleich der gelben und roten Ausgleichsgerade).

Nun wurden, wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, die Parameter berechnet und mit Hilfe der Formel (3.5) die Energieflussdichte ermittelt. Die zugehörigen statistischen Fehler

ergeben sich aus Abschnitt 3.1.3. Um die Verteilungsdichtefunktion der Weibull-Verteilung (3.2) über die vorher ermittelte Häufigkeit plotten zu können, muss darauf geachtet werden, dass die Häufigkeit, auf Grund der logarithmischen Klassifizierung und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Klassengrößen innerhalb der Windgeschwindigkeiten, mit den Klassengrößen der Windgeschwindigkeiten gewichtet wird.

### 3.2 Direkte Bestimmung von Mittelwert und Energieflussdichte aus den Zeitreihen der Windgeschwindigkeit

Um vergleichen zu können, welcher Fehler bei einer Approximation der Windgeschwindigkeiten mit der Weibull-Verteilung gemacht wird, werden in dieser Arbeit die Energieflussdichten auch direkt aus den Zeitreihen bestimmt (3.19).

$$E_{Wind} = \frac{1}{2} \overline{\rho u^3} \quad (3.19a)$$

$$E_{Wind} = \frac{1}{2} \overline{\rho u^3} \quad (3.19b)$$

Der Fehler der sich hierfür aus der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung ergibt lautet:

$$\Delta E_{Wind} = \left| \frac{1}{2} u^3 \right| \Delta \rho + \left| \frac{3}{2} \rho u^2 \right| \Delta u \quad (3.20)$$

In dieser Arbeit wird zudem noch unterschieden, ob einzeln über  $\overline{\rho u^3}$  gemittelt (3.19a) wird oder über  $\overline{\rho u^3}$  gemittelt wird (3.19b), wobei der Unterschied darin besteht, dass bei der zweiten Methode jede einzelne Luftdichte mit in die Rechnung einbezogen wird. Für beide Methoden liegt der Fehler bei durchschnittlichen Werten ( $u = 9,8$  m/s (das entspricht ungefähr dem  $a = 10,8$  m/s in Abschnitt 3.1.3),  $\Delta u = 0,2$  m/s,  $\Delta \rho$  siehe (3.15) mit den gleichen Werten für  $\Delta p$  und  $\Delta T$  wie oben ) bei etwa 50 - 60 W/m<sup>2</sup>, also in derselben Größenordnung wie bei der Energie, die mit den Weibull-Parametern berechnet wird.

Innerhalb des Vergleichs werden die Differenzen zwischen der Energie, ermittelt aus den Weibull-Parametern, und der Energie, die mittels der direkten Methode bestimmt wird, berechnet. Dabei sind negative Werte eine Unterschätzung der Energie mit der Weibull-Verteilung und positive Werte eine Überschätzung.

Die mittleren Windgeschwindigkeiten werden ebenfalls auf diese Weise miteinander verglichen, wobei sie sich mit der Weibull-Verteilung anhand Formel (3.3) und direkt aus den Zeitreihen mit der üblichen Formel für den Mittelwert (3.21) errechnen lassen.

$$\mu = \sum_i^N \frac{u_i}{N} \quad (3.21)$$

Auf eine Ausblendung des Mastschattens ist hier bewusst verzichtet worden, da der Vergleich der direkt berechneten Windmittel und –energien mit den indirekt aus der Weibull-Verteilung ermittelten Werten im Vordergrund stehen soll. In den Abbildungen 4.10 und 4.12 wird zwischen 90 und 100 m Höhe zu erkennen sein, dass der hieraus resultierende Fehler gering ist, im Vergleich 5 % beim Skalierungs- und 0,1 beim Formparameter zu niedrig. Für die Angabe von Parametern in einer Höhe werden die 100 m Werte benutzt, da hier der Abschattungseffekt keine Rolle spielt.

## 4 Ergebnisse

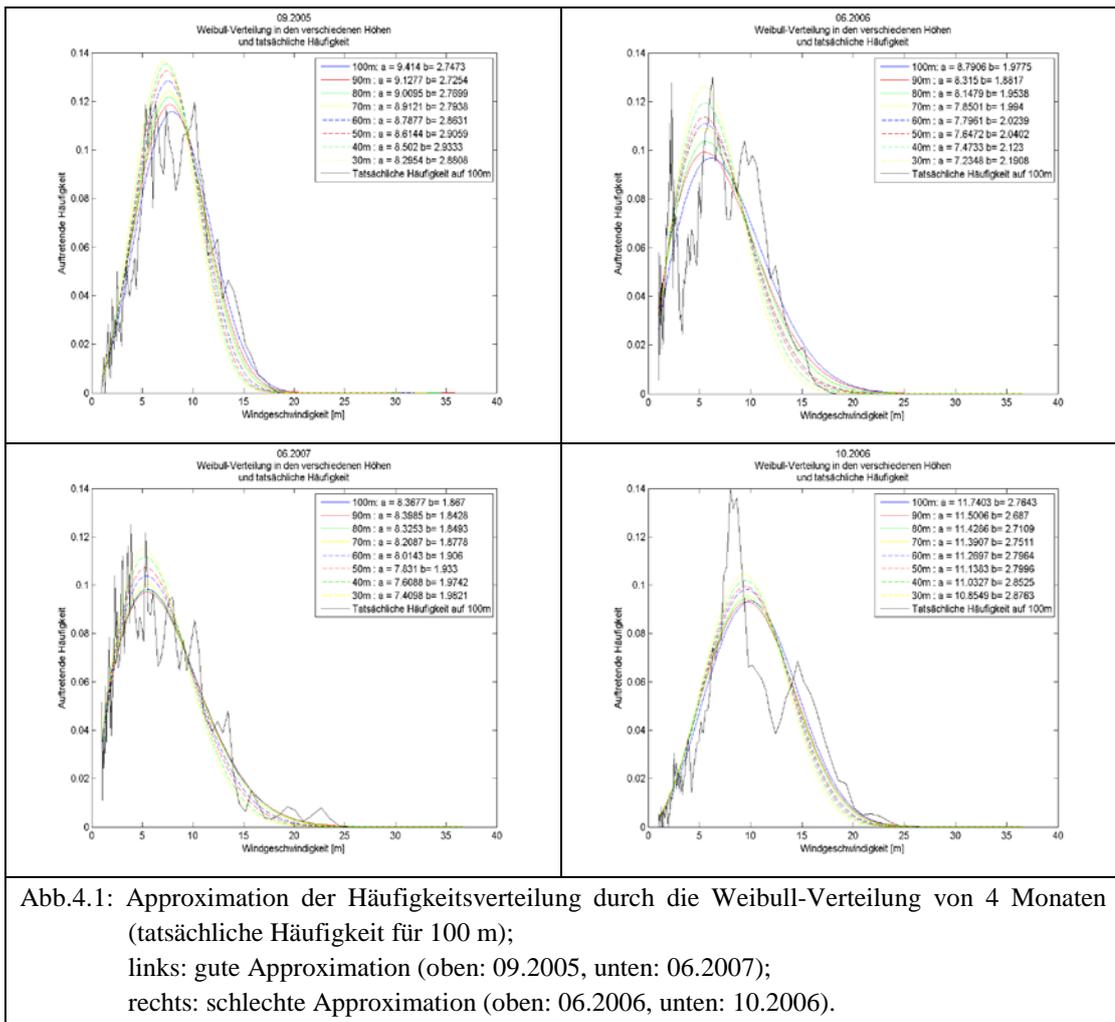
Die nun folgende Ergebnispräsentation enthält die Auswertung der Messdaten der FINO1-Plattform (10 min-Windgeschwindigkeitsmittel). Hier werden die Graphiken analysiert und die einleitenden Fragen (s. Abschnitt 1) beantwortet.

### 4.1 Approximation durch die Weibull-Verteilung

#### 4.1.1 Monate

Auf Grund des sehr kleinen Datensatzes von maximal 4464 Daten, wenn keine Datenausfälle in den Monaten vorhanden sind, ist die Approximation der Weibull-Verteilung für die vorhandenen Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten innerhalb eines Monats nicht vorteilhaft verlaufen. Im Schnitt sind über 40 % der Monate unzureichend angenähert worden. In Abbildung 4.1 sind jeweils zwei Beispiele für eine gelungene und eine nicht ausreichende Approximation dargestellt. Auffällig hierbei ist, dass die unzureichend angenäherten Häufigkeitsverteilungen meist zwei größere Vorkommen einer Windgeschwindigkeitsklasse aufweisen (s. Abb.4.1 unten rechts), und die anderen Klassen nicht sehr stark bestückt sind, wodurch eine genaue Annäherung unmöglich wird. Dies liegt an den kurzen Zeiträumen, die hier betrachtet werden. Hält eine Wetterlage eine längere Periode an, so hat diese große Auswirkung auf die Verteilung der Windgeschwindigkeiten. Sind nun Monate vorhanden, in denen die Wetterlagen häufiger wechseln, so ergibt sich mit der Weibull-Verteilung eine gute Näherung (s. Abb.4.1 links).

Es ist also davon auszugehen, dass die Weibull-Verteilung zwar eine gute Approximation für die Verteilung der Windgeschwindigkeiten ist, eine monatliche Auswertung scheint jedoch fragwürdig, da die Datensätze höchstwahrscheinlich noch zu klein sind, um immer von einer weibullverteilten Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten ausgehen zu können. Würde aber über Monate von über zehn Jahren und nicht nur wie in dieser Arbeit über vier Jahre gemittelt, könnte auch eine adäquate Näherung für jeden Monat gefunden werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass innerhalb desselben Monats in verschiedenen Jahren die meteorologischen Bedingungen sehr stark schwanken, sodass eine genaue Vorhersage der Windgeschwindigkeitsverhältnisse auch dann nicht möglich ist.



Allerdings lässt sich schon anhand der Mittelwerte für die einzelnen Monate aus den vier analysierten Jahren ein jahreszeitlicher Trend feststellen (s. Tab.4.1). So fallen die Herbst- und Wintermonate mit relativ hohen Skalierungsparametern auf ( $10 < a < 14$  m/s), wohingegen das Frühjahr und der Sommer eher geringere Werte aufweisen ( $8,7 < a < 12,3$  m/s). Ebenso, wenngleich auch nicht ganz so auffällig, verhält sich der Formparameter, der in den Monaten von März bis August geringer ausfällt (2,11 – 2,57), als in den Monaten von September bis Februar (2,19 – 2,97). Auf Grund dieser Tatsache sind im folgenden Abschnitt 4.1.2 die Jahreszeiten genauer betrachtet worden.

Tab.4.1: Monatsmittel von Form- und Skalierungsparameter aus den vier analysierten Jahren in einer Höhe von 100 m.

	<i>Skalierungsparameter a</i>	<i>Formparameter b</i>
<i>Januar</i>	14,02 m/s	2,73
<i>Februar</i>	11,72 m/s	2,51
<i>März</i>	12,28 m/s	2,57
<i>April</i>	10,25 m/s	2,22
<i>Mai</i>	10,02 m/s	2,37
<i>Juni</i>	8,89 m/s	2,21
<i>Juli</i>	8,73 m/s	2,11
<i>August</i>	9,49 m/s	2,12
<i>September</i>	10,01 m/s	2,48
<i>Oktober</i>	11,43 m/s	2,54
<i>November</i>	12,17 m/s	2,97
<i>Dezember</i>	12,68 m/s	2,19

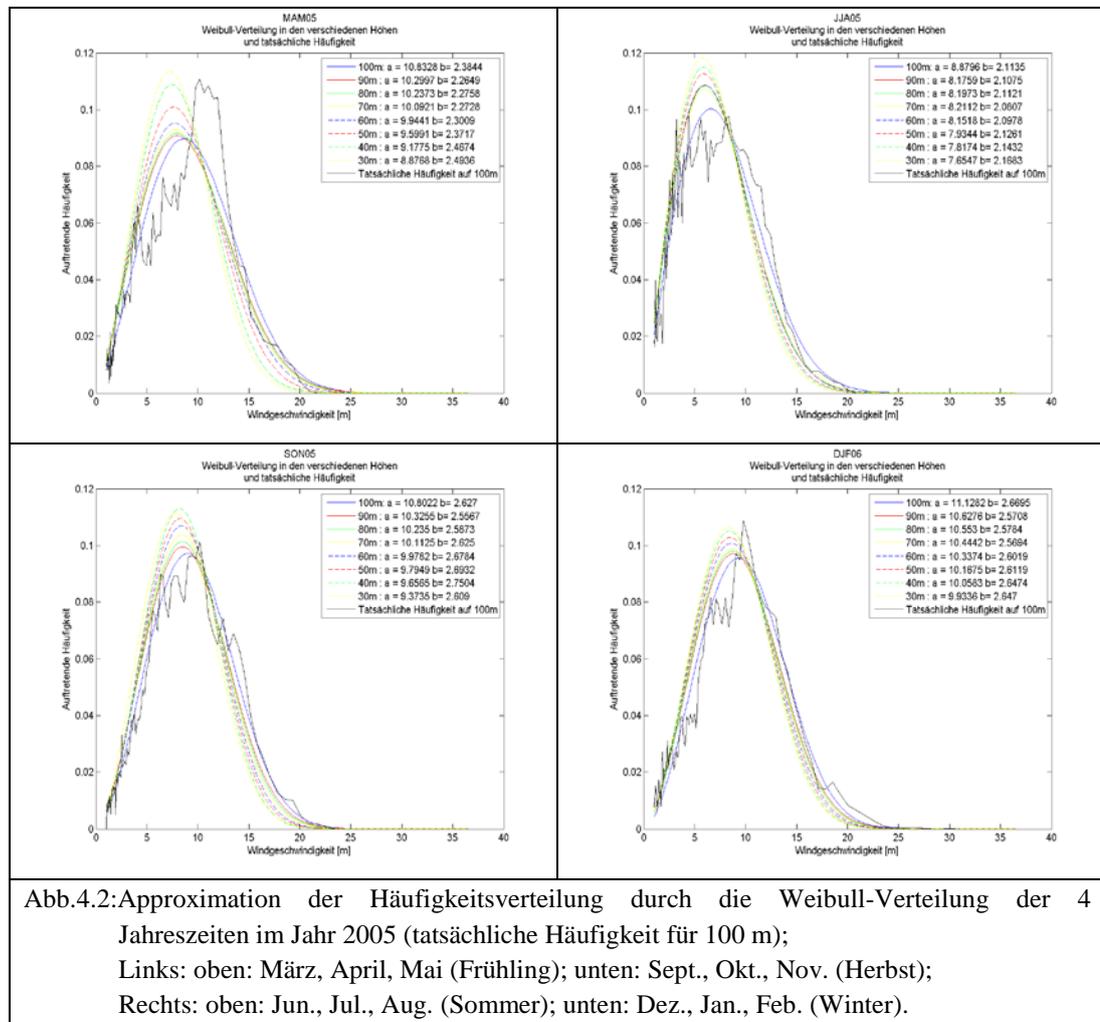
#### 4.1.2 Jahreszeiten

Die Behauptung, dass sich die Windgeschwindigkeiten weibullverteilt verhalten, lässt sich anhand der Graphiken für die Jahreszeiten (s. Abb.4.2) besser belegen. Durch die nun größere Datenmenge, werden die Approximationen um einiges genauer und sind somit aussagekräftiger. Anhand dieser Daten kann jedoch nur eine vage Analyse für den Jahresgang der Windenergie bzgl. der Jahreszeiten getroffen werden, da, wie in Abschnitt 4.1.1 zuvor schon erwähnt, vier Jahre nur einen Teil der vorherrschenden Wetterverhältnisse in diesem Gebiet widerspiegeln. Der Jahresgang der Windenergie wird in 4.3.2 noch eingehend erläutert.

Tab.4.2: Jahreszeitenmittel von Form- und Skalierungsparameter aus den vier analysierten Jahren in einer Höhe von 100 m.

	<i>Skalierungsparameter a</i>	<i>Formparameter b</i>
<i>Frühling</i>	10,74 m/s	2,30
<i>Sommer</i>	9,00 m/s	2,12
<i>Herbst</i>	11,23 m/s	2,47
<i>Winter</i>	12,83 m/s	2,31

Basierend auf den Mittelwerten des Form- und Skalierungsparameters für die Jahreszeiten ist anzunehmen, dass die Größenverteilung der Formparameter sich mit den variierenden Windgeschwindigkeiten verändert, der Skalierungsparameters verhält sich anscheinend in Abhängigkeit mit der thermischen Stabilität der marinen Atmosphäre (s. Tab.4.2, sowie Abschnitt 4.2.1).



Genauer betrachtet steht der Formparameter in Zusammenhang mit der Varianz ( $b \sim a/\sigma$ , (Wieringa, 1989)), also der Variabilität der Windgeschwindigkeiten, die innerhalb des analysierten Zeitraums auftritt (s. Tab.4.3). Die Variabilität besagt jedoch nicht, ob ein Monat hohe Böen beinhaltet oder nicht, wie in Abbildung 4.3 zu erkennen ist, sondern ob die Oszillation um den Mittelwert stark oder schwach ausgeprägt ist. In Abbildung 4.3 ist die Jahreszeit mit der höchsten Variabilität und dem kleinsten Formparameter auf der linken Seite dargestellt (Sommer 2006) und auf der rechten Seite befindet sich die Jahreszeit mit dem größten Formparameter und dem zu Folge der geringsten Varianz

(Herbst 2006). Zwar hat der Herbst 2006 eine hohe Böe (33 m/s) in der Zeitreihe, jedoch weichen die restlichen Windgeschwindigkeiten nicht sehr stark vom Mittelwert ab. Wohingegen im Sommer 2006 zwar eher geringe ( $< 20$  m/s) Windgeschwindigkeiten gemessen worden sind, allerdings oszillieren diese sehr stark um die mittlere Windgeschwindigkeit. Anhand Tabelle 4.3 lassen sich keine genauen Aussagen über das Verhalten des Formparameters während der Jahreszeiten machen, aber es ist grob festzustellen, dass im Herbst, sowie im Frühling, eher gering variierende Geschwindigkeiten auftreten. Weiter ist zu vermuten, dass es im Sommer eher zu häufigen Schwankungen in der Windgeschwindigkeit kommt. Im Winter treten, wie auch mittels der Tabelle 4.3 und auf Grund des Jahreszeiten-Korrelation-Plots (Abb.4.6) ersichtlich wird, je nach Jahr und Wetterlagen zu starke Schwankungen des Formparameters auf, sodass keine Aussage über die Größe des Formparameters in zukünftigen Wintern gemacht werden kann. Die Formel von Wieringa (s. Abschnitt 3.1.1) ist aber anhand der Tabelle 4.3 nachzuvollziehen.

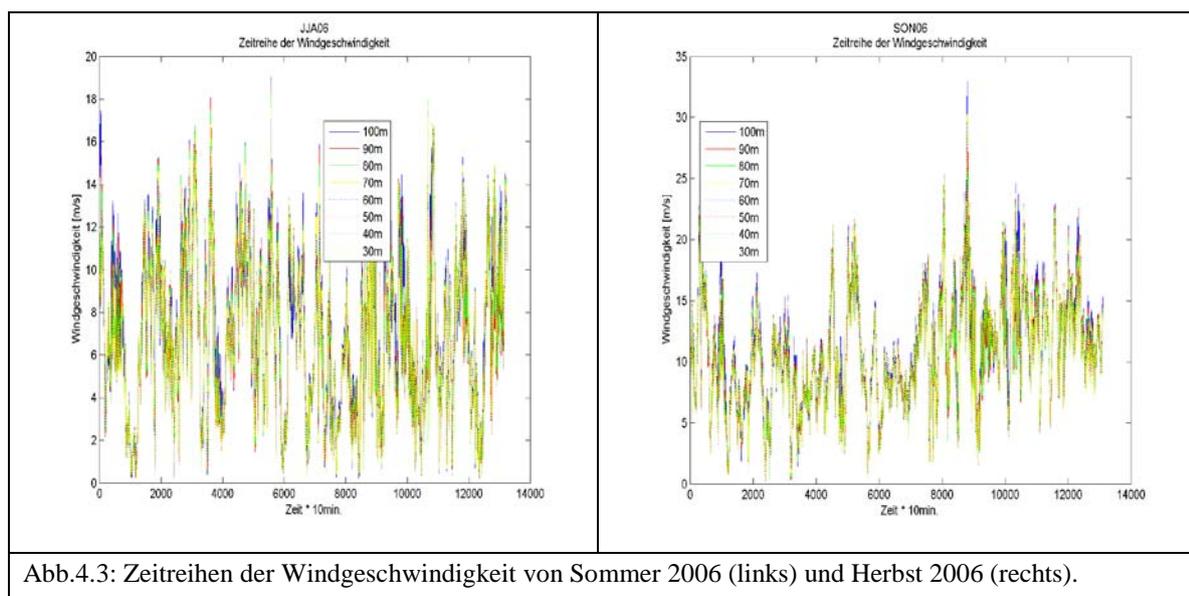


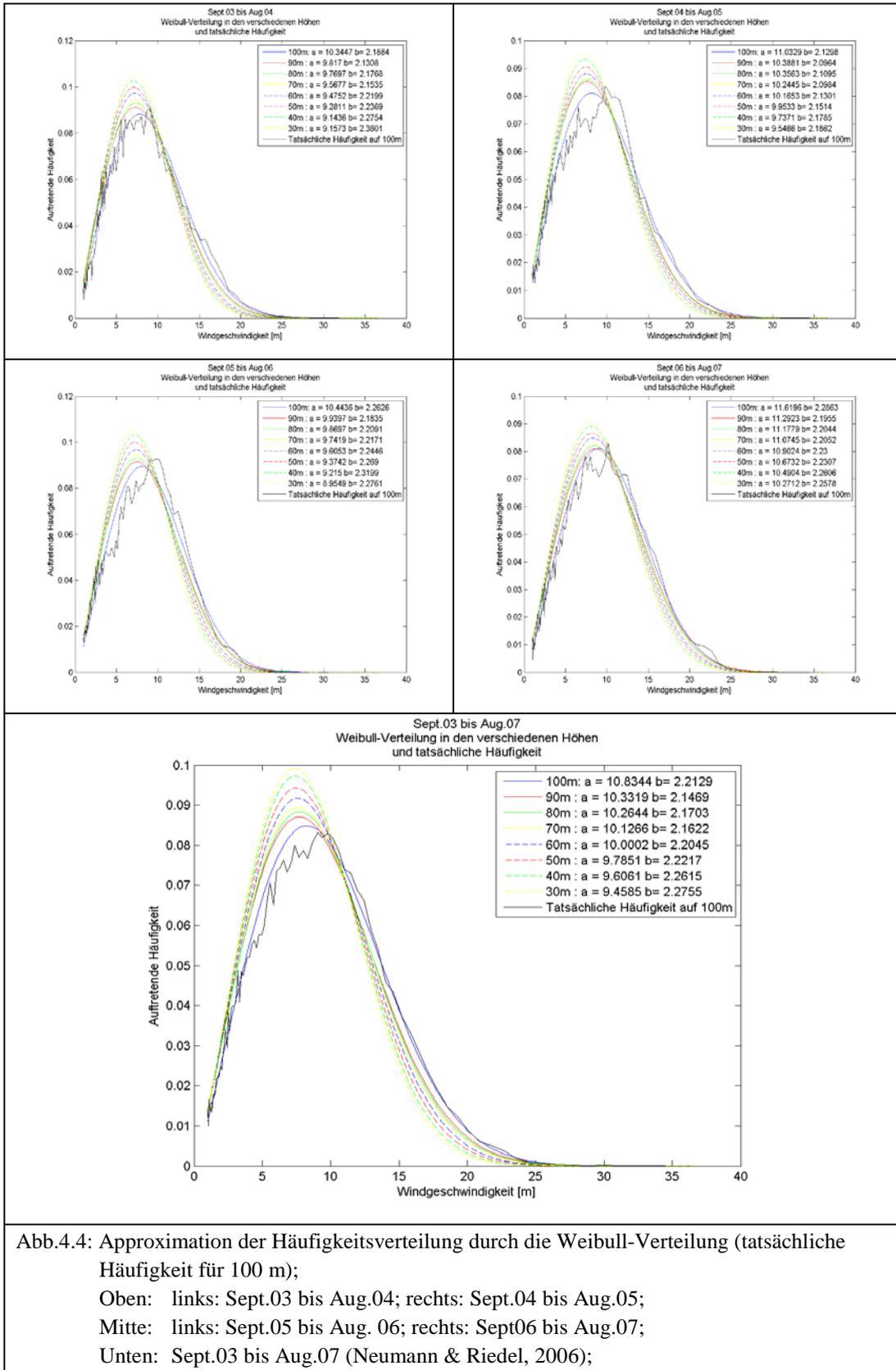
Abb.4.3: Zeitreihen der Windgeschwindigkeit von Sommer 2006 (links) und Herbst 2006 (rechts).

Tab.4.3: Zusammenhang des Formparameters mit der Varianz der Windgeschwindigkeiten  
(Wieringa, 1989) in 100 m Höhe (JJA-Juni/Juli/Aug., SON-Sept./Okt./Nov., DJF-Dez./Jan./Feb.,  
MAM-Mär./Apr./Mai).

<i>Jahreszeit</i>	<i>Formparameter b</i>	<i>a/σ</i>	<i>f = (b*σ)/a</i>
<b>JJA06</b>	2,00	2,16	0,93
<b>SON04</b>	2,09	2,25	0,93
<b>JJA05</b>	2,11	2,27	0,93
<b>JJA07</b>	2,12	2,28	0,93
<b>MAM04</b>	2,12	2,27	0,93
<b>DJF04</b>	2,16	2,31	0,94
<b>DJF05</b>	2,18	2,33	0,94
<b>JJA04</b>	2,23	2,38	0,94
<b>DJF07</b>	2,24	2,39	0,94
<b>MAM06</b>	2,25	2,40	0,94
<b>MAM05</b>	2,38	2,53	0,94
<b>SON03</b>	2,38	2,52	0,94
<b>MAM07</b>	2,46	2,60	0,95
<b>SON05</b>	2,63	2,75	0,96
<b>DJF06</b>	2,67	2,79	0,96
<b>SON06</b>	2,79	2,89	0,96

### 4.1.3 Jahre

Die Anpassung an die Jahreshäufigkeiten ist dementsprechend noch um einiges genauer, als es schon bei den Jahreszeiten der Fall war, weil nun eine Datenmenge von bis zu 52.560 Messwerten vorhanden ist (s. Abb.4.4). Jedoch kann auf Grund eines Jahres noch keine Aussage über den weiteren Verlauf der kommenden Jahre getroffen werden, da selbst die Wetterverhältnisse für Jahre stark schwanken können. Genaue Resultate sind daher erst ab einem Messzeitraum von min. 10 bis 30 Jahren zu erwarten (klimatologische Analyse). Gleichwohl lassen sich erste Intervallgrenzen festlegen ( $10 < a < 12$  m/s,  $2,1 < b < 2,3$ ), die als Grundlage für eine Analyse der Windenergie dienen. Somit ist mit den Parametern für die Auswertung der kompletten vier Jahre (Sept.03 bis Aug.07, Abb.4.4 unten) erstmal eine Basis gegeben, an der sich die weiteren Berechnungen für die Energieflussdichten orientieren können.



Dass die beiden Parameter auch innerhalb von vier Jahren noch relativ variabel sind, lässt sich in Tabelle 4.4 erkennen. Der Formparameter variiert nur um 0,1 (~ 4,5 % zum Mittelwert) der Skalierungsparameter schwankt noch um 0,8 m/s (~ 7,4 % zum Mittelwert), wobei wiederum Intervallgrenzen, die allerdings wesentlich enger liegen als bei den Monatswerten, erkennbar sind.

Tab.4.4: Jahresmittel von Form- und Skalierungsparameter aus den vier analysierten Jahren in einer Höhe von 100 m.

	<i>Skalierungsparameter a</i>	<i>Formparameter b</i>
<i>Sept.03 – Aug.04</i>	10,34 m/s	2,19
<i>Sept.04 – Aug.05</i>	11,03 m/s	2,13
<i>Sept.05 – Aug.06</i>	10,44 m/s	2,26
<i>Sept.06 – Aug.07</i>	11,62 m/s	2,29
<i>Sept.03 – Aug.07</i>	10,83 m/s	2,21

## 4.2 Analyse der Parameter

Im weiteren Verlauf wird das Gewicht auf das Verhalten der Parameter in Hinsicht auf die unterschiedlichen Jahreszeiten gelegt. Hierbei wird zum einen die Korrelation von Form- und Skalierungsparameter untereinander analysiert, sowie deren Vertikalprofile begutachtet. Zum anderen wird der Jahresgang anhand der Stabilitäten der marinen Atmosphäre und der Variabilität der Windgeschwindigkeiten eruiert.

### 4.2.1 Korrelation

In Abbildung 4.5 ist die Korrelation von Form- und Skalierungsparameter für jede Höhe, jedes Monats der vier analysierten Jahre dargestellt. Dabei fällt stark auf, dass es vier Ausreißer gibt, und die anderen Monate sich grob innerhalb eines Hauptbereiches aufhalten. Dieser Bereich befindet sich für den Formparameter ungefähr zwischen 1,75 und 3,25 und für den Skalierungsparameter zwischen 7 und 13 m/s. Es bestätigt sich nun also die Annahme, dass mittels der Daten aus den vier Jahren selbst für Monate eine ungefähre Aussage bezüglich der Größenverhältnisse der Parameter getroffen werden kann. Bei den vier Ausreißern handelt es sich um die Monate Januar 2005 (grün), November (gelb oben) und Dezember (gelb unten) 2006, sowie den Januar 2007 (rot). Auffällig ist, dass es sich hierbei hauptsächlich um Wintermonate handelt, die, wie im

weiteren Verlauf in der Untersuchung des Jahreszeiten-Korrelation-Plots (Abb.4.6) dargestellt ist, im Schnitt die größten Skalierungsparameter haben. Innerhalb dieser Monate gab es mehrere Orkan- und Sturmtiefs, mit denen sich die aus dem Raster fallenden Parameter erklären lassen (Auflistung s. Tab.4.5). Gründe für diese Sturm- und Orkantiefs waren hauptsächlich starke Gradienten zwischen polaren und warmen Luftmassen, die vom Atlantik über Europa strömten.

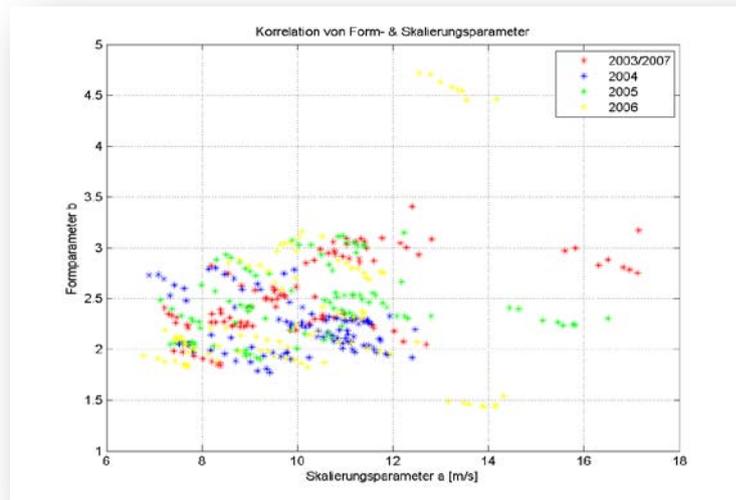


Abb.4.5: Korrelation-Plot von Form- und Skalierungsparameter für jede Höhe jedes Monats der vier analysierten Jahre (rot- Ende 2003/Anfang 2007, blau-2004, grün-2005, gelb-2006).

Tab.4.5: Liste der Sturm- und Orkantiefs innerhalb der Ausreißer-Monate<sup>7</sup>.

<b>Monat</b>	<b>Ereignisse</b>
<i>Januar 2005</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 8. Jan.: Orkantief „Erwin“</li> <li>- 20./21. Jan.: Orkantief „Ingo“</li> </ul>
<i>November 2006</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1. Nov.: Sturmtief „Britta“</li> <li>- 30. Nov.: Orkantief „Petra“</li> </ul>
<i>Dezember 2006</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3. Dez.: Orkantief „Rosa“</li> <li>- 8. Dez.: Sturmtief „Vera“</li> <li>- 10. Dez.: Orkantief „Xynthia“</li> <li>- 31. Dez.: Orkantief „Karla“</li> </ul>
<i>Januar 2007</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1. Jan.: Sturmtief „Lotte“</li> <li>- 11. Jan.: Orkantief „Franz“</li> <li>- 13. Jan.: Sturmtief „Gerhard“</li> <li>- 14. Jan.: Orkantief „Hanno“</li> <li>- 18. Jan.: Orkantief „Kyrill“</li> <li>- 28. Jan.: Sturmtief „Olli“</li> </ul>

<sup>7</sup> <http://www.wetter24.de/archiv> (gelesen am 09.09.09)

Mittels des Jahreszeiten-Korrelations-Plots (Abb.4.6) kann ein relativer Jahresgang der Parameter festgemacht werden. Im Sommer finden sich kleine Form- und Skalierungsparameter, während im Winter eher große Werte vorherrschen. Im Frühling und Herbst befinden sich die Parameter zwischen diesen beiden Extremen, wobei der Frühling sich eher an die Verhältnisse des Sommers annähert und der Herbst an die des Winters. Dieser Jahresgang hat seinen Ursprung in der thermischen Stabilität der Atmosphäre, wobei das Stabilitätsverhalten in der marinen Atmosphäre im Gegensatz zu der Atmosphäre über Land um zwei bis drei Monate verschoben ist. Dies beruht auf der Verzögerung des Temperaturjahresgangs der Meere, welche durch die hohe Wärmekapazität des Wassers verursacht wird (s. Abb.4.7). Bezeichnet wird dieser Jahresgang des Windes auf der Nordhalbkugel (Maximum im Winter, Minimum im Sommer; s. Abb.4.8) als „Ozeanischer Typ“ (Heyer, 1984).

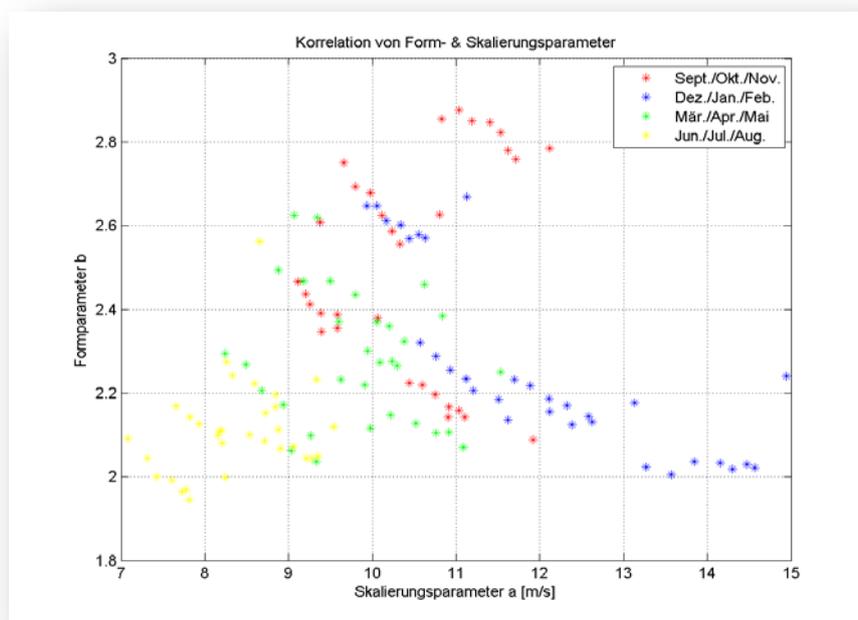


Abb.4.6: Jahreszeiten-Korrelations-Plot von Form- und Skalierungsparameter für jede Höhe der Jahreszeit der vier analysierten Jahre (rot-Herbst, blau-Winter, grün-Frühling, gelb-Sommer).

Anhand der Abbildungen 4.7 und 4.8 wird der Zusammenhang von Wassertemperatur und Windgeschwindigkeit offensichtlich, an den Wendepunkten der Wassertemperatur, an denen die darüber gelagerte Atmosphäre indifferent geschichtet ist (Sommer und Winter), befinden sich jeweils Minimum bzw. Maximum der Windgeschwindigkeiten. Der Peak im Juni 2004 (s. Abb.4.8) ist jahresspezifisch, über mehrere Jahre gemittelt

würde hier das Minimum des Sommers auftreten. Bei einer stabilen Schichtung, wie es im Frühjahr der Fall ist, nimmt die Windgeschwindigkeit ab und bei einer labilen Schichtung, ausgelöst durch eine gegenüber der Luft wärmere Wassertemperatur, wie sie im Herbst vorzufinden ist, nimmt, die Windgeschwindigkeit wieder zu (Coelingh, van Wijk, & Holtslag, 1996).

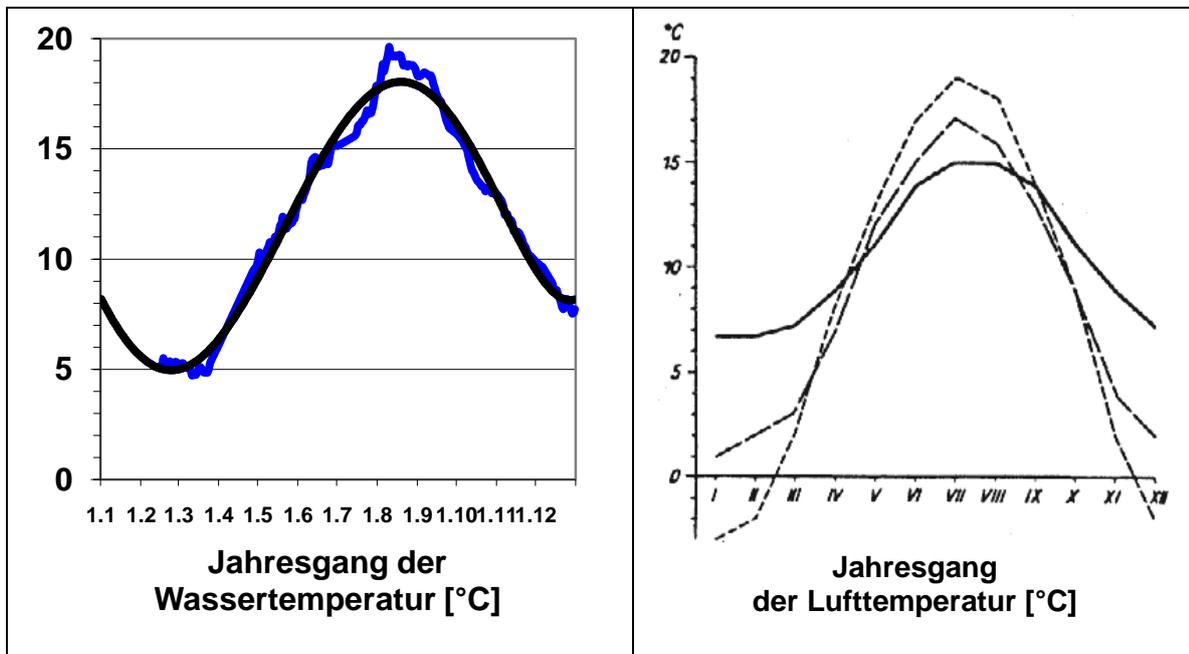


Abb.4.7: Jahresgang von Luft- und Wassertemperatur; links: Jahresgang der Wassertemperatur an der FINO1-Plattform 2004 (blau-gemessene Temperatur, schwarz-approximierte Temperatur); rechts: Der Temperaturgang in den gemäßigten Breiten (— Valentia, - - - Emden, - · - · Krakow) (Heyer, 1984).

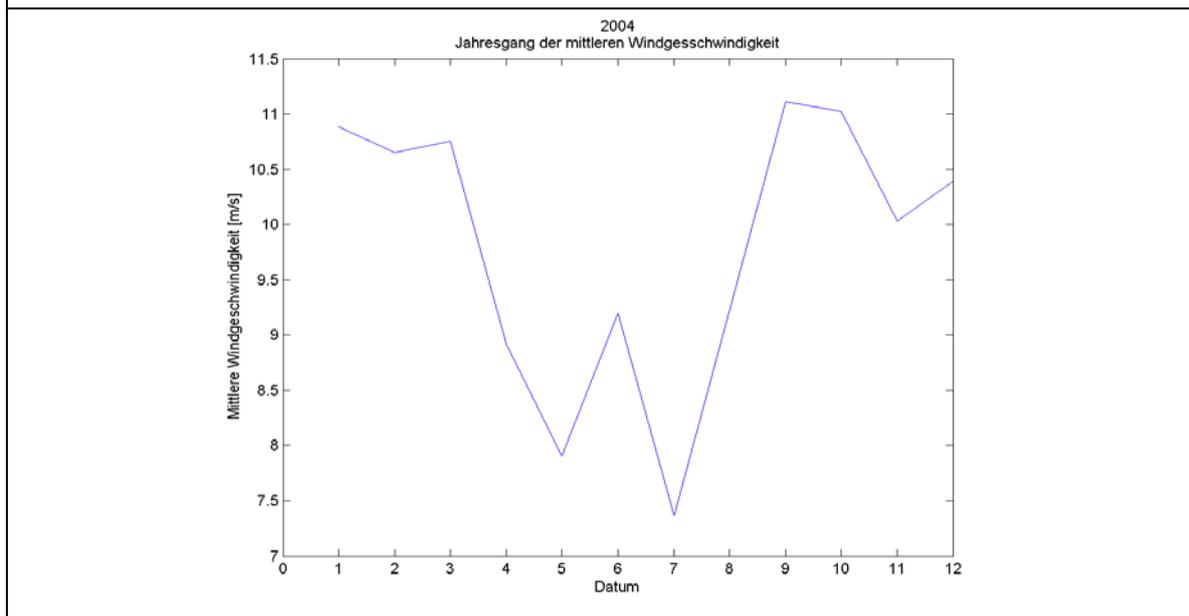


Abb.4.8: Jahresgang der mittleren Windgeschwindigkeit an FINO1 des Jahres 2004 in 100 m Höhe.

Dieses Phänomen lässt sich auch mittels der Vertikalprofile der Weibull-Parameter nachweisen. Bei einer stabilen Schichtung, wie sie im Frühjahr über See auftritt, nimmt die Windgeschwindigkeit und damit der Skalierungsparameter  $a$  mit der Höhe stärker zu ( $\sim 1,5$  m/s auf 50 m, s. Abb.4.6, grüne Punkte), als bei einer labilen Schichtung, wie sie über See im Herbst auftritt ( $< 1$  m/s auf 50 m, s. Abb.4.6, rote Punkte). Da die Vertikalprofile der Parameter hierüber eine genauere Auskunft geben, wird auf dieses Thema nochmals in Abschnitt 4.2.2 eingegangen.

Anhand der Analysen ergibt sich nun eine Korrelation der Parameter innerhalb der Jahreszeiten, die als Skizze in Abbildung 4.9 dargestellt ist. Im Sommer sind beide Parameter relativ klein, während sie in im Winter sehr groß sind. Die Schwankung des Formparameters ist im Winter stärker ausgebildet, weil dieser mit immer größer werdendem Skalierungsparameter stärker variiert, wie in Abschnitt 4.2.2.1 noch erläutert wird.

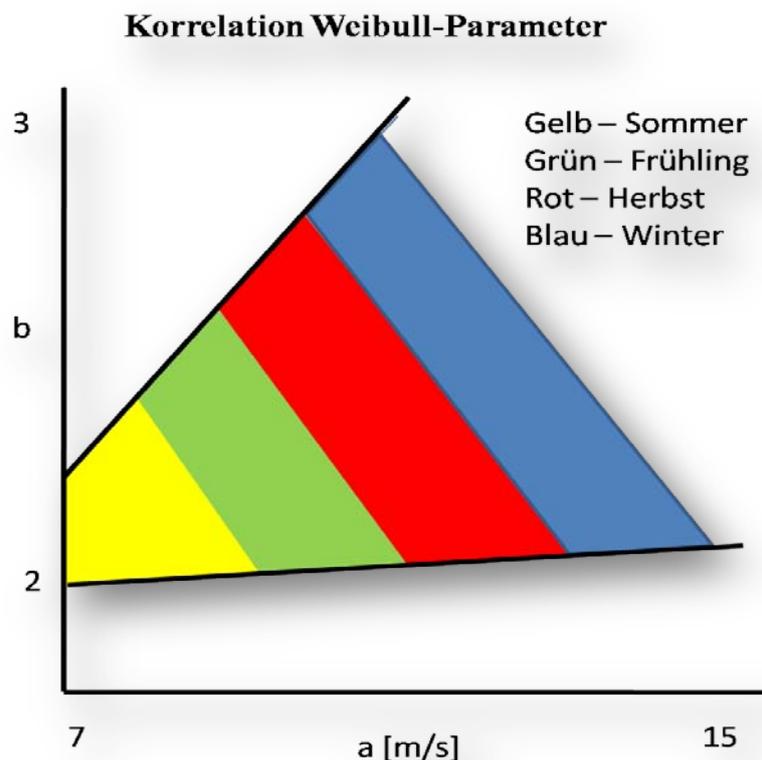


Abb.4.9: Schematische Darstellung der Korrelation der beiden Weibull-Parameter auf der Basis jahreszeitlicher Auswertungen.

## 4.2.2 Vertikalprofile

Im weiteren Verlauf wird auf die Gründe für das vertikale Verhalten der Parameter bezüglich der Jahreszeiten eingegangen. Da der Abschattungseffekt des Turms nicht mit in die Rechnung eingegangen ist und dessen Abwesenheit sich oberhalb von 90 m bemerkbar macht, werden nur die Höhen von 40 – 90 m berücksichtigt, die 30 m Höhe wurde auf Grund zu hoher Datenausfälle nicht mit in die Analyse eingebracht.

### 4.2.2.1 Formparameter

Im Verhalten des Formparameters mit der Höhe ist ein leichter Abfall festzustellen (s. Abb.4.10), der in den indifferenten Jahreszeiten Sommer und Winter relativ gering ausfällt (zwischen 40 und 90 m ca. 0,07 bis 0,08), im Frühjahr, wenn die Atmosphäre stabil geschichtet ist beträgt der Abfall mit der Höhe im Mittel ca. 0,22 und während des Herbstes, der eine eher labile Schichtung aufweist, im Mittel etwa 0,13. Demzufolge nimmt die Variabilität der Windgeschwindigkeiten mit der Höhe zu. Der Sprung, der zwischen den Höhen 90 und 100 m stattfindet, ist wie schon zuvor erwähnt auf die Abschattung des Turms zurückzuführen, beim Formparameter macht dies einen Fehler von 0,1 bis 0,2 aus.

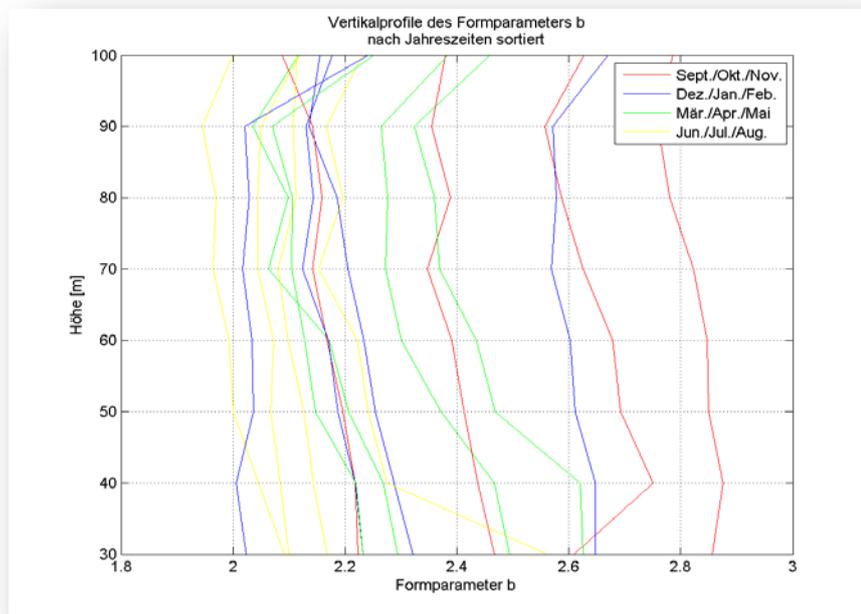


Abb.4.10: Vertikalprofil des Formparameters  $b$  für die verschiedenen Jahreszeiten der vier Jahre.

Um genauer beurteilen zu können, in welcher Unterschicht der atmosphärischen Grenzschicht sich diese Profile befinden, wird zum Vergleich das Vertikalverhalten des Formparameters an Land hinzugezogen. Über Land konnte anhand des Formparameters und dessen vertikalen Abfalls mit der Höhe (s. Abb.4.11, rechts (Emeis, 2001)) die Höhe der Prandtl-Schicht und der Übergang in die Ekman-Schicht in 30 m Höhe bei einer Messung auf einem Berg und in 70 m Höhe bei einer Messung über dem Flachland festgestellt werden. Die Annahme, dass in der marinen Atmosphäre die Mächtigkeit von Wellen- und Prandtl-Schicht nicht sehr stark ausgeprägt ist (Türk, 2008), wird mittels des Vertikalprofils des Formparameters in Abbildung 4.11 (links), welches nur einen minimalen Abfall von ca. 0,4 (oben) bzw. 0,1 (unten) mit der Höhe zeigt und somit auf eine Messung in der Ekman-Schicht hindeutet, bestätigt. Anhand dieses geringen Gradienten wird ersichtlich, dass FINO1 sich zumindest meistens oberhalb der Prandtl-Schicht befindet. Jedoch sind die Abnahmen sehr gering, sodass anzunehmen ist, dass die Messungen im Bereich des Übergangs von Prandtl- zu Ekman-Schicht stattgefunden haben, also eher dem Vertikalprofil auf einem Berg ähneln, bei dem die Prandtl-Schicht durch die erzwungene Überströmung ebenfalls sehr niedrig ist.

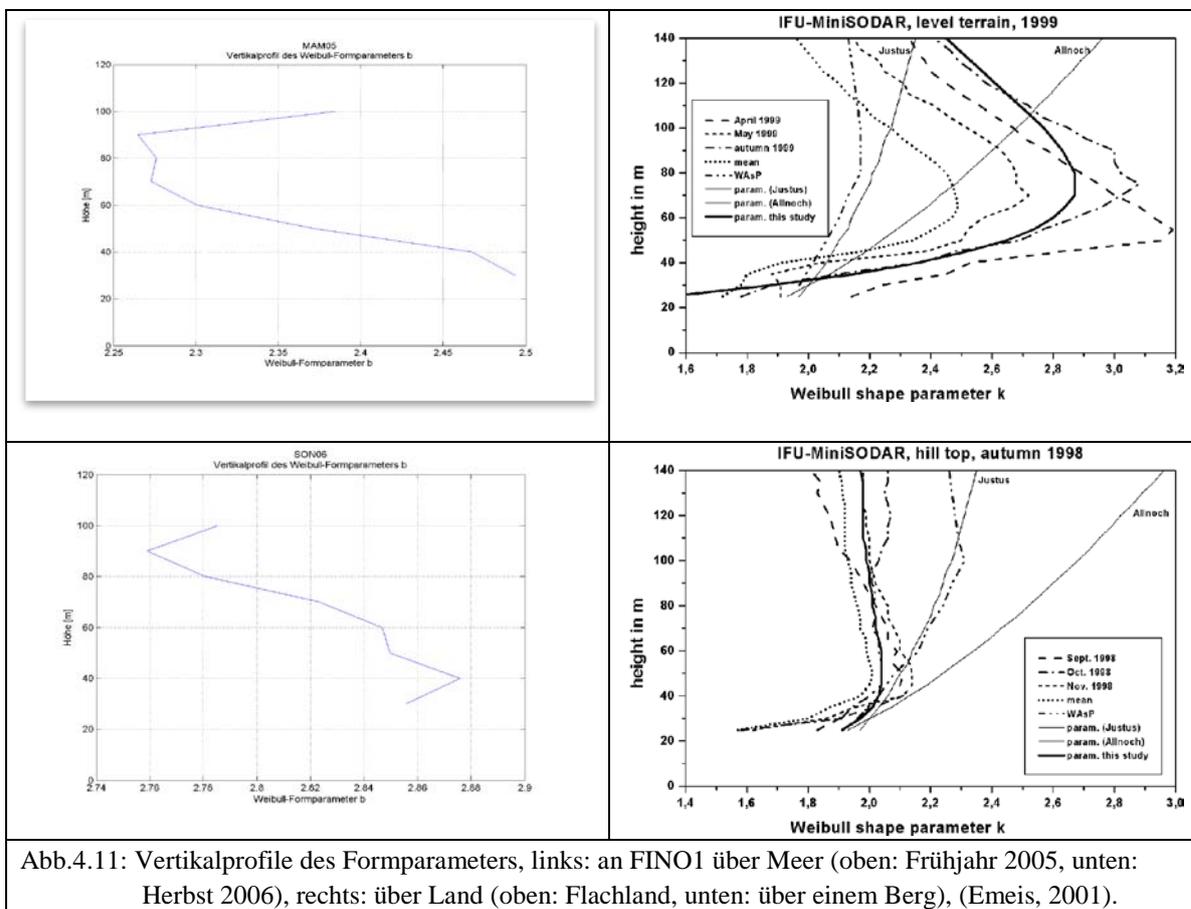


Abb.4.11: Vertikalprofile des Formparameters, links: an FINO1 über Meer (oben: Frühjahr 2005, unten: Herbst 2006), rechts: über Land (oben: Flachland, unten: über einem Berg), (Emeis, 2001).

#### 4.2.2.2 Skalierungsparameter

Wie zu erwarten war, nimmt der Skalierungsparameter  $a$  mit der Höhe zu (s. Abb.4.12). Auf Grund der geringeren Reibungseffekte über See (Türk, 2008), befinden sich die Messgeräte zum größten Teil in der Ekman-Schicht, sodass nur noch eine geringe Zunahme mit der Höhe erfasst werden kann (s. Abschnitt 4.2.2.1). Diese liegt, wie in Tabelle 4.6 ersichtlich wird, bei einer Zunahme von 0,5 bis ca. 1 m/s in der Schicht von 40 bis 90 m über NN. Auch hier ist der Sprung zwischen 90 und 100 m auf den Abschattungseffekt des Turms zurückzuführen, dieser Fehler liegt beim Skalierungsparameter bei ca. 5 %.

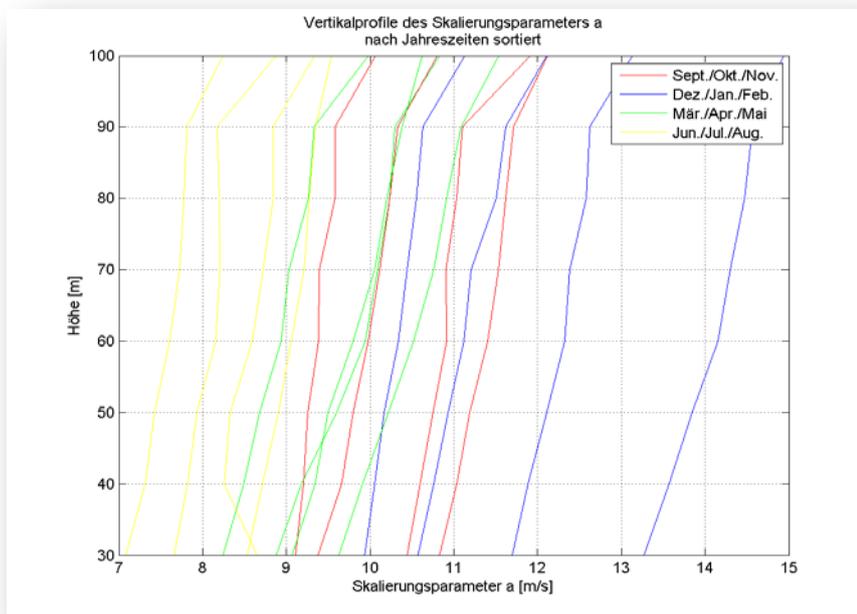


Abb.4.12: Vertikalprofil des Skalierungsparameters  $a$  für die verschiedenen Jahreszeiten der vier Jahre.

Im Allgemeinen hängt in der marinen Grenzschicht die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe sowohl von der Stabilität der Atmosphäre, als auch, vom Wellengang, und somit der Mächtigkeit von Wellen- und Prandtl-Schicht ab (Türk, 2008). Da die Amplitude der Wellen auf Grund der Reibungskräfte von der Größe der Windgeschwindigkeiten bestimmt wird, besteht ein Zusammenhang zwischen Höhe der Windgeschwindigkeiten und vertikaler Zunahme selbiger. Wird nun davon ausgegangen, dass dieser Effekt den stärkeren Einfluss auf den Vertikalgradienten der

Windgeschwindigkeit hat, müssten die Jahreszeiten in folgender Weise sortiert werden: Sommer, Frühling, Herbst, Winter.

In Tabelle 4.6 ist ersichtlich, dass eine Verbindung zwischen den Jahreszeiten und der Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe geknüpft werden kann. Allerdings spielt die hohe Stabilität, verursacht durch häufige Inversionswetterlagen (Beeken & Neumann, 2008), im Frühling eine sehr große Rolle, sodass entgegen der Annahme, in dieser Jahreszeit die größten Vertikalgradienten vorkommen. Ansonsten verhält es sich so, wie in der Hypothese dargestellt, dass im Sommer der kleinste Gradient auftritt, da der Höhenbereich des FINO1-Mastes sich dann in der Ekman-Schicht befindet, in Herbst und Winter, wo ein Teil der Prandtl-Schicht den Vertikalabschnitt beeinflusst, steigt der Gradient an (s. Abb.4.13). Im Mittel liegt im Höhenbereich des FINO1-Mastes (40 – 90 m) der Anstieg der Windgeschwindigkeit bei ca. 5 – 7 %. Im Frühjahr, wo die Stabilität ebenfalls eine Rolle spielt, liegt er bei über 10 %. Ob nun der Einfluss der Windgeschwindigkeit selbst auf das Vertikalprofil tatsächlich stärker ist, als der Einfluss der thermischen Stabilität, wie es in diesem kleinen Datensatz der Fall ist, kann nicht sicher festgestellt werden. Da in den Arbeiten von Beeken (Beeken & Neumann, 2008) und Riedel (Riedel, Durante, Neumann, & Strack, 2005), sowie von Lange (Lange, Larsen, Højstrup, & Barthelmie, 2004), die zeitlich neuere Datensätze von FINO1 analysiert haben bzw. eine analytische Abschätzung des vertikalen Windprofils über See gemacht haben, geschlussfolgert wurde, dass die thermische Stabilität den höheren Einfluss auf das Vertikalprofil hat, bleibt eine klimatologische Analyse über einen längeren Zeitraum zur endgültigen Klärung abzuwarten.

Tab.4.6: Mittelwerte des Skalierungsparameters  $a$  für die verschiedenen Jahreszeiten in einer Höhe von 90 m und 40 m, sowie die Differenz beider Windgeschwindigkeiten.

<b>Jahreszeit</b>	<b>Windgeschwindigkeit in 90m Höhe</b>	<b>Windgeschwindigkeit in 40m Höhe</b>	<b>Differenz der Windgeschwindigkeiten</b>
<b>SON</b>	10,68	10,12	0,56 (5,5 %)
<b>DJF</b>	12,36	11,57	0,79 (6,8 %)
<b>MAM</b>	10,27	9,23	1,04 (11,3 %)
<b>JJA</b>	8,55	8,03	0,52 (6,5 %)

Im Vergleich zu den Vertikalprofilen über Land wird deutlich, dass die FINO1 Profile wie schon beim Formparameter eher denen des Profils über einem Berg ähneln (s.

Abb.4.11), jedoch erst ab einer Höhe von ca. 40 – 50 m, da die Gradienten dann erst den der Größe der Gradienten auf der FINO1-Plattform entsprechen. Auch hier lässt sich schlussfolgern lassen, dass die Vertikalprofile von FINO1 sich im Übergang von Prandtl- zu Ekman-Schicht befinden, wodurch die oben stehende Vermutung geringer Mächtigkeiten der Prandtl-Schicht über See weiter gestärkt wird.

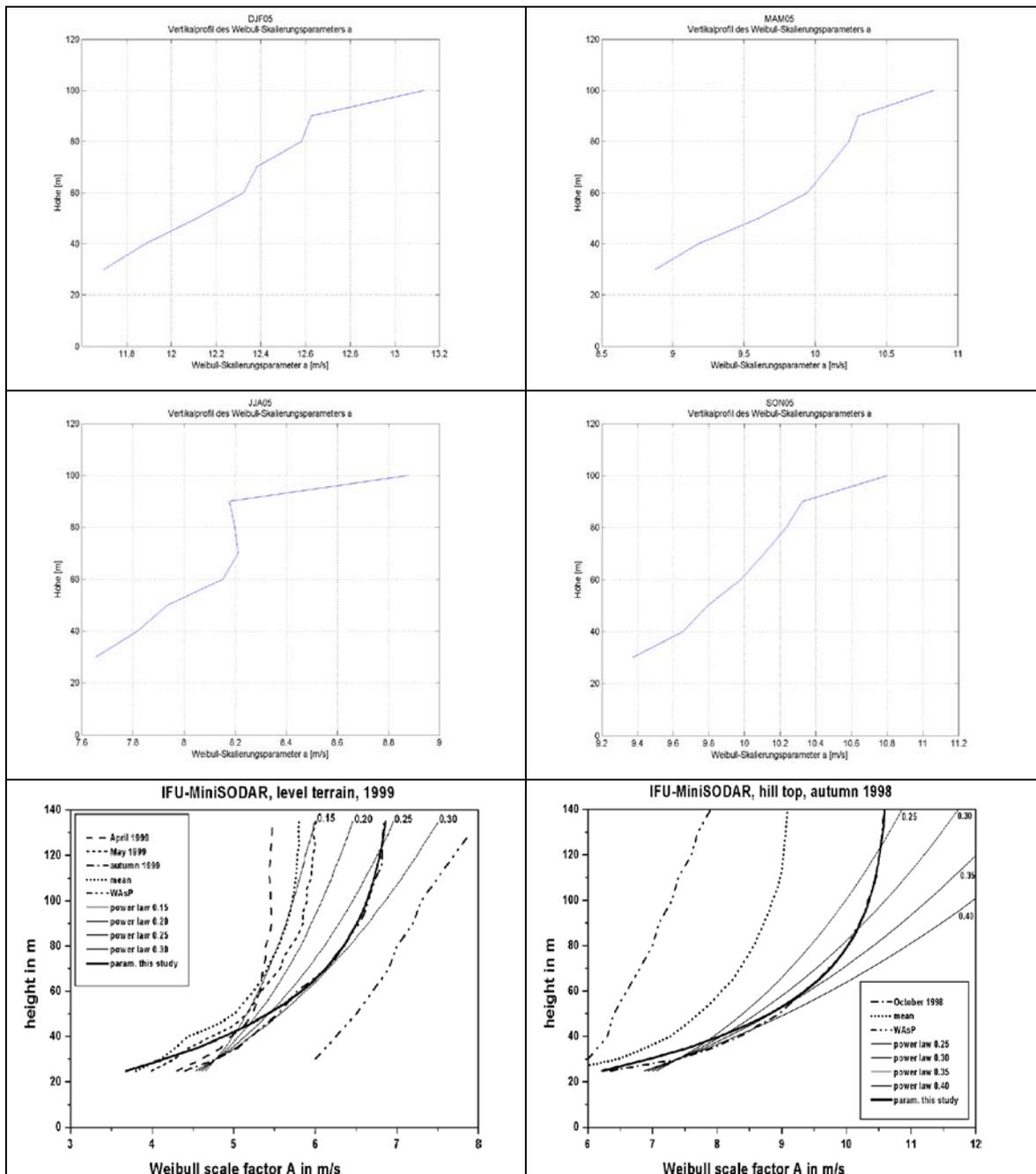


Abb.4.13: Vertikalprofile des Skalierungsparameters  $a$  der Jahreszeiten von 2005, Gradienten: Winter (oben links): 0,7; Frühling (oben rechts): 1,0; Sommer (mitte links): 0,5; Herbst (mitte rechts): 0,6; Flachland (unten links) 1,75; Berg (unten rechts) 2,0 (Emeis, 2001).

### 4.3 Vergleich der Auswertemethoden für Windmittel und Windenergie

Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse der Auswertemethoden für die Ermittlung der mittleren Windgeschwindigkeit und der Energieflussdichte miteinander verglichen.

#### 4.3.1 Mittelwert

Der jahreszeitliche Mittelwert der Windgeschwindigkeiten (Beeken & Neumann, 2008), welcher mittels der Weibull-Verteilung berechnet worden ist (s. (3.3)), unterschreitet in den kompletten vier Jahren den Mittelwert der direkt aus den Zeitreihen (s. (3.21)) bestimmt worden ist (s. Tab.4.7). Hierbei handelt es sich allerdings um minimale Unterschreitungen, die zwischen 0 und 0,4 m/s liegen, dies entspricht einem relativen Fehler von bis zu 4 % (s. Abb.4.14). Innerhalb der einzelnen Monate kommt es teilweise auch zu leichten Überschreitungen, welche aber in einem Fehlerintervall von 6 % liegen. Da es sich hierbei um acht Monate handelt, die über alle Jahreszeiten verteilt sind, kann kein systematischer Fehler für spezielle Jahreszeiten festgemacht werden.

Tab.4.7: Vergleich der mittleren Windgeschwindigkeiten in 100 m Höhe anhand der Jahreszeiten und einer mittleren Differenz zwischen beiden Auswertemethoden, wobei Gesamt das Mittel der kompletten vier Jahre kennzeichnet.

<b>Mittlere Windgeschwindigkeit</b>	<b>SON (Herbst)</b>	<b>DJF (Winter)</b>	<b>MAM (Frühling)</b>	<b>JJA (Sommer)</b>	<b>Gesamt</b>
<b>Direkt aus Zeitreihen</b>	10,29	11,66	9,75	8,15	9,96
<b>Mittels der Weibull-Verteilung</b>	9,97	11,37	9,52	7,97	9,71
<b>Differenz</b>	0,32 (3,1 %)	0,29 (2,5 %)	0,23 (2,4 %)	0,18 (2,2 %)	0,25 (2,5 %)

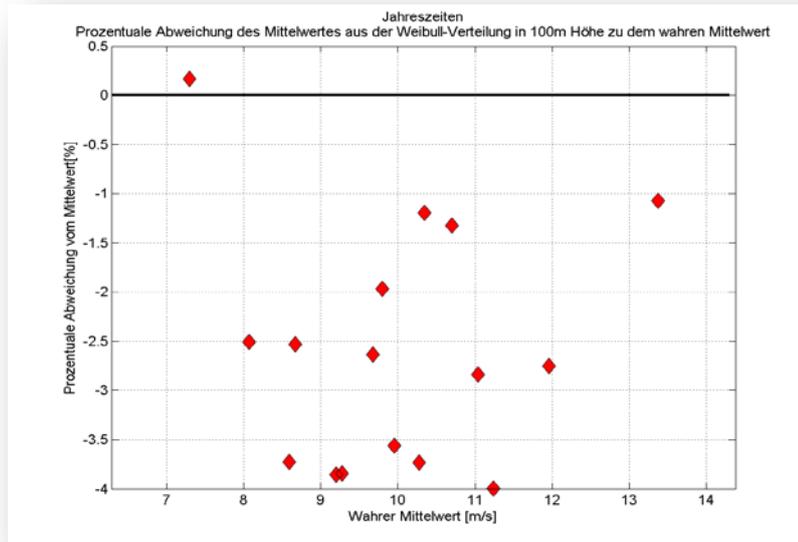


Abb.4.14: Prozentuale Abweichung des Jahreszeitenmittelwertes, welcher aus der Weibull-Verteilung berechnet worden ist zu dem direkt aus den Zeitreihen berechneten Wert in 100 m Höhe.

Die Vertikalprofile des Mittelwertes ähneln denen des Skalierungsparameters, die mittlere Windgeschwindigkeit steigt also mit der Höhe leicht an (s. Abb.4.15), die Hintergründe hierfür wurden schon in Abschnitt 4.2.2.2 näher erläutert. Auch hier wird der Abschattungseffekt des Turms zwischen der 90 und 100 m Höhe deutlich, beläuft sich aber, wie bei dem Skalierungsparameter  $a$  auf einen Fehler von ca. 5 %.

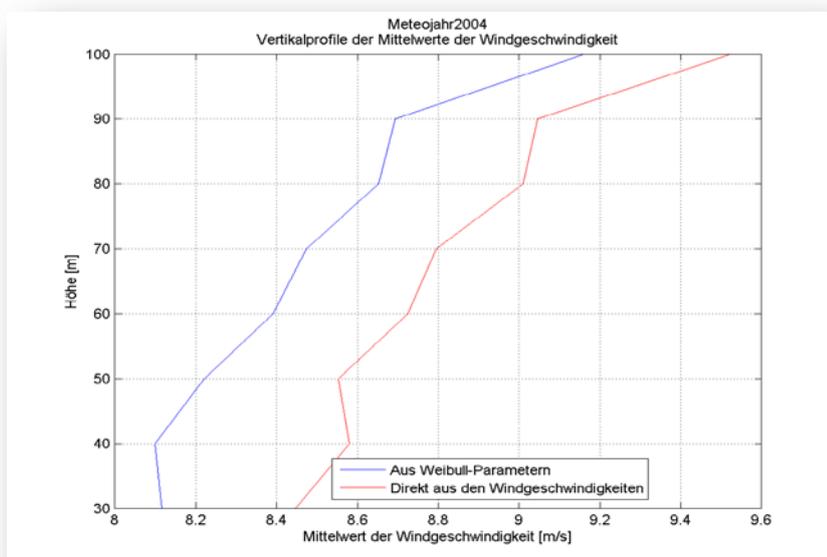


Abb.4.15: Vertikalprofil der mittleren Windgeschwindigkeit des Jahres 2004, Vergleich der beiden Auswertemethoden.

### 4.3.2 Energieflussdichte

Auch die Energieflussdichte wird zum größten Teil von der Weibull-Verteilung (s. (3.5)) unterschätzt (s. Abb.4.16), nur vier der 16 Jahreszeiten (25 %) liegen über dem aus den Zeitreihen direkt berechneten Energieflusswert (s. (3.19b)). Dies deutet darauf hin, dass es sich um einen systematischen Fehler handelt, also eine generelle Unterschätzung der Energieflussdichte. Die vorhandene Streuung bis ins Positive hinein beruht zum Teil auf unzureichenden Geradenanpassungen der Jahreszeiten bzw. die Approximation der Weibull-Verteilung war für diese Zeiträume nicht befriedigend (Winter 2007, Frühling 2007), was auch die etwas größere Überschreitung von 100-150 W/m<sup>2</sup> (5-10 %) erklärt (s. Abb.4.16 rote Rauten im oberen Bereich). Bei den anderen zwei Jahreszeiten handelt es sich um den Sommer 2006 und den Sommer 2007, dies lässt vermuten, dass leichte Überschätzungen meist in den Sommermonaten bei geringeren Windgeschwindigkeiten und hoher Variabilität (also kleinem Formparameter) auftreten. Jedoch kann dies mittels dieses kleinen Datensatzes von vier Jahren nicht weiter analysiert werden. Die mittlere Abweichung beläuft sich auf ca. 5-10 %, wobei im Winter, Frühling und Sommer Fehler von im Mittel 5 % auftreten, im Herbst, liegen diese zwischen 10 und 13 % liegt.

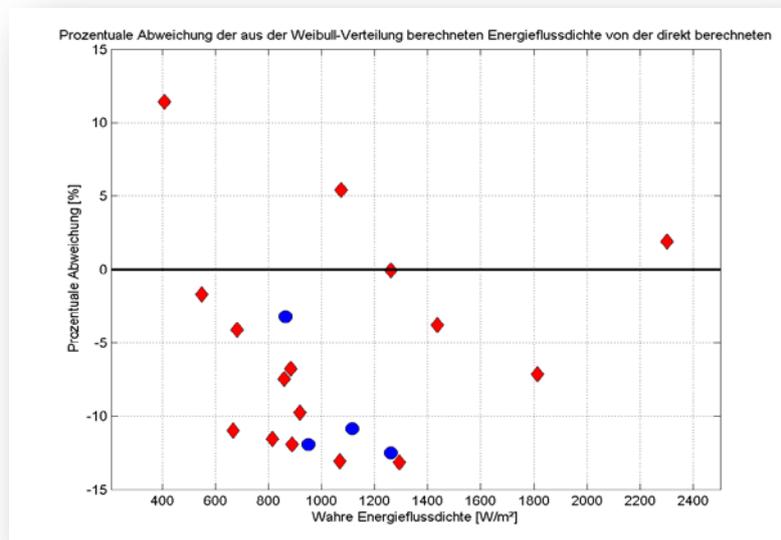


Abb.4.16: Prozentuale Abweichung der berechneten Energieflussdichten für die Jahreszeiten (rote Rauten) und die meteorologischen Jahre (blaue Kreise) aus der Weibull-Verteilung von denen direkt aus den Zeitreihen ermittelten Energieflussdichten in einer Höhe von 100 m.

Innerhalb der monatlichen Auswertungen sieht diese Verteilung ähnlich aus, hier sind ca. 35 % der ausgewerteten Monate überschätzt worden. Vor allem die Vermutung, dass eine Überschätzung meist im Sommer bzw. wärmeren Monaten stattfindet, kann anhand des Jahres 2006, welches überdurchschnittlich warm war und indem sieben von zwölf Monaten überschätzt wurden, weiter gefestigt werden. Da einzelne Monate, wie am Anfang in Abschnitt 4.1.1 schon erläutert, jedoch nicht immer weibullverteilt sind, werden sie aus der weiteren Betrachtung für die Energieflussdichte herausgenommen.

Um eine Aussage über die Energieflussdichte einzelner Jahre machen zu können, sind auch diese in Abbildung 4.16 (blaue Kreise) in Form von meteorologischen Jahren (Sept.-Aug.) dargestellt. Bei einem Datensatz von solcher Größe wäre zu erwarten, dass sich auf Grund einer sehr guten Approximation (s. Abb.4.4), die Größe der Fehler verringert. Jedoch ist zu erkennen, dass dies nicht der Fall ist, die Abweichungen von den aus den Zeitreihen berechneten Energieflussdichten belaufen sich meist auf 10 bis 13 % (Abb.4.16) und sind somit signifikant.

In der Variabilität der Energieflussdichte der einzelnen Jahre untereinander liegt darin begründet, was in Abschnitt 4.1.3 schon angesprochen wurde, dass für eine klimatologisch belastbare Aussage über den Jahresgang der Windenergie im Allgemeinen mehr als 4 Jahre nötig sind. Im Mittel dieser vier Jahre ist eine Energieflussdichte von ca. 1000 W/m<sup>2</sup> vorhanden, die eine Abweichung von der aus den Zeitreihen berechneten Energieflussdichte von ca. 10,5 % (etwa 105 W/m<sup>2</sup>) hat. Diese Abweichung ist signifikant größer als der statistischen Fehler von 50 – 60 W/m<sup>2</sup>, berechnet mit (3.16) und (3.20), sodass hier von einer systematischen Unterschätzung der Energieflussdichte ausgegangen werden muss (s. Abb.4.17).

Nun kann die vollständige Energie allerdings nicht abgegriffen werden, wie schon Betz 1919 herausfand („Betz’sches Gesetz“: „Eine Windkraftanlage kann höchstens 16/27 (~59 %) der kinetischen Energie des Windes in mechanische Energie umwandeln.“; (Betz, 1926)). Die Anlagen selbst wandeln sogar nur etwas unter 50 % der vorhandenen Energie um, da sie erst ab 3 m/s anfangen zu arbeiten und bei etwa 25 m/s aus Sicherheitsgründen abgestellt werden müssen. Wird dies berücksichtigt, können ca. 500 W/m<sup>2</sup> im Mittel abgegriffen werden, bei der direkt aus den Zeitreihen berechneten Energieflussdichte wäre es ca. 5 % mehr, also etwa 525 W/m<sup>2</sup>.

Anhand der Vertikalprofile der Energieflussdichte für die meteorologischen Jahre (s. Abb.4.17) ist ein fast linearer Anstieg mit der Höhe (40 – 90 m) von im Mittel 175 W/m<sup>2</sup> zu erkennen. Genau wie schon bei den vorhergehenden Vertikalprofilen ist auch hier der Abschattungseffekt zwischen 90 und 100 m zu erkennen, er beläuft sich auf bis zu 100 W/m<sup>2</sup> im Mittel, es ist somit von einem signifikanten Effekt zu sprechen. Zum Vergleich der zwei Auswerteverfahren sind in diesen Plots in blau die aus der Weibull-Verteilung berechnete Energieflussdichte eingezeichnet, rot (s. (3.19a)) und grün (s. (3.19b)) stellen die direkt aus den Zeitreihen berechneten Energieflussdichten dar. Die zweite Methode bei den Berechnungen aus den Zeitreihen ist genauer, da hier die Luftdichten auf die jeweilige Lufttemperatur bezogen worden sind. Dieser kleine Berechnungsunterschied macht sich zum Teil mit bis zu 50 W/m<sup>2</sup> bemerkbar! Das liegt in der Größenordnung des statistischen Fehlers der mittels (3.20) bestimmt worden ist.

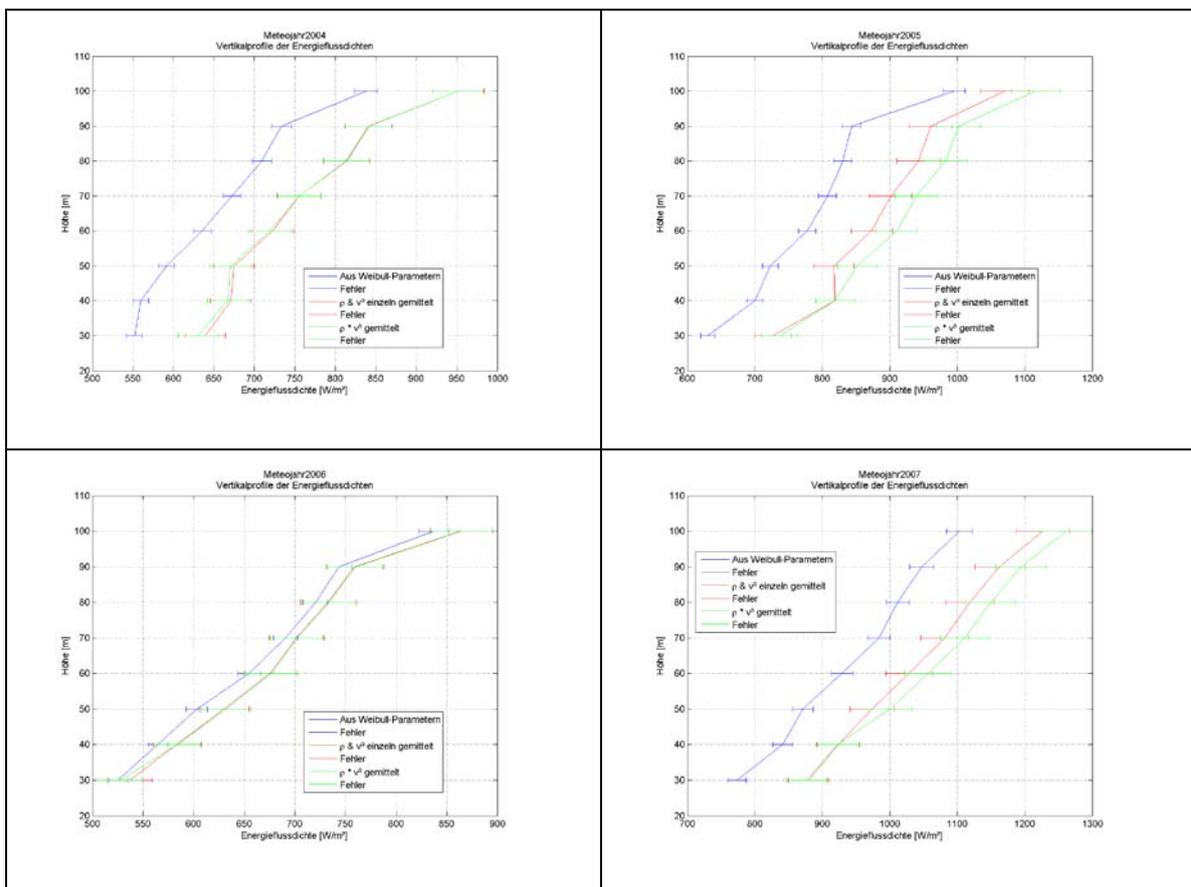


Abb.4.17: Vertikalprofile der Energieflussdichte von den meteorologischen Jahren 2004 bis 2007 (blau-Weibull-Verteilung, rot-nach Formel (3.19a), grün- nach Formel (3.19b)). Die Fehlerbalken sind individuell nach Gleichung (3.16) und (3.20) berechnet.

Die Vertikalprofile der Jahreszeiten (s. Abb.4.18) unterscheiden sich nur durch die etwas größeren Variationen von denen der Jahre, dies liegt am kleineren Datensatz. Ansonsten kann hauptsächlich die Unterschätzung der Weibull-Verteilung nachvollzogen werden, sowie anhand des Frühlings 2005 auch der Unterschied der beiden Methoden für die Berechnung aus den Zeitreihen. Der Vertikalgradient zwischen 40 und 90 m ändert sich jeweils mit der Jahreszeit, da die Energieflussdichte proportional zur dritten Potenz des Skalierungsparameters ist, verstärkt sich dieser Effekt bei der Energieflussdichte noch, die Gründe hierfür sind jedoch dieselben (s. Abschnitt 4.2.2.2).

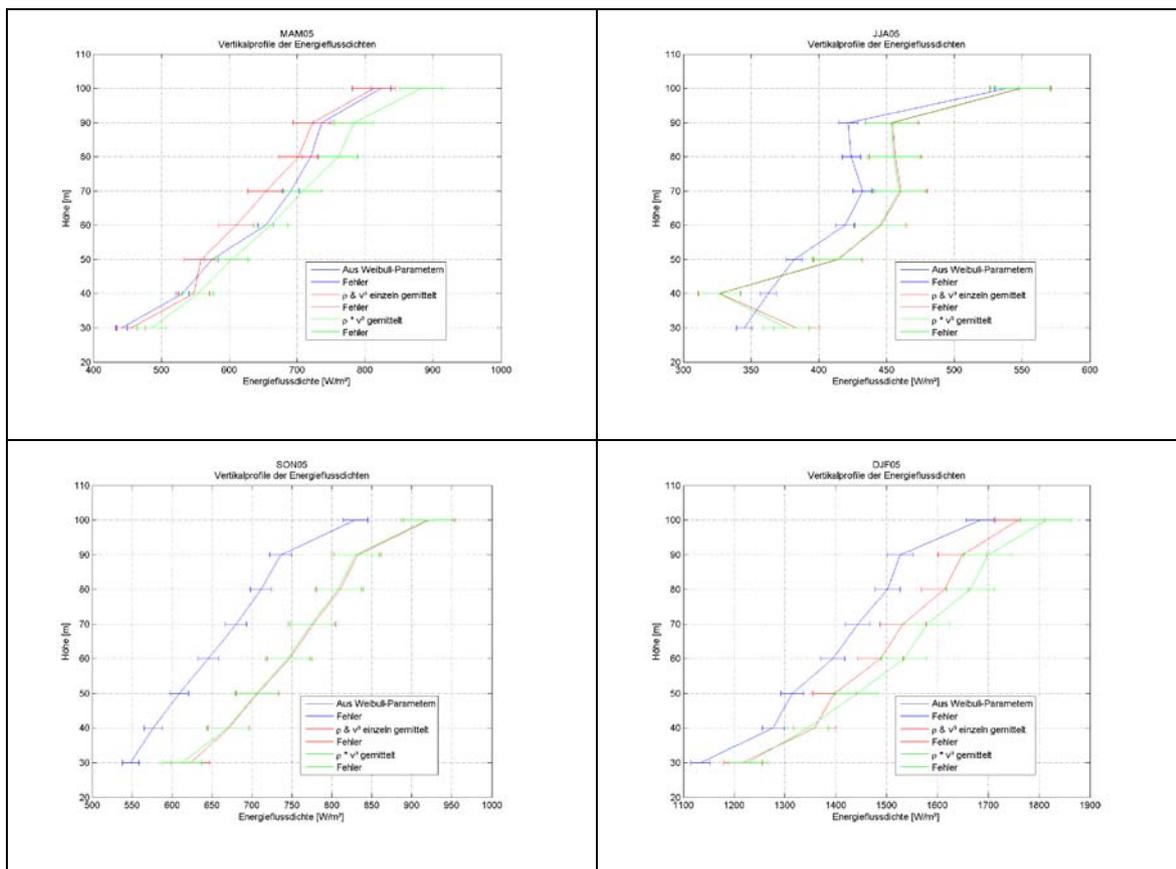


Abb.4.18: Vertikalprofile der Energieflussdichte anhand der Jahreszeiten des Jahres 2005 (links oben: Frühjahr, rechts oben: Sommer, links unten: Herbst, rechts oben: Winter). Die Fehlerbalken sind individuell nach Gleichung (3.16) und (3.20) berechnet.

Dass die Energieflussdichte ebenfalls einen Jahresgang hat (s. Abb.4.18), war nach Betrachtung des Mittelwertes der Windgeschwindigkeit und des Skalierungsparameters anzunehmen, in Tabelle 4.8 sind die Werte für die verschiedenen Jahreszeiten jeden Jahres aufgetragen. Zu erkennen ist, dass es im Sommer den geringsten Energieertrag

geben wird und im Winter den höchsten. Herbst und Frühling finden sich, wie schon bei der Analyse der Korrelation (s. Abschnitt 4.2.1) zwischen den beiden Extremen wieder. Auffällig ist allerdings, dass sich das meteorologische Jahr 2005/2006 nicht in den normalen Jahresgang mit einfügt. Zum einen ist dies durch zwei Überschätzungen der Weibull-Verteilung innerhalb des Frühlings und Sommers 2006 zu begründen, zum anderen liegt der Grund in den in diesem Jahr anhaltenden Hochdruckwetterlagen im Winter und den in großer Anzahl auftretenden Tiefdruckgebieten im Frühling 2006.

Tab.4.8: Energieflussdichte in  $W/m^2$  der Jahreszeiten innerhalb der vier Jahre auf 100 m Höhe (berechnet aus der Weibull-Verteilung).

<b>Meteorologische Jahre (Sept.-Aug.)</b>	<b>Herbst (SON)</b>	<b>Winter (DJF)</b>	<b>Frühling (MAM)</b>	<b>Sommer (JJA)</b>	<b>Jahr</b>
<b>2003/2004</b>	721,35	1381,67	782,43	593,66	869,78
<b>2004/2005</b>	1261,20	1685,01	822,95	538,69	1076,96
<b>2005/2006</b>	829,00	929,19	1131,52	453,15	835,72
<b>2006/2007</b>	1123,21	2346,73	771,72	653,33	1223,75
<b>Mittelwert</b>	983,69	1585,65	877,16	559,71	1001,55

## 5 Fazit

Die Weibull-Verteilung ist für einen längeren Zeitraum, wie ihn einzelne Jahre darstellen, eine vertretbare Approximation. Handelt es sich jedoch um kleinere Zeiträume, wie Jahreszeiten, sollte im Blick behalten werden, ob die Approximation im Toleranzbereich liegt. Einzelne Monate sind hingegen zu oft nicht weibullverteilt, sodass die Berechnung von Mittelwert und verfügbarer Energie direkt aus den Zeitreihen sehr wahrscheinlich die bessere Lösung wäre. Werden allerdings einzelne Monate über mehrere Jahre gemittelt, dann sollten durch die Variabilität der Jahre auch in einem solch begrenzten Zeitraum die Windgeschwindigkeiten weibullverteilt sein.

Die Analyse des Form- und Skalierungsparameters ergab eine Abhängigkeit von den Jahreszeiten auf Grund der Höhe der Windgeschwindigkeiten und der thermischen Stabilität der Schichten in der marinen Atmosphäre. Im Vergleich zum Land wurde die Vermutung bestätigt, dass die Prandtl-Schicht in der marinen Atmosphäre eine geringere Dicke aufweist, die ihrerseits die Windgeschwindigkeiten und vor allem die Vertikalprofile beeinflusst. Es bleibt aber abzuwarten, welcher der beiden Parameter (Stabilität oder Windgeschwindigkeit) den höheren Einfluss auf die Vertikalprofile hat. Die Dicke der Prandtl-Schicht ist auch die Grundlage für die Wahl der Nabenhöhe von etwa 100 m für die Offshore Windkraftanlagen in der Nordsee. Wie in der Abschnitt 4.2.2 herausgefunden wurde, liegt diese Höhe zumeist in der Ekman-Schicht, hat also keinen großen Vertikalgradienten mehr, sodass eine noch höhere Nabenhöhe sehr wahrscheinlich weniger Mehrertrag an Energie bringen, als sie Kosten, durch die größere Bauhöhe, verursachen würde.

Mittels des Korrelationsplots konnten allgemeine Intervalle für die Parameter festgelegt ( $7 < a < 13$  m/s,  $1,75 < b < 3,25$ ), sowie ein wahrscheinlicher Bereich für die Jahreszeiten ermittelt werden (s. Abb. 4.9). Im Sommer kommt es zu den kleinsten Skalierungsparametern und der geringsten Variabilität des Formparameters, im Winter sind hingegen die größten Skalierungsparameter, sowie die höchste Variabilität des Formparameters aufgetreten. Frühjahr und Herbst siedeln sich zwischen diesen beiden Extremen an. Jedoch ist die Korrelation der Weibull-Parameter nicht so stark, dass man ohne eine zugehörige Windverteilung kennen zu müssen, den einen aus dem anderen Parameter berechnen könnte.

Innerhalb der Betrachtungen des Vertikalverhaltens der Energieflussdichten wurde ebenfalls eine jahreszeitliche Abhängigkeit analysiert, die ihren Ursprung in dem Verhalten des Skalierungsparameters bzw. der mittleren Windgeschwindigkeit mit der Höhe hat. Zudem konnte ein fast linearer Anstieg mit der Höhe analysiert werden, jedoch unterschätzte die Weibull-Verteilung zum größten Teil die Energieflussdichten in jeder Höhe. So machen sich kleinere Abweichungen von bis zu 4 % im Skalierungsparameter schon mit über 10 % innerhalb der Energieflussdichte bemerkbar. Dies offenbarte der Vergleich der beiden Auswertemethoden und geht schon aus der dritten Potenz in den Formeln für die Energieflussdichte hervor. Diese systematische Unterschätzung der Weibull-Verteilung wird im Ingenieurwesen als eine „sehr konservative Abschätzung“ bezeichnet, da somit kein Standort als rentabel ausgewiesen wird, der es nicht auch wirklich ist.

## 6 Ausblick

Um die in dieser Arbeit erlangten Erkenntnisse und Hypothesen bestätigen zu können, müssten weitere Datensätze auf dieselbe Art und Weise untersucht werden, da dieser Arbeit nur ein Datensatz von vier Jahren zu Grunde liegt. Vor allem im Bereich der Monatsanalyse würden sich dann vermutlich noch weitere Erkenntnisse ergeben, deren genauere Analyse innerhalb dieser Arbeit keinen Sinn gemacht hätte. Zudem könnten Gründe für Ausreißermonate gefunden werden und somit eine bessere Verknüpfung zu den synoptischen Hintergründen hergestellt werden.

Außerdem wäre eine genauere Verbindung im Zusammenhang mit den Stabilitätsanalysen der marinen Atmosphäre und somit mit den Wasser- und Lufttemperaturen innerhalb der vorherrschenden Wetterlagen der verschiedenen Jahreszeiten sehr aufschlussreich, weil mittels dieser Schwankungen in verschiedenen Jahreszeiten erklärt werden könnten. Ferner bedarf es einer genaueren Bestimmung der Höhe der Prandtl-Schicht, um den Einfluss von Windgeschwindigkeit und thermischer Stabilität der Atmosphäre auf die Vertikalprofile noch genauer verifizieren zu können.

Weiterhin wäre es interessant, andere Standorte zum Vergleich heranzuziehen, da sich die Frage stellt, ob das Verhalten der Parameter an anderen Standorten Ähnlichkeiten aufweist und welche Einflüsse hierzu beitragen. Es könnte nämlich sein, dass noch andere Faktoren, außer der thermische Stabilität und der Windgeschwindigkeit selbst, zu einer solchen Korrelation der Parameter beitragen. Hierzu sollte auch eine Häufigkeitsanalyse des Auftretens von verschiedenen Wetterlagen gemacht werden, um eine Korrelation bei spezifischen Wetterlagen zu erstellen, sodass man über die Kenntnis der Häufigkeiten von spezifischen Wetterlagen eines Standortes einen Rückschluss auf den ungefähren Energieertrag ziehen kann.

## Literaturverzeichnis

Beeken, A., & Neumann, T. (2008). Five Years of Offshore Measurements at the Fino1 Platform in the German Bight. *DEWI-Magazin* (33), S. 6-11.

Betz, A. (1926). *Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Göttingen: Vandenhoeck&Ruprecht, 64 S.

Bronstein, L., & Semendjajew, K. (1975). *Taschenbuch der Mathematik* (15. Ausg.). Zürich + Frankfurt/Main: Harri Deutsch, 585 S.

Coelingh, J., van Wijk, A., & Holtslag, A. (1996). Analysis of wind speed observation over the North Sea. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (61), S. 51-69.

Emeis, S. (2001). Vertical variation of frequency distributions of wind speed in and above the surface layer observed by sodar. *Meteorologische Zeitschrift* (10), S. 141-149.

Heyer, E. (1984). *Witterung und Klima (Allgemeine Klimatologie)* (7. Ausg.). Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft, 344 S.

Lange, B., Larsen, S., Højstrup, J., & Barthelmie, R. (2004). Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (92), S. 959-988.

Neumann, T., & Nolopp, K. (2007). Three Years Operation of Far Offshore Measurements at FINO1. *DEWI Magazin* (30), S. 42-46.

Neumann, T., & Riedel, V. (2006). FINO 1 Platform: Update of the Offshore Wind Statistics. *DEWI-Magazin* (28), S. 60.

Neumann, T., Nolopp, K., & Herklotz, K. (2004). First Operating Experience with the FINO1 Research Platform. *DEWI-Magazin* (24), S. 27-34.

Neumann, T., Nolopp, K., & Herklotz, K. (2004). First Operating Experience with the FINO1 Research Platform. *DEWI-Magazin* (24), pp. 27-34.

Riedel, V., Durante, F., Neumann, T., & Strack, M. (2005). Das erste Messjahr auf der FINO1-Plattform in der Nordsee - Auswertung und Analyse des Windprofils und Abschätzung des statistischen Langzeitmittels. *DEWI-Magazin* (26), S. 37-48.

Troen, I., & Petersen, E. (1989). *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark: ISBN 87-550-1482-8, 656 S., (s. [www.windatlas.de](http://www.windatlas.de)).

Türk, M. (2008). Ermittlung designrelevanter Belastungsparameter für Offshore-Windkraftanlagen. Universität zu Köln: Doktorarbeit, 126 S.

Wieringa, J. (1989). Shapes of annual frequency distributions of wind speed observed on high meteorological masts. *Boundary-Layer Meteorology* (47), S. 85-110.

Wilker, H. (2004). *Weibull-Statistik in der Praxis - Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Produkte* (Bd. 3). Norderstedt: Books on Demand GmbH, 330 S.

## Eidesstattliche Erklärung

„Hiermit versichere ich, Meike Bilstein, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, mich keiner anderen Literatur oder Quellen außer den angegebenen bedient, sowie Zitate oder die Übernahme von annähernd wörtlichen Stellen aus Veröffentlichungen kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat in dieser oder ähnlicher Form noch keinem anderen Prüfungsamt vorgelegen.“

Köln, den 10.10.2009

---

Meike Bilstein



## Danksagung

In erster Linie möchte ich den Betreuern für die Vergabe des Themas und der Betreuung bei der Anfertigung der Arbeit danken. Sie haben mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden und sich auf manche Diskussion eingelassen.

Außerdem gilt mein Dank dem Forschungszentrum Karlsruhe für die zweimonatige Anstellung und die Bereitstellung des Arbeitsplatzes in Garmisch-Partenkirchen. Dies konnte durch die Finanzierung durch die Forsknings- og Innovationsstyrelsen im dänischen Ministeriet for Videnskab, Teknologi og Udvikling unter der Sagsnr 2104-08-0025 im Rahmen des Projekts: „Large wind turbines – the wind profile up to 400 m“ ermöglicht werden.

Zudem danke ich dem Deutschen Windenergie-Institut in Wilhelmshaven für die Bereitstellung der FINO1-Daten, ohne die diese Bachelorarbeit nicht zustande gekommen wäre.

Zum Schluss möchte ich meiner Familie danken, die es mir überhaupt erst möglich gemacht hat für diesen Zeitraum in Garmisch-Partenkirchen zu wohnen und mir vor allem das vorangegangene Studium finanziert hat.