

Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen

Von HEINER SCHMIDT und JOHANNES PÄTSCH

Zusammenfassung

Für verschiedene Orte auf Norderney wird die Richtungsabhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit aus vierjährigen Messungen dargestellt. Wegen der großen Unterschiede der Bodenrauigkeit auf der Insel ergeben sich zum Teil erhebliche Differenzen in der Windgeschwindigkeit. Die Simulation der Windverhältnisse mit einem dreidimensionalen numerischen Modell der Luftströmung ergibt eine befriedigende Übereinstimmung. Aus der flächendeckenden Modellrechnung können richtungsabhängige Faktoren zur Umrechnung der Windwerte von verschiedenen Meßorten auf die freie See abgeleitet werden.

Summary

The directional dependence between mean wind speed and location for Norderney Island is calculated from measurements taken over a four year period. Strongly varying surface roughnesses generate large differences in the wind speed. A simulation of the wind conditions using a three-dimensional numerical model shows satisfactory agreement with the measured data. From the model calculations, direction dependent factors can be deduced for relating the wind speed at different locations to their corresponding offshore values.

Inhalt

1. Einleitung	131
2. Die Windmessungen	132
3. Das numerische Modell MKW/SWA	133
4. Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen und die Ableitung von Faktoren zur Übertragung auf die freie See	135
4.1 Vorbemerkung	135
4.2 Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen	136
4.3 Ableitung der Übertragungsfaktoren	138
4.4 Weitere Ergebnisse	141
5. Schlußbemerkung	142
6. Schriftenverzeichnis	142

1. Einleitung

Es gibt heute in den küstennahen Seegebieten kaum noch ständig verfügbare Windmeßstellen. Da eine physikalische Zuordnung von Seegang, Windstau u. ä. vernünftigerweise nur zum Wind auf See vorgenommen werden sollte, ist eine Methode zur Korrektur der landgestützten (und vom Land selbst beeinflussten) Windmessungen erforderlich. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ in dem Teilprojekt „Naturmessungen“ auch ein meteorologisches Programm vorgesehen.

Das meteorologische Programm wurde vom Seewetteramt (SWA) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt. Es bestand aus einem Windmeßprogramm, um das notwendige Basismaterial bereitzustellen und um auch die anderen Teilprojekte mit Zeitserien des Windes versorgen zu können. Außerdem sollte anhand der Messungen auf Norderney versucht werden, eine auch auf andere Orte übertragbare Methode anzugeben, um von den auf einer Insel oder an der Küste gemessenen Werten approximativ auf die Windverhältnisse der freien See schließen zu können.

2. Die Windmessungen

In der Meteorologie ist seit langem bekannt, daß die Windverhältnisse an einem Meßort (-punkt) zum einen natürlich von den großräumigen Klimabedingungen, zum andern aber von der Höhe über Grund und kleinräumig ganz entscheidend von der Rauigkeit des Erdbodens in der näheren und weiteren Umgebung sowie von orographischen Strukturen geprägt werden. Als Beispiele für die sehr umfangreiche Literatur zu diesem Thema seien hier nur CHRISTOFFER u. ULBRICHT-EISSING (1989) sowie TROEN u. PETERSEN (1990) genannt.

Daher bestückte das SWA auf der Insel Norderney zusätzlich zu den bestehenden Windmeßeinrichtungen „Wetterstation“ (DWD) und „Wattpfahl“ (Forschungsstelle Küste) noch vier weitere Orte („Hafen“, „Flugplatz“, „Wasserwerk“ und „Nordpfahl“) mit Meßeinrichtungen. Die Lage der Stationen ist in Abbildung 1 dargestellt. Es wurde versucht, mit den Stationen im Rahmen der logistischen Gegebenheiten möglichst viele unterschiedliche Umgebungsbedingungen zu erfassen. Die Station „Hafen“ mißt in den vier Niveaus 4, 10, 16 und 24 m, die anderen messen nur in einem Niveau nahe 10 m über Grund.

Drei der neuen Stationen konnten nach Überwindung von Baurechts- und Naturschutzhindernissen im Januar 1988 in Betrieb genommen werden. Die Station „Nordpfahl“ wurde auf dem seeseitigen der beiden 1989 im Bühnenfeld D1-E1 eingespülten Meßpfähle der

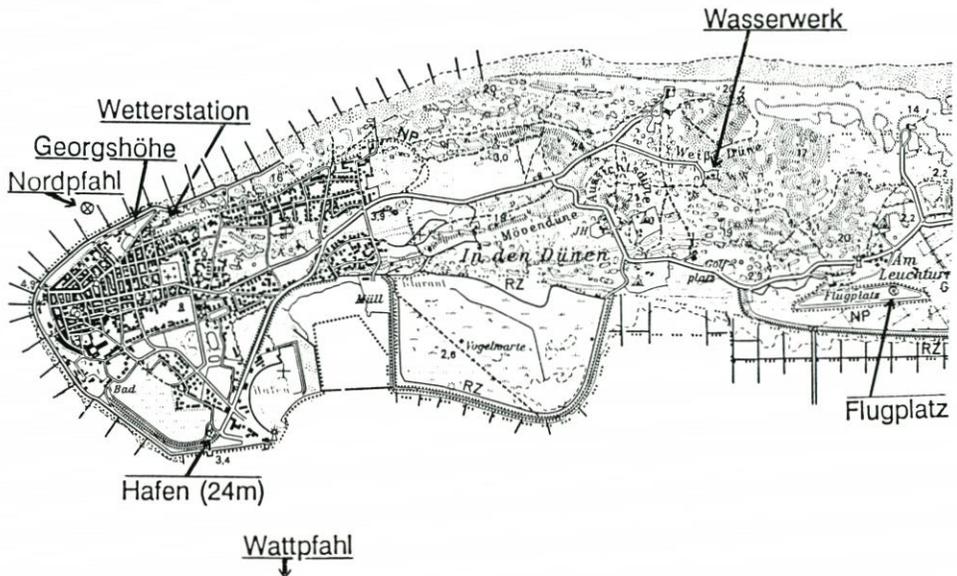


Abb. 1: Die Lage der Windmeßeinrichtungen auf der Insel Norderney.

Tabelle 1. Verfügbarkeit der Windmessungen an den Meßstellen auf Norderney

	1988		1989		1990	
Hafen 24 m	1	7	1	7	1	1
Flugplatz	-----*4		-----		-----	
Wasserwerk	-----		-----		-----	
Wetterstation	-----		-----		-----	
Wattpfahl	-----		I-----		-----	
Nordpfahl	-----		-----		-----	
	1990		1991		1990	
Hafen 24 m	1	7	1	7	1	1
Flugplatz	--*1		-----*5		-----*8	
Wasserwerk	--*3		-----		-----	
Wetterstation	-----		-----		-----	
Wattpfahl	-----		-----		-----	
Nordpfahl	I--*2		*6-----		*7-----	
*1 (Umbau Flughafen Mast)			*5 (Anlage ausgefallen)			
*2 (Blitzschlag)			*6 (nach *2 nur Richtung)			
*3 (Stromausfall)			*7 (Meßeinrichtung OK)			
*4 (Meßanlage def.)			*8 (Neue Siggelkow Anlg)			

Forschungsstelle Küste montiert. Nach verschiedenen Schwierigkeiten (u. a. durch Blitzschlag) waren die Windmessungen hier erst ab Juni 1991 verfügbar. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Verfügbarkeit aller Windmeßeinrichtungen.

Die Windmessungen erfolgten auf konventionelle Weise mit einem Schalenstern-Anemometer für die Windgeschwindigkeit und einer Einblatt-Windfahne für die Richtung. An drei der neuen Stationen wurden moderne Sensoren verwendet, deren digitale Signale direkt von einer elektronischen Meßwertverarbeitung (Fa. Siggelkow, Hamburg) im Takt von 1 Sekunde aufgenommen und über je 10 Minuten zu Mittelwert, Standardabweichung und Maximalwert von Richtung und Geschwindigkeit verarbeitet wurden. Die abgeleiteten Größen wurden auf Cassetten gespeichert. Vom gleichen Typ (nur mit Fernübertragung) ist die Station „Wattpfahl“ der Forschungsstelle Küste. Die Station „Hafen“ war ebenfalls ähnlich, nur war die Erfassungseinheit schon sehr alt. Sie hatte in zunehmendem Maße Ausfälle in einigen Niveaus und mußte zum Ende des Projektes gegen eine neue Anlage von Siggelkow ausgetauscht werden. Die Wetterstation ist mit einer modernen Windmeßanlage der Fa. Thies, Göttingen, ausgerüstet.

Das Staatliche Amt für Insel- und Küstenschutz (STAIK, Norden) hat Ende 1991 in unmittelbarer Nähe zu unserer Station „Hafen“ das Oberfeuer Riffgat mit einer Windmeßanlage (Höhe 18 m, Fa. Lambrecht, Göttingen, und Fa. Ott, Kempten) ausgerüstet. Die Daten werden auf einen PC in Norden fernübertragen und dienen dem Sturmflutwarndienst. Die Windverhältnisse vom „Hafen“ sind unmittelbar auf die Messungen des STAIK übertragbar.

3. Das numerische Modell MKW/SWA

Das SWA verfügt seit längerem über ein numerisches, dreidimensionales Modell zur Simulation der Luftströmung über orographisch gegliedertem Gelände mit wechselnder

Bodenrauigkeit. Dieses relativ einfache statische (nicht zeitabhängige) Modell wurde vom SWA aus dem NOAA Boundary Layer Model (NOABL) weiterentwickelt (SHERMAN, 1976; TRACI, 1978). Es besitzt ein gleichabständiges Gitter in der Horizontalen. Die Vertikale wird durch eine geländefolgende Koordinate beschrieben, die Gitterabstände wachsen hier mit zunehmendem Abstand vom Boden.

Das Modell wandelt ein vorzugebendes Anfangswindfeld in ein massen-konsistentes Windfeld (daher der Name MKW) um. Das Modell kann hier nicht eingehend beschrieben werden; einige grundsätzliche vereinfachte Anmerkungen mögen zum Verständnis genügen.

Die Reibung der Atmosphäre an der rauhen Erdoberfläche erzeugt eine turbulente Durchmischung und damit einen vertikalen Impulsfluß, der beständig Impuls aus dem Wind entnimmt und in den Boden abführt. Unter idealen Bedingungen („unendliche horizontale Homogenität“) bildet sich ein vertikales Gleichgewichtsprofil aus, das „logarithmische Windprofil“, bei dem das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten u in zwei Höhen z_1 und z_2 über Grund nur durch die Rauigkeit (hier beschrieben durch eine Rauigkeitslänge z_0) der Erdoberfläche und eine Verdrängungshöhe d bestimmt wird:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln(z_2 - d) - \ln(z_0)}{\ln(z_1 - d) - \ln(z_0)} \quad (1)$$

Die Verdrängungshöhe kommt nur dann zum Tragen, wenn der Untergrund sehr dicht mit Hindernissen besetzt ist, etwa in einem Kornfeld, einem Wald oder einer Stadt. In diesen Fällen beträgt d etwa 4/5 der mittleren Hindernishöhe; ansonsten ist d annähernd gleich Null. Für die Stadt Norderney wurde $d = 7$ m gesetzt. Das Windprofil wird gewissermaßen um die Höhe d vom Erdboden nach oben verdrängt; unterhalb d ist die mittlere Windgeschwindigkeit klein. Typische Werte für die Rauigkeitslänge auf Norderney gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Rauigkeitslänge z_0 in Meter

Stadt	0,7
Dünengelände	0,3
Marschwiesen	0,01
Strand	0,001
Meer	0,00025

Wenn der Wind nun von einem Gebiet geringerer Rauigkeit auf eines mit höherer Rauigkeit übertritt, wird das Gleichgewicht am Boden gestört. Eine interne Grenzschicht bildet sich aus, deren Höhe mit zunehmender Entfernung vom Rauigkeitssprung wächst. Unterhalb der Grenzschicht stellt sich der Wind mit einer erhöhten Turbulenz schnell auf die neue Rauigkeit ein, oberhalb herrschen noch die alten Verhältnisse. Bei einem Rauigkeitssprung von rau nach glatt ist es ähnlich, nur dauert die Anpassung an die neuen Verhältnisse länger, da die aus dem raueren Gebiet herangeführte Turbulenz nur allmählich gedämpft wird.

Beim Überströmen einer Insel (wie Norderney) erfolgt nun ein ständiger Wechsel der Bodenrauigkeit. Auch sind quer zur Strömungsrichtung unterschiedliche Rauigkeiten vorhanden. Die daraus resultierenden Geschwindigkeitsunterschiede werden im Verlauf der Strömung durch horizontale Vermischung ausgeglichen.

Die beschriebenen Vorgänge werden in dem Modell MKW/SWA in dem ersten Programmteil approximativ behandelt. Es berechnet zu einer in einer gewissen Höhe vorzugebenden generellen Strömungsrichtung und -geschwindigkeit ein dreidimensionales Anfangswindfeld in geländefolgenden Koordinaten über der Orographie.

Das Anfangswindfeld ist im allgemeinen nicht massenkonsistent, d. h., in eine Gitterzelle kann mehr Luft einströmen als wieder hinaus fließt oder umgekehrt. Ein zweiter Programmteil besorgt nun die Massenkonsistenz mittels eines iterativen Potentialströmungsausgleichs. Dabei werden an den drei Windkomponenten jeder Gitterzelle so lange kleine Korrekturen angebracht, bis das gesamte Windfeld an jedem Punkt massenkonsistent (divergenzfrei) ist. Die Iteration minimiert die Summe der Quadrate der Zusatzvektoren. Die Lösung der zugehörigen Differentialgleichung wird sehr effizient mit einem modernen Mehrgitter-Verfahren vorgenommen. Durch den Potentialströmungsausgleich ergeben sich auch die Effekte seitlicher Umströmung von Hindernissen, eine Strömungsüberhöhung über Kuppen und Kämmen sowie Vorstau- und Lee-Effekte; alles ähnlich, wie es vom Wasser her bekannt ist.

Bei dem erfolgreichen Einsatz des Modells im KFKI-Projekt „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in Ästuarien der Deutschen Bucht“ konnte bereits eine Optimierung des Modellverhaltens im Fernfeld (1–20 km) hinter Rauigkeitssprüngen durch Vergleich mit dem sehr aufwendigen Grenzschichtmodell GESIMA der GKSS (Geesthacht) erreicht werden. Anhand der Windmessungen auf Norderney wurde auch das Verhalten im Nahfeld (50–1000 m) sowie die grundsätzliche Einstellung der wenigen freien Parameter („Schrauben“) des Modells der Natur angepaßt.

Das Modell MKW/SWA ist bezüglich der Geschwindigkeit vollständig linear, d. h., bei gleichem Rechengebiet und gleicher Anströmrichtung unterscheiden sich die Ergebnisse für zwei verschiedene Anströmgeschwindigkeiten nur durch einen konstanten Faktor, der für alle Gitterpunkte des dreidimensionalen Windfeldes gültig ist. Diese Eigenschaft ist nützlich, denn so kann die Modellrechnung zunächst mit einer beliebigen Anströmgeschwindigkeit gestartet werden. Durch Vorgabe eines tatsächlichen Windwertes (z. B. eines Meßwertes) an einem Gitterpunkt ist der Faktor zur Skalierung des gesamten Feldes eindeutig bestimmt. Bei gleichzeitiger Vorgabe mehrerer Stützpunkte muß eine Ausgleichung vorgenommen werden. Für die Norderney-Rechnung wurden fünf Stützpunkte je Richtung verwendet.

4. Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen und die Ableitung von Faktoren zur Übertragung auf die freie See

4.1 Vorbemerkung

In der Meteorologie ist die Windrichtung definiert als die Richtung, aus der der Wind kommt; anders in der Ozeanographie, dort wird ein Strom mit der Richtung bezeichnet, in die er setzt. Die Windrichtung beginnt mit 0° bei Nordwind und zählt im Uhrzeigersinn, so daß 90° Ostwind bedeutet usw. Die Windgeschwindigkeit wird hier in Meter/Sekunde angegeben (obgleich in der Meteorologie sonst wegen der Belange der Luft- und Seefahrt die Einheit „Knoten“, kn = Seemeilen/Stunde vorherrscht; 1 kn = 0.51444 m/s).

Aus den Messungen des vierjährigen Projektzeitraums (Januar 1988 bis Dezember 1991) können verlässliche Angaben zu den langfristigen Klimaverhältnissen nur bedingt gewonnen werden; der Zeitraum ist zu kurz. Häufigkeitsverteilungen und insbesondere Mittelwerte des Windes beginnen sich wegen der großen Variabilität des Windes in allen Zeitskalen erst etwa ab einem 10jährigen Zeitraum zu stabilisieren. Für viele Anwendungen werden in der Klimatologie sogar 30 Jahre („Klima-Normal-Perioden“) verwendet. Hier werden nur einige abgeleitete Ergebnisse zu den 10 Jahren 1982–1991 dargestellt.

Anders als Mittelwerte stabilisieren sich Verhältniszahlen, die die mittlere Relation

zwischen der Windgeschwindigkeit an zwei Orten beschreiben, schon nach relativ kurzer Zeit. Ein halbes Jahr an stündlichen Parallelmessungen reichen im allgemeinen aus. Das Ziel, Übertragungsfaktoren zur Umrechnung des Windes von einem Ort auf einen anderen zu bestimmen, ist daher mit den vierjährigen Messungen des Projektes gut zu erreichen.

4.2 Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen

Bei der Beschreibung des Modells (Abschnitt 3) wurde bereits deutlich, daß der Wind über vorwiegend ebenem Gelände (wie in Norderney) an einem Punkt im wesentlichen durch die stromauf vorhandene Rauigkeit der Erdoberfläche bestimmt wird. Daher muß hier eine Unterscheidung nach Windrichtungen vorgenommen werden. Die Klassenbreite der Richtung beträgt 30° , die 12 Klassen sind zentriert auf 0, 30, 60 Grad usw.

Die Windrichtung ist bei geringen Geschwindigkeiten sehr variabel und nicht mehr allein durch die Dynamik der Luftströmung bestimmt. Daher wurden für die folgende Auswertung alle gleichzeitig an den verschiedenen Orten auf der Insel gemessenen Windwerte außer Betracht gelassen, wenn die Windgeschwindigkeit am Hafen in 24 m Höhe (als Stundenmit-

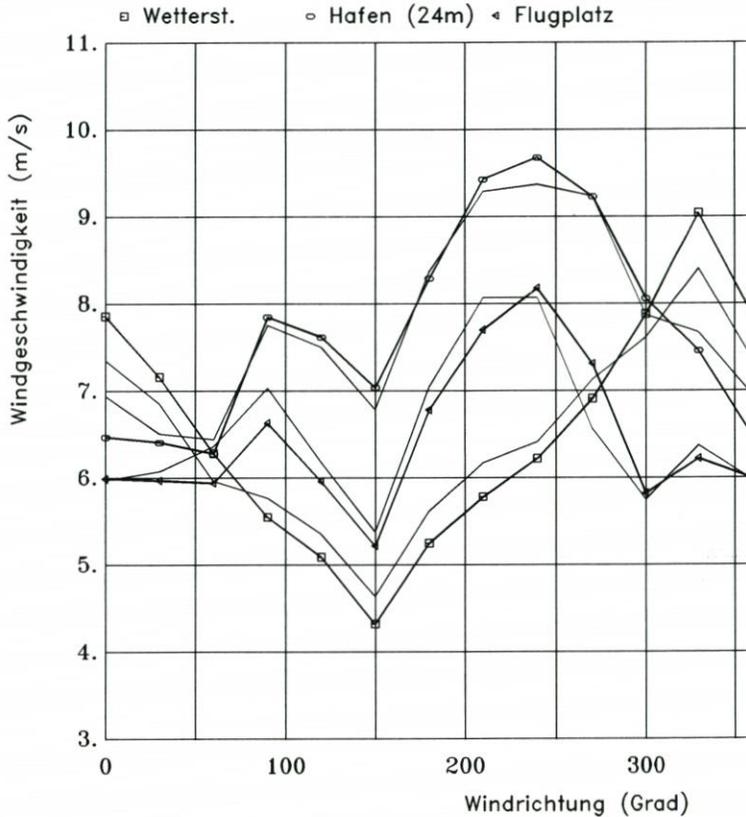


Abb. 2: Mittlere Vergleichs-Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung für die Orte „Wetterstation“, „Hafen 24 m“ und „Flugplatz“, berechnet nur für die Fälle, bei denen die Windgeschwindigkeit am Hafen (24 m) mehr als 4 m/s betrug. (Dicke Linien mit Symbolen: Aus Messungen. Dünne zugehörige Linien: Modellrechnungen).

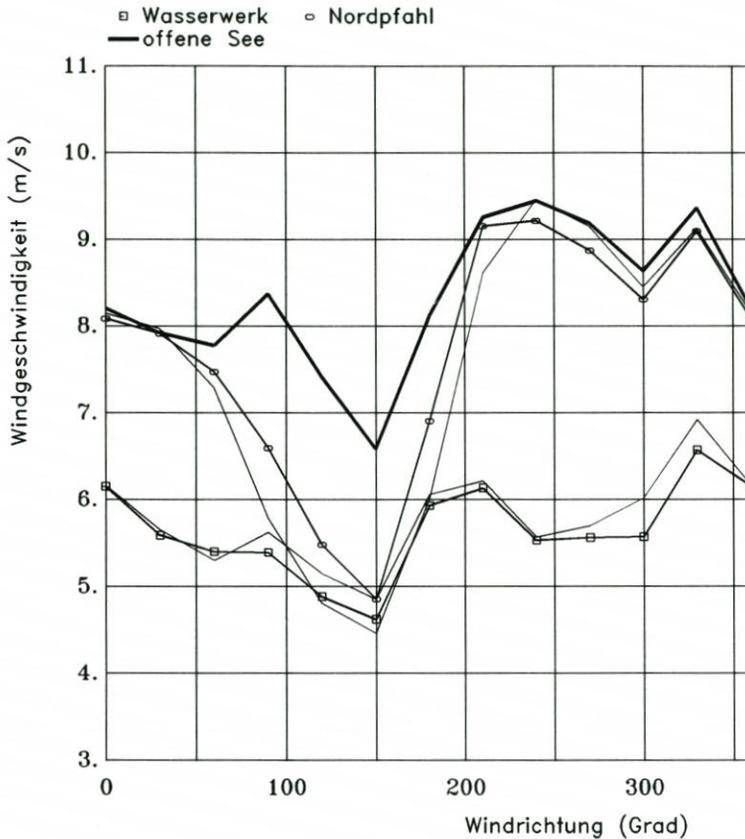


Abb. 3: Wie Abb. 2, für die Orte „Nordpfahl“ und „Wasserwerk“. Die sehr dicke einzelne Linie bezeichnet die Modellrechnung für die freie See.

telwert) kleiner als 4 m/s war. Unter dieser Bedingung wurden die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für die 12 Richtungsklassen über den gesamten vierjährigen Meßzeitraum berechnet. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 2 und 3 als dicke Linien mit Symbolen dargestellt.

Abb. 2 enthält die Verhältnisse für die Wetterstation, den Hafen (24 m) und den Flugplatz, Abb. 3 die für das Wasserwerk und den Nordpfahl. Für den Watterpfahl lagen nicht genügend Messungen vor. Es zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den Stationen, die zusätzlich noch mit der Windrichtung stark variieren. So ergeben sich z. B. für den Nordpfahl, der im aerodynamisch glatten Wasser steht, meist um 2–3 m/s höhere Werte als für das Wasserwerk, das allseits vom relativ rauen Dünengelände umschlossen ist (Abb. 3). Südöstlicher Wind (120–150°) ist am Nordpfahl dagegen geringer, weil der Pfahl sich dann im Lee der extrem rauen Stadt Norderney befindet. Die Meßhöhe ist dann sogar noch niedriger als die mittlere Dachhöhe der Häuser. Ähnliche Unterschiede zeigen sich auch beim Vergleich der Wetterstation mit dem Hafen. Diese Stationen liegen bei unterschiedlichen Windrichtungen im Lee der Stadt.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für die 12 Anströmrichtungen sind in den Abb. 2 und 3 für die fünf Stationen zusätzlich als dünne Linienzüge eingetragen. Eine Zuordnung zu den Kurven der Messungen (dicker, mit Symbolen) ist leicht möglich, da sie immer nahe

beinander liegen. Die Modellrechnungen (die in der näheren Umgebung der Stationen in einem horizontalen Raster von 50 m, in größerer Entfernung zu ihnen im 200-m-Raster erfolgten) geben die gemessenen Windverhältnisse folglich sehr gut wieder. Die mittlere Abweichung, über alle Richtungen und alle fünf Stationen berechnet, beträgt $\pm 0,3$ m/s. Wir schließen daraus, daß die Modellrechnung eine entsprechende Güte auch an allen anderen Gitterpunkten aufweist, was allerdings unbeweisbar ist, da es dort keine Messungen gibt.

Als sehr dicke Linie sind in Abb. 3 die Windwerte für die ungestörte Anströmung der Modellrechnung in 10 m Höhe eingetragen. Diese Werte entsprechen den Windverhältnissen auf der „freien See“. Dies ist nun nicht die Mitte der Nordsee, sondern ein Punkt etwa 5–10 km nördlich der Insel Norderney. Er liegt also noch im Küstenvorfeld. Es ist zu beachten, daß auch die Linie für die „freie See“ mit den anderen Linien der Abb. 2 und 3 konsistent ist. Das heißt, es gilt die Einschränkung, daß in die Berechnung der Mittelwerte nur Werte eingehen, wenn am Hafen in 24 m Höhe der Wind größer als 4 m/s ist.

Bei der Erläuterung des Modells (Abschnitt 3) wurde erwähnt, daß sich bei der Umströmung von Hindernissen auch örtliche Abweichungen der Windrichtung von der Generalrichtung ergeben. Dies ist auch bei der Überströmung von Norderney der Fall. Die Abweichungen betragen aber in Höhen von 10 m und mehr über Grund an den Meßorten nur wenige Grad, so daß wir hier auf eine Erörterung verzichten können. Die Winkelabweichung wird für die praktische Anwendung gleich Null gesetzt.

4.3 Ableitung der Übertragungsfaktoren

Die Ableitung der mittleren windrichtungsabhängigen Faktoren f zur Übertragung der Windgeschwindigkeit u von einem Ort 1 auf einen anderen Ort 2 ist nun als gute Näherung sehr einfach. Es sind die Quotienten der in den Abb. 2 und 3 dargestellten (gemessenen oder modellierten) Vergleichs-Windgeschwindigkeiten u_v für jede Richtungsklasse i :

$$f_{i,1 \rightarrow 2} = \frac{u_{v,i,2}}{u_{v,i,1}} \quad (2)$$

Diese Übertragungsfaktoren verwenden wir nun nicht nur zur Transformation von Mittelwerten, sondern auch für beliebige Einzelwerte der Windgeschwindigkeit:

$$u_2 = f_{i,1 \rightarrow 2} \cdot u_1 \quad (3)$$

Dabei ergibt sich der Index i aus der zu u_1 gehörigen Windrichtung. In der Praxis der Übertragung von Einzelwerten interpolieren wir meist noch Zwischenwerte von f entsprechend der Windrichtung.

Diese Methode wurde schon für die Darstellung der Windverhältnisse am Nordpfahl (Abb. 3) verwendet, der nur im Zeitraum Juni bis Dezember 1991 Messungen lieferte. Hier wurden zunächst für diese sieben Monate nach (2) die entsprechenden empirischen Faktoren zur Übertragung von der Wetterstation auf den Nordpfahl berechnet und dann mit (3) die vierjährigen Mittelwerte der Wetterstation transformiert.

In Abb. 4 und numerisch in Tabelle 3 sind nun die richtungsabhängigen Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeiten verschiedener Meßorte auf die freie See angegeben. Sie wurden zur Wahrung der inneren Konsistenz nur aus den Ergebnissen der Modellrechnungen berechnet, denn nur dadurch ist es möglich, Übertragungsfaktoren auch für Orte anzugeben, an denen es keine Messungen gibt. Es zeigt sich, daß die Windwerte der

Tabelle 3. Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeit auf die freie See für einige Orte auf Norderney

Ort	Windrichtung (Grad)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
A	1,12	1,16	1,31	1,45	1,39	1,42	1,45	1,50	1,45	1,21	1,14	1,12
B	0,99	1,02	1,10	1,23	1,19	1,19	1,20	1,21	1,14	1,02	0,96	0,95
C	0,92	0,94	1,01	1,10	1,07	1,06	1,06	1,07	1,02	0,94	0,91	0,90
D	1,18	1,22	1,21	1,08	0,99	0,97	0,97	1,00	1,01	1,00	1,10	1,22
E	1,28	1,33	1,32	1,16	1,04	1,02	1,01	1,05	1,06	1,04	1,17	1,33

A: Derzeitige Wetterstation (WST), ab 1. 9. 1981

B: Ehem. WST Georgshöhe (1), 5. 10. 60-12. 4. 66 u. 11. 12. 78-31. 8. 81

C: Ehem. WST Georgshöhe (2), 12. 4. 66-11. 12. 78

D: Hafen 24 m (Projektmeßstelle)

E: Hafen 18 m, Station des STAİK Oberfeuer Riffgat, ab Dez. 1991

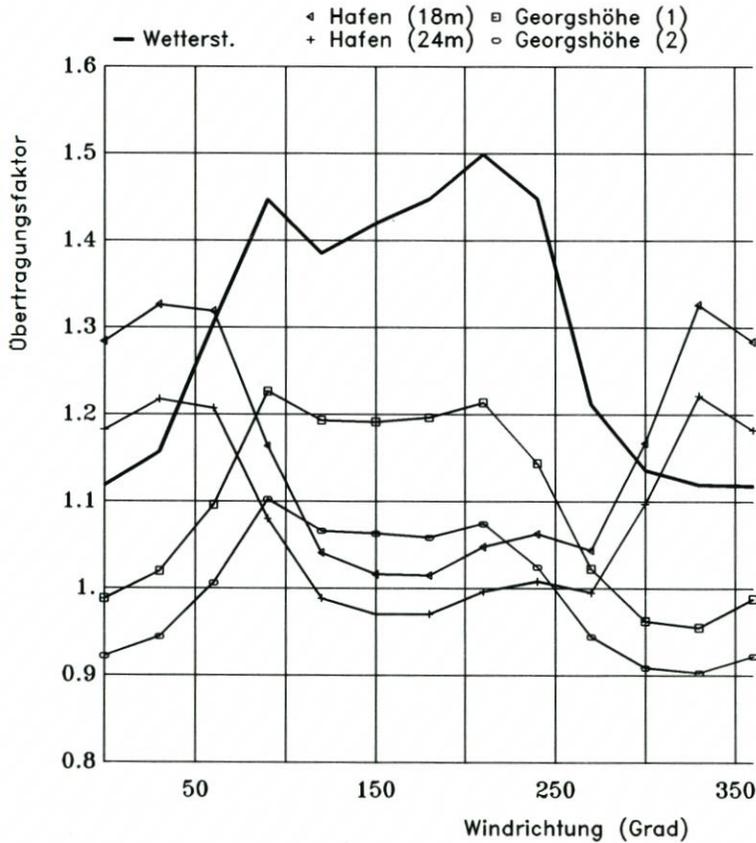


Abb. 4: Windrichtungsabhängige Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeiten von fünf Orten der Insel Norderney auf die freie See. Die Faktoren und eine Erläuterung zu den Orten sind in Tabelle 3 angegeben.

Wetterstation zur Übertragung auf die Seeverhältnisse bis zu 50% angehoben werden müssen, und zwar ausgerechnet für die Hauptwindrichtung Südwest (210–240°).

Mit der Bezeichnung „Wetterstation“ ist deren heutiger Standort am Januskopf gemeint, der am 1. 9. 1981 eingerichtet wurde. Die Meßhöhe beträgt hier 12 m über Grund (23 m über NN). Vorher befand sich die Wetterstation auf der „Georgshöhe“, etwa 200 m westlich der heutigen Station. Die Höhe des Windmessers betrug dort vom 5. 10. 60–12. 4. 66 33 m über NN, vom 12. 4. 66–11. 12. 78 44 m über NN und vom 11. 12. 78–31. 8. 81 wieder 34 m über NN. Für den ersten und letzten Zeitraum können die gleichen Faktoren „Georgshöhe (1)“, für den mittleren „Georgshöhe (2)“ verwendet werden. „Hafen 18 m“ stellt die Übertragungsfaktoren für die neue Station des STAIK am Oberfeuer Riffgat dar.

Es ist zu bedenken, daß die Übertragungsfaktoren mittlere Werte sind. Ihre Anwendung auf längerfristige richtungsabhängige Mittelwerte des Windes ergibt an der Zielstation mit einer Streuung von ca. $\pm 5\%$ gute Ergebnisse. Bei der Übertragung einzelner Windwerte müssen deutlich höhere (aber unsystematische) Abweichungen von etwa $\pm 10\text{--}15\%$ in Kauf genommen werden. Hier führt auch die Annahme der gleichen Windrichtung in Ausgangs- und Zielstation zu einer Unsicherheit von etwa $\pm 20^\circ$. Sehr schlecht werden die Übertragungsergebnisse für Einzelwerte bei schwachem Wind, etwa unterhalb 3 m/s. Für die meisten

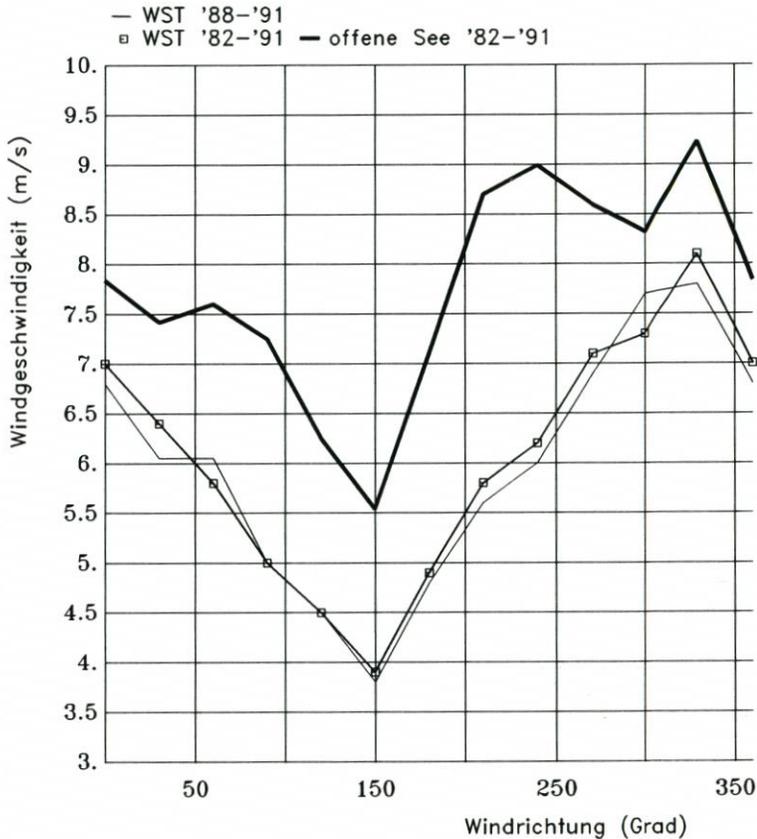


Abb. 5: Richtungsabhängige klimatologische Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für die Jahre 1982–1991 an der Wetterstation (WST) und auf der freien See. Zum Vergleich für die Wetterstation auch das Mittel über den Projektzeitraum 1988–1991 (dünne Linie).

technisch-wissenschaftlichen Anwendungen, wie etwa den Sturmflut- und Wind-Wa oder die Ermittlung des Windstaus, der Wellenanfachung und des Windenergiepotent Fehler bei Schwachwind jedoch belanglos.

Die eingehende Untersuchung der empirischen Übertragungsfaktoren zwischen Stationen zeigt außerdem, daß der Faktor für eine Windrichtung keine wirkliche K ist, sondern noch eine leichte Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweist, die aber im der zuvor genannten Genauigkeit zu vernachlässigen ist.

4.4 Weitere Ergebnisse

In Abbildung 5 sind die 10jährigen klimatologischen Mittelwerte (Linie mit Sy 1982–91) des Windes im Vergleich mit den 4jährigen (dünne Linie, 1988–91) des Pro raums für die Wetterstation dargestellt. Die Anwendung der Umrechnungsfaktoren 3) auf den 10jährigen Zeitraum ergibt die richtungsabhängigen Mittelwerte des Winde freie See (genauer: etwa 5–10 km nördlich von Norderney). Dies ist die dicke Li Werte in Abb. 5 sind wirkliche klimatologische Mittelwerte; hier wurden in jeder Ric klasse alle Geschwindigkeitswerte zur Mittelbildung herangezogen (im Gegensatz Abb. 2 und 3, siehe Abschnitt 4.2).

Wenn man die Modellrechnung für jede Richtung nun so skaliert, daß sich Gitterpunkt, der der Meßhöhe an der Wetterstation entspricht, genau deren 10 Mittelwert ergibt, und dann die Felder für die 12 Richtungen (mit den zugehörigen Hä ten gewichtet) mittelt, ist das Ergebnis ein raumdeckendes Feld der mittleren Windge digkeit. Eine Schicht daraus, in 10 m Höhe über Grund (bzw. über der in Absc erwähnten Verdrängungshöhe), ist in Abb. 6 in einem Raster von 50 m für den Westk



Abb. 6: Klimatologische Mittelwerte (1982–1991) der Windgeschwindigkeit über dem Westkopf c Norderney in 10 m Höhe aus Modellrechnungen.

Insel Norderney dargestellt. Das quadratische Rechengebiet hat eine Seitenlänge von 3,15 km (63 Gitterzellen).

Die mittlere Windgeschwindigkeit variiert erheblich; sie reicht von mehr als 7 m/s in der nordwestlichen und südwestlichen Ecke auf dem Wasser bis zu weniger als 4,5 m/s über der Stadt (da hier die Verdrängungshöhe 7 m beträgt, ist dieser Windwert 10 m höher, also 17 m über dem Straßenniveau zu finden).

5. Schlußbemerkung

Es hat sich gezeigt, daß die Windmessungen auf Norderney keineswegs für die Windverhältnisse auf See repräsentativ sind. Vielmehr müssen die Werte für einige Windrichtungen zur Übertragung nach See erheblich modifiziert werden. Mit wenigen Ausnahmen gilt dies für alle Küsten- und Inselmeßstellen.

Das dargestellte Verfahren, approximative Faktoren zur Übertragung des Windes von einem auf andere Orte über Modellrechnungen zu bestimmen, ist nun ohne wesentliche Einschränkungen auch auf andere Gebiete an den deutschen Küsten übertragbar. Es kann sogar auf geplante Anemometer-Standorte angewendet werden, an denen es noch keine Vergleichsmessungen gibt, denn man benötigt nur relative Geschwindigkeitsunterschiede. Modellrechnungen sind allerdings aufwendig. Die Orographie und die Bodenrauigkeit müssen in einem feinen Raster bereitgestellt werden, und die Rechnungen kosten relativ viel Rechenzeit.

Wir danken den Mitarbeitern der Forschungsstelle Küste für die freundliche Hilfe bei der Planung, Einrichtung und Betreuung unserer Windmeßeinrichtungen auf Norderney.

6. Schriftenverzeichnis

- CHRISTOFFER, J. u. ULBRICHT-EISSING: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 147, 2. Auflage, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach/Main, 1989.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. Die Küste, H. 54, 1992.
- TROEN, I. u. PETERSEN, E. L.: Europäischer Windatlas. Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark, 1990.
- TRACI, R. M., PHILLIPS, G. T. u. PATNIAK, P. C.: Wind Energy Site Selection Methodology Development. RLO/2440-78/2, 1978.
- SHERMAN, C. A.: A Mass-Consistent Model for Windfields Over Complex Terrain. Lawrence Livermore Laborator Report UCRL-76171, Rev. 1, 1976.