

---

**KFKI-VERBUNDPROJEKT**  
Modellgestützte Untersuchungen zu extremen  
Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)

**TEILVORHABEN**  
Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer  
Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der Ostsee (SEBOK A)



ABSCHLUSSBERICHT 2.1

**Windfelder für SEBOK**

Autoren	Anette Ganske, Gudrun Rosenhagen, Heiner Schmidt
Institut	Deutscher Wetterdienst (DWD), Hamburg
Bearbeitungszeitraum	01.07.2005 – 30.11.2007
Fördernummer	BMBF 03KIS053 / KFKI 85
Datum	30.11.2007
Version	1.0

Zitierhinweis: Ganske, A., Rosenhagen, R. und Schmidt, H. (2007): Windfelder für SEBOK, Abschlussbericht 2.1 zum KFKI-Verbundprojekt *Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)*, Hamburg

---

Das Verbundprojekt wurde gefördert von:



KFKI-Projekt MUSTOK

# **Windfelder für SEBOK**

Fördernummer KFKI 84 – 86

A. Ganske, G. Rosenhagen und H. Schmidt

Deutscher Wetterdienst Hamburg

November 2007

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Berechnung von Windfeldern.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Das Windmodell MKW.....</b>	<b>4</b>
2.1.1 Das Initial-Windfeld .....	4
2.1.2 Rauigkeiten über See .....	5
2.1.3 Das divergenzfreie Windfeld.....	5
<b>2.2 Nesten der Windfelder.....</b>	<b>6</b>
2.2.1 Windatlas .....	6
2.2.1 Sturmflut-Szenarien.....	6
<b>3. Windatlas.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Eingangsgrößen .....</b>	<b>7</b>
3.1.1 Windgeschwindigkeit .....	7
3.1.1.1 Wertebereich .....	7
3.1.1.2 Klassenbreite .....	8
3.1.2 Windrichtung.....	8
3.1.3 Wasserstand.....	8
3.1.3.1 Wertebereich .....	9
3.1.3.2 Klassenbreite .....	9
3.1.4 Anzahl der Windfelder.....	11
<b>3.2. Anwendung .....</b>	<b>11</b>
3.2.1. Wahl der Eingabewerte .....	13
3.2.2. Geeignete Messstationen .....	14
<b>3.3. Verifikation der Windatlas-Ergebnisse .....</b>	<b>15</b>
3.3.1. Gebiet Kiel .....	16
3.3.2. Gebiet Mecklenburg .....	18
3.3.3. Gebiet Warnemünde.....	19
3.3.4. Gebiet Rügen .....	21
3.3.5. Gebiet Pommersche Bucht.....	23
<b>3.4. Zusammenfassung.....</b>	<b>25</b>
<b>4. Berechnung von hoch aufgelösten Windfeldern bei Sturmflutwetterlagen .....</b>	<b>27</b>
4.1 Erwartungen.....	27
4.2 Windfelder in der Mecklenburger Bucht.....	27
4.2.1 Fehmarn.....	28
4.2.2 Dahme .....	29
4.3 Das Windfeld im Untersuchungsgebiet Probstei in der Kieler Bucht.....	31
4.4 Zusammenfassung .....	32
<b>5. Literatur .....</b>	<b>33</b>
<b>6. Danksagung .....</b>	<b>33</b>

## 1. Einleitung

Für viele Untersuchungen im Bereich des Küsteningenieurwesens und des Küstenschutzes werden für lange Zeiträume räumlich hoch aufgelöste Windfelder für See- und in Küstengebieten benötigt. Derartige Windfelder liegen bisher jedoch meist nur in einer groben Auflösung vor, wie z.B. die Windfelder des Wettervorhersagemodells COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes (Auflösung rund 7 km, siehe Doms und Schättler, 1999) oder die des HIPO-CAS-Projekts (Auflösung rund 50 km, siehe Weiss et al., 2003). Die erforderlichen Reihen müssen deshalb speziell berechnet werden. Hierzu bietet sich das sogenannte Windatlasverfahren an.

Solche Windatlanten für die Ostsee wurden bereits für die Region um Darss und Zingst von Hinneburg, Raabe und Tetzlaff (1997) und für den Greifswalder Bodden von Rudolph und Gayer (1995) bestimmt. Da diese Windatlanten jedoch nicht alle für das Projekt relevanten Untersuchungsgebiete abdecken, war die Berechnung eines neuen, bedarfsgerechten Windatlas erforderlich.

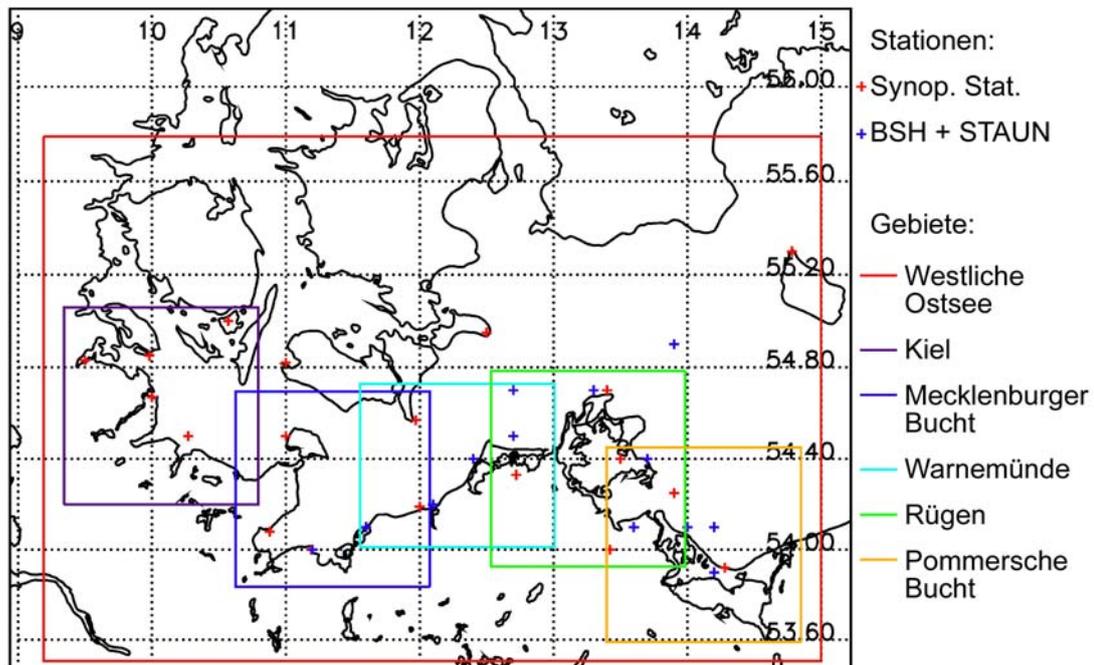
Für das Teilprojekt SEBOK (Seegangsbelastung Ostsee - Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgeblicher Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen) des Projekts MUSTOK (Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste) des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) werden sowohl räumlich hoch aufgelöste Windfelder für ausgewählte Sturmflutwetterlagen als auch lange Zeitreihen von hoch aufgelösten Windfeldern für statistische Untersuchungen benötigt.

Im Rahmen des KFKI-Projekts MOSES (Modellierungen des mittelfristigen Seegangsklimas im Nordseeküstengebiet) wurde in der Abteilung Seeschifffahrt des Deutschen Wetterdienstes in Hamburg bereits ein digitaler Windatlas für die südliche Nordsee berechnet, siehe Ganske, Rosenhagen und Schmidt (2006). Dieser Windatlas liefert für das Nordseeküstengebiet hoch aufgelöste Windfelder für statistische Untersuchungen mit Seegangs- und Strömungsmodellen und hat sich in seiner Anwendung bewährt. Deshalb wurde beschlossen, in gleicher Weise innerhalb von MUSTOK einen Windatlas für die deutsche Ostseeküste zu erstellen. Die Anforderungen an die Lage der Untersuchungsgebiete (siehe Abbildung 1.1) und die Genauigkeit der Windfelder wurden von den Projektpartnern von den Universitäten Kiel und Rostock vorgegeben.

Da im Bereich der deutschen Küsten die örtlichen Unterschiede im Wind im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Rauigkeitsverhältnisse der Erdoberfläche und der Seeoberfläche bestimmt sind, reicht zur Berechnung der Windfelder das Windmodell MKW (Massenkonsistentes Windmodell) des Seewetteramts Hamburg, ein einfaches, diagnostisches Atmosphärenmodell aus. Dieses hat sich bereits bei ähnlichen Problemstellungen in verschiedenen Untersuchungen bewährt, siehe z.B. (Schmidt und Pätsch, 1992). Zur Berechnung der räumlich hoch aufgelösten Windfelder bei ausgewählten Sturmflutwetterlagen wurden als Randwerte für das MKW die Daten von Windfeldern des Modells COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes verwendet.

Der Windatlas besteht aus einer Vielzahl von mit dem MKW berechneten Feldern der Windgeschwindigkeit, die durch systematische Variation der antreibenden Windgeschwindigkeit und der Windrichtung in 800 m Höhe unter Berücksichtigung der Land-/Seeverteilung und der zugehörigen Bodenrauigkeit sowie repräsentativen Wasserständen berechnet wurden. Dabei wurde die mit der Windgeschwindigkeit wachsende Rauigkeit der Meeresoberfläche approximativ aus einem Gleichgewicht zwischen dem Windfeld und dem Rauigkeitsfeld bestimmt, während die Rauigkeit der Landoberflächen als zeitlich konstant angenommen werden kann.

Zur Anwendung des Windatlas gibt man für eine frei wählbare Position in einem der drei Untersuchungsgebiete als Eingangsgrößen Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung in 10 m Höhe und ein zugehöriger repräsentativer Wasserstand vor. Ein Interpolationsprogramm berechnet aus diesen Eingangswerten für das gewählte Windatlas-Gebiet das zugehörige meteorologisch konsistente Windfeld.



**Abb. 1.1:** Das Untersuchungsgebiet Westliche Ostsee mit den Teilgebieten Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht. Die roten Kreuze bezeichnen die an den Küsten liegenden synoptischen Stationen des Deutschen, Dänischen und Schwedischen Wetterdienstes, die blauen Kreuze die Orte der Stationen des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und des Staatlichen Amtes für Umwelt und Naturschutz (STAUN).

Der Abschlussbericht erläutert zunächst kurz das Windmodell MKW. Danach gibt er einen Überblick über die Wertebereiche und Klassenbreiten, die zur Berechnung der Felder des Windatlas verwendet wurden, um mit genügender Genauigkeit die für Seegang- und Strömungsberechnungen benötigten Windfelder interpolieren zu können. Es folgt für jedes der fünf Teilgebiete ein statistischer Vergleich zwischen Windatlas-Ergebnissen und Messungen. Hieraus werden Empfehlungen für geeignete Eingangsgrößen für die Windatlas-Rechnungen abgeleitet.

Schließlich werden die Ergebnisse von Untersuchungen für ausgewählte Sturmflutwetterlagen vorgestellt. An Hand von Beispielen wird gezeigt, wie sich für mit COSMO-EU erzeugte Windfelder mit dem MKW hoch aufgelöste Windfelder für die Teilgebiete bestimmen lassen und in welchen Fällen dies sinnvoll ist.

## 2. Berechnung von Windfeldern

Alle Felder der Windgeschwindigkeit wurden mit dem Windmodell MKW (**M**assen**k**onsistentes **W**indmodell) bestimmt. Das statische (nicht zeitabhängige) Modell wurde aus dem NOAA Atmospheric Boundary Layer Model (NOABL: Sherman, 1976 und Traci, 1978) vom DWD weiterentwickelt und bereits in mehreren Projekten erfolgreich verwendet, um Windfelder in Küstennähe zu berechnen, siehe (Ganske, Rosenhagen und Schmidt, 2006), (Schmidt et al., 1994), (Schmidt und Pätsch, 1992), sowie (Füg und Schmidt, 2001).

### 2.1 Das Windmodell MKW

Das Windmodell MKW besteht aus zwei Teilen, wobei im ersten ein sogenanntes Initial-Windfeld berechnet wird, das durch den zweiten Teil in ein divergenzfreies, massenkonsistentes Windfeld umgewandelt wird. Das MKW weist ein dreidimensionales Rechengitter auf, das in der Horizontalen gleichabständig ist. Die geländefolgende vertikale Koordinate hat dagegen mit der Höhe wachsende Gitterabstände. Eine ausführliche Beschreibung des MKW findet man in Ganske, Rosenhagen und Schmidt, 2006.

#### 2.1.1 Das Initial-Windfeld

Beim Initialisierungsverfahren wird für jeden Gitterpunkt die Topographie und die Oberflächenrauigkeit vorgegeben, wobei die Topographiedaten aus dem IOW-Datensatz (Seifert et al. 2001) interpoliert wurden. Weiter muss ein Referenzwert für die Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Modelloberrand in 800 m (Windatlas) bzw. 300 m (Sturmflut-Windfelder) Höhe vorgegeben werden. Meteorologisch gesehen ist dies gleich mit der Annahme, dass dort ein konstanter geostrophischer Wind herrscht und dass damit der Gradient des Luftdrucks innerhalb des vorgegebenen Gebiets in guter Näherung konstant ist. In der Natur ist dies meist nur über kleinen Gebieten gegeben.

Unter der Voraussetzung eines homogenen Rauigkeitsfeldes mit entsprechenden Randbedingungen stellt sich in der bodennahen Luftschicht (über See in den unteren 800 m) näherungsweise ein logarithmisches Windprofil ein:

$$\frac{u(z_1)}{u(z_2)} = \frac{\ln(z_1) - \ln(z_0)}{\ln(z_2) - \ln(z_0)} \quad (1)$$

Dabei sind  $z_1$  und  $z_2$  zwei beliebige Höhen innerhalb der Grenzschicht und  $z_0$  ist die sogenannte Rauigkeitslänge, die über Land an jedem Gitterpunkt anhand der GLC2000 Landnutzungsdaten (Europäische Kommission, 2000) bestimmt wurden. Hierbei wird angenommen, dass sich die Windrichtung nicht mit der Höhe ändert. Die Berechnung von Rauigkeiten über See wird im folgenden Unterkapitel näher erläutert.

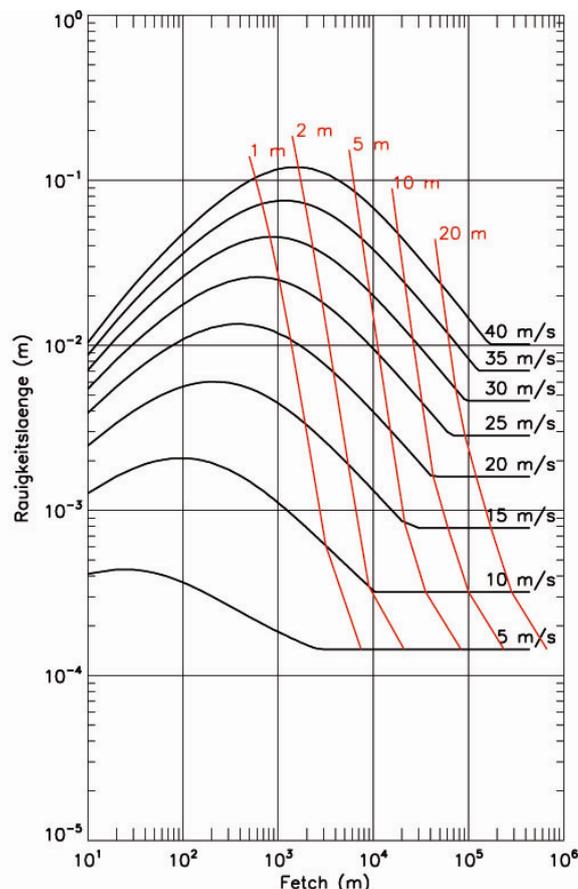
Das logarithmische Windprofil ist nur innerhalb der unteren 80 - 100 m (Prandtl-Schicht) gültig, da hier die Drehung des Windes mit der Höhe auf Grund der Corioliskraft vernachlässigt werden kann. Da bei diesem Projekt nur die Windrichtungen und -geschwindigkeiten in 10 m Höhe über Grund bzw. NN berechnet werden, kann die vertikale Änderung der Windrichtung vernachlässigt werden. Die vertikale Änderung der Windgeschwindigkeit oberhalb der Prandtl-Schicht wird durch das logarithmische Profil mit genügender Genauigkeit wiedergegeben.

Die Berechnung des dreidimensionalen Windfeldes wird auf eine quasi-Lagrange Weise approximativ vorgenommen, indem der Wind, der auf der luvseitigen Berandung in ein Gitterelement einströmt, durch die zwischen den benachbarten Gitterelementen wechselnde Bodenrauigkeit strömungsfolgend modifiziert wird. Damit kann in erster Näherung die Bildung von internen Grenzschichten, z.B. bei der Überströmung von glattem Untergrund auf raueren Untergrund, beschrieben werden.

### 2.1.2 Rauigkeiten über See

Über Land sind die Rauigkeitslängen  $z_0$  zeitlich konstant und hängen von der Landnutzung ab. Über See sind die Rauigkeiten eine Funktion der Wellenhöhe und des Wellenalters, die wiederum von der Windgeschwindigkeit, dem Fetch und der Wassertiefe abhängen.

Das Gleichgewicht zwischen Wind- und Wellenfeld lässt sich in einem iterativen Prozess berechnen, siehe im Anhang von Ganske, Rosenhagen und Schmidt, 2006. Die daraus bestimmten Rauigkeitslängen in Abhängigkeit vom Fetch bei vorgegebenen Windgeschwindigkeiten sind in Abbildung 2.1 gezeigt. Dabei begrenzen die rot eingezeichneten Wassertiefen die Rauigkeiten auch bei weiter wachsendem Fetch. Die konstanten Werte der Rauigkeitslänge bei sehr großem Fetch entsprechen den nach Charnock berechneten Werten für Rauigkeitslängen.



**Abb. 2.1:** Rauigkeitslänge der Seeoberfläche als approximative Funktion der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und des Fetches, begrenzt durch die Wassertiefe (rote Linien). Die konstanten Werte der Rauigkeitslänge bei sehr großem Fetch entsprechen den nach Charnock berechneten Werten für Rauigkeitslängen.

### 2.1.3 Das divergenzfreie Windfeld

Im zweiten Programmteil des MKW wird aus dem Initial-Windfeld das massenkonsistente (divergenzfreie) Windfeld berechnet. Das Feld wird iterativ so lange modifiziert, bis in jedem Volumenelement ebensoviel Luft ein- wie ausströmt und dabei gleichzeitig die Unterschiede zum Initial-Windfeld minimal bleiben. Die dazu erforderliche Lösung einer Poisson-Differentialgleichung wird mit einem Mehrgitterverfahren vorgenommen. Durch diesen Potentialströmungsausgleich ergeben sich auch Effekte wie seitliche Umströmung von Hindernissen, die Strömungsüberhöhung über Kuppen sowie Vorstau- und Leeeffekte. Rauere Gebiete in einer aerodynamisch glatten Umgebung wirken ähnlich wie orographische Hindernisse.

## **2.2 Nesten der Windfelder**

Durch eine sogenannte Nestversion des Modells MKW ist es möglich, hoch aufgelöste Windfelder zu berechnen, an deren Rändern Werte eines gröber aufgelösten Windfeldes vorgegeben werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Windfelder der Teilgebiete in geringerem Maße von numerischen Randeinflüssen gestört sind, als dies ohne das Nesten (Einbetten) der Fall wäre.

### **2.2.1 Windatlas**

Für den Windatlas wird zuerst eine Vielzahl von Feldern der Windgeschwindigkeit für das Gebiet Westliche Ostsee auf einem Gitter mit einer Maschenweite von 1000 m bestimmt. Die in diesem Gebiet berechneten Windwerte werden verwendet als Randwerte der Windfelder am luvseitigen Rand der höher aufgelösten Windfelder der Teilgebiete Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht (Maschenweite 250 m), deren geographische Lage in Abb. 1.1 zu sehen ist. Zusätzlich werden an den Rändern die Rauigkeiten und Fetchlängen des Gebiets Westliche Ostsee als Randwerte zur Berechnung der Rauigkeiten im genesteten Gebiet vorgegeben.

Die Gebiete Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht werden so festgelegt, dass sie einerseits zusammen die Deutsche Ostseeküste abdecken und dass andererseits die Untersuchungsgebiete der Projektpartner von den Universitäten Kiel und Rostock darin enthalten sind und nicht am Rand eines Gebiets liegen.

### **2.2.2 Sturmflut-Szenarien**

Für die Sturmflut-Szenarien wird eine Version des MKW verwendet, bei der der Oberrand des Modells in 300 m Höhe über Grund liegt. Als Randwerte für das MKW werden Windgeschwindigkeiten in allen Modellhöhen des COSMO\_EU bis einschließlich 300 m Höhe benutzt. COSMO-EU ist das operationelle Vorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes und wird auf einem Gitter mit einer Maschenweite von rund 7 km berechnet. Um die Windfelder des COSMO-EU als Randwerte für das MKW verwenden zu können, müssen sie sowohl horizontal als auch vertikal auf das Gitter des MKW interpoliert werden.

Die hoch aufgelösten Sturmflutwindfelder sollen für Gebiete mit einer maximalen Erstreckung von 40 km \* 40 km bestimmt werden. Um für spätere Rechnungen flexibel die Teilgebiete wählen zu können, werden die COSMO-EU -Windfelder zuerst auf die Gitter aller 5 Teilgebiete interpoliert, die für die Windatlas-Rechnungen in der westlichen Ostsee definiert wurden. Für diese Gebiete liegen die benötigten Topographien und Rauigkeiten auf Gittern mit Maschenweiten von 250 m vor.

Aus dem auf die Windatlas-Gebiete interpolierten COSMO-EU -Windfeld wird dann ein Windfeld in einem Teilgebiet der Größe 40 km \* 40 km ausgeschnitten. In 300 m Höhe wird aus diesem Windfeld eine mittlere Windgeschwindigkeit berechnet, und in 10 m Höhe eine mittlere Windrichtung. Mit dem MKW wird anschließend ein neues Windfeld berechnet, das in 300 m Höhe ein konstantes Windfeld mit diesen Mittelwerten besitzt und bei dem an den luvseitigen Rändern die Windgeschwindigkeiten in allen Höhen gleich den Werten der aus dem COSMO-EU interpolierten Windgeschwindigkeiten sind. Die Windrichtung ist dabei in allen Höhen im gesamten Gebiet gleich der vorgegebenen Windrichtung.

## 3. Windatlas

### 3.1 Eingangsgrößen

Die Berechnung der Windfelder des Windatlas erfordert als Eingangsgrößen je einen Wasserstand sowie am Modelloberrand eine Windgeschwindigkeit und eine Windrichtung. Um für anschließende Seegangs- und Strömungsberechnungen jedes gewünschte Windfeld mit genügender Genauigkeit interpolieren zu können, mussten die Klassenbreiten und Wertebereiche zur Berechnung der Felder entsprechend gewählt werden. Die Wertebereiche und Klassenbreiten dieser Größen lassen sich weitestgehend durch physikalische Überlegungen und durch gemessene Extremwerte einschränken bzw. festlegen. Die gewählten Klassenbreiten und Wertebereiche werden im folgenden Kapitel diskutiert.

#### 3.1.1 Windgeschwindigkeit

Das Windmodell benötigt zur Berechnung der Windfelder Angaben des Windes am Modelloberrand in 800 m Höhe. Für die praktische Anwendung des Windatlas werden jedoch die Wertebereiche in 10 m Höhe über Grund bzw. NN festgelegt, da nur in dieser Höhe die Windfelder für die anschließenden Modelle der Küstenforschung gebraucht werden. Bei der Umsetzung des Wertebereichs für die Windgeschwindigkeit am Modelloberrand aus den Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über NN besteht das Problem, dass in dieser Höhe die berechneten Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Gebieten stark variieren. Deshalb wurde ein Referenzpunkt in der Nähe der Darsser Schwelle und eine Referenzwindrichtung von 90 Grad (Ost) gewählt. Für diesen Referenzpunkt werden dann aus den 10 m-Windwerten die am Modelloberrand entsprechenden Windgeschwindigkeiten bestimmt.

Bei der Berechnung der Windfelder wurde eine neutrale thermische Schichtung der Atmosphäre vorausgesetzt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten ist die bodennahe Grenzschicht der Atmosphäre gut durchmischt und damit die Voraussetzung der thermisch neutralen Schichtung meist erfüllt. Dies gilt jedoch nicht für geringe Windgeschwindigkeiten, weshalb die berechneten Windfelder in diesen Fällen stark von den tatsächlichen Windfeldern abweichen können. Dadurch ergibt sich bereits, dass der Wertebereich der Windgeschwindigkeit eingeschränkt werden sollte.

##### 3.1.1.1 Wertebereich

Der Wertebereich für die Eingangswindgeschwindigkeiten unterliegt folgenden Einschränkungen:

- Erfahrungen haben gezeigt, dass Stundenmittel der Windgeschwindigkeiten größer 35 m/s (Windstärke 12 Bft) im Gebiet der westlichen Ostsee bisher nicht gemessen wurden.
- Die Voraussetzungen zur Berechnung der Rauigkeit über See sind bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten nicht mehr erfüllt.
- Bei geringen Windgeschwindigkeiten kann keine neutrale Schichtung der atmosphärischen Grenzschicht vorausgesetzt werden.

Wir wählten deshalb für die Windgeschwindigkeiten  $u$  in 10 m Höhe über See einen Wertebereich zwischen 10 m/s und 35 m/s. Am Modelloberrand entspricht dies einem Wertebereich zwischen 15 m/s und 60 m/s.

Wird ein Ausgangsergebnis für eine Windgeschwindigkeit kleiner 10 m/s benötigt, weil z.B. innerhalb einer vorgegebenen Zeitreihe Werte kleiner 10 m/s auftreten, so ist eine Interpolation vorgesehen zwischen dem Windfeld bei 10 m/s und dem Feld bei 0 m/s, wo alle Windgeschwindigkeiten gleich Null sind. Windfelder, die für Eingangswindgeschwindigkeiten größer 35 m/s bestimmt werden sollen, werden extrapoliert.

### 3.1.1.2 Klassenbreite

Als Klassenbreite der Windgeschwindigkeit  $u_{10}$  in 10 m Höhe über Grund, mit der die Windfelder berechnet werden, wurde 5 m/s gewählt. Mit dieser Klassenbreite kann i. A. eine lineare Interpolation zwischen zwei Windfeldern erfolgen.

Bei Gitterpunkten über Land ist eine solche Interpolation ohne weiteres möglich. Dort wird die Geschwindigkeit  $u$  in der Höhe  $z_1$  berechnet aus der am Modelloberrand in Höhe  $z_2=800$  m vorgegebenen Windgeschwindigkeit  $u$  mit Hilfe des logarithmischen Windprofils

$$u(z_1) = u(z_2) \frac{\ln(z_1) - \ln(z_0)}{\ln(z_2) - \ln(z_0)} \quad (2),$$

wobei  $z_0$  die sogenannte Rauigkeitslänge ist. Damit ändert sich die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe linear mit der Windgeschwindigkeit am oberen Modellrand.

An Gitterpunkten innerhalb des Seegebietes wechselwirken Windgeschwindigkeit und Rauigkeitsfeld, da die Rauigkeit von der Wellenhöhe und dem Wellenalter abhängt, die eine nichtlineare Funktion der Windgeschwindigkeit, des Fetches und der Wassertiefe sind. Dabei wird jegliche Dünung vernachlässigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch an Gitterpunkten über See die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe bei deutlicher Erhöhung der Windgeschwindigkeit am Modelloberrand (z.B. um 5 m/s) anwachsen.

Bestimmt man zwischen 10 m/s und 35 m/s entsprechend der Klassenbreite aus den Werten der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe am Referenzpunkt die Werte der Windgeschwindigkeit am Modelloberrand, so erhält man die Werte 15 m/s, 22 m/s, 30 m/s, 40 m/s, 50 m/s und 60 m/s.

### 3.1.2 Windrichtung

Eine Drehung der Windrichtung mit der Höhe wird bei der Initialisierung der Windfelder mit dem Windmodell MKW nicht berücksichtigt. Die am Modelloberrand vorgegebene Windrichtung ist identisch mit der Windrichtung in 10 m Höhe und wird erst bei der Berechnung der divergenzfreien Windfelder geringfügig verändert. Frühere Projekte (z.B. Ganske, Rosenhagen und Schmidt, 2006 oder Füg und Schmidt, 2001) haben gezeigt, dass sich die mit dem Windmodell MKW berechnete Windrichtung in 10 m Höhe nur um wenige Grad ( $< 5$  Grad) von der vorgegebenen Windrichtung am Modelloberrand unterscheidet und dass man im Rahmen der Genauigkeit der berechneten Windfelder diese Änderungen vernachlässigen kann. Deshalb werden die Windrichtungen in 10 m Höhe mit der vorgegebenen Windrichtung gleichgesetzt und nicht an jedem Gitterpunkt ausgegeben.

Die Windrichtungsintervalle beginnen bei 11.25 Grad und haben eine Breite von 22.5 Grad. Die Intervallmitten stimmen mit den in der Meteorologie verwendeten Windrichtungen der 16-teiligen Windrose (NNO, NO, ONO, ... NNW, N) überein, wobei NNO=22.5 Grad, N=360 Grad sind.

### 3.1.3 Wasserstand

Eine Berücksichtigung des Wasserstandes bei der Berechnung der Windfelder ist nötig, da die Wassertiefe einen Einfluss auf die Rauigkeit der Meeresoberfläche hat. Für seichtes Wasser erfolgt ein Brechen von Wellen und damit eine Erhöhung der Rauigkeit im Vergleich zu Wellen im tiefen Wasser.

Der Wasserstand kann bei den Rechnungen für den Windatlas nur an den Gitterpunkten verändert werden, die mit Hilfe einer sogenannten Land-See-Maske als See-Gitterpunkte definiert sind. Die Grenzen zum Land der vorgegebenen Seegebiete fallen mit den Deichlinien zusammen. Die Land-See-Maske soll sicherstellen, dass nur über See die Rauigkeiten variiert werden, nicht aber in Gewässern ohne Tideeinfluss. Zudem soll bei Hochwasser nur außerhalb der Deichlinien ein Überfluten von Land möglich sein. Veränderte Wasserstände werden derart berücksichtigt, dass die auf NN bezogenen Wasserstände zu den Wassertie-

fendaten hinzu addiert werden. Somit erhöhen sich bei Hochwasser die Wassertiefen, bei Niedrigwasser werden sie reduziert. Bei resultierenden negativen Tiefendaten wird angenommen, dass diese Gebiete trockengefallen sind und die Rauigkeit von Sand angesetzt werden kann.

Der Einfluss des Wasserstandes auf die Windfelder ist nicht linear und nicht stetig, da bei konstanter Windgeschwindigkeit, aber verändertem Wasserstand zwei verschiedene Effekte die Rauigkeit verändern:

- Bei Flachwassergebieten sinkt mit wachsendem Wasserstand und damit größer werdender Wassertiefe die Rauigkeit ab, da die vom Wind erzeugten Wellen in tiefem Wasser weniger brechen, also glatter sind als im flacheren Wasser. Daraus folgt beim ausgereiften Seegang eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit.
- Sind Flächen innerhalb des Seegebiets trockengefallen, so wird für diese Flächen die Rauigkeit von Sand eingesetzt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten (ab  $u > 20$  m/s in 10 m Höhe) ist diese Rauigkeit immer kleiner als die Rauigkeit der vom Wind überströmten Wasserflächen. Damit steigt bei Überflutung dieser vormals trockengefallenen Flächen die Rauigkeit an und die Windgeschwindigkeit fällt ab.

### **3.1.3.1 Wertebereich**

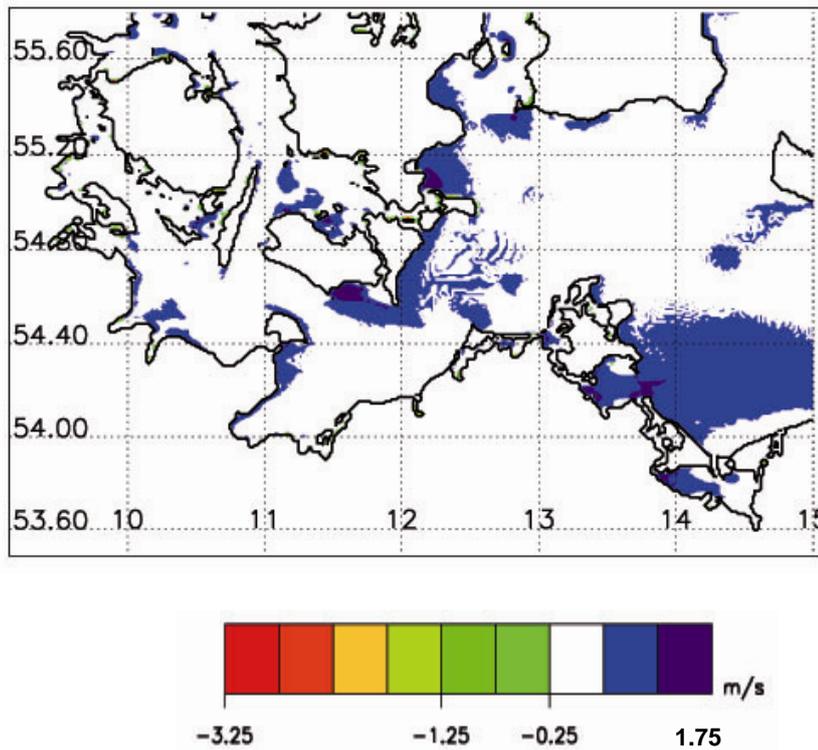
Für den Windatlas sollte der Wasserstand äußerstenfalls innerhalb der Grenzen des höchsten Hochwassers von 3.37 m über NN und des niedrigsten Niedrigwassers von 2.43 m unter NN, die bis jetzt in der westlichen Ostsee gemessen wurden, liegen.

### **3.1.3.2 Klassenbreite**

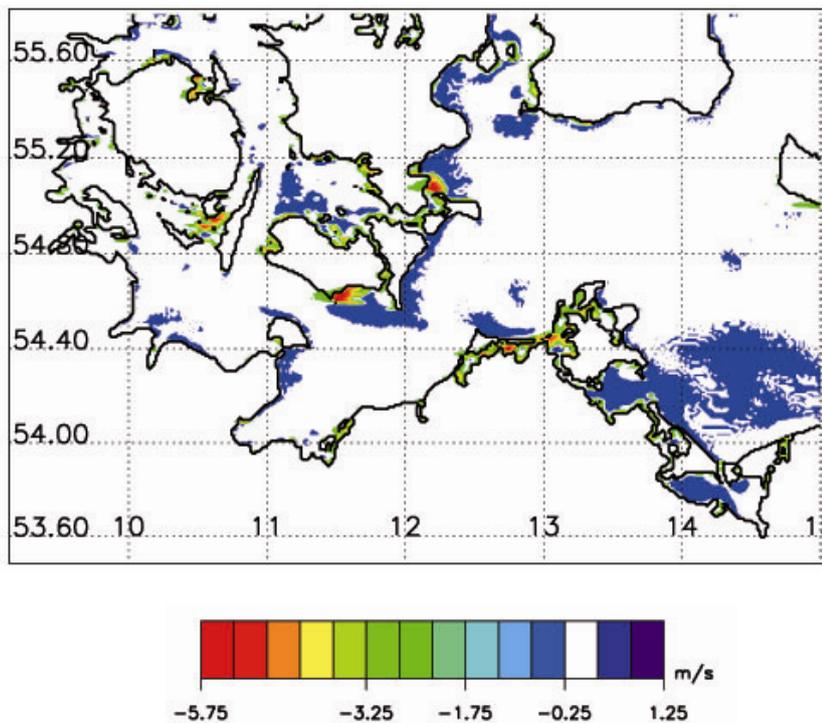
Für den Windatlas müssen für jeden einzelnen Wasserstand für alle festgelegten Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten Windfelder berechnet werden. Somit beeinflusst die Gesamtzahl der berücksichtigten Wasserstände entscheidend die Anzahl der zu berechnenden Windfelder und somit den zeitlichen Aufwand. Da die Windfelder möglichst schnell den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden sollten, musste der zeitliche Aufwand so gering wie möglich gehalten werden.

Durch Testrechnungen wurde gezeigt, dass die Interpolationsfehler dann am größten sind, wenn zwischen zwei Windfeldern, die mit verschiedenen Wasserständen berechnet werden, interpoliert wird. Dabei unterscheiden sich bei Hochwasser die bei den Wasserständen 0 m NN und 3 m über NN berechneten Windfelder in der Nähe der deutschen Küste über See um weniger als 1 m/s, siehe Abbildung 3.1. Vergleicht man die bei niedrigeren Wasserständen als 3 m über NN berechneten Windfeldern mit den bei 0 m NN berechneten Windfeldern, so sind die Unterschiede so gering, dass diese im Rahmen der benötigten Genauigkeit vernachlässigt werden können. Somit werden bei Hochwasser nur Windfelder bei Wasserständen von 0 m NN und 3 m über NN berechnet.

Bei Niedrigwasser hingegen erreichen die Unterschiede in den Geschwindigkeiten lokal bis zu 6 m/s, siehe Abbildung 3.2. Die Unterschiede in den Geschwindigkeiten entstehen in Gebieten mit geringer Wassertiefe: in den Bodden, westlich von Langeland und südlich von Lolland. Wegen des hohen Rechenaufwands wurde von den Projektgruppenmitgliedern beschlossen, bei Niedrigwasser nicht weitere Windfelder mit mehr Wassertiefen als 2 m unter NN und 0 m NN zu rechnen, da die stark fehlerbehafteten Gebiete am Rande der Windatlas-Teilgebiete liegen. Die Windfelder in diesen Gebieten sollten jedoch für spätere Projekte nicht verwendet werden. Deshalb wurden Windfelder für die Wassertiefen 2 m unter NN, 0 m NN und 3 m über NN berechnet.



**Abb. 3.1:** Differenz der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, berechnet bei Wasserständen von 3 m über NN und 0 m NN (Windgeschwindigkeiten bei 3 m über NN - Windgeschwindigkeiten bei 0 m NN). Windfelder berechnet mit einer Windrichtung von 90 Grad und einer Windgeschwindigkeit von 35 m/s in der Nähe der Darßer Schwelle.



**Abb. 3.2:** Differenz der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, berechnet bei Wasserständen von 2 m unter NN und 0 m NN. (Windgeschwindigkeiten bei 0 m NN - Windgeschwindigkeiten bei 2 m unter NN). Windfelder berechnet mit einer Windrichtung von 90 Grad und einer Windgeschwindigkeit von 35 m/s in der Nähe der Darßer Schwelle.

### 3.1.4 Anzahl der Windfelder

Tabelle 3.1 zeigt die verwendeten Grenzen und Schrittweiten für Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Wassertiefen. Daraus berechnet man 6 verschiedene Windgeschwindigkeiten, 16 Windrichtungen und 3 Wassertiefen. Multipliziert man die Anzahl der verwendeten Wassertiefen mit der Anzahl der Windgeschwindigkeitsintervalle und der Windintervalle, so erhält man für die Berechnung des Windatlas eine Gesamtzahl von 288 Ausgangswindfeldern für jedes der 6 Gebiete.

<i>Variable</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Schrittweite</i>
Windgeschwindigkeit*	10 m/s	35 m/s	5 m/s
Windrichtung	0 Grad	360 Grad	22.5 Grad
Wasserstand	- 2.0 m NN	3.0 m NN	2.0 m unter NN 3.0 m über NN

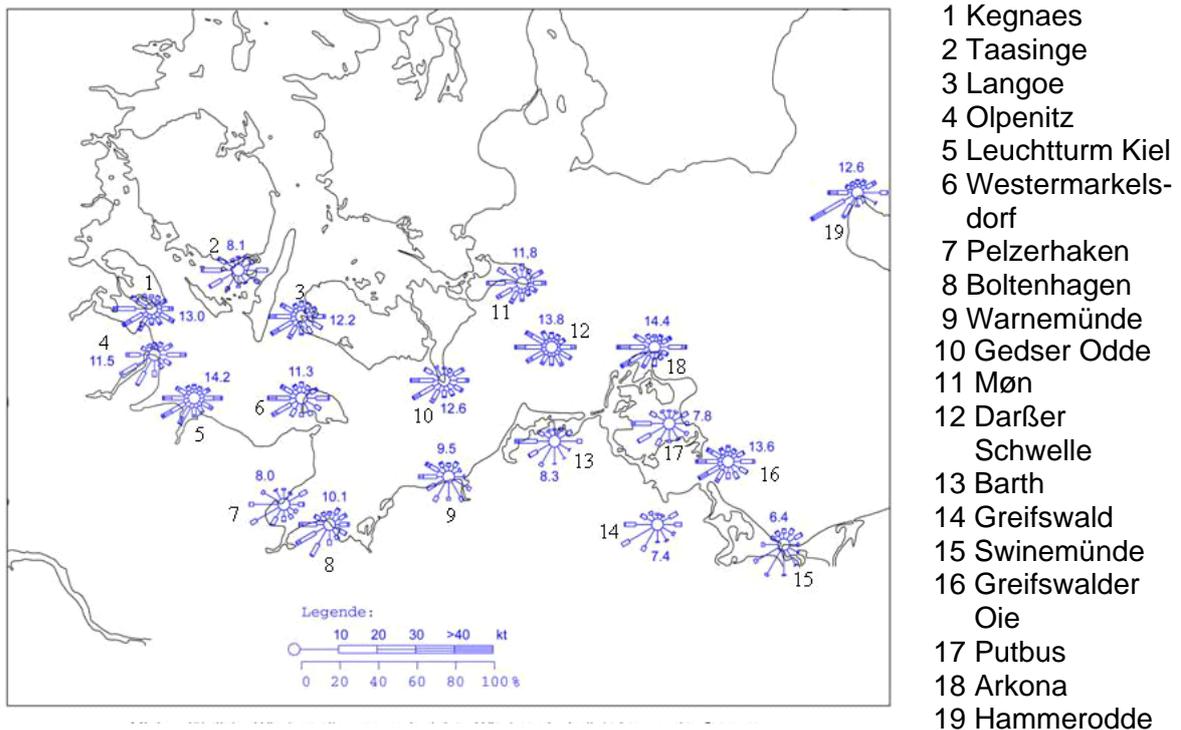
**Tab. 3.1:** Bei der Windatlas-Berechnung verwendete Grenzen und Schrittweiten.

\* Wert der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe bei einer Windrichtung von 90 Grad und einem Wasserstand von 0 m NN am Gitterpunkt nahe Darßer Schwelle.

### 3.2 Windatlas Anwendung

Der Windatlas besteht aus einer Vielzahl von Windfeldern, die jeweils für die Gebiete Westliche Ostsee, Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht berechnet wurden. Die Windfelder für das Gebiet Westliche Ostsee dienen dabei vorrangig zur Bestimmung der Randbedingungen für die Teilgebiete Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht. Bei der Berechnung des Initial-Windfeldes wurde ein über dem gesamten Gebiet konstanter geostrophischer Wind angenommen. Die Verwendung der Windfelder ist deshalb nur unter dieser Voraussetzung sinnvoll. Großräumig trifft dies nur selten zu, so dass eine Gebietseinschränkung auf Ausschnitte mit annähernd konstanter Windrichtung notwendig ist.

Dass diese Ausschnitte meist kleiner sind als die vorgegebenen Gebiete, verdeutlicht Abbildung 3.3. Sie zeigt 12-teilige Windgeschwindigkeitsrosen von 19 Stationen in der westlichen Ostsee für das Jahr, basierend auf Messwerten des Zeitraums 1.8.2001 – 31.7.2005. Windgeschwindigkeitsrosen sind graphische Darstellungen der Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit (Klassenbreite hier 10 Knoten) in Abhängigkeit von der Windrichtung (Klassenbreite hier 30 Grad). Ergänzend sind die Jahresmittel der Windgeschwindigkeit (in Knoten) hinzugefügt. So werden im Gebiet Mecklenburger Bucht z.B. in Boltenhagen (Station Nr. 8) sehr viel häufiger Winde aus Nordwest beobachtet als in Warnemünde (Station Nr. 9), wo südwestliche Winde dominieren.



**Abb. 3.3:** 12-teilige Windgeschwindigkeitsrosen von 19 Stationen (schwarze Zahlen Stationsnummern, siehe Tabelle rechts) in der westlichen Ostsee, gemittelt für ein Jahr, sowie Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Knoten (blaue Zahlen), Bezugszeitraum 1.8.2001 – 31.7.2005.

Der Windatlas bietet verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Mit einem Fortran-Programm lässt sich aus der Vielzahl von Feldern für vorgegebene Eingangswerte das gewünschte Windfeld interpolieren. Die Nutzer des Windatlas geben dem mitgelieferten Interpolationsprogramm die geographischen Koordinaten eines Eingangspunkts, einen Wasserstand, sowie eine Windrichtung und eine Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe vor. Durch Interpolation wird aus den Feldern des Windatlas ein Windfeld für das Teilgebiet berechnet, in dem am Eingabepunkt die vorgegebene Windgeschwindigkeit und Windrichtung gelten. Da angenommen wird, dass die Windrichtung nahezu konstant ist, wird sie nicht gesondert angegeben. Es lassen sich sowohl ganze Windfelder als auch Daten von ausgewählten Zielpunkten ausgeben. So sind auch Berechnungen für Zeitreihen möglich.

Die Windfelder können für verschiedene Anwendungen genutzt werden. Dabei gibt es, je nach Verwendungszweck zwei grundsätzlich unterschiedliche Ausgabemöglichkeiten:

1. Das numerische Feld von Windgeschwindigkeiten mit der vorgegebenen Windrichtung wird komplett ausgegeben, wie es z.B. als Antrieb für ein Seegangs- oder Strömungsmodell benötigt wird.
2. Nicht die gesamten interpolierten Windfelder, sondern nur die Windgeschwindigkeiten an ausgesuchten Gitterpunkten des Modellgebiets werden ausgegeben, wie wir sie z.B. bei der Verifikation verwendet haben. Dabei ist eine Ausgabe von Windgeschwindigkeit und –richtung für den Zielpunkt in eine Datei möglich.

Gibt man bei den Windatlas-Rechnungen Eingabegrößen aus Zeitreihen vor, so erhält man zu jedem entsprechenden Zeitpunkt ein Windfeld und somit eine Zeitreihe berechneter Windfelder. Damit lassen sich auch für einzelne Gitterpunkte zeitgleiche Wertepaare von Windgeschwindigkeit und Windrichtung bestimmen. Diese berechneten Zeitreihen werden insbesondere zum Zwecke der Verifikation benötigt, um z.B. Vergleiche mit einer am gleichen Ort gemessenen Zeitreihe durchführen zu können.

### 3.2.1. Wahl der Eingabewerte

Die Qualität der Zeitreihe, die das Windklima am Eingabepunkt repräsentieren soll, bestimmt die Qualität der Ergebnisse für die berechneten Windfelder. Deshalb kommt der Wahl des Eingabepunkts und der zugehörigen Zeitreihen große Bedeutung zu. Insbesondere müssen folgende Kriterien beachtet werden:

- Repräsentative Eingabepunkte: Sowohl Eingabe- als auch Zielpunkt sollten möglichst auf See oder in unmittelbarer Küstennähe liegen, und frei von lokalen Effekten sein.
- Die Wasserstände sollten von einem Pegel stammen, der repräsentativ für das gesamte Gebiet ist, für das die Windfelder berechnet werden.
- die Mittelungszeiträume für die Windwerte sollten mindestens eine Stunde betragen.
- Wasserstände und Windwerte müssen in der gleichen zeitlichen Auflösung vorliegen.

Bei den folgenden Verifikationsrechnungen wurden für die einzelnen Teilgebiete die in Tabelle 3.2 aufgelisteten Pegelstände verwendet, die uns freundlicherweise vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung gestellt wurden.

Gebiet	Pegel
Kiel	Kiel-Holtenau
Mecklenburger Bucht	Rostock- Warnemünde
Warnemünde	Rostock- Warnemünde
Rügen	Sassnitz
Pommersche Bucht	Koserow

**Tabelle 3.2:** Für die Verifikationsrechnungen in den verschiedenen Gebieten verwendete Pegel.

Damit die Zeitreihen das Windklima am Eingabepunkt repräsentieren, sollten die Messungen an diesem Ort möglichst wenig von ihrer lokalen Umgebung beeinflusst sein. So sollte der Messmast möglichst frei stehen. Es können z.B. in der Nähe des Windmasts stehende Gebäude oder ein Wald die Windwerte so verändern, dass diese nicht mehr repräsentativ sind. Für statistische Auswertungen sollten die Zeitreihen möglichst lückenlos vorliegen und keine systematischen Ausfälle aufweisen (z. B. gleichmäßige Verteilung über den Tag und das Jahr).

Falls die Messungen nicht in der Höhe  $z_1 = 10$  m erfolgten, sondern in einer Höhe  $z_2$ , können sie mit Hilfe des logarithmischen Windprofils in Gleichung 3 auf die Höhe  $z_1 = 10$  m umgerechnet werden:

$$u(z_1) = u(z_2) \frac{\ln(z_1) - \ln(z_0)}{\ln(z_2) - \ln(z_0)} = c_{\text{kor}} u(z_2) \quad (3).$$

Dazu benötigt man eine Rauigkeitslänge  $z_0$ , die bei den Rechnungen für den Windatlas an jedem Gitterpunkt über Land anhand der Landnutzungsdaten vorgegeben wurde und als Datensatz auf dem gleichen Gitter dem Windatlas beigelegt ist.

Die Rauigkeitslängen über See hängen nichtlinear von der Windgeschwindigkeit ab und können z.B. bestimmt werden mit Hilfe der modifizierten Charnock-Formel (Charnock, 1955):

$$z_0 = A_c \frac{u_*^2}{g} \quad (4).$$

Dabei ist  $u_*$  die so genannte Schubspannungsgeschwindigkeit, die mit der Windgeschwindigkeit  $u$  in der Höhe  $z$  und der Rauigkeitslänge folgendermaßen zusammenhängt:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{mit } k = 0.4 \quad (5).$$

Hier ist  $k$  die Karman-Konstante,  $g$  die Gravitationskonstante und  $A_c$  wird in der Arbeit von Charnock als Konstante mit Werten zwischen 0.011 und 0.015 für Rauigkeitsberechnungen auf hoher See angegeben. Bei den Rechnungen für den Windatlas wurde der Wert von 0.0185 von Wu (1982) verwendet, siehe auch im Anhang von Ganske, Rosenhagen und Schmidt (2006).

### 3.2.2. Geeignete Messstationen

Im Rahmen des Projekts wurden von den Projektarbeitern des Deutschen Wetterdienstes alle Windmessstationen an der Küste zwischen Pelzerhaken und Barth besichtigt, um die lokalen Einflüsse der Umgebung auf die Windmessungen beurteilen zu können. Von den übrigen Stationen lagen entweder bereits Besichtigungsprotokolle vor oder es wurden anderweitig detaillierte Informationen über die lokalen Verhältnisse rund um die Messstationen zusammengetragen.

Erfahrungen im Seewetteramt haben gezeigt, dass die Winddaten der in Tabelle 3.3 aufgelisteten Stationen in den genannten Zeiträumen grundsätzlich die unter 3.2.1. genannten Bedingungen erfüllen. Dabei werden die Stationen Ahrenshoop und Warnemünde vom Staatliche Amt für Umwelt- und Naturschutz (STAUN) des Landes Mecklenburg-Vorpommerns, Darßer Schwelle vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Gedser Odde und Kegnaes vom Dänischen Wetterdienst (Danmarks Meteorologiske Institut) und alle anderen Stationen vom Deutschen Wetterdienst betrieben.

Viele Messstationen an der Ostseeküste sind stark von lokalen Verhältnissen beeinflusst: So liegen die meisten Stationen im Gebiet Rügen und Pommersche Bucht an Steilküsten und im Gebiet Warnemünde stehen einige Messmaste landseits geschützt am Strand vor dem Küstenwald.

Tabelle 3.3 enthält für solche Zwecke Korrekturfaktoren  $c_{kor}$ , zur Umrechnung unter Annahme eines logarithmischen Windprofils. Die Faktoren wurden mit einer Rauigkeit von 0.25 (Umgebung Gras/Büsche) berechnet. Im Falle eines Korrekturfaktors von 1.0 weichen die mit dem logarithmischen Windprofil auf 10 m Höhe umgerechneten Geschwindigkeiten um maximal 5 % von den gemessenen Windgeschwindigkeiten ab. Somit können bei all diesen Stationen im Rahmen der Genauigkeit die gemessenen Windgeschwindigkeiten i. A. ohne Umrechnung verwendet werden.

Messort	östliche Länge (°)	Nördliche Breite (°)	Messhöhe (m ü. Grund)	Korrekturfaktor	Zeitraum
Ahrenshoop	12.4	54.4	10	1.0	Ab 1998
Arkona	13.44	54.68	24	0.81	11.1995 – 10.2006
Boltenhagen	11.2	54.00	18	0.86	Ab 4.1991
Darsser Schwelle	12.7	54.7	9	1.0	Ab 1994
Gedser Odde	11.97	54.57	8	1.0	Ab 1996
Greifswalder Oie	13.91	54.25	12	1.0	Ab 2001
Kegnaes	9.98	54.85	16	0.89	Ab 1996
Leuchtt. Kiel	10.27	54.50	8	1.0	Ab 1982
Olpenitz	10.03	54.67	10	1.0	Ab 1996
Swinemünde	14.23	53.92	6	1.16	Ab 1996
Warnemünde	12.1	54.2	10	1.0	Ab 1997
Westermarkelsdorf	11.07	54.53	10	1.0	Ab 6.1996

**Tab. 3.3:** Für den Windatlas geeignete Eingabestationen und Korrekturfaktoren zur Umrechnung auf 10 m Höhe über Grund.

### 3.3. Verifikation der Windatlas-Ergebnisse

Zur Verifikation der Windatlas-Ergebnisse mit Messergebnissen wurden Zeitreihen von Messstationen als Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen verwendet und die gewonnenen Gitterpunktwerte mit Zeitreihen nahegelegener Messstationen verglichen. Bei den statistischen Untersuchungen wurden nur die Daten für Zeitpunkte berücksichtigt, die sowohl von der Messstation des Eingabepunktes als auch vom Zielort vorlagen.

An Hand der Ergebnisse sind Rückschlüsse einerseits darauf möglich, wie geeignet die vorliegenden Windmessungen für die Verwendung als Inputwerte in diesem Gebiet sind und andererseits, wie gut die lokalen Verhältnisse durch den Windatlas erfasst werden.

Für jedes Windatlasgebiet wurden beispielhaft zwei Verifikationsdarstellungen ausgewählt.

a. Korrelationsplots:

Die Korrelationsplots basieren auf Wertepaaren der Windgeschwindigkeit von zwei verschiedenen Bezugsorten zu gleichen Zeitpunkten. Die Abbildungen zeigen in Farbdarstellung die Anzahl der Wertepaare für Klassenbreiten von 1 m/s und die Ausgleichsgerade für alle Wertepaare.

b. Quotientendarstellungen:

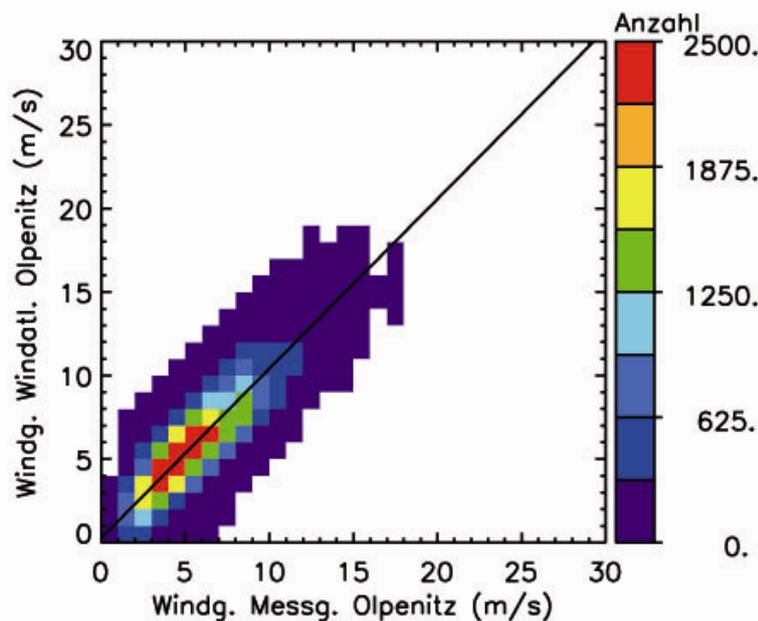
Aus ihnen lassen sich besonders gut Rückschlüsse auf die Umgebungseinflüsse der Messstandorte ableiten. Abgebildet sind die Quotienten der Mittelwerte der Windgeschwindigkeit zweier Zeitreihen in Abhängigkeit von der Windrichtung, aufgeteilt in 16 Klassen. Es wurden drei verschiedene Bezüge hergestellt und farbig dargestellt:

1. Für jede Windrichtungsklasse die Quotienten der Mittelwerte, der an zwei verschiedenen Stationen gemessenen Windgeschwindigkeitszeitreihen, wobei die erste Station der Eingangspunkt und die zweite Station der Zielpunkt einer Windatlas-Rechnung ist (schwarz dargestellt).
2. In gleicher Weise die Quotienten der Mittelwerte, der am Eingangspunkt gemessenen Windgeschwindigkeitszeitreihe und der für den Zielpunkt mit dem Windatlas berechneten Zeitreihe (blau dargestellt).
3. Ebenfalls für jede Windrichtungsklasse die Quotient der Mittelwerte der am Zielpunkt gemessenen Windgeschwindigkeitszeitreihe und der für den Zielpunkt mit dem Windatlas berechneten Zeitreihe (rot dargestellt).

### 3.3.1. Gebiet Kiel

Abbildung 3.4.a zeigt einen Vergleich zwischen der in Olpenitz gemessenen Geschwindigkeits-Zeitreihe (Abszisse) und den mit dem Windatlas für Olpenitz berechneten Windgeschwindigkeiten (Ordinate). Dabei wurde bei den Windatlas-Rechnungen die Zeitreihe vom Leuchtturm Kiel als Eingabezeitreihe verwendet. Die Datenbasis umfasst den Zeitraum 1.11.1996 bis 31.10.2005.

An der Lage der Ausgleichsgeraden ist abzulesen, dass die in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten im Mittel etwas kleiner sind als die mit dem Windatlas für Olpenitz berechneten. Dies zeigt sich auch in den Mittelwerten der Windgeschwindigkeiten, die 6.0 m/s für die gemessene und 6.4 m/s für die berechnete Zeitreihe betragen. Der rms-Fehler (root mean square error = Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers) zwischen der berechneten Zeitreihe und der gemessenen Zeitreihe beträgt 1.8 m/s.

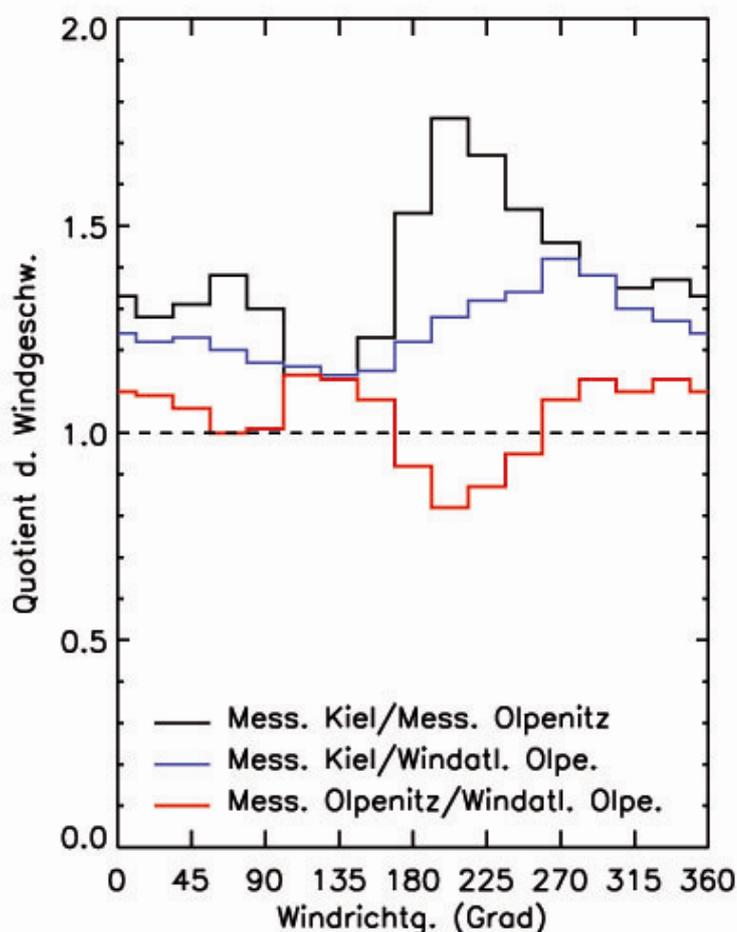


**Abb. 3.4.a:** Korrelation zwischen den Windgeschwindigkeiten, die in Olpenitz gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Olpenitz berechnet wurden (Ordinate). Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen: am Leuchtturm Kiel gemessene Windgeschwindigkeiten. Durchgezogene Linie: Ausgleichsgerade. Bezugszeitraum: 1.11.1996 bis 31.10.2005

Die in Abbildung 3.4.b enthaltene schwarze Treppenfunktion der Quotienten der Mittelwerte der am Leuchtturm Kiel und in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten zeigt, dass für alle Windrichtungen die Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten am Leuchtturm Kiel höher sind als die von Olpenitz. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Leuchtturm Kiel auf freier See ohne Landeinfluss liegt, Olpenitz jedoch an der Küste. Die Beeinflussung durch die Landoberfläche der in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten ist am stärksten bei Windrichtungen zwischen 180 Grad (Süd) und 270 Grad (West), bei denen der Mittelwert der Windgeschwindigkeit am Leuchtturm Kiel maximal 1.8-mal so groß ist wie in Olpenitz.

Die zweite, blaue Linie der Abbildung zeigt das Verhältnis der in Kiel gemessenen Windgeschwindigkeiten zu den aus dieser Zeitreihe mit dem Windatlas für Olpenitz berechneten Windgeschwindigkeiten. Eingangspunkt der Windatlas-Rechnungen ist ebenfalls Kiel. Idealerweise sollte diese Linie parallel zu schwarzen verlaufen, jedoch ist der Anstieg der blauen mit wachsenden Windrichtungen größer 180 Grad (Süd) deutlich geringer als der der schwarzen und das relative Maximum der blauen Linie liegt bei 270 Grad (West) statt bei

225 Grad (Südwest). Dies bedeutet, dass in diesem Windrichtungsbereich die Windgeschwindigkeiten, die für Olpenitz berechnet wurden, im Vergleich zu den in Kiel gemessenen Windgeschwindigkeiten zu hoch ausfallen.



**Abb. 3.4.b:** Quotienten der Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten für die 16 Windrichtungsklassen für gemessene und mit dem Windatlas berechnete Zeitreihen. Eingangspunkt für Windatlasrechnungen: Kiel. Bezugszeitraum: 1.11.1996 bis 31.10.2005

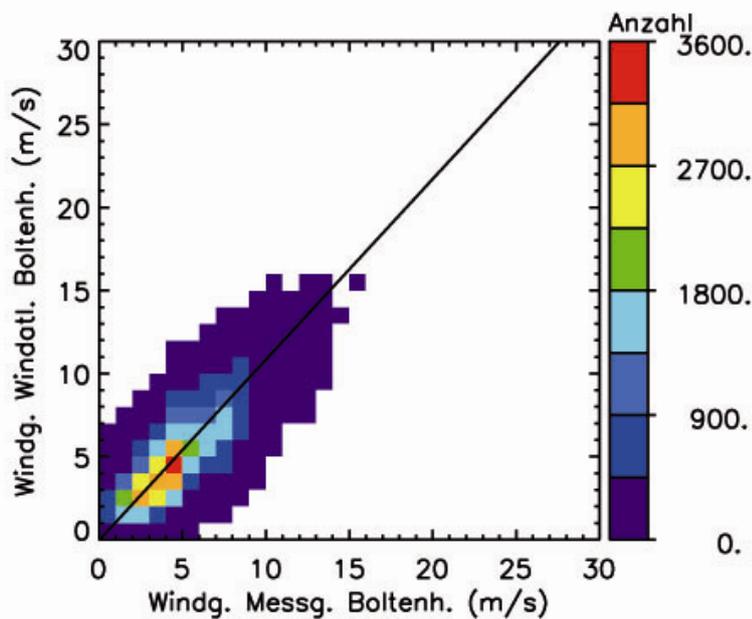
In rot ist das Verhältnis der Mittelwerte der in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeit zu der für Olpenitz mit dem Windatlas berechneten dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Windrichtungen zwischen 180 Grad (Süd) und 270 Grad (West) die in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten kleiner sind als die mit dem Windatlas berechneten und bei den anderen Windrichtungen größer. Der Verlauf der rot und schwarz dargestellten Quotienten ist spiegelverkehrt. Daraus kann man schließen, dass bei dieser Windatlas-Rechnung die Reduktion der Windgeschwindigkeiten über Land im Vergleich zu den Geschwindigkeiten über See zu gering ist, so dass die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten bei Anströmung von Land zu groß sind. Andererseits werden die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten bei Anströmung von der Seeseite unterschätzt.

Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten und für Olpenitz berechneten Windgeschwindigkeiten (rote Linie) sind für alle Windrichtungen kleiner als die Unterscheide zwischen den gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten in Kiel zu den gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten in Olpenitz (schwarze Linie) und liegen nahe 1, d.h. die für Olpenitz berechneten Werte geben die gemessenen insgesamt gut wieder.

### 3.3.2. Gebiet Mecklenburg

Die Vergleiche für das Gebiet Mecklenburg erfolgten mit den an den Wetterwarten Boltenhagen und Westermarkelsdorf gemessenen Zeitreihen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Dabei wurde die in Westermarkelsdorf gemessene Zeitreihe der Windgeschwindigkeit und Windrichtung als Eingabezeitreihe für die Windatlas-Rechnungen verwendet.

Abbildung 3.5.a zeigt die Korrelation der zwei Zeitreihen, die vom 1.11.1996 – 31.10.2005 in Boltenhagen gemessen und mit dem Windatlas für Boltenhagen berechnet wurden. Die Ausgleichsgerade für alle Wertepaare verläuft oberhalb der Winkelhalbierenden. Somit sind die mit dem Windatlas für Boltenhagen berechneten Windgeschwindigkeiten etwas höher als die dort gemessenen. Dies drückt sich auch in den Mittelwerten der einzelnen Zeitreihen aus: Der Mittelwert der in Boltenhagen gemessenen Windgeschwindigkeit beträgt 5.0 m/s, der für die berechnete Zeitreihe 5.4 m/s. Der rms-Fehler zwischen den zwei Zeitreihen beträgt 1.8 m/s.



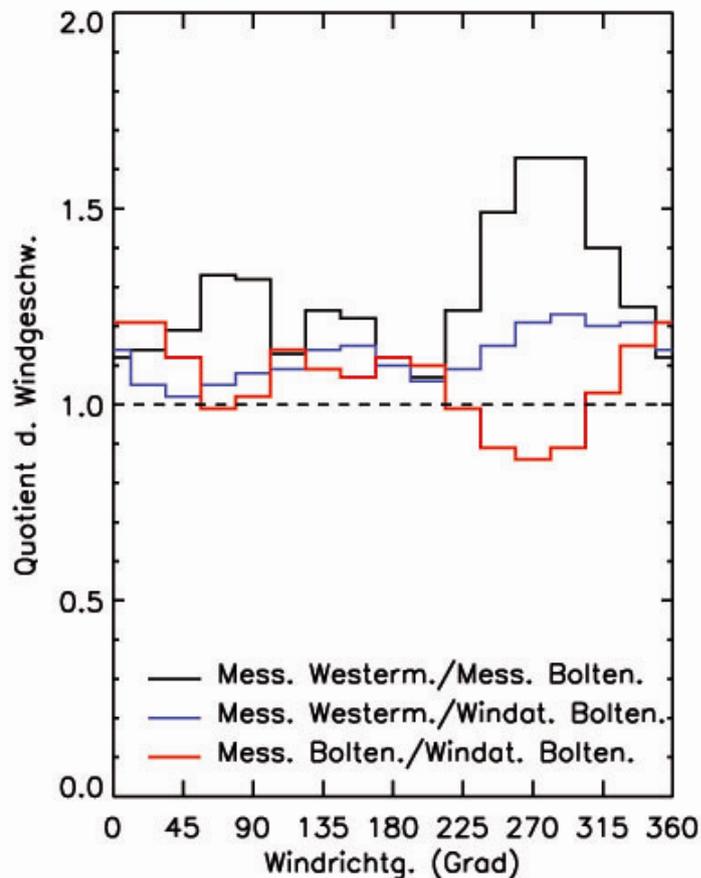
**Abb. 3.5.a:** Korrelation zwischen den Windgeschwindigkeiten, die in Boltenhagen gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Boltenhagen berechnet wurden (Ordinate). Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen: in Westermarkelsdorf gemessene Windgeschwindigkeiten. Durchgezogene Linie: Ausgleichsgerade. Bezugszeitraum: 1.11.1996 bis 31.10.2005.

Abbildung 3.5.b basiert auf den in Westermarkelsdorf und Boltenhagen gemessenen Windgeschwindigkeitszeitreihen und der mit dem Windatlas für Boltenhagen berechneten Zeitreihe. Die Mittelwerte der in Westermarkelsdorf gemessenen Windgeschwindigkeiten sind um bis zu 65 % größer als die der in Boltenhagen gemessenen (schwarze Linie). Dabei sind die Unterschiede dann am größten, wenn bei Windrichtungen zwischen rund 225 Grad (Südwest) und 360 Grad (Nord) in Westermarkelsdorf die Anströmung von See und in Boltenhagen dagegen der Einfluss des Holsteiner Küstenlandes wirksam ist.

Die in blau dargestellten Quotienten aus den Mittelwerten der in Westermarkelsdorf gemessenen Windgeschwindigkeiten und den Mittelwerten der für Boltenhagen berechneten Windgeschwindigkeiten zeigt, dass mit dem Windatlas je nach Windrichtung durchaus eine unterschiedliche Reduktion der Windgeschwindigkeit von Westermarkelsdorf nach Boltenhagen erfolgt.

Die rote Linie der Quotienten aus den Mittelwerten der Messwerten und der Windatlas-Werten für Boltenhagen zeigt, lässt ebenfalls einen Land-Einfluss in den Windatlas-Rechnungen erkennen. Dieser ist jedoch schwach, so dass die Mittelwerte der mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten größer sind als die der gemessenen Wind-

geschwindigkeiten. Insgesamt weichen die mit dem Windatlas für Boltenhagen berechneten gemittelten Windgeschwindigkeiten für alle Windrichtungen nur um max. 18 % von den Mittelwerten der gemessenen Windgeschwindigkeiten ab.



**Abb. 3.5.b:** Quotienten der Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten für die 16 Windrichtungsklassen für gemessene und mit dem Windatlas berechnete Zeitreihen. Eingangspunkt für Windatlasrechnungen: Westermarkelsdorf. Bezugszeitraum: 1.11.1996 bis 31.10.2005.

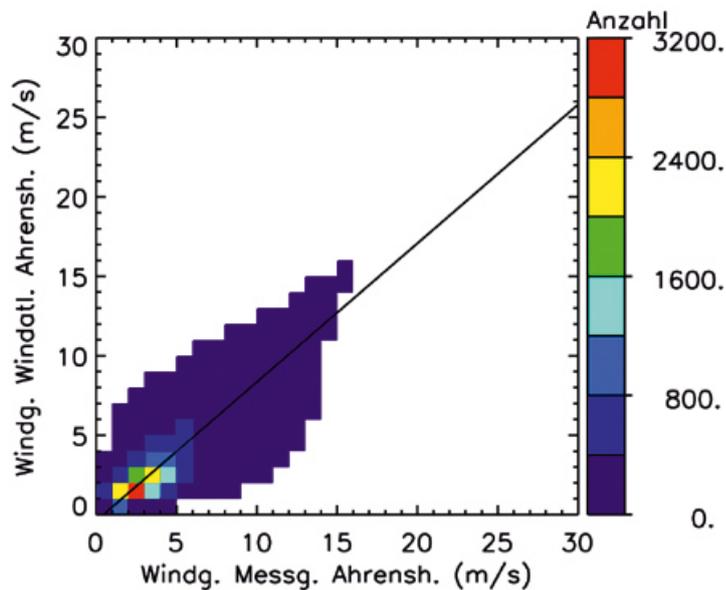
### 3.3.3. Gebiet Warnemünde

Bei allen Stationen aus dem Gebiet Warnemünde, von denen uns Messdaten zur Verfügung standen, sind die Windmessungen stark von kleinräumigen, lokalen Effekten beeinflusst. Dies wird auch an den nachfolgenden Beispielen deutlich. Die Messdaten sind im Allgemeinen nicht repräsentativ für die großräumige Umgebung der Stationen und können nur bei ausgewählten, windreichen Wetterlagen zur Beurteilung der Qualität der berechneten Windfelder verwendet werden.

Abbildung 3.6.a zeigt den Korrelationsplot zwischen der an der STAUN-Station Ahrenshoop gemessenen Windgeschwindigkeitszeitreihe und der für Ahrenshoop mit dem Windatlas berechneten Zeitreihe für die Jahre 2002 bis 2005. Eingangswerte der Windatlas-Zeitreihe sind die gemessenen Windgeschwindigkeiten der STAUN-Station Warnemünde.

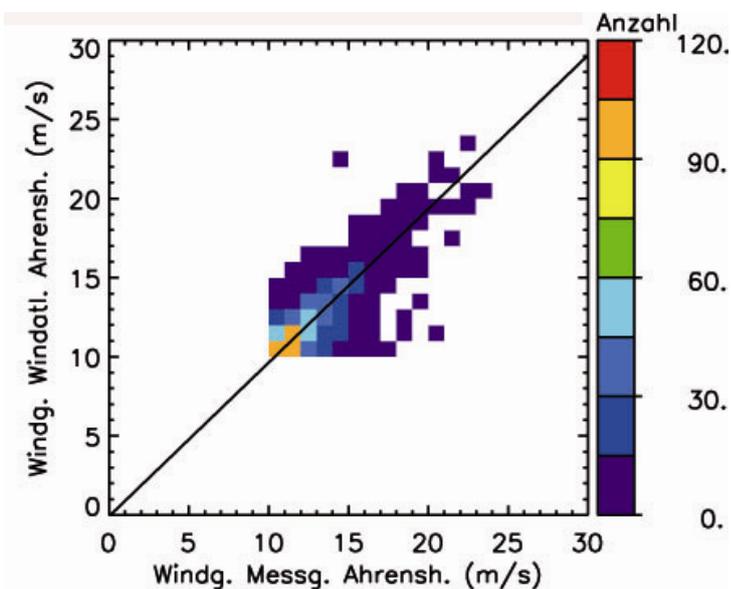
Die Mittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeit betragen in Warnemünde 3.5 m/s, in Ahrenshoop 4.6 m/s. Der Mittelwert der mit dem Windatlas für Ahrenshoop berechneten Zeitreihe beträgt sogar nur 3.7 m/s. Somit sind beide Stationen relativ windschwach. Die Voraussetzungen für Windatlas-Rechnungen, dass hohe Windgeschwindigkeiten herrschen, sind nur an wenigen Tagen im Jahr gegeben. Daraus resultiert im Vergleich zur mittleren

Windgeschwindigkeit ein großer rms-Fehler von 2.1 m/s zwischen der gemessenen und der berechneten Zeitreihe. Auch weicht die in Abbildung 3.6.a gezeigte Ausgleichsgerade deutlich von der Winkelhalbierenden ab, da die meisten der mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten kleiner sind als die gemessenen.



**Abb. 3.6.a:** Korrelation zwischen den Windgeschwindigkeiten, die in Ahrenshoop gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Ahrenshoop berechnet wurden (Ordinate). Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen: in Warnemünde gemessene Windgeschwindigkeiten. Durchgezogene Linie: Ausgleichsgerade. Bezugszeitraum: 1.1.2002 bis 31.12.2005

Vergleicht man nur Messungen mit Windgeschwindigkeiten größer als 10.0 m/s (siehe Abbildung 3.6.b), so sinkt der rms-Fehler auf 1.6 m/s ab und die Ausgleichsgerade für alle Punkte liegt in der Nähe der Winkelhalbierenden. Somit bestätigt dieses Beispiel, dass bei geringen mittleren Windgeschwindigkeiten die Fehler der mit dem Windatlas berechneten Windfelder größer sind als bei höheren Windgeschwindigkeiten.

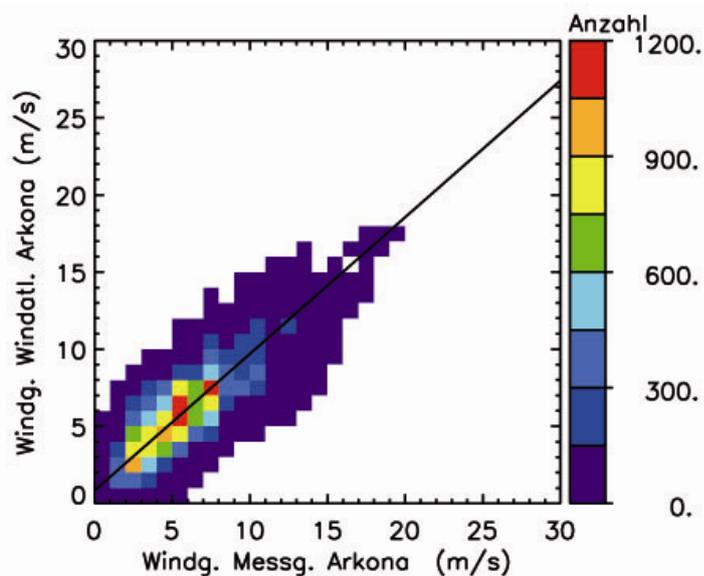


**Abb. 3.6.b:** Gleichartige Darstellung wie in Abb. 3.6.a, jedoch wurden hierbei nur Geschwindigkeiten größer als 10 m/s berücksichtigt.

### 3.3.4. Gebiet Rügen

Beispielhaft für das Gebiet Rügen zeigt Abbildung 3.7.a den Vergleich zwischen den in Arkona gemessenen und den mit dem Windatlas für Arkona berechneten Windgeschwindigkeiten für den Zeitraum vom 1.9.2001 bis 31.8.2005. Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen sind die an der Darßer Schwelle gemessenen Windgeschwindigkeiten.

Der Mittelwert der in Arkona gemessenen Windgeschwindigkeiten beträgt 6.0 m/s, der der berechneten Reihe 6.2 m/s. Die Ausgleichsgerade für alle Punkte liegt für Windgeschwindigkeiten kleiner 8 m/s unter und für größere etwas oberhalb der Winkelhalbierenden. Da die meisten Windgeschwindigkeiten unter 10 m/s liegen, ist insgesamt der resultierende Mittelwert für die berechnete Zeitreihe höher als der der gemessenen Reihe. Der rms-Fehler zwischen der gemessenen und der berechneten Zeitreihe beträgt 1.9 m/s.



**Abb. 3.7.a:** Korrelation zwischen den Windgeschwindigkeiten, die in Arkona gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Arkona berechnet wurden (Ordinate). Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen: an der Darßer Schwelle gemessene Windgeschwindigkeiten. Durchgezogene Linie: Ausgleichsgerade. Bezugszeitraum: 1.9.2001 bis 31.8.2005.

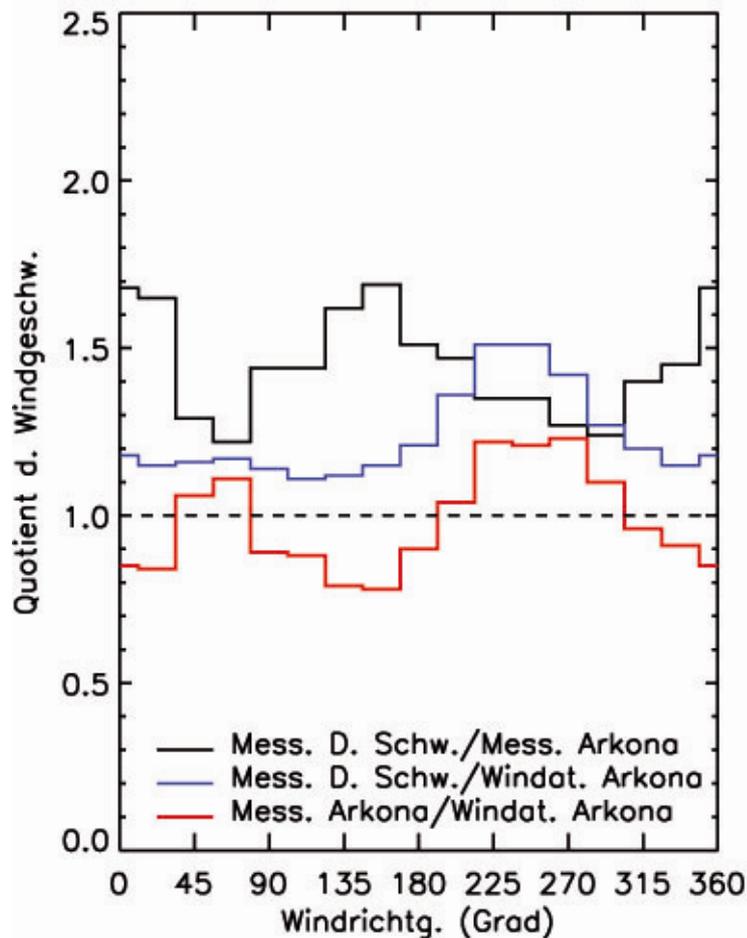
Einen Vergleich der Mittelwerte der an den Stationen Darßer Schwelle und Arkona gemessenen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Windrichtung zeigt die schwarze Linie in Abbildung 3.7.b. Die Unterschiede in den Mittelwerten sind durch die sehr unterschiedlichen Umgebungsverhältnisse der beiden Stationen zu erklären: Darßer Schwelle ist eine Bojenmessstation auf freier See, während die Windmessungen in Arkona stark von den lokalen Verhältnissen geprägt sind, da der Windmast von Arkona oberhalb der Steilküste von Rügen steht. Im Vergleich zur ungestörten Anströmung über der freien See werden dort die gemessenen Windgeschwindigkeiten je nach Windrichtung einerseits durch die Anströmung der Steilküste überhöht, andererseits durch die Überströmung von Rügen erniedrigt.

Für alle Windrichtungen sind die gemittelten, an der Darßer Schwelle gemessenen Windgeschwindigkeiten deutlich höher als die von Arkona, siehe Abbildung 3.7.b. Dabei werden die Windgeschwindigkeiten in Arkona bei Windrichtungen in den Bereichen 23 Grad (Nordnordost) bis 68 Grad (Ostnordost) und 203 Grad (Südsüdwest) bis 270 Grad (West) am meisten durch die Orographie verstärkt. Bei diesen Windrichtungen sind die in Abbildung 3.7.b gezeigten Quotienten der Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten der Stationen Darßer Schwelle durch die von Arkona mit minimalen Werten von 1.2 kleiner als bei den anderen Windrichtungen, wo ein maximaler Quotient von 1.7 berechnet wurde.

Bei Windrichtungen zwischen rund 135 Grad (Südost) und 225 Grad (Südwest) erfolgt die Anströmung von Arkona über Land. Somit sind in diesem Bereich die mittleren Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu denen auf freier See zusätzlich reduziert und die Mittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeiten an der Darsser Schwelle sind bis zu 1.8-mal größer als in Arkona.

Die mit dem Windatlas berechnete Reduktion der Windgeschwindigkeit von Arkona auf Grund der Rauigkeit bei Windrichtungen zwischen rund 135 Grad (Südost) und 225 Grad (Südwest) erkennt man in der blauen Linie, die das Verhältnis der Mittelwerte der an der Darßer Schwelle gemessenen Windgeschwindigkeit zu den mit dem Windatlas für Arkona berechneten Windgeschwindigkeiten zeigt. Die Quotienten haben in diesem Windrichtungsbereich ein deutliches Maximum; bei 225 Grad (Südwest) ist der Mittelwert der Windgeschwindigkeiten an der Darßer Schwelle 1.5-mal so groß wie der für Arkona berechnete Wert.

Die rote Linie zeigt das Verhältnis der Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten, die in Arkona gemessen und mit dem Windatlas für Arkona berechnet wurden. Sie schwankt zwischen 0.8 und 1.25 und hat ein relatives Maximum zwischen 45 Grad (Nordost) und 90 Grad (Ost), wo die schwarze Linie minimal wird, da die Windgeschwindigkeiten in Arkona auf Grund der Steilküste überhöht sind. Da die Steilküste von Arkona nicht mit dem Windatlas erfasst wird, werden in



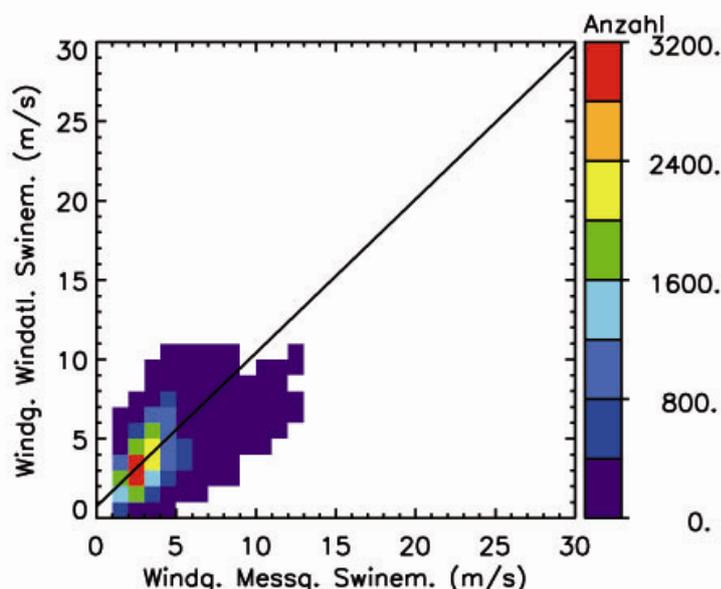
**Abb. 3.7.b:** Quotienten der Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten für die 16 Windrichtungsklassen für gemessene und mit dem Windatlas berechnete Zeitreihen. Eingangspunkt für Windatlasrechnungen: Darßer Schwelle. Bezugszeitraum: 1.9.2001 bis 31.8.2005

diesem Windrichtungsbereich die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu den gemessenen unterschätzt. Bei 135 Grad (Südost) zeigt die rote Linie ein Minimum mit einem Wert von rund 0.8. Dies ist der Windrichtungsbereich, wo die Rauigkeiten von Rügen die Windgeschwindigkeiten vermindern. Diese Reduktion der Windgeschwindigkeit auf Grund der Rauigkeiten wird bei den Windatlas-Rechnungen überschätzt, da diese z.T. in der Natur durch orographische Effekte reduziert werden, nicht aber bei den Windatlas-Rechnungen. Das relative Maximum von rund 1.25 bei 270 Grad (West) ist wieder eine Folge der überhöhten, auf Grund der Orographie in Arkona gemessenen Windgeschwindigkeiten.

### 3.3.5. Gebiet Pommersche Bucht

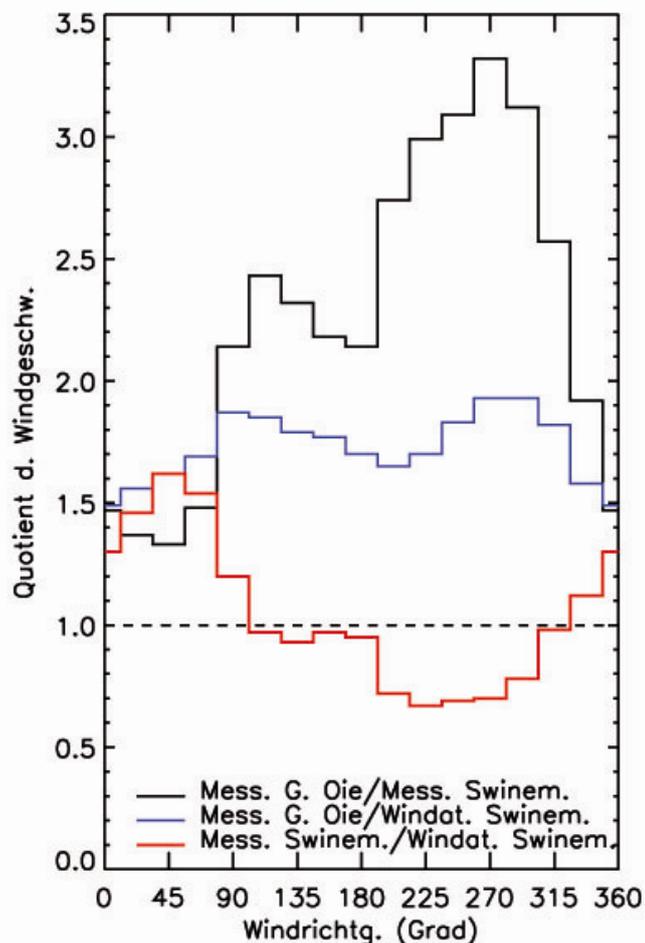
Auch im Gebiet Pommersche Bucht liegen die meisten Messstationen an Steilküsten. Da die Interpretation der Messdaten dieser Stationen sehr schwierig ist und diese Daten als Eingangsdaten für Windatlas-Rechnungen nur bedingt geeignet sind, werden hier die Zeitreihen der Seemessstation Greifswalder Oie und Swinemünde verwendet, obwohl in Swinemünde nur geringe mittlere Windgeschwindigkeiten vorherrschen.

Abbildung 3.8.a zeigt einen Vergleich der zwischen dem 1.1.2003 und dem 31.12.2005 gemessenen Windgeschwindigkeiten in Swinemünde und den für Swinemünde mit dem Windatlas berechneten Geschwindigkeiten. Eingangszeitreihe für die Windatlas-Rechnungen ist die auf der Greifswalder Oie gemessene Windgeschwindigkeitsreihe. In Swinemünde werden im Mittel nur geringe Windgeschwindigkeiten mit einem Mittelwert von 3.5 m/s gemessen. Der Mittelwert der mit dem Windatlas berechneten Zeitreihe beträgt 4.0 m/s und liegt trotz der geringen, für Windatlas-Rechnungen ungünstigen Werte in der Nähe des Mittels des Messwerts. Auch stimmt die Ausgleichsgerade gut mit der Winkelhalbierenden überein. Der rms-Fehler zwischen gemessener und berechneter Zeitreihe beträgt jedoch 2.1 m/s und ist im Vergleich zum Mittelwert hoch.



**Abb. 3.8.a:** Korrelation zwischen den Windgeschwindigkeiten, die in Swinemünde gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Swinemünde berechnet wurden (Ordinate). Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen: an der Darßer Schwelle gemessene Windgeschwindigkeiten. Durchgezogene Linie: Ausgleichsgerade. Bezugszeitraum: 1.1.2002 bis 31.12.2005

Die Quotienten der verschiedenen Mittelwerte in Abhängigkeit von den Windrichtungsklassen findet man in Abbildung 3.8.b. Die schwarze Linie zeigt das Verhältnis der Mittelwerte der auf der Greifswalder Oie gemessenen Windgeschwindigkeiten zu dem der in Swinemünde gemessenen. Für alle Windrichtungen sind die auf der Greifswalder Oie gemessenen Windgeschwindigkeiten rund 1.3 bis 3.3-mal so hoch wie die von Swinemünde. Dies ist damit zu erklären, dass die Greifswalder Oie auf freier See liegt und Swinemünde an der Küste. So wird Swinemünde nur bei Windrichtungen zwischen rund 315 Grad (Nordwest) und 45 Grad (Nordost) von See her angeströmt, so dass bei allen anderen Windrichtungen die Windgeschwindigkeiten in Swinemünde auf Grund der Rauigkeit der Landoberfläche reduziert sind im Vergleich zu den Windgeschwindigkeiten über See. Aber auch im Windrichtungsbereich zwischen 315 Grad (Nordwest) und 45 Grad (Nordost) sind auf Grund von lokalen Verhältnissen die auf der Greifswalder Oie gemessenen Windgeschwindigkeiten um rund 30 % höher als in Swinemünde.



**Abb. 3.8.b:** Quotienten der Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten für die 16 Windrichtungsklassen für gemessene und mit dem Windatlas berechnete Zeitreihen. Eingangspunkt für Windatlasrechnungen: Darßer Schwelle. Bezugszeitraum: 1.1.2002 bis 31.12.2005

Die Reduktion der Windgeschwindigkeit auf Grund der Landrauigkeit wird auch bei den Windatlas-Rechnungen berücksichtigt. Dies zeigt sich in den Quotienten der Mittelwerte der an der Greifswalder Oie gemessenen Windgeschwindigkeiten zu den mit dem Windatlas für Swinemünde berechneten, siehe die blaue Linie in Abbildung 3.8.b. Bei Windrichtungen zwischen 68 Grad (Ostnordost) und 293 Grad (Westnordwest) ist der Mittelwert der auf der Greifswalder Oie gemessenen Windgeschwindigkeiten 1.6-mal bis maximal 1.9-mal größer als der mit dem Windatlas für Swinemünde berechneten Windgeschwindigkeiten. Aber auch bei freier Anströ-

mung von Swinemünde über See sind die auf der Greifswalder Oie gemessenen Windgeschwindigkeiten mehr als 1.5-mal so hoch als die für Swinemünde berechneten.

Vergleicht man die in Swinemünde gemessenen Windgeschwindigkeiten mit den für Swinemünde berechneten (rote Linie), so sind für Windrichtungen zwischen 113 Grad (Ostsüdost) und 315 Grad (Nordwest) die Mittelwerte der in Swinemünde gemessenen Windgeschwindigkeiten um bis zu 35 % kleiner als die der mit dem Windatlas berechneten. Auch in diesem Beispiel werden, wie bei den oben besprochenen Vergleichen für die anderen Windatlas-Gebieten, die Windgeschwindigkeiten über Land vom Windatlas zu hoch berechnet. Bei Windrichtungen zwischen 338 Grad (Nordnordwest) und 90 Grad (Ost) werden die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu den gemessenen Windgeschwindigkeiten unterschätzt, wobei die Mittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeiten bis 1.6-mal größer sind als die der mit dem Windatlas berechneten.

### **3.4 Zusammenfassung**

Die Verifikation bereitete durch die schlechte Verfügbarkeit geeigneter Verifikationsmessreihen erhebliche Probleme. Die Windverhältnisse an den Küstenstationen werden durch Steilküsten, Küstenwälder sowie Bebauung sowie das stark gegliederte Hinterland geprägt. Diese Effekte werden durch den Windatlas, der für Wasserflächen konzipiert ist, nicht ausreichend aufgelöst. Lediglich die Daten weniger, relativ frei gelegener Messstellen, wie Westermarkelsdorf, Leuchtturm Kiel oder die Boje Darßer Schwelle und die Station auf der Greifswalder Oie liefern geeignete Eingangs- und Verifikationsdaten. Hier zeigte sich gute Übereinstimmung. Die Verifikationsbeispiele, insbesondere die Diagramme mit den Darstellungen der Quotienten der Mittelwerte belegen für diese Stationen befriedigende bis gute Ergebnisse. Die Vergleiche der mit dem Windatlas für einen bestimmten Punkt berechneten Windgeschwindigkeiten mit gemessenen Windgeschwindigkeiten bestätigen zudem die größere Genauigkeit der Windatlas-Rechnungen bei höheren mittleren Windgeschwindigkeiten. Dies entspricht den Erwartungen, da die Voraussetzungen, die bei der Berechnung der Windfelder gemacht wurden, nur bei höheren Windgeschwindigkeiten erfüllt sind.

In allen Gebieten werden die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten bei Anströmung von Land her überschätzt und über See unterschätzt.

Die mit dem Windatlas im Gebiet Kiel für Olpenitz und im Gebiet Mecklenburg für Boltenhagen berechneten Zeitreihen der Windgeschwindigkeit stimmen gut mit den Zeitreihen der gemessenen Windgeschwindigkeiten überein und weichen um weniger als 2 m/s voneinander ab. Sie sind somit als Eingabefelder für Modelle der Küstenforschung geeignet.

Im Gebiet Warnemünde lagen uns keine Daten von Messstation an der Küste vor, deren Messungen nicht beträchtlich durch lokale Effekte verändert wurden. Zudem sind die örtlichen Verhältnisse an der Küste im Gebiet Warnemünde ungünstig für Windatlas-Rechnungen, da die dort vorherrschenden mittleren Windgeschwindigkeiten mit weniger als 5 m/s sehr gering sind. Deshalb sind die relativen Fehler der Windatlas-Ergebnisse im Vergleich zu den Messergebnissen sehr hoch. Da diese Messungen sowohl als Eingangswerte als auch als Vergleichswerte für die Windatlas-Rechnungen verwendet werden müssen, sind die Verifikationsergebnisse für dieses Gebiet schlechter als die Ergebnisse der anderen Gebiete.

Im Gebiet Rügen liegen viele Messstationen an Steilküsten und deren Messungen sind damit auch hier stark von der lokalen Topographie geprägt. So sind z.B. die Windgeschwindigkeiten von Arkona mit dem Windatlas nur schwer zu berechnen. Dennoch weicht der Mittelwert der Zeitreihe der in Arkona gemessenen Windgeschwindigkeiten nur um 0.2 m/s von dem der Zeitreihe der für Arkona berechneten Windgeschwindigkeiten ab.

Auch das Gebiet Pommersche Bucht ist auf Grund der an der Küste vorherrschenden geringen Windgeschwindigkeiten nicht ideal für Windatlas-Rechnungen. Dennoch weicht die mit dem Windatlas für Swinemünde berechnete mittlere Windgeschwindigkeit nur um 0.5 m/s vom Mittelwert der gemessenen Windgeschwindigkeit ab, der rms-Fehler von 2 m/s zwischen der berechneten und der gemessenen Zeitreihe ist jedoch im Vergleich zum Mittelwert hoch.

## **4. Berechnung von hoch aufgelösten Windfeldern für Sturmflutwetterlagen**

Auf Grund von Erfahrungen mit Testrechnungen wurden alle Untersuchungen zur Berechnung von hoch aufgelösten Windfeldern bei Sturmflutwetterlagen mit einer Modellversion des Windmodells MKW durchgeführt, bei der die maximale Modellhöhe in 300 m Höhe über Grund (auf Land) bzw. über NN (auf See) liegt. Als Randwerte verwendeten wir ein Windfeld aus dem mit COSMO-EU berechneten Ensemble für die Sturmflut vom 17.10.2003 mit dem Starttermin 12 UTC + 178 Stunden Vorhersagezeit. Diese Felder wurden sowohl horizontal als auch vertikal auf das Gitter des MKW interpoliert.

Für unsere beispielhafte Untersuchung wählten wir drei Untersuchungsgebiete aus, die von unseren Projektpartnern der Universität Kiel vorgegeben wurden: ein Gebiet um Fehmarn, ein Gebiet um Dahme und die Probstei. Dabei liegen die Gebiete Fehmarn und Dahme im Windatlas-Gebiet Mecklenburger Bucht, das Gebiet Probstei im Gebiet Kiel. Alle drei Untersuchungsgebiete wurden jeweils in größere Gebiete mit einer Erstreckung von rund 40 km \* 40 km eingebettet, um Randeffekte in den Windfeldern innerhalb der Untersuchungsgebiete zu vermeiden.

### **4.1 Erwartungen**

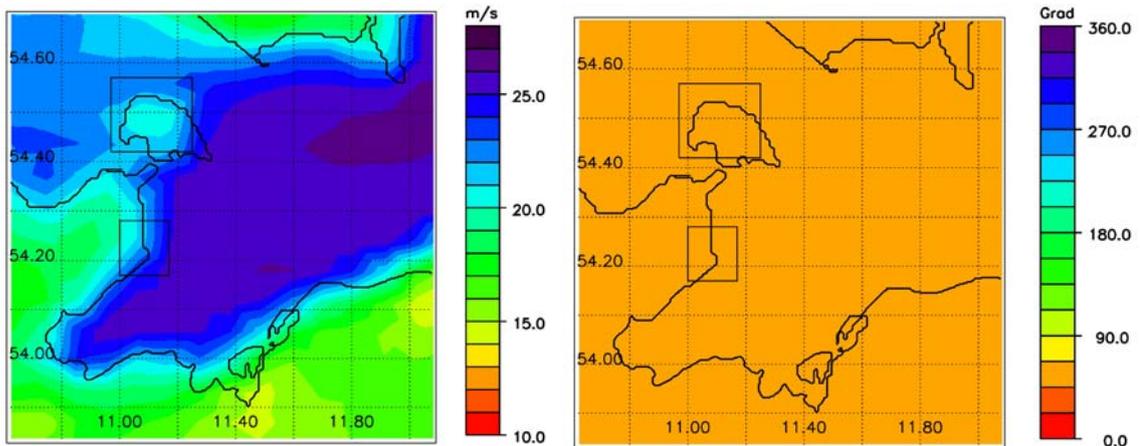
Geht man davon aus, dass das interpolierte COSMO-EU-Windfeld dem in der Natur vorkommenden Windfeld auf einem groben Gitter entspricht, so erwartet man bei einer Verfeinerung des Windfeldes auf eine kleinere Gitterweite, dass die großräumigen Gradienten der Windgeschwindigkeiten erhalten bleiben. Über See wird durch den Einfluss der Wassertiefe und des Fetchs das Windfeld leicht verändert. Insbesondere im Lee von Landflächen sollte sich die Windgeschwindigkeit mit wachsendem Abstand von Land an die durch das grob aufgelöste Windfeld vorgegebene Windgeschwindigkeit anpassen.

Da die mit dem MKW berechneten Windfelder in die interpolierten COSMO-EU-Windfelder eingebettet werden, sollten die MKW-Windfelder an den Außenrändern des Untersuchungsgebiets möglichst mit den interpolierten COSMO-EU-Feldern übereinstimmen, damit an den Gebietsrändern keine Diskontinuitäten im zusammengesetzten Windfeld auftreten. Diese interpolierten Windfelder können als Antrieb für Strömungs- und Seegangmodelle verwendet werden, bei denen ein kleineres Strömungsfeld mit höherer räumlicher Auflösung in ein Strömungsfeld mit geringer räumlicher Auflösung eingebettet wird.

### **4.2. Windfelder in der Mecklenburger Bucht**

Das auf das Gebiet der Mecklenburger Bucht interpolierte COSMO-EU-Windfeld vom 17.10.2003, 12 UTC + 178 Stunden Vorhersagesagezeit ist in Abbildung 4.1 gezeigt. Die Windrichtung über Fehmarn ist annähernd konstant und liegt im Untersuchungsgebiet zwischen 45 Grad (Ost) und 68 Grad (Ostsüdost). Die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über NN bzw. über Grund betragen auf See 20 m/s bis 27 m/s. Dabei liegt das relative Maximum der Windgeschwindigkeit am östlichen Rand des Gebiets.

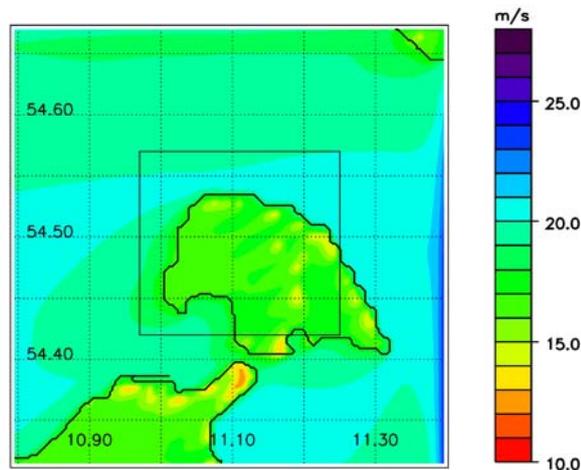
Im Windfeld ist eine leichte Umströmung von Fehmarn am nördlichen Rand der Insel zu erkennen. Da im Gitter des COSMO-EU die Insel Fehmarn nur durch drei Gitterpunkte abgedeckt wird, erstreckt sich die Abnahme der Windgeschwindigkeit über Land im Vergleich zur See nur über dem Zentrum der Insel. Eine Zunahme der Windgeschwindigkeit im Süden von Fehmarn beim Überströmen der Wasserflächen kann mit dem COSMO-EU nur grob bestimmt werden, da die Strukturen der Küstenlinie im Fehmarnsund im Vergleich zur Gitterweite zu klein sind.



**Abb. 4.1:** Von der COSMO-EU-Vorhersage auf das MKW-Gitter interpolierte Windgeschwindigkeitsfeld (linke Abb.) und Windrichtungen (rechte Abb.) am 17.10.2003, 12 UTC + 178 Stunden Vorhersage in 10 m Höhe über NN bzw. über Grund im Windatlas-Gebiet Mecklenburger Bucht. Die markierten Rechtecke beschreiben die Untersuchungsgebiete Fehmarn und Dahme.

#### 4.2.1 Fehmarn

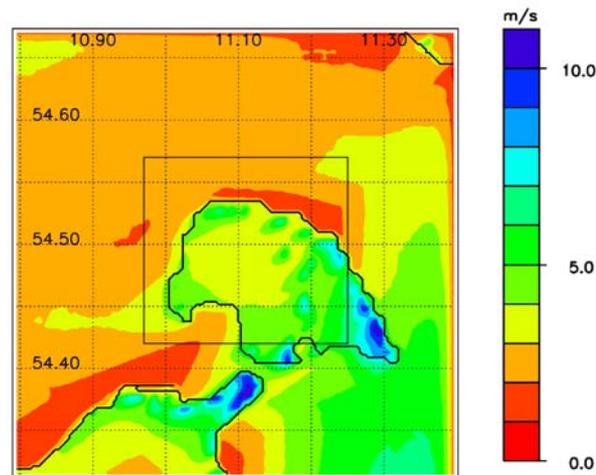
Aus dem interpolierten COSMO-EU-Windfeld wurde für dieses Gebiet in 10 m Höhe eine mittlere Windrichtung von 57 Grad und in 300 m Höhe eine mittlere Windgeschwindigkeit von 29.6 m/s als Eingabewerte für die MKW-Rechnungen bestimmt. Das daraus resultierende Windfeld ist in Abbildung 4.2 dargestellt.



**Abb. 4.2:** Mit dem MKW und den Randwerten aus den interpolierten COSMO-EU-Windfeldern berechnete Windgeschwindigkeiten im Gebiet um Fehmarn. In 300 m Höhe wurden eine feste Windgeschwindigkeit von 29.6 m/s und eine Windrichtung von 57 Grad vorgegeben.

Am nördlichen Rand nimmt die Windgeschwindigkeit innerhalb weniger Gitterpunkte um 1 m/s bis 2 m/s ab, so dass dort die Windgeschwindigkeit nur 18 m/s bis 19 m/s beträgt. Auch am östlichen Rand reduziert sich nach wenigen Gitterpunkten die Windgeschwindigkeit von maximal 24 m/s um 2 m/s bis 3 m/s. Im Inneren des Untersuchungsgebiets betragen die Windgeschwindigkeiten über See zwischen 18 m/s und 21 m/s, über Fehmarn führt die erhöhte Rauigkeit zu einem Abfall der Windgeschwindigkeit auf 16 m/s bis 13 m/s. Südlich von Fehmarn ist eine Zunahme der Windgeschwindigkeit beim Übergang von Land zu Wasser gut zu erkennen.

Ein Vergleich der mit dem MKW berechneten Windgeschwindigkeiten mit den mit dem COSMO-EU vorgegebenen Windgeschwindigkeiten ist in Abb. 4.3 gezeigt. Dargestellt ist die Differenz der Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe, an jedem Gitterpunkt berechnet aus den mit dem COSMO-EU und den mit dem MKW berechneten Geschwindigkeiten. Am nördlichen und am östlichen Rand des Untersuchungsgebiets sind die Differenzen der Windgeschwindigkeiten kleiner als 1 m/s, da dort die COSMO-EU Windgeschwindigkeiten als Randbedingung für die MKW-Felder vorgegeben waren. Am östlichen Rand des Gebiets nehmen nach wenigen Gitterpunkten Entfernung vom Rand die Differenzen zwischen den Windfeldern von Nord nach Süd zu und betragen über See maximal 7 m/s. Über Fehmarn sind die mit dem MKW berechneten Geschwindigkeiten um bis zu 11 m/s geringer als die des COSMO-EU.



**Abb. 4.3:** Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe vom COSMO-EU-Output (Abb. 4.1) minus MKW-Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe (Abb. 4.2) .

Das Beispiel zeigt, dass bei den MKW-Rechnungen im Inneren des Gebiets der Impulsaustausch der Gitterpunkte mit den Randgitterpunkten zu schwach wiedergegeben wird, um die Zunahme der Windgeschwindigkeit von West nach Ost, die im COSMO-EU-Windfeld in Abb. 4.1 östlich von Fehmarn zu sehen ist, abzubilden.

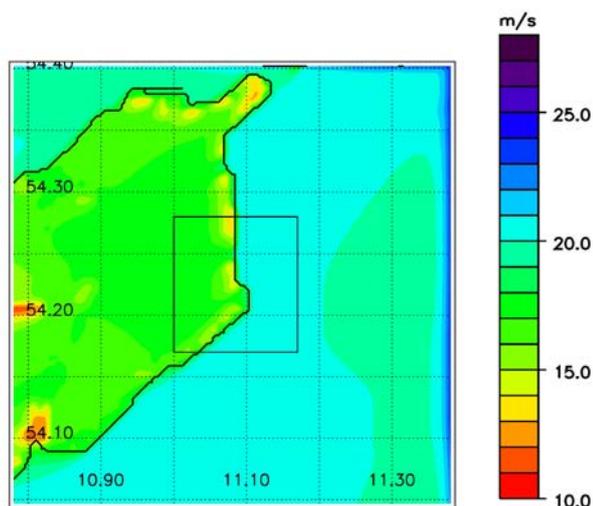
Zudem nehmen die Windgeschwindigkeiten über See bei den MKW-Windfeldern schwächer zu als bei den COSMO-EU-Windfeldern, weil die Rauigkeiten über See in den beiden Modellen unterschiedlich bestimmt werden. In COSMO-EU werden die Rauigkeiten nach Charnock aus der Windgeschwindigkeit berechnet, siehe (Doms und Schättler, 1999). Im MKW hingegen wird ein Gleichgewicht aus Rauigkeit und Windgeschwindigkeit berechnet, bei dem die Rauigkeiten in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit, der Fetchlänge und der Wassertiefe bestimmt wird, siehe Kapitel 2 sowie Ganske, Rosenhagen und Schmidt, 2006. Dabei geht die Abhängigkeit der Rauigkeit bei großen Fetchlängen in die von der Charnock-Formel (Charnock, 1955) gegebene Abhängigkeit über. In unseren Beispielrechnungen sind die Fetchlängen am nördlichen Rand des Gebiets so klein, dass die daraus resultierenden Rauigkeitslängen immer größer sind als die aus der Charnock-Formel berechneten Rauigkeitslängen. Somit sind die mit dem MKW berechneten Windgeschwindigkeiten über See geringer als die mit dem COSMO-EU berechneten.

#### 4.2.2 Dahme

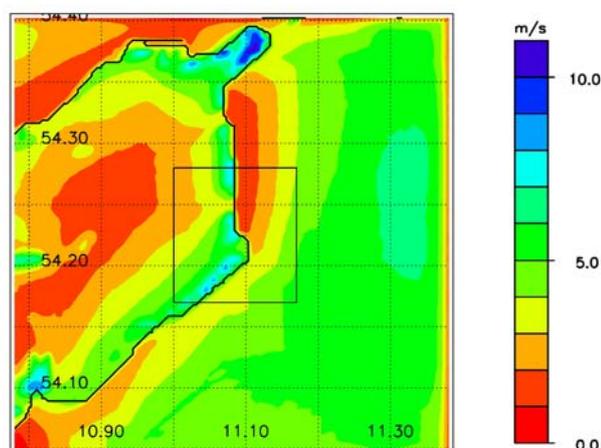
Das für das Untersuchungsgebiet Dahme mit dem MKW berechnete Windfeld in 10 m Höhe ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Die mittlere Windrichtung beträgt 56.7 Grad und die mittlere Windgeschwindigkeit am Modelloberrand 29.6 m/s. Da das Untersuchungsgebiet von Nordosten angeströmt wird, sind über See keine Beeinflussungen des Windfeldes durch die Küste zu erwarten.

Auch bei diesem Windfeld erkennt man jeweils eine Abnahme der Windgeschwindigkeit vom östlichen und nördlichen Rand ins Gebiet hinein von mehr als 2 m/s innerhalb weniger Gitterpunkte. Innerhalb des schwarz eingezeichneten Untersuchungsgebiets variiert die Windgeschwindigkeit über See um weniger als 1 m/s. Einen Vergleich der mit dem MKW berechneten Windgeschwindigkeiten und der mit der mit dem COSMO-EU berechneten Windgeschwindigkeiten zeigt Abb. 4.5.

Dargestellt ist wieder die Differenz zwischen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe, aus dem COSMO-EU und dem MKW. Innerhalb des eingezeichneten Untersuchungsgebiets unterscheiden sich die Windfelder über See um maximal 5 m/s am südöstlichen Rand des Gebiets, außerhalb des Untersuchungsgebiets um maximal 7 m/s. Somit weichen auch bei diesem Gebiet die Windfelder an den Gebietsgrenzen stark von den ursprünglichen COSMO-EU-Windfeldern ab. Bei der gewählten vorherrschenden Windrichtung ergibt sich kein Vorteil zwischen den MKW-Windfelder und den interpolierten COSMO-EU-Windfeldern.



**Abb. 4.4:** Mit dem MKW und den Randwerten aus den interpolierten COSMO-EU-Windfeldern berechnete Windgeschwindigkeiten im Gebiet um Dahme. In 300 m Höhe wurden eine feste Windgeschwindigkeit von 29.6 m/s und eine Windrichtung von 56.7 Grad vorgegeben.



**Abb. 4.5:** Mit dem COSMO-EU bestimmte Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe (Abb. 4.1) minus der mit dem MKW berechneten Geschwindigkeiten (Abb. 4.4).

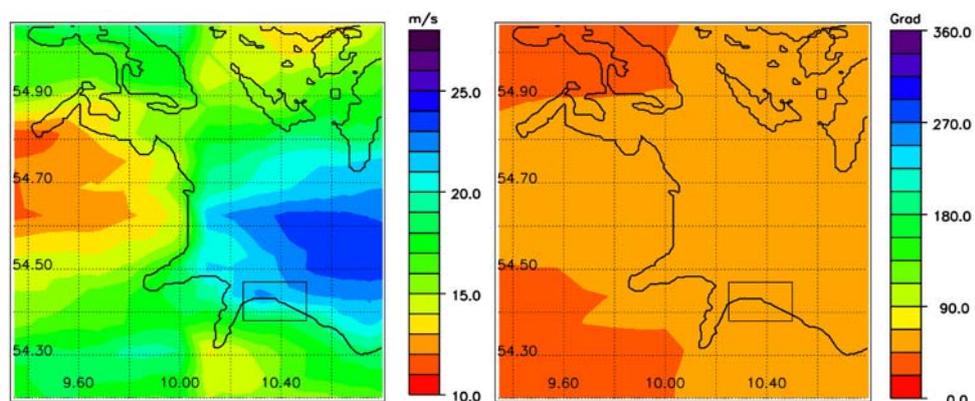
### 4.3 Das Windfeld im Untersuchungsgebiet Probstei in der Kieler Bucht

Das dritte Untersuchungsgebiet liegt im Windatlas-Gebiet Kiel. Das interpolierte COSMO-EU-Windfeld ist in Abbildung 4.6 gezeigt. Die Windrichtung über dem eingezeichneten Untersuchungsgebiet Probstei ist annähernd konstant und liegt im Untersuchungsgebiet zwischen 45.0 Grad (Ost) und 67.5 Grad (Ostsüdost). Die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über NN bzw. über Grund betragen auf See 20 m/s bis 23 m/s. Dabei liegt das relative Maximum der Windgeschwindigkeit am nordöstlichen Rand des Gebiets Probstei. Im COSMO-EU-Windfeld sind Lee-Effekte in Küstennähe nicht zu beobachten. Das Windfeld im Untersuchungsgebiet wird durch das großräumige Windfeld mit dem Maximum der Windgeschwindigkeit am östlichen Rand des Gebiets Kiel bestimmt.

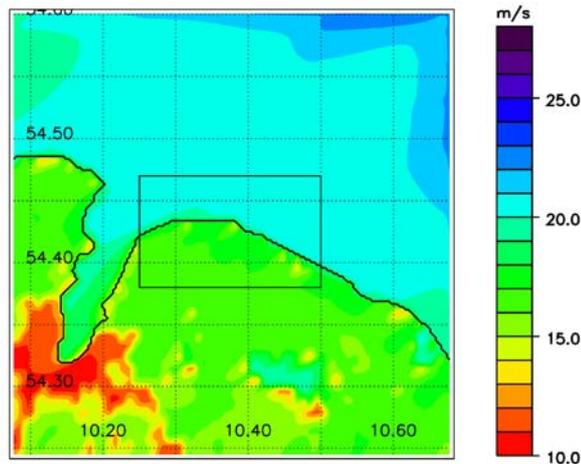
Auch in dem mit dem MKW berechneten Windfeld für das Gebiet Probstei in Abbildung 4.7 sind Lee-Effekte in Küstennähe nur schwach ausgeprägt. Über See variieren die Windgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet Probstei nur um maximal 1 m/s. An den Rändern des Gebiets Kiel betragen die Änderungen der Windgeschwindigkeit innerhalb weniger Gitterpunkte bis zu 2 m/s.

Abbildung 4.8 zeigt wieder die Differenz der Windfelder, die mit COSMO-EU berechnet und auf das Gitter interpoliert wurden und die mit dem MKW und den Randwerten des COSMO-EU bestimmten. Dabei erreichen im Untersuchungsgebiet Probstei über See die größten Differenzen Werte von bis zu 3 m/s (am nördlichsten Teil der Küste). Insgesamt muss man feststellen, dass auch in diesem Gebiet eine Berechnung der Windfelder mit dem MKW keine entscheidenden Vorteile gegenüber einer reinen Interpolation der COSMO-EU-Windfelder auf das feinere Gitter bringt, da ausgeprägte Lee-Effekte bei diesen Windrichtungen auch im MKW-Windfeld nicht auftreten.

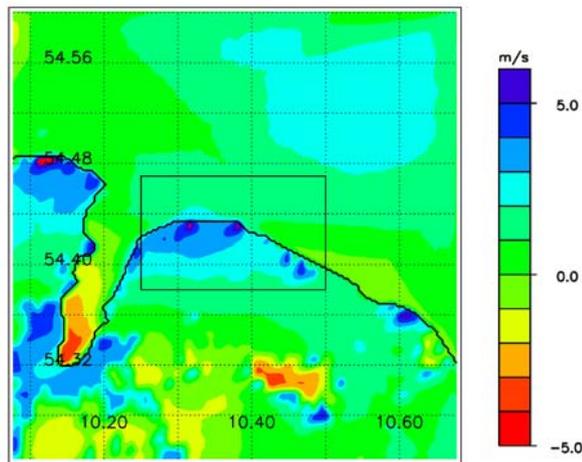
Anders ist dies im Gebiet der Kieler Förde. Hier bringen die Rechnungen mit dem MKW einen sichtbaren Vorteil gegenüber der reinen Interpolation der COSMO-EU-Windfelder: Die Kieler Förde wird im gröberen COSMO-EU-Gitter in Abbildung 4.6 praktisch nicht als Wasserfläche erkannt, so dass dort nur das großräumige Windfeld die Windgeschwindigkeiten bestimmt. Das MKW hingegen kann die Kieler Förde als Wasserfläche mit entsprechender Rauigkeit auflösen und zeigt in Abbildung 4.7 eine Zunahme der Windgeschwindigkeit von Ost nach West. Hier sind die mit dem MKW berechneten Windgeschwindigkeiten in der Kieler Förde um bis zu 5 m/s höher als die mit dem COSMO-EU berechneten.



**Abb. 4.6:** Von der COSMO-EU-Vorhersage auf das MKW-Gitter interpolierte Windgeschwindigkeiten (linke Abb.) und Windrichtungen (rechte Abb.) vom 17.10.2003, 12 UTC + 178 Stunden Vorhersage in 10 m Höhe über NN bzw. über Grund im Windatlas-Gebiet Kiel. Das eingezeichnete Rechteck beschreibt das Testgebiet Probstei.



**Abb. 4.7:** Mit dem MKW und den Randwerten aus den interpolierten COSMO-EU-Windfeldern berechnete Windgeschwindigkeiten im Gebiet um die Probstei. In 300 m Höhe wurden eine feste Windgeschwindigkeit von 27.9 m/s und eine Windrichtung von 54.6 Grad vorgegeben.



**Abb. 4.8:** Mit dem COSMO-EU berechnete Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe (Abb. 4.6) minus mit dem MKW berechnete Geschwindigkeiten (Abb. 4.7).

#### 4.4 Zusammenfassung

Die Testrechnungen zeigen, dass eine Berechnung der Windfelder mit dem MKW für die ausgewählten Untersuchungsgebiete im Allgemeinen keine Vorteile gegenüber einer reinen Interpolation der COSMO-EU-Windfelder bringen. Auf Grund des relativ glatten Verlaufs der Küsten in den drei Untersuchungsgebieten sind stärkere Einflüsse der Küste auf das Windfeld in Küstennähe nur bei Westwindlagen zu erwarten, bei denen jedoch in den Untersuchungsgebieten der Deutschen Ostseeküste keine stärkeren Sturmfluten auftreten. Dies gilt jedoch nicht im Falle von stark gegliederten Küsten, wie am Beispiel der Kieler Förde gezeigt. Hier ergeben die Berechnungen der Windfelder mit dem MKW realistischere Ergebnisse als die reine Interpolation der COSMO-EU-Windfelder.

Nestet man jedoch die mit dem MKW bestimmten Windfelder in die mit COSMO-EU bestimmten Windfelder, so ergibt sich am Rand des genesteten Windfelds immer eine Diskontinuität im erzeugten Windfeld, die für spätere Wellenberechnungen ungünstig ist. Dies ist dadurch bedingt, dass über See die Rauigkeiten bei den Modellen COSMO-EU und MKW unterschiedlich bestimmt werden. Dadurch sind die mit dem MKW berechneten Windgeschwindigkeiten in den Untersuchungsgebieten an Gitterpunkten über See immer kleiner als die mit COSMO-EU berechneten.

## 5. Literatur

- Charnock, H. , 1955:** Wind stress over a water surface. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 81, pp 639-640.
- Doms, G. und U. Schättler, 1999:** The Nonhydrostatic Limited-Area Model LM (Lokal Modell) of DWD. <http://www.cosmo-model.org>
- Europäische Kommission, 2000:** Global Landcover 2000 Database. European Commission, Joint Research Centre. [www.gvm.sai.jrc.it/glc2000](http://www.gvm.sai.jrc.it/glc2000).
- C. Füg und H. Schmidt, 2001:** Windantrieb für Küstenseegang. Abschlußbericht zu dem meteorologischen Teilprojekt im KFKI-Forschungsvorhaben „Bemessungsseegang für Küstenschutzwerke und Randdünen“. Deutscher Wetterdienst, Hamburg.
- Ganske, A. , G. Rosenhagen und H. Schmidt, 2006:** Der Windatlas für Deutsche Küstenseegebiere der Nordsee, Abschlußbericht KFKI-Projekt MOSES.
- Hinneburg, D., Raabe, A. und G. Tetzlaff, 1997:** Wind- und Seegangs atlas für das Gebiet um Darss und Zingst. Teil1: Windatlas. Wiss. Mitt. Inst. f. Meteor. Univ. Leipzig u. Inst. f. Troposphärenforschung e.V. Leipzig, Bd. 5, 1-164.
- Rudolph, E. und G. Gayer, 1995:** Atlas of GESIMA wind fields in the Greifswalder Bodden, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Geesthacht 1995.
- J. H. Schmidt und Pätsch, 1992:** Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Die Küste, Heft 54.
- H. Schmidt, H. Günther und R. Strüfing, 1994:** Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerk-Systemen. Teibereich Meteorologie. Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben MTK 0545 A, Deutscher Wetterdienst, Hamburg.
- Seifert, T. Tauber, F. und B. Kayser: 2001:** „A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea - 2nd edition“, Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25-29. November 2001, Poster #147. <http://www.io-warnemuende.de/iowtopo>
- C.A. Sherman, 1976:** A Mass-Consistent Model for Windfields over Complex Terrain. Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-76171, Rev. 1.
- R.M. Traci, G.T. Phillips und P.C. Patniak, 1978:** Wind Energy Site Methodology Development. RLO/2440-78-2.
- R. Weiß, F. Feser and H. Günther, 2003:** Wind- und Seegangsklimatologie 1958 - 2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. GKSS 2003/10.
- J. Wu, 1982:** Wind stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. J. Geophys. Res. 87, pp. 9704 - 9706.

## 6. Danksagung

Wir danken dem Bundesamt für Seefahrt und Hydrographie und dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock für die Überlassung der Messdaten ihrer Stationen an der Ostseeküste. Weiter danken wir den Kollegen des Deutschen Wetterdienstes in Potsdam, Boltenhagen, Warnemünde und Barth für die detaillierten Informationen zu den Messstationen des Deutschen Wetterdienstes.