

F993 128

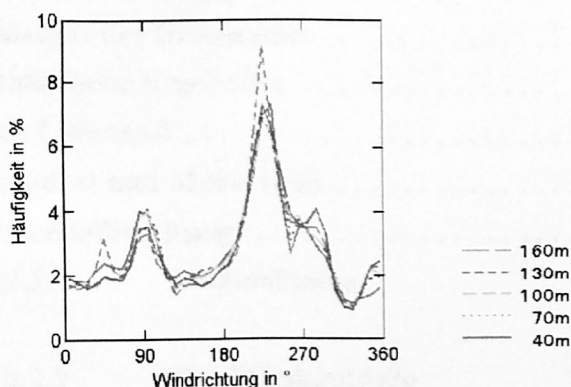
UB/TIB Hannover



**Erste Aufbereitung von flächenhaften Windmeßdaten  
aus Höhen bis 150 m über Grund für ein späteres Archiv  
"Winddaten aus Sondermessungen"  
und für weitere wissenschaftlich-technische Auswertungen**

**Abschlußbericht  
vorgelegt von  
Horst Günther, Barbara Hennemuth**

**Juni 1998**



**Forschungsvorhaben gefördert durch das  
Bundesministerium für Bildung und Forschung  
über das Forschungszentrum Jülich, BEO  
Förderkennzeichen: 0329372A**

UB/TIB Hannover  
118 647 210

89



**Deutscher Wetterdienst, GF Seeschifffahrt, Postfach 301190, 20304 Hamburg**

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK  
HANNOVER  
TECHNISCHE  
INFORMATIONSBIBLIOTHEK

1	Einleitung .....	5
	2.2.3 Erste Korrektur der Daten .....	20
	2.3.1 Allgemeines .....	21
	2.4.3 Beispiele für die Anwendung der Datenbank .....	42
2.5	Erste wissenschaftliche Auswertung .....	42
	2.5.1 Allgemeines .....	42
	2.5.2 Dreidimensionale Turbulenzstruktur .....	43
	2.5.2.1 Analyse der gesamten Zeitreihe .....	43
	2.5.2.2 Analyse spezieller Ereignisse .....	57
	2.5.3 Windverhältnisse in Richtlinien .....	61
3	Aufbereitung weiterer spezieller Winddaten .....	66
3.1	Daten des 80m-Mastes auf Helgoland .....	66
	3.1.1 Standort und Meßsystem .....	66
	3.1.2 Datenaufbereitung .....	66
	3.1.3 Qualität des Datensatzes .....	68
	3.1.4 Statistische Ergebnisse .....	68
3.2	Mastdaten Lühesand .....	74
	3.2.1 Standort und Meßsystem .....	74
	3.2.2 Datenaufbereitung .....	75
	3.2.2.1 Originaldaten .....	75
	3.2.2.2 Qualitätskontrolle .....	76
	3.2.2.3 Auswahl der Meßdaten in derselben Höhe .....	80
	3.2.3 Qualität des Datensatzes .....	83
	3.2.4 Statistische Ergebnisse .....	84
3.3	Sodar-Daten Esenshamm (Unterweser) I .....	88
	3.3.1 Standort und Meßsystem .....	88
	3.3.2 Datenaufbereitung .....	89
	3.3.3 Qualität des Datensatzes .....	91
	3.3.4 Statistische Ergebnisse .....	91
3.4	Die 46 m-Masten bei Bredstedt, Esens und Tating .....	95
	3.4.1 Standorte und Meßsystem .....	95

3.4.2	Datenaufbereitung .....	97
3.4.3	Qualität des Datensatzes .....	97
3.4.4	Statistische Ergebnisse .....	97
3.5	Sodar-Daten Brokdorf .....	104
3.5.1	Standort und Meßsystem .....	104
3.5.2	Datenaufbereitung .....	104
3.5.3	Qualität des Datensatzes .....	109
3.5.4	Statistische Ergebnisse .....	109
3.6	Sodar-Daten Stade .....	112
3.6.1	Standort und Meßsystem .....	112
3.6.2	Datenaufbereitung .....	112
3.6.3	Qualität der Daten .....	114
3.6.4	Statistische Ergebnisse .....	114
3.6.5	Vergleich der Sodar-Daten Stade mit den Mastdaten Lühesand .....	116
3.7	Sodar-Daten Esenshamm (Unterweser) II .....	119
3.7.1	Standort und Meßsystem .....	119
3.7.2	Datenaufbereitung .....	119
3.7.3	Qualität der Daten .....	120
3.7.4	Statistische Ergebnisse .....	121
3.7.5	Vergleich der beiden Stationen Esenshamm .....	124
3.8	Sodar-Daten Lingen (Emsland) .....	125
3.8.1	Standort und Meßsystem .....	125
3.8.2	Datenaufbereitung .....	125
3.8.3	Qualität der Daten .....	126
3.8.4	Statistische Ergebnisse .....	127
3.9	Mastdaten Hamburg-Billwerder .....	130
3.9.1	Standort und Meßsystem .....	130
3.9.2	Datenaufbereitung .....	131
3.9.3	Qualität des Datensatzes .....	132
3.9.4	Statistische Ergebnisse .....	132
4	Zusammenschau der Ergebnisse .....	136
4.1	Allgemeine Vorbemerkungen .....	136
4.2	Windverhältnisse bis 150 m Höhe .....	137
5	Abschließende Bemerkungen .....	143

Literaturverzeichnis .....	144
Anhang A .....	147
Anhang B .....	156
Danksagung .....	158

# 1 Einleitung

## 1.1 Zielsetzung

Windenergienutzer brauchen spezielle Winddaten, die vom konventionellen Windmeßnetz des Deutschen Wetterdienstes nicht oder nur unzureichend geliefert werden können. Für die Planung neuer Standorte einzelner Windenergieanlagen oder Windparks werden langjährige Statistiken von Windgeschwindigkeit und Windrichtung bis in große Höhen benötigt. Diese Daten sollten möglichst als 10 min-Mittelwerte erfaßt werden und als Statistik für Jahre, Jahreszeiten oder andere gewünschte Zeiträume vorliegen. Für Sonderuntersuchungen etwa zur Entwicklung neuer Anlagen, zur Zertifizierung und zur Erstellung von Richtlinien werden hochaufgelöste Winddaten benötigt, die die Turbulenz des Einstromfeldes enthalten.

Bei Gutachten wird zur Zeit überwiegend auf die Daten des Meßnetzes des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen. Hier liegen lange Zeitreihen von Meßdaten für verschiedene Standorte in Deutschland vor. Solche Routinedaten werden i.a. in dreistündigem Rhythmus erfaßt und archiviert. Für einige Fragestellungen, speziell für die Nutzung der Windenergie, reichen sie jedoch nicht aus.

Neben den Routinemessungen des Deutschen Wetterdienstes gibt es aber eine Vielzahl von Messungen, die bis in größere Höhen reichen, zeitlich höher aufgelöst gemessen und gespeichert werden und Profilmessungen liefern.

Zur Nutzbarmachung dieser Daten wurde das hier beschriebene Projekt initiiert. Im Rahmen dieses Projektes wurden vom Geschäftsfeld Seeschifffahrt des Deutschen Wetterdienstes alle verfügbaren Sonderwindmessungen zusammengetragen, die langjährige statistische Aussagen bis in große Höhen erlauben oder die Turbulenz des Windfeldes möglichst auch bis in große Höhen beschreiben.

Unter diesen Aspekten wurde während des 'Windmeßprogramms GROWIAN' ein wertvoller Datensatz gewonnen. An drei 150 m hohen Meßmasten, davon zwei in einem Abstand von nur 52 m, wurden am Standort der 3 MW-Windenergieanlage GROWIAN am Kaiser-Wilhelm-Koog mit hoher Meßfrequenz Winddaten gemessen. Durch die spezielle Meßfühleranordnung konnte das Windfeld über der gesamten Rotorfläche vermessen werden.

Das wichtigste Teilziel des Projektes ist daher die Verfügbarmachung der GROWIAN-Windmeßdaten. Dieser umfangreiche und wohl einmalige Datensatz war auf Datenträgern, die in naher Zukunft nicht mehr lesbar gewesen wären. Die Meßdaten aus der GROWIAN-Meßkampagne sollten auf PC-lesbare Datenträger übertragen werden, die meteorologischen und anlagenspezifischen Daten selektiert und aufbereitet werden. Dazu gehört die Aussortierung defekter oder fehlerhafter Meßkanäle, die Einordnung der Daten nach Anströmrichtungen und die Überprüfung der Daten auf Plausibilität. Vor einer Archivierung müssen die Meßdaten korrigiert werden. Dann werden Mittelwert, Standardabweichung und andere statistische Größen für die etwa 25minütigen Meßzeiträume berechnet.

In einem weiteren Arbeitsschritt soll eine erste wissenschaftliche Auswertung der hochaufgelösten

Winddaten erfolgen. In ausgesuchten Fällen werden Zeitreihenanalysen wie Korrelationsfunktionen, Spektren u.ä. berechnet.

Das zweite Teilziel ist die Sammlung weiterer spezieller Winddaten aus Meßkampagnen oder Überwachungsaufgaben zur wissenschaftlichen und technischen Nutzung, insbesondere für die Windenergie. In Deutschland sind vor allem die küstennahen Gebiete mit hohen Windgeschwindigkeiten zur Windenergienutzung geeignet (Christoffer u. Ulbricht-Eissing, 1989, Gerth u. Christoffer, 1994). Daher werden vorzugsweise Daten aus dem norddeutschen Küstenbereich aquiriert. Die Daten werden aufbereitet, d.h. - soweit dies möglich ist - korrigiert, zeitlich richtig zugeordnet, zu Stundenmittelwerten zusammengefaßt und archiviert. Zur Kontrolle werden ausgewählte Zeitreihenplots angefertigt. Von den mehrjährigen Zeitreihen werden jahresweise statistische Größen wie Momente, Häufigkeitsverteilungen, Windrosen und mittlere Vertikalprofile berechnet.

In das Archiv für Sonderwindmessungen sollen nur statistisch aufbereitete Daten eingehen wie Stundenmittelwerte, Häufigkeitsverteilungen und Windstärkerosen für Jahre bzw. Jahreszeiten. Von den hochaufgelösten Datensätzen werden Mittelwert und Standardabweichung über die jeweilige Meßzeit archiviert. Es liegen jedoch alle Originaldaten und die korrigierten Daten auf PC-lesbaren Datenträgern (MOD=Magneto-Optical Disk) beim Geschäftsfeld Seeschifffahrt des Deutschen Wetterdienstes vor.

## 1.2 Datensammlung

Das Datenarchiv soll alle Sonderwindmessungen in Norddeutschland umfassen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es noch nicht vollständig. Die bisher zusammengetragenen und aufbereiteten Datensätze decken zwar einen großen Teil des norddeutschen Küstenraumes ab, es sind aber noch nicht alle Sonderwinddaten enthalten, und es sind auch nicht alle Bereiche Norddeutschlands gleich gut mit Meßdaten bestückt. So fehlen etwa noch Datensätze im Ostseeküstenbereich.

Abbildung 1 zeigt eine Karte von Norddeutschland, in die die Standorte mit Sonderwindmessungen eingetragen sind.

*Abbildung 1: Norddeutschland und Standorte mit Sonderwindmessungen: 1. Kaper-  
Küsten, 2. Helgoland, 3. Lohseand, 4. Esenshafen, 5. Budehoft, 6. Esens, 7.  
Wang, 8. Jorkum, 9. Gade, 10. Lingen, 11. Hamburg, 12. Bülwer  
Küstengruppe des Deutschen Wetterdienst, 1987*



**Abbildung 1**

Karte von Norddeutschland und Standorte mit Sonderwindmessungen: 1: Kaiser-Wilhelm-Koog, 2: Helgoland, 3: Lühesand, 4: Esenshamm, 5: Bredstedt, 6: Esens, 7: Tating, 8: Brokdorf, 9: Stade, 10: Lingen, 11: Hamburg-Billwerder  
Kartengrundlage aus Deutscher Wetterdienst, 1967

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Art der Daten, den Meßzeitraum und den Umfang der Datensätze.

---

**Kaiser-Wilhelm-Koog (53° 55.8' N, 08° 57.1' E):**

GROWIAN-Winddaten, Turbulenzmessungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung in den Höhen 10, 50, 75, 100, 125 und 150 m an zwei Masten, in 50 und 150 m Höhe zwei Meßstellen nebeneinander, in 75, 100 und 125 m Höhe vier Meßstellen nebeneinander zur flächenhaften Messung.

**Meßzeitraum:** 300 sporadische Meßkampagnen von ca. 25 min Dauer und 2.5 Hz Meßfrequenz im Zeitraum Januar 1984 bis Februar 1987

**Bemerkungen:** korrigierte Daten; zusätzlich Temperaturmessungen in drei Höhen, aber teilweise unbrauchbar; zeitweise Vertikalwindmessungen vorhanden; Anströmung teilweise ungestört, teilweise von GROWIAN (65 m entfernt), teilweise parallel zum Meßgitter; zusätzlich technische Daten von GROWIAN, Meßfrequenz 12.5 HZ, unkorrigiert.

**Umfang:** 300 Dateien, 424 MB (technische Daten: 322 Dateien, 704 MB)

**Quelle:** MDE München

**Helgoland (54° 10.5' N, 06° 53.5' E):**

Stundenmittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gemessen an einem Gittermast in 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 und 78 m Höhe, Die Rohdaten sind 1 min-Werte, teilweise 2 s-Werte (insgesamt ca. 620 h).

**Meßzeitraum:** Juni 1989 bis April 1992.

**Bemerkungen:** Mast mit drei Auslegern, mit numerischem Modell ist der Einfluß des Gittermastes herausgerechnet; die Standardabweichung ist aus den 2 s-Werten berechnet; viele Datenausfälle; zusätzlich Temperaturen in 10, 30, 50 und 78 m Höhe;

**Umfang:** 4 Jahre, 3 MB (Rohdaten: 118 Dateien, 405 MB)

**Quelle:** Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Seeschifffahrt, Hamburg

**Bredstedt (54° 38.0' N, 08° 59.2' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gemessen an einem Gittermast in den Höhen 12.5 und 46 m

**Meßzeitraum:** Mai 1979 bis Februar 1982

**Bemerkungen:** überprüfte Daten; zusätzlich Temperaturmessungen in 12.5 und 46 m Höhe

**Umfang:** 4 Jahre, 29 MB

**Quelle:** Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover

**Tating (54° 20.0' N, 08° 41.1' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gemessen an einem Gittermast in den Höhen 12.5 und 46 m

**Meßzeitraum:** Mai 1979 bis Februar 1982

**Bemerkungen:** überprüfte Daten; zusätzlich Temperaturmessungen in 12.5 und 46 m Höhe

**Umfang:** 4 Jahre, 29 MB

**Quelle:** Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover

**Esens (53° 36.5' N, 07° 37.0' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gemessen an einem Gittermast in den Höhen 11.5 und 46 m

**Meßzeitraum:** April 1979 bis Februar 1982

**Bemerkungen:** überprüfte Daten; zusätzlich Temperaturmessungen in 11.5 und 46 m Höhe

**Umfang:** 4 Jahre, 29 MB

**Quelle:** Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover

**Lühesand bei Stade ( 53° 35.6' N, 9° 35.5' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gemessen an einem Hochspan-

nungsmast in den Höhen 62, 114 und 160 m

**Meßzeitraum:** Juli 1981 bis Dezember 1993

**Bemerkungen:** die Winddaten wurden an nördlichen und südlichen Auslegern gemessen und je nach Windrichtung luvseitig ausgewählt bzw. gemittelt; teilweise erhebliche Störung der Meßwerte durch den Hochspannungsmast; zusätzlich sind die vertikale Windrichtung, die Standardabweichung der vertikalen und horizontalen Windrichtung und die Temperatur in 62, 114 und 160 m Höhe registriert sowie der Luftdruck, die Strahlungsbilanz, die Niederschlagsintensität und die relative Feuchte in 2 m Höhe

**Umfang:** 13 Jahre, 120 MB

**Quelle:** Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hannover

**Esenshamm (Unterweser) (53° 26.1' N, 08° 28.9' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus SODAR-Messungen in den Höhen 25, 50, 75, 100 und 150m

**Meßzeitraum:** Juli 1981 bis Dezember 1984

**Bemerkungen:** zusätzlich Erfassung der Standardabweichung des Vertikalwindes;

**Umfang:** 4 Jahre, 27 MB

**Quelle:** Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hannover

**Brokdorf (53° 52.0' N, 9° 19.1' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus SODAR-Messungen in den Höhen 40, 60, 80, 100, 120, 140 und 160 m

**Meßzeitraum:** Februar 1990 bis Dezember 1996

**Bemerkungen:** zusätzlich Registrierung der Standardabweichung des Vertikalwindes;

**Umfang:** 7 Jahre, 47 MB

**Quelle:** Preußen Elektra, Hannover / Fa. Metek, Elmshorn

**Stade ( 53° 37.3' N, 9° 32.0' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus SODAR-Messungen in den Höhen 50, 75, 100, 125 und 150 m

**Meßzeitraum:** Januar 1992 bis Dezember 1996

**Bemerkungen:** zusätzlich Registrierung der Standardabweichung des Vertikalwindes

**Umfang:** 5 Jahre, 25 MB

**Quelle:** Preußen Elektra, Hannover / Fa. Metek, Elmshorn

**Esenshamm (Unterweser) (53° 26.1' N, 08° 28.9' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus SODAR-Messungen in den Höhen 50, 75, 100, 125 und 150 m

**Meßzeitraum:** Januar 1992 bis Dezember 1996

**Bemerkungen:** zusätzlich Registrierung der Standardabweichung des Vertikalwindes

**Umfang:** 5 Jahre, 25 MB

**Quelle:** Preußen Elektra, Hannover / Fa. Metek, Elmshorn

**Emsland ( 53° 22.8' N, 07° 16.3' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus SODAR-Messungen in den Höhen 40, 70, 100, 130 und 160 m

**Meßzeitraum:** Januar 1990 bis Dezember 1996

**Bemerkungen:** zusätzlich Registrierung der Standardabweichung des Vertikalwindes

**Umfang:** 7 Jahre, 34 MB

**Quelle:** Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH, Lingen / Fa. Metek, Elmshorn

**Hamburg-Billwerder (53° 31.4' N, 10° 05.9' E):**

10 min-Mittelwerte von Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gemessen an einem 300 m hohen Sendemast des NDR in den Höhen 50, 110, 175 und 250 m und an einem 10 m hohen Gittermast in den Höhen 2 und 10 m.

**Meßzeitraum:** 1996 (Daten ab März 1995 verfügbar, s.Quelle)

**Bemerkungen:** Die Originaldaten sind 1 min-Mittelwerte aus 1 s-Rohdaten; zusätzlich Temperaturmessungen in den Höhen 2 und 10 m; weitere Temperaturmessungen sowie Feuchte-, Druck-, Strahlungs- und Niederschlagsmessungen im Originaldatensatz vorhanden.

**Umfang:** 1 Jahr, 5 MB (Originaldaten: 150 MB)

**Quelle:** Meteorologisches Institut der Universität Hamburg

---

## Tabelle 1

Liste der Sonderwindmessungen für das geplante Datenarchiv

Nachfolgend wird die Aufbereitung des GROWIAN-Winddatensatzes, der Aufbau einer Datenbank und die Ergebnisse einer ersten wissenschaftlichen Auswertung beschrieben (Kapitel 2). Die Aufbereitung der weiteren Datensätze und statistische Ergebnisse sind in Kapitel 3 dargestellt. Eine Zusammenchau aller Ergebnisse wird in Kapitel 4 vorgestellt. Das 5. Kapitel enthält abschließende Bemerkungen.

## 2 Die GROWIAN Winddaten

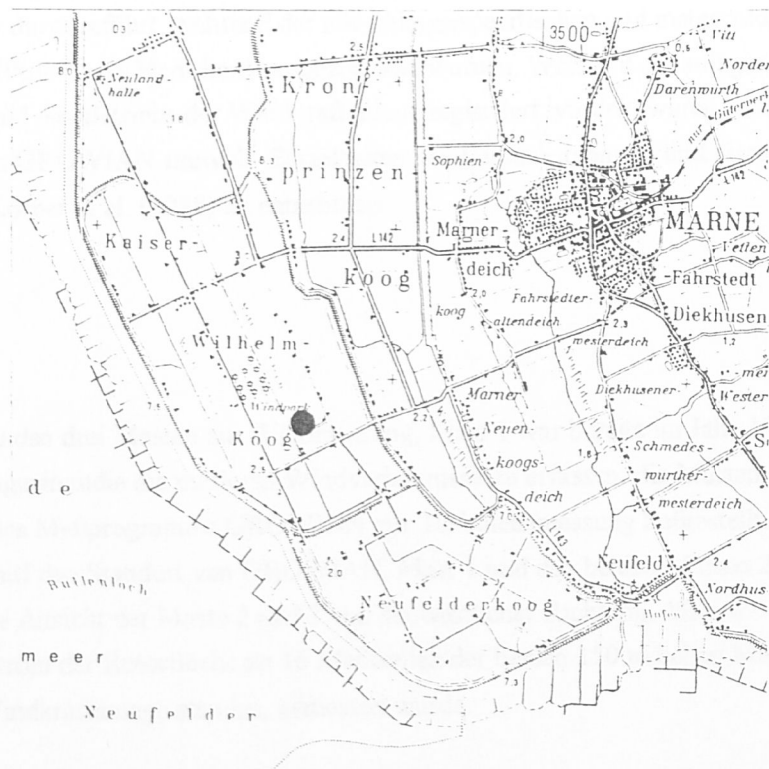
### 2.1 Allgemeines

#### 2.1.1 Das meteorologische Meßprogramm während des GROWIAN Testbetriebs

Im Februar 1983 wurde im Kaiser-Wilhelm-Koog nahe der Elbmündung die erste große Windenergieanlage Deutschlands errichtet. GROWIAN (**GRO**ße **W**indkraft**AN**lage) war eine 3 Megawatt-Anlage mit einer Nabenhöhe von 100 m und einem Rotordurchmesser vom 100 m, die über vier Jahre hinweg im Betrieb getestet werden sollte. Abbildung 2 zeigt den Standort von GROWIAN, etwa 2 km von der Küstenlinie entfernt.

Begleitend zum Projekt 'Bau und Betrieb von GROWIAN' wurde ein Meßprogramm durchgeführt, das während des Betriebs von GROWIAN technische und umweltbezogene Daten sammeln und speichern sollte, die zur Beurteilung des Testbetriebs notwendig sind. Die Beschreibung des Meßprogramms und seine Ergebnisse sind in dem Bericht 'Meßprogramm an der 3 MW-Windkraftanlage GROWIAN' (Körber et al., 1988) von MDE (MAN Dezentrale Energiesysteme) beschrieben.

Als Themen des Meßprogramms werden dort genannt: Windcharakteristik, Anlagenleistung, Schwingungsverhalten, Belastungen, Verhalten des elektrischen Systems, Betriebsführung und Regelung, Emmission. Viele Ergebnisse des GROWIAN-Meßprogramms findet man



**Abbildung 2**

Standort von GROWIAN und der Windmeßanlage am Kaiser-Wilhelm-Koog (Kartenausschnitt: C2318, vervielfältigt mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holstein vom 25.9.1997, 3-562.6S)

im Zusammenhang mit anderen Ergebnissen auch in dem Lehrbuch 'Windkraftanlagen' von Hau (1988).

Ein begleitendes meteorologisches Meßprogramm sollte u.a. die Charakteristik des turbulenten Windfeldes im Zustrom des Rotors erfassen und dadurch typische sowie extreme Belastungen der Anlage aufzeigen. Bei geeigneten Windrichtungen diente die Meßeinrichtung ebenfalls zur Erfassung der Windcharakteristik im Lee der Anlage. Das meteorologische Meßprogramm wurde von Prof. Tetzlaff (damals Universität Hannover) betreut.

Die Beschreibung des Standortes hinsichtlich der mittleren Windverteilung war bereits in einem Vorlaufprojekt erfolgt und ist in dem Bericht 'Windmessungen bis in große Höhen' vorgelegt (Tetzlaff et al., 1985). Dies war insbesondere deshalb notwendig, weil Messungen über die Windverhältnisse bis 150 m Höhe nur sehr sporadisch vorliegen und nur rechnerische Extrapolationen vorgenommen werden konnten. Die mehr als dreijährigen Messungen ergaben einen Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe von 7.4 m/s am GROWIAN-Standort.

Das GROWIAN-Meßprogramm wurde - abgesehen von einzelnen Langzeitaufzeichnungen - in Meßkampagnen von ca. 25 min Dauer durchgeführt, während der alle anlagenspezifischen und meteorologischen Meßdaten auf PCM-Band (Puls-Code-Moduliert) aufgezeichnet wurden. Während die anlagenspezifischen Meßdaten nur während des Betriebs der Windkraftanlage registriert wurden, waren Windmessungen auch bei Stillstand des GROWIAN sinnvoll. Einzelheiten der Versuchsplanung und Datenerfassung sind dem Bericht von Körber et al. (1988) zu entnehmen.

### 2.1.2 Meßanordnung

Am Standort des GROWIAN standen drei Masten zur Windmessung, Mast 1 war bereits im Jahr 1980 errichtet worden, um in einer Langzeitstudie die mittleren Windverhältnisse zu erfassen, die Masten 2 und 3 wurden 1983 im Rahmen des Meßprogramms GROWIAN zur Turbulenzmessung aufgestellt. Abbildung 3 zeigt eine Aufsicht auf den Standort von GROWIAN, Mast 1 und den beiden Masten 2 und 3, und Abbildung 4 zeigt eine Ansicht der Maste 2 und 3 von südwestlicher Richtung. Man erkennt, daß das Windfeld im Zustrom der Rotorfläche an 16 Meßstellen der beiden 150 m hohen Masten, die 65 m südwestlich der Windkraftanlage standen, gemessen wurde.



Abbildung 3

Aufsicht auf den Standort von GROWIAN mit den drei Meßmasten, aus Körber et al., 1988

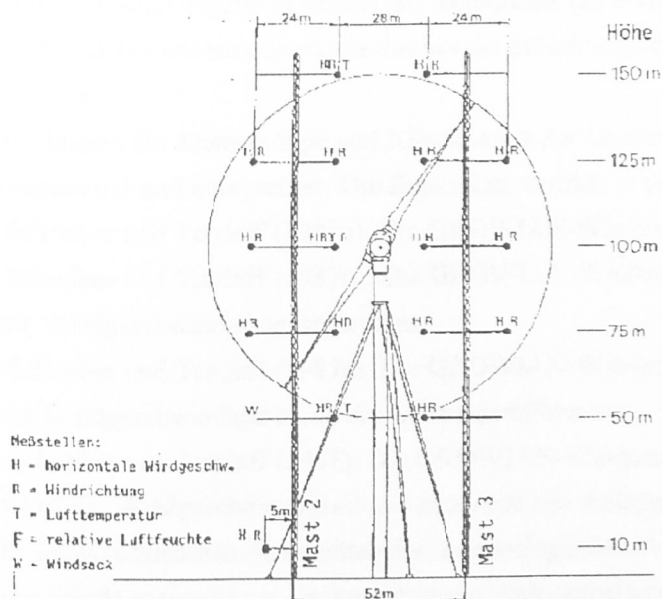


Abbildung 4

Seitenansicht der Maste 2 und 3 von SW (aus Körber et al., 1988)

Die Maste 2 und 3 wurden im Abstand von 52 m in der Richtung der zu erwartenden mittleren Anströmung errichtet. Es handelte sich um Gittermaste, die mit 12 m langen Auslegern in den Höhen 50 m, 75 m, 100 m, 125 m und 150 m versehen waren, um das Windfeld annähernd über der Rotorfläche

zu erfassen. In 10 m Höhe war an Mast 2 zusätzlich ein 5 m langer Ausleger angebracht.

In Abbildung 4 ist jede Horizontalwindmeßstelle mit 'H' für Horizontalwind und 'R' für Richtung markiert, die Temperatur wurde bei 'T' und die relative Feuchte bei 'F' gemessen. Zusätzlich wurde an den jeweils äußeren Auslegern in 75 m und 125 m Höhe der Vertikalwind gemessen.

Die Instrumentierung der Maste 2 und 3 ist in Körber et al. (1988) nur kurz beschrieben. Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden mit kombinierten Propelleranemometern gemessen, über den Temperatur- und den Feuchtemeßfühler ist nichts vermerkt. Die Meßfrequenz betrug 12.5 Hz.

### 2.1.3 Auswertung und Interpretation einer Auswahl von Meßdaten im Rahmen des meteorologischen Meßprogramms

Während des GROWIAN-Meßprogramms wurde von August 1986 bis August 1987 ein spezielles meteorologisches Meßprogramm durchgeführt. Es wurden Meßkampagnen von 30 min Dauer bei vorher definierten Anströmungsbedingungen (möglichst senkrechte Anströmung des Meßgitters, bestimmte Bewölkungsverhältnisse) zur Mittagszeit (zu erwartende labile thermische Schichtung) und in der Nacht (zu erwartende stabile thermische Schichtung) durchgeführt. Insgesamt lagen 39 Meßkampagnen vor.

Am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover wurden diese Meßkampagnen ausgewertet und interpretiert. Die Ergebnisse wurden in vier Berichten veröffentlicht:

- Schreiber und Tetzlaff (1987a): Die GROWIAN-Windmessungen - Aufbereitung der Datensätze.
- Schreiber und Tetzlaff (1987b): Die GROWIAN-Windmessungen - Berechnung und Auswertung der Windgeschwindigkeitsscherungen.
- Schreiber und Tetzlaff (1987c): Die GROWIAN-Windmessungen - Ansätze zur Zeitreihenanalyse der Windgeschwindigkeit und der Leistungsdifferenzen.
- Schreiber und Tetzlaff (1988): Die GROWIAN-Windmessungen - Kohärenzuntersuchungen zwischen der Windgeschwindigkeit und ausgewählten Anlagenparametern.

In den verschiedenen Abschnitten der meteorologischen Auswertungen wurden Methoden erarbeitet, wie Windmessungen zur Interpretation der Anlagenbelastung herangezogen werden können. Die Ergebnisse liefern wertvolle Erkenntnisse über den Einfluß des turbulenten Windfeldes auf die Windkraftanlage. Die Datensätze dieser speziellen Meßkampagnen sind heute nicht mehr verfügbar.

### 2.1.4 Aufbereitung von Meßdaten der GROWIAN-Meßkampagne

Die ca. 400 Meßkampagnen, in denen meteorologische und anlagenspezifische Meßdaten auf PCM-Bändern aufgezeichnet wurden, stellen auch über den Testbetrieb von GROWIAN hinausgehend ein wertvolles Datenmaterial dar. Die Erfassung von turbulenten Winddaten in einem 100 m x 76 m großen Meßgitter ist in vielerlei Hinsicht einmalig:

- die hohe zeitliche Auflösung läßt die Untersuchung der Turbulenzstruktur zu,
- die meteorologischen Daten erlauben die Analyse der dreidimensionalen Struktur des Windfeldes bis 150 m Höhe einschließlich lateraler Korrelationen, was bei den meisten Datensätzen nicht möglich ist; somit hat der Datensatz große wissenschaftliche Bedeutung,
- die Winddaten bieten zusammen mit den anlagenspezifischen Daten die Möglichkeit, die Belastungen einer großen Windkraftanlage bei einem weiten Spektrum an Anströmungsbedingungen zu studieren,
- andere Fragestellungen aus der Praxis wie etwa das Auftreten extremer Scherungen oder der Zeitverlauf einer Bö können mit diesem Datensatz systematisch (d.h. für verschiedene Höhen, verschiedene thermische Schichtungen, verschiedene räumliche Versetzungen o.ä.) untersucht werden.

Da weder die Archivierung noch die Lesbarkeit der Daten bei MDE garantiert waren, wurde vom Deutschen Wetterdienst im Jahr 1990 das Projekt zur Aufbereitung der Meßdaten eingebracht und im Jahr 1992 vom BMBF bewilligt.

## 2.2 Aufbereitung der GROWIAN-Winddaten

### 2.2.1 Lesen der Originalbänder

Für die Sicherung der relevanten meteorologischen und anlagenspezifischen Daten wurde ein Auftrag an die Firma MDE in München gegeben. Die Original-PCM-Bänder, auf denen während des GROWIAN-Projektes alle Meßdaten aufgezeichnet wurden, wurden gelesen, die relevanten Datenkanäle ausgewählt und auf PC-lesbare Datenträger (Magneto-Optical Disk, MOD) übertragen. Die Bearbeitung verzögerte sich aufgrund technischer Probleme erheblich, so daß erst im Februar 1994 die erste MOD bearbeitet werden konnte.

Insgesamt lagen 400 Datensätze von jeweils ca. 10 MByte (entsprechend einer Meßdauer von ca. 25 min) vor. Es wurden 51 meteorologische Datenkanäle (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Vertikalwind, Temperatur und Feuchte) ausgewählt sowie 14 technische Kanäle, die für eine Beurteilung der Belastung der Windkraftanlage durch die Turbulenz wesentlich sind. Tabelle 2 zeigt die Kurzbezeichnung der Kanäle und eine Klartextbeschreibung. Es wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit die Windmessung am Maschinenhaussporn und der Differenzwinkel zwischen Maschinenhaus und Wind zu den meteorologischen Kanälen dazugeschlagen und die Windrichtungsangabe am Mast 1 in 150 m Höhe auch für die Höhen 50 m und 100 m verwendet.

	<b>Meteorologische Größen</b>
Kanalbezeich.	Meßgröße, Einheit und Beschreibung
ff-M1-050-1	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 1 50m
ff-M1-100-1	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 1 100m
ff-M1-150-1	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 1 150m
ff-M2-010-a	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 außen 10m
ff-M2-050-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 innen 50m
ff-M2-075-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 innen 75m
ff-M2-075-a	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 außen 75m
ff-M2-100-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 innen 100m
ff-M2-100-a	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 außen 100m
ff-M2-125-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 innen 125m
ff-M2-125-a	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 außen 125m
ff-M2-150-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 2 innen 150m
ff-M2-050-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 3 innen 50m
ff-M3-075-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 3 innen 75m
ff-M3-075-a	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 3 außen 75m
ff-M3-100-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 3 innen 100m
ff-M3-100-a	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 3 außen 100m
ff-M3-125-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 3 innen 125m
ff-M3-125-a	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 3 außen 125m
ff-M3-150-i	Windgeschwindigkeit in m/s, Mast 3 innen 150m
ff-M-SP-1	Windgeschwindigkeit in m/s, Maschinenhaussporn 100m
dd-M1-1	Windrichtung in °, Mast 1 150m
dd-M1-1	Windrichtung in °, Mast 1 150m
dd-M1-1	Windrichtung in °, Mast 1 150m
dd-M2-010-a	Windrichtung in °, Mast 2 außen 10m
dd-M2-050-i	Windrichtung in °, Mast 2 innen 50m

dd-M2-075-i	Windrichtung in °, Mast 2 innen 75m
dd-M2-075-a	Windrichtung in °, Mast 2 außen 75m
dd-M2-100-i	Windrichtung in °, Mast 2 innen 100m
dd-M2-100-a	Windrichtung in °, Mast 2 außen 100m
dd-M2-125-i	Windrichtung in °, Mast 2 innen 125m
dd-M2-125-a	Windrichtung in °, Mast 2 außen 125m
dd-M2-150-i	Windrichtung in °, Mast 2 innen 150m
dd-M3-050-i	Windrichtung in °, Mast 3 innen 50m
dd-M3-075-i	Windrichtung in °, Mast 3 innen 75m
dd-M3-075-a	Windrichtung in °, Mast 3 außen 75m
dd-M3-100-i	Windrichtung in °, Mast 3 innen 100m
dd-M3-100-a	Windrichtung in °, Mast 3 außen 100m
dd-M3-125-i	Windrichtung in °, Mast 3 innen 125m
dd-M3-125-a	Windrichtung in °, Mast 3 außen 125m
dd-M3-150-i	Windrichtung in °, Mast 3 innen 150m
dd-M-SP-1	Richtungsdifferenz in ° zw. Maschinenhaus und Wind 100m
wu-M2-075-a	aufwärtsger. Vertikalwind in m/s, Mast 2 außen 75m
wu-M2-125-a	aufwärtsger. Vertikalwind in m/s, Mast 2 außen 125m
wu-M3-075-a	aufwärtsger. Vertikalwind in m/s, Mast 3 außen 75m
wu-M3-125-a	aufwärtsger. Vertikalwind in m/s, Mast 3 außen 125m
wd-M2-075-a	abwärtsger. Vertikalwind in m/s, Mast 2 außen 75m
wd-M2-125-a	abwärtsger. Vertikalwind in m/s, Mast 2 außen 125m
wd-M3-075-a	abwärtsger. Vertikalwind in m/s, Mast 3 außen 75m
wd-M3-125-a	abwärtsger. Vertikalwind in m/s, Mast 3 außen 125m
T-M1-010-1	Lufttemperatur in °C, Mast 1 10m
T-M2-050-i	Lufttemperatur in °C, Mast 2 innen 50m
T-M2-100-i	Lufttemperatur in °C, Mast 2 innen 100m
T-M2-150-i	Lufttemperatur in °C, Mast 2 innen 150m
r-M2-100-i	relative Luftfeuchte in %, Mast 2 innen 100m

	anlagenspezifische Größen
B2-11-1-D	Dehnung in N/mm <sup>2</sup> , Rotorblattholm Meßpunkt 1 bei x=11m
B2-11-2-D	Dehnung in N/mm <sup>2</sup> , Rotorblattholm Meßpunkt 2 bei x=11m
B2-27-2-D	Dehnung in N/mm <sup>2</sup> , Rotorblattholm Meßpunkt 2 bei x=27m
B2-27-9-D	Dehnung in N/mm <sup>2</sup> , Rotorblattholm Meßpunkt 9 bei x=27m
B2-40-2-D	Dehnung in N/mm <sup>2</sup> , Rotorblattholm Meßpunkt 2 bei x=40m
B2-40-7-D	Dehnung in N/mm <sup>2</sup> , Rotorblattholm Meßpunkt 7 bei x=40m
M-1-1-S	Tilgerweg in mm
M-1-2-N	Generator Drehzahl in 1/min
M-1-1-L	Generatorleistung in kW
M-ST-1-W	Blatteinstellwinkel in °
M-1-1-W	Rotorposition in °
M-1-1-N	Rotordrehzahl in 1/min

**Tabelle 2**

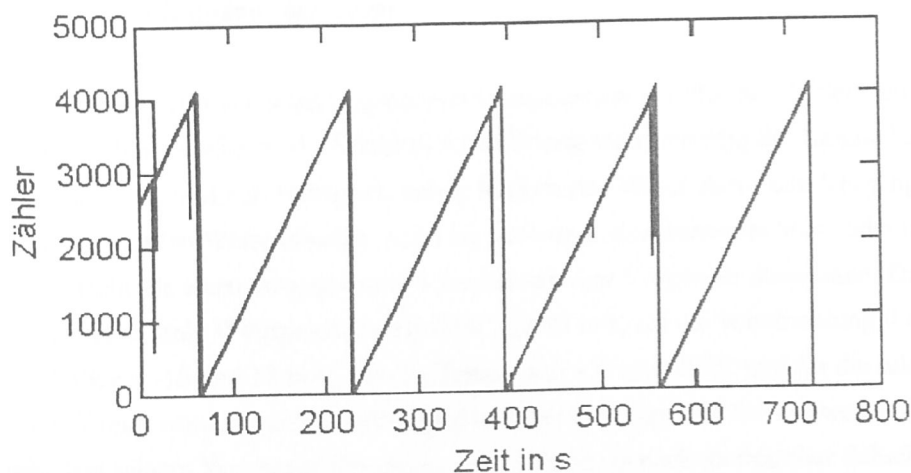
Kurzbezeichnung und Meßgrößenbeschreibung der 55 meteorologischen und 12 anlagenspezifischen Kanäle, zu näheren Angaben s. Körber et al. (1988)

Die Datensätze enthalten in den ersten Zeilen die Anzahl der ausgewählten Kanäle, die Anzahl der Zeilen, die Kennung der Kanäle sowie die verwendete Einheit. Jede Datenzeile enthält am Anfang einen - nachträglich gesetzten - Sekundenzähler, eine Datumsangabe (Tag, Monat, Jahr) und eine Zeitangabe (Stunde, Minute, Sekunde). Die Meßfrequenz beträgt 12.5 Hz.

### 2.2.2 Speicherung der Meßdaten

Beim Geschäftsfeld Seeschifffahrt des Deutschen Wetterdienstes wurden die Datensätze von den MODs zunächst auf den PC überspielt und mittels Ethernet-Leitung auf den Großrechner übertragen. Ein erstes Korrekturprogramm liest den Datensatz zeilenweise und entfernt Fehlerzeilen. Als Kriterium wird dabei der interne Zähler verwendet, der in Zweierschritten von 1 bis 4095 läuft und nach Angabe von MDE die einzige zuverlässige Zeitangabe liefert. Zählerwerte, die nicht zu vorangegangenen Werten passen, werden entfernt. Der häufigste Fehler ist dabei die mehrfache Wiederholung derselben Zeile

mit anschließendem Sprung des Zählers, wobei aber entweder zuviele oder zuwenige Zeilen vorkommen können. Es treten aber auch völlig fehlerhafte Zeilen auf. Im Schnitt enthält ein Datensatz 100 bis 600 Fehlerzeilen bei insgesamt ca. 18000 Zeilen, das entspricht einer fehlerquote von 0.5 bis 3%. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel einer fehlerhaften 'Sägezahnkurve'.



**Abbildung 5**

Beispiel für Fehler im 'sägezahnartigen' Zähler

Der Datensatz wird dann um die fehlenden Zeilen ergänzt (Wiederholung der letzten Zeile mit weiterlaufendem Zähler), und es wird ein Fehlerprotokoll erstellt, das die Anzahl der fehlerhaften und der ergänzten Zeilen, Anfangs- und Enddatum auf dem Datensatz enthält und die ersten 100 Fehlerzeilen mit Vorgänger und Nachfolger ausdrückt. In der Regel werden nur Zählersprünge bis zu 50 (d.h. 25 fehlerhafte Zeilen) toleriert, da sonst u.U. "Ausreißer" im Zähler als sinnvoll ergänzt werden. Treten größere Zählersprünge auf, so kann dem Protokoll entnommen werden, ob eine echte Unterbrechung des Datensatzes (Sprung im Datum und/oder in der Zeit) vorliegt oder ob eine Ergänzung der Zeitlücke noch sinnvoll erscheint. In jedem Fall wird von solchen Datensätzen ein Plot des Originalzählers erstellt. Von 383 gelesenen Files werden 84 Files nicht weiter bearbeitet, da sie eine Unterbrechung in der Zeit aufweisen.

Von diesem "restaurierten" Datensatz werden dann zwei Dateien erstellt, die einerseits die meteorologischen Kanäle, andererseits die technischen Kanäle enthalten. Wegen der geringen Auflösung der meteorologischen Meßdaten (z.B. Windgeschwindigkeiten wurden nur mit 0.3 m/s Auflösung erfaßt) werden diese über 5 Werte gemittelt, was eine Frequenz von 2.5 Hz ergibt. Die technischen Daten bleiben ungemittelt. So entstehen zwei Datensätze von ca. 1.5 MByte (meteorologische Daten) und ca. 2.5 MByte (technische Daten), die auf dem Großrechner und auf je einer MOD gespeichert werden. Die

anlagenspezifischen Daten werden hier nicht weiter behandelt.

### 2.2.3 Erste Korrektur der Daten

Zur Kontrolle wird von allen gespeicherten Datensätzen ein Plot des Zählers angefertigt und - obwohl sie noch fehlerbehaftet sind - Mittelwert und Standardabweichung der Kanäle berechnet.

Der Datensatz wird nun korrigiert, indem **fehlerhafte Werte** durch den Vorgänger ersetzt werden. Als fehlerhaft werden Werte erkannt, wenn sie gewisse Schrankenwerte über- oder unterschreiten und wenn sie um mehr als einen vorgegebenen Schwellwert vom Vorgänger abweichen. Die Schrankenwerte sind für die horizontale Windgeschwindigkeit 0 und 50 m/s, für die Windrichtung 0 und 360°, für den Vertikalwind -10 und 10 m/s, für die Temperatur -30 und 40°C und für die relative Feuchte 0 und 120%. Damit werden bereits auffällige Ausreißer beseitigt. Die Schwellwerte, um die ein Wert nicht mehr von seinem Vorgänger abweichen darf, müssen je nach thermischer Schichtung und anderen Bedingungen etwas variiert werden. I.a. können für die Windgeschwindigkeit  $\pm 3$  m/s und für die Windrichtung  $\pm 30^\circ$  verwendet werden, teilweise werden  $\pm 5$  m/s und  $\pm 50^\circ$  (bei starker Turbulenz) oder  $\pm 2$  m/s und  $\pm 10^\circ$  (bei schwacher Turbulenz) verwendet. In Einzelfällen werden die Schwellwerte auch für verschiedene Kanäle verschieden ausgewählt (z.B. in den unteren Höhen größere Variabilität als in den oberen Höhen). Ein Protokoll listet die Anzahl der korrigierten Daten pro Kanal nach Schrankenwerten und Schwellwerten auf. Der korrigierte Datensatz wird gespeichert.

Von diesem Datensatz werden Mittelwerte und Standardabweichungen sowie horizontale und vertikale Korrelationen der Windgeschwindigkeiten berechnet und Plots der mittleren Profile der Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen, der Temperatur und der Turbulenzintensitäten erstellt. Ferner werden Zeitreihen von mindestens 6 Datenkanälen geplottet, dabei aus Vergleichsgründen standardmäßig die Windgeschwindigkeit und -richtung in 100m Höhe am Mast 2 innen und Mast 3 innen. Es werden insbesondere die Meßreihen, die durch abweichende Mittelwerte oder Standardabweichungen auffallen, dargestellt.

Bei diesem Einblick in zumindest einen Teil der Daten zeigt sich bereits, ob noch Ausreißer vorhanden sind, die durch einen zu groß gewählten Schwellwert nicht erkannt wurden, oder ob sonstige Störungen vorliegen. Man erhält aber auch schon einen guten Eindruck von den Strömungsbedingungen wie Turbulenzgrad, mesoskalige Variationen oder Einfluß eines Hindernisses.

Die Darstellung ausgewählter Zeitreihen zeigt, ob die erste Korrektur ausreichend war, um alle Ausreißer zu entfernen. Für den zweiten Korrekturdurchgang kann man diesen Zeitreihen gut angepaßte Schwellwerte entnehmen. Dennoch gelingt es nicht in allen Fällen, sämtliche Ausreißer zu entfernen. Das liegt einerseits daran, daß nicht alle Kanäle geplottet werden können, andererseits entziehen sich aber auch viele Fehler einer automatischen Fehlererkennung. Ist etwa die Varianz groß, so daß der

Schwellwert groß gewählt werden muß, so kann das Auge zwar einen eindeutigen Ausreißer noch erkennen, das Prüfverfahren wird ihn aber u.U. nicht finden. So muß in Einzelfällen darauf hingewiesen werden, daß auch die korrigierten Zeitreihen noch Fehler enthalten können.

#### 2.2.4 Datumskorrektur

Die Datensätze enthalten eine Datums- und eine Zeitangabe. Diese Datumsangabe weicht in den meisten Fällen von der in den handschriftlichen MAN-Protokollen ab. Die Zeitangabe ist nur auf den Bänken selbst vorhanden. Zur Überprüfung des Datums werden die mittlere Windgeschwindigkeit und Windrichtung eines Kanals mit denen der nächstgelegenen Wetterstation Cuxhaven zu beiden angegebenen Tagen und der entsprechenden Uhrzeit verglichen. In fast allen Fällen stimmen die Windwerte bei den Datumsangaben des Protokolls besser überein und werden daher verwendet. Kritisch sind einige Fälle mit starken zeitlichen Änderungen des Windes, bei denen auch die Lage der betrachteten Stationen berücksichtigt werden muß; aber auch dabei erscheint das Protokolldatum als das richtigere. Es gibt dennoch einige wenige Fälle, in denen beide Datumsangaben offensichtlich falsch sind oder fehlen und kein Datum angegeben werden kann.

Die Uhrzeit kann prinzipiell nicht überprüft werden, jedoch erscheinen die Meßzeiten, die sich zwischen 8.00 Uhr morgens und 18.00 Uhr abends bewegen als durchaus sinnvoll. Einige Datensätze enthalten allerdings auch eine unsinnige Zeitangabe, hier ist eine Zuordnung nicht möglich.

### 2.3 Physikalische Korrektur der Daten

#### 2.3.1 Allgemeines

Der Datensatz ist nach der Entfernung fehlerhafter Werte noch nicht konsistent, d.h. die Meßdaten in den verschiedenen Höhen entsprechen nicht den physikalischen Gestzmäßigkeiten in der atmosphärischen Grenzschicht, und die Meßdaten in denselben Höhen stimmen bei ungestörter Anströmung nicht überein. Das ist auch nicht unbedingt zu erwarten, da die Meßwerte ohne Kalibrierung verwendet wurden. Ferner sind vermutlich während des Meßzeitraums, der ja mehr als drei Jahre umfaßt, etliche Meßfühler ausgetauscht worden und Arbeiten an den Auslegern vorgenommen worden. Eine Dokumentation ist nicht mehr verfügbar. Als Folge erkennt man Sprünge in den Abweichungen der Daten verschiedener Meßfühler voneinander, etwa in den Windrichtungsangaben, die auch den Schluß zulassen, daß einzelne Ausleger zeitweise nicht parallel zur Meßlinie ausgerichtet waren. Zusätzliche Fehler

treten bei der Temperaturmessung auf (vgl. 2.3.3).

Hier zeigt sich sehr deutlich, daß ein genaues Protokoll unbedingt nötig gewesen wäre. So bleibt jede Korrektur der Daten mit einer Unsicherheit behaftet, da die Ursache der Abweichung der Meßwerte voneinander nur vermutet werden kann und die Dauer der Abweichung nur aus den Daten selbst entnommen werden kann.

Die Vorgehensweise bei der Datenkorrektur ist die folgende:

Bei **ungestörter Anströmung** des Meßgitters wird erwartet, daß die Vertikalprofile von Temperatur und Wind bei **hinreichend langer Mittelungszeit** den **physikalischen Gesetzen** in der atmosphärischen Grenzschicht entsprechen.

Unter **ungestörter Anströmung** wird eine Strömungsrichtung verstanden, die jeden Meßfühler des Meßgitters trifft, ohne durch das Gitter selbst oder durch die Windenergieanlage beeinflusst zu sein. Berücksichtigt man, daß die Ausleger nicht ganz parallel zur Gitterlinie sind, so erscheint der Bereich einer Anströmung von  $190^\circ$  bis  $290^\circ$  als ungestört. Die Windgeschwindigkeit sollte mindestens 5 m/s in 100m Höhe betragen. Fälle ungestörter Anströmung kommen in etwa 60% aller Meßläufe vor und sind über den gesamten dreijährigen Meßzeitraum verteilt.

Die mittlere Meßlaufdauer von 25 min wird als **hinreichend lange Mittelungszeit** angesehen, da sie länger ist als typische Zeitskalen turbulenter Vorgänge (Fiedler u. Panofsky, 1970).

Die **physikalischen Gesetze** in der atmosphärischen Grenzschicht beschreiben die Vertikalprofile von Temperatur und Wind in Abhängigkeit von geometrischen Parametern wie der Meßhöhe, der Bodenrauigkeit und - bei inhomogenem Gelände, wie es ja an einer Küstenstation der Fall ist - der Untergrundstruktur in Anströmrichtung und meteorologischen Parametern wie der Anströmgeschwindigkeit und der thermischen Schichtung.

Die Anwendung dieser Gesetze auf die Vertikalprofile verlangt selbstverständlich, daß bei ungestörter Anströmung die mittleren Meßwerte in einer Meßhöhe übereinstimmen.

Grundsätzlich wird nicht jeder Meßlauf für sich korrigiert, sondern es werden **mittlere Korrekturfaktoren** aus Abweichungen über mehrere Datensätze ermittelt. So fallen die Korrekturen nicht so gravierend aus und sind glaubwürdiger. Ferner bleiben so in einzelnen Datensätzen mit sehr großen mesoskaligen Variationen oder Winddrehungen Unterschiede an den Meßstellen erhalten. In einem einzelnen Datensatz finden sich also auch nach der Korrektur noch Abweichungen sowohl von physikalischen Vertikalprofilen als auch Abweichungen der Mittelwerte in einer Höhe. Bei der Verwendung mittlerer Korrekturfaktoren können zeitlich aufeinanderfolgende Datensätze aneinandergehängt werden, ohne daß Brüche an den "Nahtstellen" auftreten. Dies wäre nicht möglich, wenn jeder Datensatz für sich korrigiert würde.

Bei der Ermittlung der mittleren Abweichungen bei ungestörter Anströmung können bestimmte Zeitabschnitte unterschieden werden, die für die Mittelung verwendet werden und die sich von anderen

Abschnitten deutlich unterscheiden. Hier liegt vermutlich jeweils ein Meßfühler austausch vor, zumal die Abschnittsgrenzen meist mit Zeitlücken im Meßprogramm zusammenfallen. Innerhalb eines Abschnitts treten z.T. auch große Streuungen der Abweichungen auf, die aber in Kauf genommen werden, um eine zu große Zersplitterung in viele zeitlich sehr kurze Bereiche zu vermeiden.

Mit den Korrekturen, die für ungestörte Anströmung ermittelt werden, werden **alle Meßläufe korrigiert**. Die Abschnittsgrenzen müssen in dem vollständigen Datensatz natürlich neu festgelegt werden. In den Fällen, in denen sie nicht deutlich sichtbar sind, da es sich gerade um von Hindernissen gestörte Datensätze handelt, ist eine Orientierung an Zeitlücken im Meßprogramm zweckmäßig. In einigen Einzelfällen erscheint die Korrektur mit den aus den ungestörten Fällen bestimmten Korrekturtermen nicht sinnvoll, dann wird **nicht** korrigiert.

Die Korrektur der Meßdaten der GROWIAN-Datensätze ist zweifellos nicht ganz zufriedenstellend, aber aufgrund einer fehlenden Protokollierung des Meßfühlereinsatzes ist eine objektive Korrektur nicht möglich. Aus diesem Grund wird zu jedem Datensatz eine Datei gespeichert, die für jeden Meßfühler die Korrekturterme enthält, und zwar jeweils einen additiven Offset (ggf. =0.0) und Korrekturfaktoren (ggf. =1.0). So können die - nur auf Ausreißer korrigierten - Originaldaten wiedergewonnen werden. Ein Beispiel für eine Korrekturdatei ist im Anhang B gegeben.

### 2.3.2 Behandlung fehlerhafter Kanäle

Zugleich mit der physikalischen Korrektur werden fehlerhafte Kanäle, die unsinnige Daten enthalten, Null gesetzt. Diese 'Korrektur' ist natürlich nicht rückgängig zu machen. Dabei handelt es sich um

- Kanäle, die nur - von Ausreißern durchsetzt - konstante Werte (meist 0.00, bei Windrichtungskanälen auch oft andere konstante Werte) enthalten,

- Kanäle, die eindeutig ein starkes überlagertes Signal (Trend, Wellen o.ä.) enthalten, das nicht herauszufiltern ist (das ist sehr häufig bei Temperaturkanälen der Fall, anfangs aber auch bei dem Kanal, der den Differenzwinkel zwischen Sporn und Windrichtung angibt),

- Kanäle, bei denen das Meßsignal plötzlich abbricht und in einen konstanten Wert übergeht,

- Kanäle, die aus anderen Gründen unbrauchbare Daten enthalten.

Die letztgenannten Fehler können Meßfühlerfehler oder Datenerfassungsfehler sein, Beispiele sind: ein Temperaturkanal enthält Winddaten (falsche Datenaufzeichnung), ein Windrichtungskanal enthält eine um 100° von den anderen abweichende Windrichtung (falsche Ausrichtung des Auslegers), ein Windrichtungskanal enthält abweichend von den anderen eine nur wenig variierende Windrichtungsangabe mit stufenartigen Änderungen (Schwergängigkeit der Windfahne), ein Windgeschwindigkeitskanal zeigt eine zu starke Spreizung des Meßsignals (Datenübertragungsfehler).

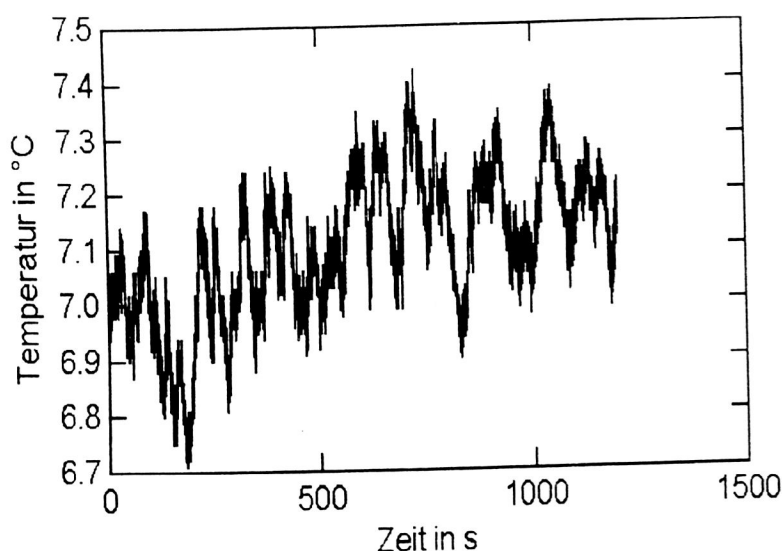
Die hier genannten Fehler sind nicht korrigierbar, die Meßwerte in den Kanälen werden auf Null gesetzt.

Daneben treten aber noch zahlreiche andere Fehler in bestimmten Kanälen auf, die ebenfalls eine bedenkenlose Nutzung der Meßdaten nicht zulassen. Es kann sich dabei um ein überlagertes Rauschen handeln, um einen Offset, um eine systematische Abweichung von Nachbarkanälen oder um ein Abschneiden bei bestimmten Werten. Diese Fehler sind aber entweder nicht so gravierend oder erscheinen mit aufwendigen Verfahren noch korrigierbar oder enthalten noch eine nutzbare Information, so daß ein Nullsetzen der Kanäle nicht gerechtfertigt erscheint. Diese Kanäle werden in den korrigierten Datensatz übernommen und später (s. GROWIAN-Datenbank) als 'fraglich' gekennzeichnet.

### 2.3.3 Temperaturkorrektur

Die Temperaturmeßdaten sind von wesentlich schlechterer Qualität als die Winddaten. Es treten sehr unterschiedliche Fehler auf, die nicht alle korrigiert werden können. Möglicherweise werden auch nicht alle Fehler erkannt, da nicht von allen Temperaturmeßreihen Zeitreihen dargestellt werden; einige Fehler zeigen sich aber bereits in den Mittelwerten oder in erhöhten Standardabweichungen.

Im Folgenden werden diese Fehler kurz in einem Beispiel vorgestellt und erläutert, ob und ggf. wie sie behoben werden.



**Abbildung 6**

Beispiel für ein dem Meßsignal überlagertes Rauschen

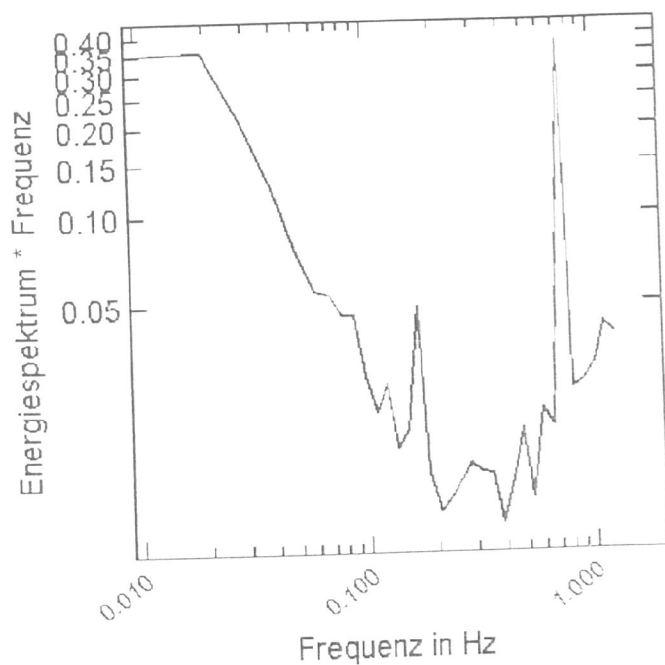


Abbildung 7

Energiespektrum einer verrauschten Temperaturregistrierung

Der am häufigsten auftretende Fehler ist ein dem Meßsignal überlagertes **Rauschen** (Beispiel 1, Abbildungen 6 und 7). Dieser Fehler zeigt sich einer Erhöhung der Standardabweichung und sollte den Mittelwert nicht verändern. Die Berechnung eines Varianzspektrums der unkorrigierten Daten zeigt deutlich eine Spitze bei einer Frequenz von etwa 0,7 Hz, außerdem aber noch einen generellen Anstieg im hochfrequenten Bereich (Abbildung 7). Fast alle Temperaturmeßreihen in 50, 100 und 150 m sind verrauscht.

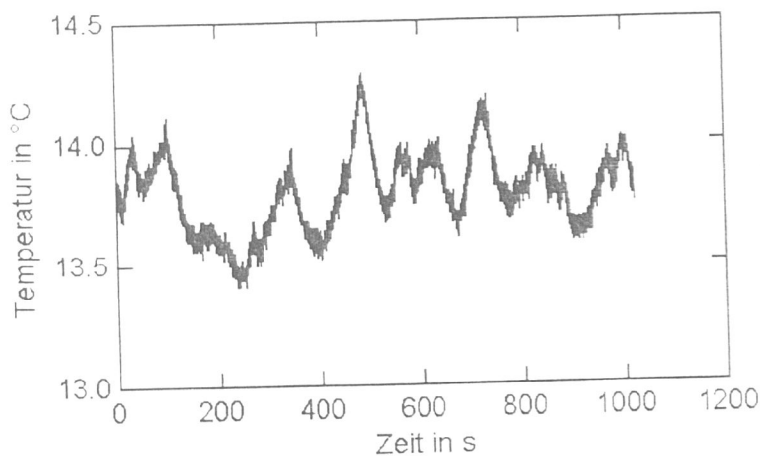


Abbildung 8

Beispiel für eine Temperaturregistrierung mit überlagerter langperiodischer Schwingung

Ebenfalls sehr häufig wird eine Überlagerung des Meßsignals von einer **Schwingung** im Minuten-Bereich beobachtet (Beispiel 2, Abbildung 8). Die Ursache dafür ist unbekannt. Es wird eine wesentlich erhöhte Standardabweichung berechnet. Da die Schwingung nicht regelmäßig ist (z.B. Einschwingvorgang, Ausklingen), ist eine Korrektur nicht möglich. Man kann für diese Fälle lediglich annehmen, daß der Mittelwert der Messung noch brauchbar ist. Zur Bestimmung eines Korrekturterms sollten diese Datensätze aber nicht verwendet werden.

Die Temperaturmessung in 150 m Höhe an Mast 2 innen zeigt häufig ein **Abdriften** des Temperatursignals (Beispiel 3, Abbildung 9), vornehmlich in den letzten Minuten des Datensatzes. Hier sind sowohl Mittelwert als auch Standardabweichung verfälscht, die Meßreihe ist unbrauchbar.

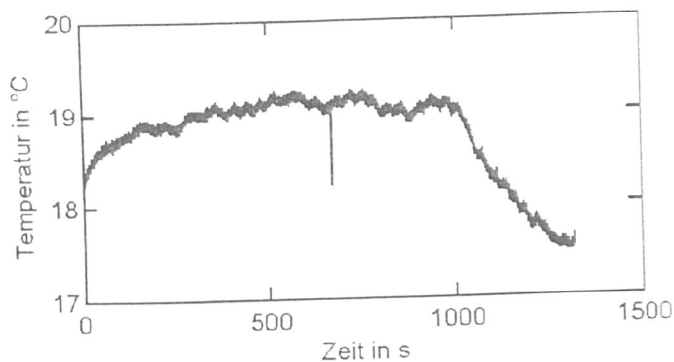


Abbildung 9

Beispiel für ein Abdriften des Temperatursignals

Ferner treten während eines Zeitabschnitts in 150 m Höhe um etwa 22 K **zu hohe** Temperaturen auf, die darüberhinaus auffallend große Standardabweichungen aufweisen. Diese Datensätze sind nicht zu korrigieren.

Häufig sind die Meßreihen in den vier verschiedenen Höhen **nicht konsistent**, d.h. bestimmte Strukturen treten nicht an allen Meßstellen auf. Mesoskalige Strukturen können in der Grenzschicht bei entkop-

pelten Schichten bspw. nur in den unteren oder nur in den oberen Schichten auftreten. Hier muß also eine Einzelfallprüfung, die die Windmessungen mit heranzieht, beurteilen, ob es sich um physikalisch sinnvolle oder um gestörte Meßdaten handelt. Bei der Bestimmung eines Korrekturterms sollten auch diese Datensätze ausgeschlossen werden.

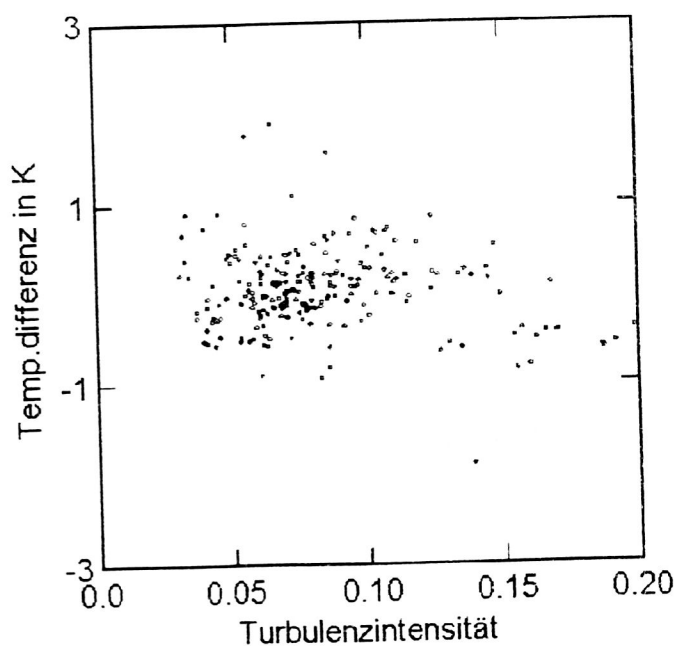
Auch bei Berücksichtigung nur der Meßreihen, die vernünftige Meßdaten enthalten, ist das Vertikalprofil der gemittelten Temperaturdaten noch nicht physikalisch sinnvoll. Die unkalibrierten Temperaturdaten müssen noch korrigiert werden. Es wird ein **additiver** Korrekturterm verwendet, der die Standardabweichungen nicht verändert.

Die Temperaturdaten werden so korrigiert, daß für die Datensätze mit ungestörter Anströmung und bei nahezu adiabatischer Schichtung im Mittel eine höhenkonstante potentielle Temperatur herrscht. Der Einfluß der Küstenlinie auf das Temperaturprofil wird vernachlässigt. Die Temperaturmessung in 50 m Höhe weist die wenigsten Störungen und Ausfälle auf und wird als die richtige angenommen. Eine Absoluteichung ist nicht möglich.

Da die Schichtung nicht aus den noch zu korrigierenden Temperaturdaten ermittelt werden kann, werden Starkwindfälle, bei denen von guter Durchmischung und daher einer adiabatischen Schichtung ausgegangen werden kann, verwendet. Dazu werden alle Fälle mit einer Windgeschwindigkeit  $> 10$  m/s in 100 m Höhe herangezogen. Die Korrektur geschieht abschnittsweise. Für die Zeitabschnitte werden die mittleren Abweichungen der potentiellen Temperaturen in 10, 100 und 150 m gegenüber der in 50 m Höhe bestimmt und mit diesen Werten alle Datensätze korrigiert.

Es zeigt sich, daß die Temperatur in 10 m Höhe bis auf wenige Datensätze 2 bis 3 K zu niedrig ist im Vergleich zu den Temperaturen in den größeren Höhen.

Als Überprüfung der Korrektur wird für alle Mittelwerte bei ungestörter Anströmung ein Schichtungsparameter (hier:  $\Delta T$ ) gegen die Turbulenzintensität aufgetragen (Abbildung 10). Zwischen beiden Größen sollte ein eindeutiger Zusammenhang bestehen (vgl. z.B. Roth, 1993). Das Fehlen einer Systematik in der Abbildung 10 deutet darauf hin, daß es sich überwiegend um Meßdaten in nahezu neutraler Schichtung handelt und daß die Streuung relativ groß ist. Siebers (1990) interpretiert am gleichen Standort in 16 m Höhe ge-



**Abbildung 10**

Darstellung der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen 100m und 150m gegen die Turbulenzintensität

gemessene Turbulenzintensitäten zwischen 0.07 und 0.12 als adiabatisch.

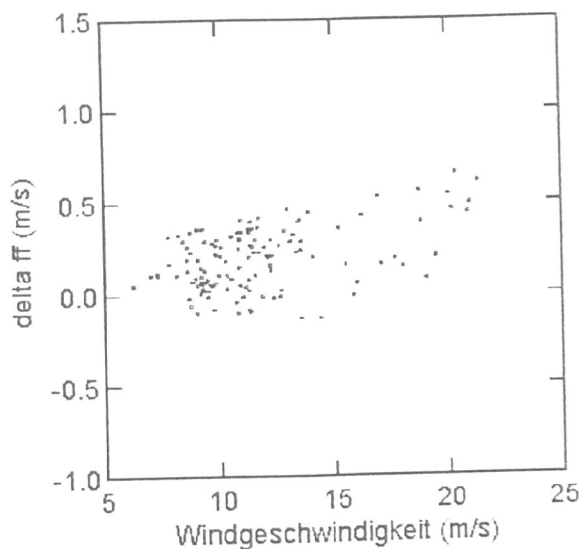


Abbildung 11

Abweichung der gemittelten Windgeschwindigkeit der Meßstelle 16 von der gemittelten Windgeschwindigkeit an der Normmeßstelle 8, aufgetragen gegen die Windgeschwindigkeit

Die vielfältigen Fehler bei der Temperaturmessung machen die Korrektur sehr aufwendig, da sehr viele Datensätze im einzelnen überprüft werden müssen. Auch nach der Korrektur sind die Temperaturmeßdaten für Turbulenzanalysen nicht brauchbar und die Mittelwerte nur bedingt brauchbar.

#### 2.3.4 Korrektur der Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeitsmessungen werden so korrigiert, daß sich bei ungestörter Anströmung

a) die **mittleren Geschwindigkeiten in einer Meßhöhe** - jeweils im Mittel über einen bestimmten Zeitbereich - **nicht voneinander unterscheiden** und

b) die mittleren **Vertikalprofile** bei adiabatischer Schichtung **dem theoretisch berechneten Windprofil** mit der vorgegebenen Untergrundstruktur **entsprechen**.

Mit den so ermittelten Korrekturtermen werden dann alle Datensätze korrigiert. Im folgenden wird das Verfahren für das Meßgitter von Mast 2 und 3 beschrieben, entsprechend wird auch Mast 1 korrigiert.

Der erste Punkt des Korrekturverfahrens wird dadurch erreicht, daß alle Meßstellen - mit Ausnahme der 10 m Höhe - zunächst an die Meßstellen des Mastes "2 innen" angepaßt werden. Mast 2 innen wurde ausgewählt, da in allen Meßhöhen gemessen wurde und im Vergleich zu Mast 3 innen weniger Ausfälle vorliegen. Die Anpassung geschieht in bestimmten Zeitabschnitten. Trägt man die Abweichung einer Meßstelle von der an Mast 2 innen gegen die Windgeschwindigkeit auf (Abbildung 11), so erkennt man, daß eine lineare Beziehung besteht, d.h. daß die Abweichung geschwindigkeitsabhängig ist; somit wird hier ein **Korrekturfaktor** verwendet, also auch die Varianz mitkorrigiert. Es brauchen

hier nur zwei Zeitbereiche unterschieden zu werden, der erste enthält die Meßdaten des Jahres 1984, der zweite die ab Ende 1985. Die Faktoren liegen meist zwischen 0.99 und 1.10, als Extremwerte werden 0.945 und 1.205 verzeichnet. Die Standardabweichungen der Faktoren liegen meist zwischen 0.010 und 0.015.

Auch Mast 2 innen weist wegen fehlender Kalibrierung kein konsistentes Vertikalprofil auf, daher müssen nun alle Meßstellen nochmals - diesmal in den jeweiligen Höhen einheitlich - korrigiert werden (Punkt zwei). Diese Korrekturfaktoren werden für ungestörte Anströmung bei adiabatischer Schichtung bestimmt. Die Windgeschwindigkeit in 100m Höhe wird als richtig angenommen. Die Vorgehensweise ist nun die, daß Verhältnisse der Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen Höhen zu der in 100 m Höhe aus den theoretisch berechneten Profilen - unter Berücksichtigung der Rauigkeitsverteilung und der Deichüberströmung - bestimmt werden und für die aktuellen Profile Korrekturfaktoren 'theoretisch berechnetes Verhältnis / aktuelles Verhältnis' bestimmt werden, so daß die Mittelwerte die richtigen Profile ergeben.

Als erstes werden die Verhältnisse  $f_1$  der aktuellen Windgeschwindigkeiten zu der in 100 m Höhe bestimmt. Der Standort des Mastes bezüglich der Küstenlinie erfordert es, drei Anströmrichtungen mit unterschiedlicher Entfernung von der Küste und vom Deich zu unterscheiden (siehe Abbildung 2), in denen die Verhältnisse der Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen Höhen unterschiedlich sind. Es sind Sektoren von jeweils 30° Breite, zentriert um 210°, 240° und 270°. Es zeigt sich, daß man auch hier die Daten der Jahre 1984 von denen der Jahre 1985-1987 unterscheiden muß. Tabelle 3 zeigt die Mittelwerte der Faktoren für die verschiedenen Höhen, die drei Sektoren und die zwei Zeitbereiche, ermittelt aus Datensätzen mit  $ff > 10\text{m/s}$  in 100m Höhe (zu  $f_2$ , "berech." Faktoren s.nächster Abschnitt).

Faktoren $f_1$ und $f_2$	210°	240°	270°
gem. 1984 <b>10m/100m</b>	0.543	0.491	0.547
berech.	0.685	0.683	0.677
gem. 85-87	0.606	0.687	0.654
gem. 1984 <b>50m/100m</b>	0.984	0.905	0.923
berech.	0.940	0.937	0.897
gem. 85-87	0.883	0.916	0.887
gem. 1984 <b>75m/100m</b>	1.063	1.023	1.040
berech.	0.975	0.975	0.975
gem. 85-87	0.916	0.926	0.916
gem. 1984 <b>125m/100m</b>	1.175	1.194	1.174
berech.	1.019	1.019	1.019
gem. 85-87	1.012	1.004	1.015

gem.1984 150m/100m	1.255	1.297	1.263
berech.	1.035	1.035	1.035
gem.85-87	1.094	1.045	1.071

**Tabelle 3**

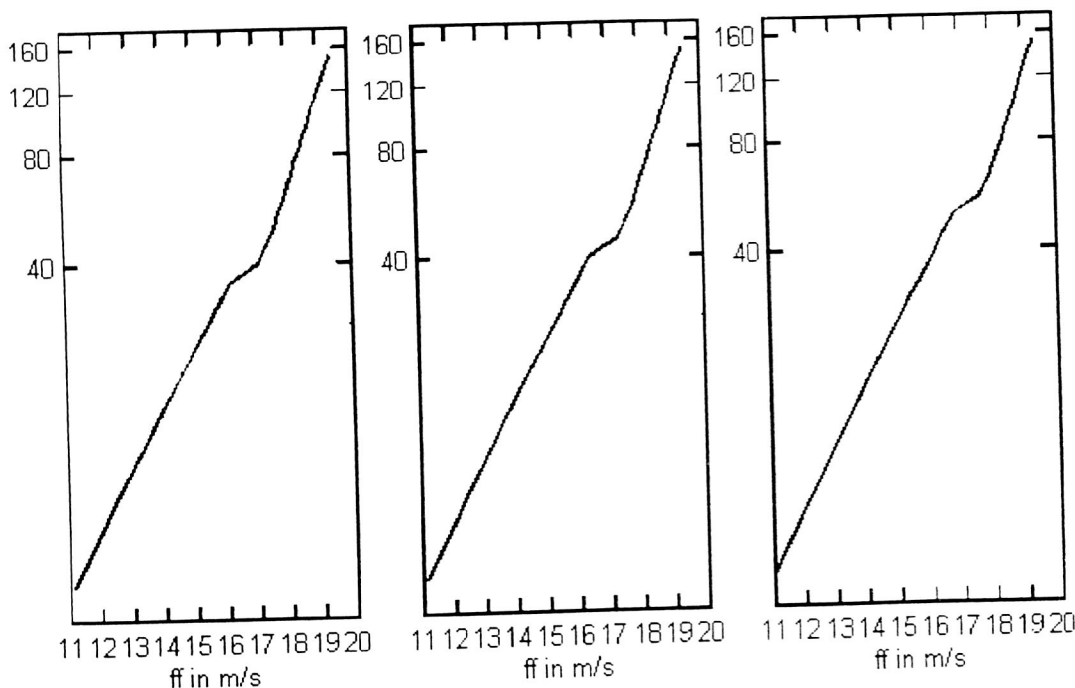
Mittlere Quotienten  $f_1$ : Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen Höhen durch Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe an Mast 2 innen, für die Zeitabschnitte 1984 und 1985-1987 und für die drei Anströmbereiche  $210^\circ$ ,  $240^\circ$  und  $270^\circ$   
 und Quotienten  $f_2$ : berechnete Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen Höhen durch berechnete Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe, gemäß der Rauigkeitsverteilung in den drei Anströmektoren

Ebenfalls für diese Sektoren werden dann theoretische Windprofile berechnet. Dies geschieht in zwei Schritten. Zuerst werden die durch den Wechsel in der Rauigkeit beeinflussten Windprofile bestimmt, die dann modifiziert werden, um den Einfluß der Überströmung des Deiches zu simulieren. Diese Methode ist sicherlich nicht exakt - dazu müßte mit einem zweidimensionalen Modell ein Windprofil gerechnet werden - aber bei der Qualität der Daten, die ja nur im Mittel über große Zeitbereiche korrigiert werden, zweifellos ausreichend.

210

240

270

**Abbildung 12**

Berechnete Windprofile am Standort der Maste 2 und 3 für die drei Anströmrichtungen 210°, 240° und 270° gemäß der Rauigkeitsverteilung

Die Rauigkeitsverteilung im Luv des Mastes ist der Abbildung 2 zu entnehmen. Die Rauigkeit der Wiese wird mit  $z_0=0.05\text{m}$ , die des Watts mit  $z_0=0.02\text{m}$  und die des Wassers mit  $z_0=0.001\text{m}$  angenommen, die Anströmung sei zweidimensional. Die Windprofile werden nach Formeln von Troen u. Petersen (1989) und Panofsky u. Townsend (1964) für Rauigkeitswechsel berechnet. Abbildung 12 zeigt die berechneten Profile für die drei Anströmrichtungen.

Der Übergang von einer internen Grenzschicht zu einem ungestörten Profil ist im Höhenbereich von 40 m bis 60 m gut zu erkennen. In den Sektoren 210° und 240° liegt lediglich die Meßstelle in 10 m Höhe innerhalb der internen Grenzschicht über der rauhen Oberfläche, im Sektor 270° auch noch die Meßstelle in 50 m Höhe. Oberhalb dieser Höhen wird also das ungestörte Windprofil über See vermessen.

Für die drei Anströmsektoren erhält man Faktoren  $f_2(z_i, \alpha) = \frac{f f_c(z_i, \alpha)}{f f_c(100\text{m})}$ , wobei

$ff_c$  für die berechnete Windgeschwindigkeit steht. Die Faktoren sind in Tabelle 3 unter "berech." aufgeführt.

(Ein Beispiel: im Jahr 1984 ist im Anströmbereich  $210^\circ$  im Mittel  $ff(10m)$  nur 54% von  $ff(100m)$ , müßte entsprechend dem theoretisch berechneten Windprofil aber ca. 69% betragen, d.h. die Meßwerte werden mit dem Faktor  $69\%/54\%=1.26$  multipliziert. Tatsächlich wird aber die Korrektur etwas geringer ausfallen, da  $ff(10m)$  durch die Deichwirkung weniger als 69% von  $ff(100m)$  sein wird, d.h. der Korrekturfaktor beträgt nicht 1.26 sondern nur 1.24, wie in der späteren Tabelle 5 angegeben ist.)

Der Einfluß des 8m hohen Deiches wird durch Überströmen eines rechteckigen Hindernisses von 5 m Höhe simuliert, um den Strömungswiderstand der Rückseite des Deiches zu erfassen. Die Geschwindigkeitsprofile im Lee eines zweidimensionalen Hindernisses bei adiabatischer Schichtung werden nach Counihan et al. (1974) berechnet, wie sie in Tetzlaff et al. (1989) angegeben sind. Das Geschwindigkeitsdefizit tritt hinter dem Deich zunächst in Hindernishöhe auf und breitet sich dann mit zunehmendem Abstand vom Deich nach oben aus, das Phänomen ist also eingebettet in die sich hinter dem Rauigkeitswechsel ausbildende interne Grenzschicht über der Rauigkeit "Wiese". Für die Rechnungen wird daher als Anströmrauigkeit  $z_0=0.05m$  angenommen.

Die nachstehende Tabelle 4 zeigt für die drei Sektoren den Abstand der Masten vom Hindernis sowie die Reduktionsfaktoren  $f_3$  in den unteren Meßhöhen.

	$210^\circ$	$240^\circ$	$270^\circ$
Abstand vom Deich	1120m	1180m	1440m
Reduktion in 10 m	0.9833	0.9844	0.9880
Reduktion in 50 m	0.9959	0.9958	0.9953
Reduktion in 75 m	0.9996	0.9995	0.9992
Reduktion in 100 m	1.0000	1.0000	0.9999

**Tabelle 4**

Faktoren  $f_3$ , um die die aus der Rauigkeitsverteilung berechneten Windprofilaten reduziert werden müssen, um die Wirkung der Deichüberströmung zu berücksichtigen

Die Korrekturfaktoren für die auf Mast 2 innen bezogenen Meßdaten ermitteln sich dann aus  $f=(f_2 f_3)/f_1$  für die verschiedenen Sektoren und 1984 bzw. 1985-1987 und sind in Tabelle 5 angegeben. Da der Untergrundeinfluß bereits berücksichtigt ist, sollte es nur einen Korrekturfaktor  $f$  geben, der hier als Mittelwert über die drei Sektoren bestimmt wird und ebenfalls in Tabelle 5 in der letzten Spalte angegeben ist. Die Abweichungen liegen in dem geringen Kollektiv aus Datensätzen mit Anströmung  $>10m/s$  pro Sektor begründet (für 1984 nur 3 Datensätze pro Sektor, für 1985-1987 nur 25-40 Daten-

sätze pro Sektor). Ferner wurden in der Anströmung über der Rauigkeit "Wiese" keine weiteren Hindernisse wie Straßen und Gebäude berücksichtigt, die sich vor allem in der unteren Meßhöhe noch störend auswirken.

Höhenverhältnisse	210°	240°	270°	alle
10m/100m 1984	1.240	1.369	1.223	1.277
85-87	1.111	0.978	1.023	1.037
50m/100m 1984	0.951	1.031	0.967	0.983
85-87	1.060	1.019	1.006	1.028
75m/100m 1984	0.917	0.953	0.937	0.936
85-87	1.064	1.053	1.063	1.060
125m/100m 1984	0.867	0.853	0.868	0.863
85-87	1.007	1.015	1.004	1.009
150m/100m 1984	0.825	0.798	0.819	0.814
85-87	0.946	0.990	0.966	0.968

**Tabelle 5**

Korrekturfaktoren für die verschiedenen Höhen und die drei Anströmrichtungen für den Mast 2 innen, die im Mittel für ungestörte Anströmung ein Windprofil ergeben, wie es der Rauigkeitsverteilung und Deichüberströmung entspricht.

Man erkennt, daß die Abweichungen der Meßdaten des Mast 2 innen vom theoretisch berechneten Windprofil für das Jahr 1984 relativ groß sind, während sie für den überwiegenden Zeitraum der Messungen nur maximal 6% erreichen.

Damit liegen alle Faktoren für die Korrektur der Windgeschwindigkeiten vor.

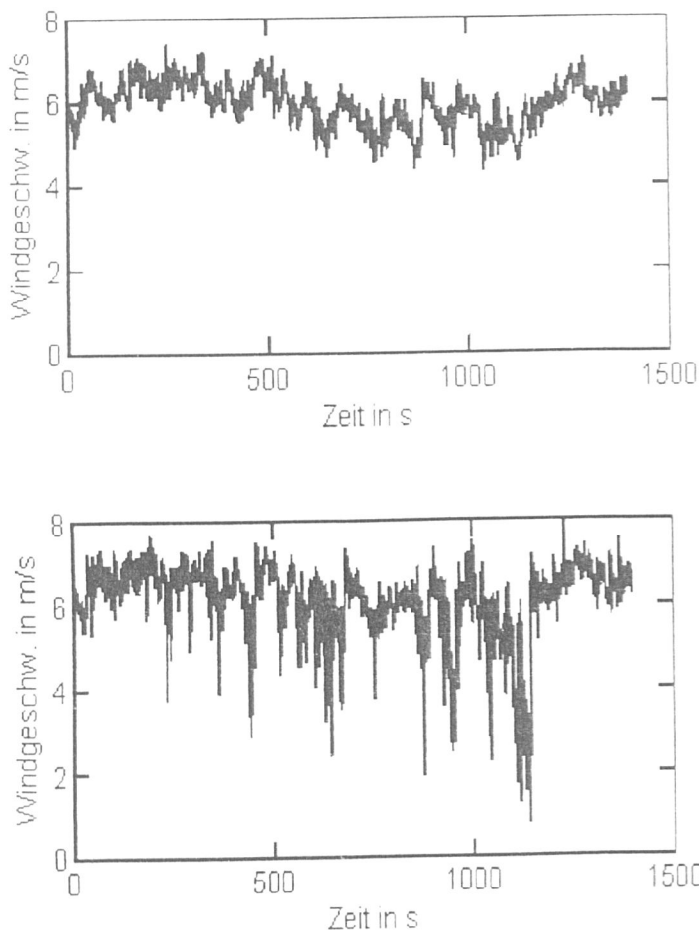
### 2.3.5 Korrektur der Windrichtung

In den 17 Windrichtungsmeßstellen am Meßgitter zeigen sich sehr große Abweichungen (z.T.  $> 20^\circ$ ). Ein Grund dafür ist auch die Tatsache, daß einzelne Ausleger zumindest zeitweise nicht parallel zum Meßgitters ausgerichtet waren. Möglicherweise wurde dies durch Arbeiten am Meßgitter verursacht. Hier wäre ein Meßprotokoll sehr hilfreich gewesen.

Die Windrichtungsmessungen werden so korrigiert, daß **bei ungestörter Anströmung** im Mittel über einheitliche Bereiche **alle Meßstellen dieselbe Windrichtung anzeigen**. Es wird also kein veränderliches Vertikalprofil der Windrichtung angenommen. In der Grenzschicht bis 150 m Höhe ist die Dre-

hung der Windrichtung bei adiabatischer Schichtung gering. Die Windrichtungen werden nur durch einen Offset korrigiert - d.h. gedreht -, die Varianzen bleiben erhalten.

Die Windrichtungen werden an eine Messung in 100 m Höhe angepaßt, wobei sich die Meßstelle 9 (Mast 2 außen) als die geeignetste erwies, da sie von den anderen Meßstellen in Verlauf der Meßkampagne sowohl positive als auch negative Abweichungen in Bereich von etwa  $3^\circ$  aufweist, also nicht etwa systematisch höhere oder geringere Werte zeigt. Für jede der anderen Meßstellen wird im Mittel über bestimmte Bereiche ein additiver Offset bestimmt, und damit werden innerhalb der Zeitbereiche auch die "gestörten" Datensätze korrigiert.



**Abbildung 14**

Beispiel für die Abschattung durch den Gittermast  
oben: ungestörte Windmeßstelle Mast 3 100m innen,  
unten: zeitweilig abgeschattete Windmeßstelle Mast 3 100m außen

Eine Kalibrierung der Windrichtungsmessungen erscheint möglich, wenn im Fall einer Anströmung parallel zum Meßgitter die inneren Meßstellen durch den Gittermast abgeschattet werden. Da keine Konstruktionszeichnung der Gittermasten und ihrer Ausleger vorliegt, kann der Bereich, in dem Ab-

schattung vorliegt, nur geschätzt werden. Es handelt sich etwa um einen Bereich von  $\pm 15^\circ$  um  $153^\circ$  (also Anströmung aus SSE) für den Ausleger Mast 2 innen und um  $333^\circ$  (Anströmung aus NNW) für den Ausleger Mast 3 innen.

Zeitreihen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für die Datensätze mit Parallelanströmung (Files gr023\_3 ... gr030\_2) weisen für den Meßfühler 8 (Mast 2 innen) eine Abschattung im Bereich von  $158-187^\circ$ , also um  $172.5^\circ$  herum auf, das ergibt eine Abweichung von  $20^\circ$  gegenüber der "wahren" Windrichtung. Tatsächlich beträgt in diesem Zeitbereich die Abweichung vom Referenzmeßfühler 9  $17^\circ$ . Bei Anströmung aus nordwestlicher Richtung zeigt der Meßfühler 16 (Mast 3 innen) für Windrichtungen  $> 318^\circ$  eine Abschattung. Dieser Wert stimmt mit dem theoretischen exakt überein, die Abweichung vom Referenzmeßfühler beträgt in diesem Zeitbereich  $3^\circ$ . Innerhalb dieser Genauigkeit kann man davon ausgehen, daß der Meßfühler 9 tatsächlich die wahre Windrichtung anzeigt.

### 2.3.6 Sonstige Meßdaten

Weitere Meßdaten sind der Vertikalwind, die relative Luftfeuchtigkeit, eine Windgeschwindigkeitsmessung am Maschinenhaussporn und eine Messung des Differenzwinkels zwischen Maschinenhaus und Windrichtung.

Bei der Vertikalwindmessung sollten die aufwärts- und die abwärtsgerichtete Komponente in zwei getrennten Kanälen erfaßt werden. Es stellte sich jedoch heraus, daß durch einen Datenerfassungsfehler beide Kanäle identische Daten enthalten, also nur die aufwärts- oder die abwärtsgerichtete Komponente. Lediglich in den Fällen, in denen eine so starke Nullpunktverschiebung vorliegt, daß die Größe vollständig erfaßt ist, ist die Messung brauchbar. Dennoch wurden die Meßdaten nicht verworfen sondern in den endgültigen Datensatz übernommen. Die Daten werden nur auf Ausreißer überprüft, eine physikalische Korrektur wird nicht vorgenommen. Lediglich die Meßläufe von 1984 enthalten überhaupt Vertikalwinddaten, in allen späteren Meßläufen enthalten die Kanäle nur Null.

Die Feuchtemeßdaten werden nur auf Ausreißer überprüft und ansonsten unkorrigiert übernommen. Vereinzelte Zeitreihendarstellungen zeigen, daß das Meßsignal z.T. von Rauschen oder ähnlichen Störungen überlagert ist, was aber nicht korrigiert wird. Die Feuchteangabe ist allenfalls als Mittelwert wichtig, nicht aber in ihrer Turbulenzstruktur.

Die Windgeschwindigkeitsmeßwerte am Sporn des Maschinenhauses von GROWIAN sind nur dann sinnvoll zu interpretieren, wenn man die momentane Ausrichtung der WKA kennt. Diese Angabe sollte eine Messung der Winkeldifferenz zwischen Maschinenhaus und Wind liefern. Dadurch würde man insbesondere Informationen über die Nachführung des GROWIAN bei Windrichtungsänderungen erhalten. Die Winkelmeßdaten erscheinen jedoch sehr zweifelhaft. Nach anfänglichen zweifellos falschen Meßdaten im Jahr 1984 (Überlagerung von anderen Signalen großer Amplitude) treten in einigen Fällen sinnvolle Daten auf, ab einem bestimmten Zeitpunkt aber werden immer Winkelabweichungen um  $100^\circ$  mit geringen und durchaus plausiblen Variationen gemessen. Das würde bedeuten, daß GROWIAN immer nahezu senkrecht zur mittleren Windrichtung ausgerichtet wäre, was zweifellos unsinnig

ist. Dennoch werden sowohl die Geschwindigkeitsdaten als auch die Winkeldifferenzdaten nach einer Korrektur auf Ausreißer in den endgültigen Datensatz übernommen und ggf. als fraglich markiert. Lediglich in den Fällen, da sie eindeutig fehlerhaft sind, werden sie Null gesetzt. Es fällt auf, daß die Geschwindigkeitsmessung zwar ihrer Struktur nach mit anderen Windmeßstellen übereinstimmt, oft aber eine wesentlich größere Spreizung aufweist.

### 2.3.7 Der korrigierte Datensatz

Der mit den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Methoden korrigierte Datensatz stellt einen physikalisch konsistenten, weitgehend fehlerfreien Datensatz dar. Fehlerhafte Datenkanäle wurden durch Null ersetzt, fragliche Kanäle markiert, sodaß Nutzer die sonstigen Daten unbedenklich verwenden können.

Im Anhang A ist die Liste aller korrigierten Datensätze mit Dateinamen, Datum, Uhrzeit, mittlerer Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 100 m Höhe (=Nabenhöhe GROWIAN) abgedruckt. Im Anhang B ist als Beispiel für einen Datensatz und alle 55 Meßkanäle eine Tabelle der additiven Korrekturterme (1.Spalte, für Windrichtung und Temperatur) und der Korrekturfaktoren (2.und 3.Spalte: Korrekturfaktoren  $f$  für die Windgeschwindigkeit, 4.Spalte: evtl. Nullsetzen fehlerhafter Kanäle) gezeigt.

Trotz vieler Datenausfälle bleiben ausreichend viele Meßstellen, um ein Bild von der Windstruktur in dem Meßgitter zu erhalten.

Mit Hilfe der im 4.Abschnitt vorgestellten Datenbank kann die Güte des Datenkollektivs beurteilt werden. In Tabelle 6 ist angegeben, in wie vielen Datensätzen die einzelnen Meßkanäle ausgefallen sind ('Ausfälle') und in wie vielen Datensätzen die Meßdaten der Kanäle zweifelhaft sind ('fraglich'). Man erkennt, daß die Ausfälle bei der Windgeschwindigkeit deutlich größer sind als bei der Windrichtung, daß die Temperaturmessung problematisch ist und daß nur für wenige Fälle sinnvolle Meßdaten des Vertikalwindes vorliegen. Für die Windmessung werden Geschwindigkeits- und Richtungsmessungen benötigt, daher ist in Spalte 3 bei den Windgeschwindigkeitskanälen angegeben, wie oft Windgeschwindigkeit oder Windrichtung an einer Meßstelle ausgefallen sind. Die Zahl der Ausfälle liegt im Schnitt zwischen 10 und 20%, so daß bei der großen Anzahl von 299 Datensätzen immer noch ein genügend großes Kollektiv zur Auswertung zur Verfügung steht.

	Meßkanal	Ausfälle	fraglich	Ausf. ff,dd
1	ff M1 50m	19	2	
2	ff M1 100m	24	17	

	Meßkanal	Aus- fälle	frag- lich	Ausf. ff,dd
3	ff M1 150m	14	14	115
4	ff M2 10m	1	-	4
5	ff M2 50m	22	1	23
6	ff M2 75m i	16	-	18
7	ff M2 75m a	13	1	15
8	ff M2 100m i	21	-	23
9	ff M2 100m a	31	2	32
10	ff M2 125m i	19	5	19
11	ff M2 125m a	39	-	43
12	ff M2 150m	117	10	119
13	ff M3 50m	19	-	19
14	ff M3 75m i	44	-	47
15	ff M3 75m a	12	6	15
16	ff M3 100m i	63	-	66
17	ff M3 100m a	20	8	23
18	ff M3 125m i	46	-	49
19	ff M3 125m a	50	2	53
20	ff M3 150m	40	1	43
21	ff Sporn	-	50	
22	dd M1 50m			
23	dd M1 100m			
24	dd M1 150m	115	45	
25	dd M2 10m	3	3	
26	dd M2 50m	11	1	
27	dd M2 75m i	13	1	
28	dd M2 75m a	3	1	
29	dd M2 100m i	18	2	
30	dd M2 100m a	16	1	
31	dd M2 125m i	14	1	
32	dd M2 125 a	4	1	
33	dd M2 150m	3	1	

	Meßkanal	Aus- fälle	frag- lich	Ausf. ff,dd
34	dd M3 50m	6	1	
35	dd M3 75m i	9	1	
36	dd M3 75m a	9	2	
37	dd M3 100m i	9	2	
38	dd M3 100m a	9	3	
39	dd M3 125m i	3	68	
40	dd M3 125m a	9	3	
41	dd M3 150m	3	2	
42	dd Sporn	7	263	
43	wu M2 75m a	298	-	
44	wu M2 125m a	258	27	
45	wu M3 75m a	258	24	
46	wu M3 125 a	263	30	
47	wie 43			
48	wie 44			
49	wie 45			
50	wie 46			
51	T M1 10m	11	12	
52	T M2 50m	9	20	
53	T M2 100m i	21	35	
54	T M2 150m	14	45	
55	r M2 100m i	-	4	

**Tabelle 6**

Anzahl der Datensätze mit Ausfällen und zweifelhaften Daten der 55 Meßkanäle. Dabei bedeuten: ff: Windgeschwindigkeit, dd: Windrichtung, wu: vertikale Windgeschwindigkeit (nur positive Werte), T: Lufttemperatur, M2: Mast 2, M3: Mast 3, i: nach innen gerichteter Ausleger, a: nach außen gerichteter Ausleger.

Ein gewisses Problem stellen die Meßdaten vom Mast 1 dar, der etwa 700 m ost-südöstlich des Meßgitters steht (s. Abbildung 3). Es handelt sich um einen Dreiecksmast mit jeweils drei Auslegern zur Messung der Windgeschwindigkeit (vgl. Tetzlaff et al., 1985). Je nach Anströmung kann daher ein weit-

gehend ungestörter Meßfühler ausgewählt werden. Es ist jedoch nicht bekannt, welcher der drei Ausleger ausgewählt wurde. Auch nach den Korrekturen ist die Qualität der Meßdaten unzureichend; die Einzelprofile weichen oft stark von einem physikalisch sinnvollen Windprofil ab, die Standardabweichungen zeigen ein anderes Vertikalprofil als die übrigen Meßdaten, teilweise ist die Struktur der Windmessungen anders als bei den übrigen Meßdaten. Die Windrichtung wird nur in 150 m Höhe gemessen. Diese Meßgröße zeigt - neben auffällig häufigen Ausfällen - meist eine andere Struktur als andere Richtungsmessungen, was teilweise mit einer Schwergängigkeit der Windfahne erklärt werden kann. So muß darauf hingewiesen werden, daß die Meßdaten von Mast 1 auch dann, wenn sie nicht als fraglich markiert sind, zumindest mit Vorsicht verwendet müssen.

## 2.4 Die GROWIAN-Datenbank

### 2.4.1 Datenbank Visual FoxPro

Der Umfang der Meßdaten während des GROWIAN-Testbetriebs legt nahe, die wesentlichen Merkmale der Datensätze in einer Datenbank zusammenzufassen. So können Abfragen nach bestimmten Anströmbedingungen, Meßkanalausfällen oder Tages- oder Jahreszeiten einfacher erstellt werden.

Die geplante Datenbank für Sonderwindmessungen soll auf einem IBM-oder kompatiblen PC eingerichtet werden, um den Datenaustausch und die Datenweitergabe möglichst einfach zu gestalten. Die Entscheidung zwischen verschiedenen aktuellen Datenbanksystemen fiel für die FoxPro Datenbank der Firma Microsoft. Es wurde das System Visual FoxPro, Version 3.0 verwendet. Es handelt sich um ein relationales Datenbanksystem, d.h. die FoxPro-Datenbank besteht aus Tabellen, die über Schlüsselfelder miteinander verknüpft werden können (Näheres s. Herzog, 1992). In die Tabellen können nicht nur alphanumerische Größen oder Datumsgrößen aufgenommen werden sondern auch freier Text, der aber in einer separaten Datei gespeichert wird und in der Tabelle nur durch einen Zeiger gekennzeichnet wird.

### 2.4.2 Aufbau der GROWIAN-Datenbank

Die GROWIAN-Datenbank besteht aus zwei Tabellen, in denen die wesentlichen Merkmale der 300 Datensätze enthalten sind, die Daten selbst sind auf einer MOD und auf einer CD (Compact Disk) gespeichert. Die eine Tabelle enthält Hinweise auf die **Originaldateien**, die von MDE geliefert wurden, und die Protokollierung während des Meßprogramms. Die zweite Tabelle enthält die wesentlichen

Merkmale der **aufbereiteten Meßdaten** und Hinweise über bereits vorhandene Darstellungen.

<b>Pcmband:</b>	145
<b>Spur 1:</b>	1
<b>Spur 2:</b>	2
<b>Spur 3:</b>	3
<b>Spur 4:</b>	4
<b>Inhalt1:</b>	Teillast
<b>Inhalt2:</b>	Teillast
<b>Inhalt3:</b>	Wind, 10-14 m/s, 120°
<b>Inhalt4:</b>	Wind, 13-15 m/s, 106°
<b>Datum:</b>	20.10.1986
<b>Mod1:</b>	3
<b>Mod2:</b>	6
<b>Mod3:</b>	3
<b>Mod4:</b>	6
<b>Sonstiges:</b>	
<b>Bearbeitet:</b>	

**Tabelle 7**

Beispiel für einen Datensatz der Datenbanktabelle, die die Originaldaten beschreibt

Tabelle 7 zeigt einen Datensatz der ersten Datenbanktabelle, der aus mehreren Feldern besteht. Die Felder haben die folgende Bedeutung: 'PCMBand' gibt die Nummer des Magnetbandes an, 'Spur1 ... 4' geben an, welche Spuren beschrieben sind, 'Inhalt1 ... Inhalt4' enthalten für die jeweiligen Spuren die Informationen, die im MAN-Protokoll stehen, 'Datum' ist die Datumsangabe des Protokolls (meist die richtige, vgl. 2.2.4), 'MOD1 ... MOD4' geben die Nummer der Original-MOD an, auf der die Daten der Spur1 ... Spur4 gespeichert sind, 'Sonstiges' enthält Protokollbemerkungen, die für alle beschriebenen Spuren gelten, 'Bearbeitet' gibt an, ob die Daten des PCM-Bandes aufbereitet wurden. Es wurden für die 154 Bänder Datensätze angelegt. Davon sind aber 49 Bänder gar nicht beschrieben, 6 Bänder enthalten keine meteorologischen Daten.

<b>Filename:</b>	gr021_2
<b>Datum:</b>	08.11.1986
<b>Zeit:</b>	20.46

<b>Filename:</b>	gr021_2
<b>Länge:</b>	3552
<b>Windgeschw.:</b>	10.1
<b>Windricht.:</b>	43
<b>Ausfälle:</b>	43
<b>Fraglich:</b>	42,44,45,46
<b>Stichwort:</b>	von GROWIAN
<b>Mod origin:</b>	4
<b>Pcmband:</b>	21
<b>Mod korrig:</b>	1
<b>Plots Orig:</b>	0
<b>Plots Korrr:</b>	9,13,14,16,18,20,29,37,45,46
<b>Zählerfeh:</b>	583
<b>Bemerkung:</b>	Anströmung z.T. von GROWIAN Beeinflussung von Mast 3 (s.Spektren) Unterschiedliche Varianzen Kanal 3 und 29 gestört

**Tabelle 8**

Beispiel für die Struktur der Datenbanktabelle, die die wesentlichen Merkmale der bearbeiteten Datensätze enthält

Die zweite Datenbanktabelle enthält die wesentlichen Merkmale der bearbeiteten Datensätze (= Spuren des Magnetbandes), dazu gehören Datum und Uhrzeit, Länge des Datensatzes, mittlere Windgeschwindigkeit und Windrichtung und eine Kurzbezeichnung der Anströmung (z.B. 'ungestört' oder 'Wind von GROWIAN'). Ferner sind Merkmale enthalten, die Aufschluß über die Güte des Datensatzes geben, wie Anzahl der fehlerhaften Zeilen in der Originaldatei, fehlerhafte oder zweifelhafte Kanäle und im Klartext geschriebene Bemerkungen. Tabelle 8 gibt ein Beispiel für einen Datensatz der zweiten FoxPro-Tabelle.

Hier haben die Felder die folgende Bedeutung: 'Filename' enthält den Namen, den der Datensatz erhalten hat, eine Kombination aus PCMBandname und Spur, 'Datum' gibt das geprüfte Datum an, wie es in 2.2.4 beschrieben wurde, 'Zeit' ist die Startzeit, wie sie auf dem Band angegeben ist, 'Länge' gibt die Länge des Datensatzes in Zeilen an (eine Zeile entspricht 0.4 s), 'Windgeschw' enthält die gemittelte Windgeschwindigkeit in m/s in 100 m Höhe, i.a. von der Meßstelle Mast 3 innen, 'Windricht' enthält die gemittelte Windrichtung in ° von derselben Meßstelle, in 'Ausfälle' sind die Nummern der Kanäle angegeben, die keine, falsche oder nicht korrigierbare Daten enthalten und die daher zu Null gesetzt wurden (vgl. 2.3.2), in 'Fraglich' sind die Nummern der Kanäle angegeben, die zweifelhafte Daten

enthalten, die aber wegen eines möglichen Informationsgehalts nicht zu Null gesetzt wurden: diese sind mit Vorsicht zu interpretieren, 'Stichwort' enthält eine Kurzcharakterisierung der Anströmung, es wurden die Stichworte 'ungestört', 'fast ungestört', 'Gittereinfluß', 'von GROWIAN' und 'Windstille' verwendet, 'Mod Origin' enthält die Nummer der MOD, auf der die Daten geliefert wurden, 'Pcmband' enthält die Nummer des Originalbandes (ist auch im Dateinamen enthalten), 'Plots Orig' gibt die Kanalnummern an, von denen Plots der unkorrigierten Größen vorliegen, während 'Plots Korr' die Kanalnummern angibt, von denen Plots der korrigierten Größen vorliegen, 'Zählerfeh' gibt an, wie viele Zeilen in der Originaldatei (fünffach so groß wie die bearbeitete!) fehlerhaft waren, 'Bemerkung' enthält schließlich im Klartext alle während der Bearbeitung aufgefallenen Besonderheiten oder Probleme.

Beide Datenbanktabellen werden über die Felder 'PCM-Band' miteinander verknüpft, so daß für jede Datei die Information über die Originaldaten und über die bearbeiteten Daten abgerufen werden kann.

### 2.4.3 Beispiele für die Anwendung der Datenbank

Die Tabellen und ihre Kombination zu einer Datenbank geben wertvolle Informationen über die Verwertbarkeit der Meßdaten für die verschiedensten Anwender. Bereits in Abschnitt 2.3.7 wurde ein Beispiel für die Anwendung der Datenbank gegeben, dort wurde die Anzahl aller fehlerhaften oder fraglichen Kanäle in den 299 Datensätzen angegeben und somit eine Aussage über die verfügbaren Daten gemacht.

Durch das 'Stichwort' wird eine grobe Charakterisierung der Anströmung gegeben. Es liegen 172 Datensätzen bei ungestörter Anströmung vor, 37 bei fast ungestörter Anströmung, 38 Datensätze enthalten einen Einfluß des Meßgitters, 48 einen Einfluß des (rotierenden) GROWIAN und in 4 Fällen zeigen die Messungen fast Windstille. Von den Datensätzen bei ungestörter Anströmung weisen 104 eine mittlere Windgeschwindigkeit von  $\bar{w} > 10$  m/s auf, 26 von  $\bar{w} > 15$  m/s, 11 von  $\bar{w} > 20$  m/s und 1 von  $\bar{w} > 25$  m/s.

Weitere interessierende Details wie etwa die Zahl der Datensätze mit Vertikalwind (maximal 41), mit sinnvollen Meßdaten an den zwei 150 m-Meßstellen (158) oder mit allen vier Meßdaten in 100 m Höhe (193) können abgefragt werden. Ferner kann man feststellen daß 42 Datensätze in das Jahr 1984 fallen, 33 in das Jahr 1985, 200 in das Jahr 1986 und 24 in das Jahr 1987.

Eine Auflistung der bereits vorliegenden Plots der Meßgrößen kann ebenfalls von Interesse sein, um ohne großen Aufwand Vergleiche zwischen verschiedenen Situationen anstellen zu können.

## 2.5 Erste wissenschaftliche Auswertung

### 2.5.1 Allgemeines

Mit der Aufbereitung der meteorologischen Daten, die während des GROWIAN-Meßprogramms gewonnen wurden, ihrer Korrektur und Archivierung ist im wesentlichen das Teilziel 'Aufbereitung von Meßdaten der GROWIAN-Meßkampagne' des Projektes abgegolten. Zur Beurteilung der Güte der Daten reichen aber im allgemeinen die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen nicht aus, hier müssen aufwendigere Analyseverfahren, insbesondere der Zeitreihenanalyse herangezogen werden. In Abschnitt 2.3.3 ist bereits darauf hingewiesen, daß das der Temperaturmessung überlagerte Rauschen im Energiespektrum deutlich erkennbar wird.

Es wurden daher weitere Analyseverfahren für die Meßdaten entwickelt und auf ausgewählte Datensätze angewandt. Zu den Verfahren gehören solche, die Erkenntnisse über die Struktur der dreidimensionalen Turbulenz in der Grenzschicht gewinnen und auf die wissenschaftliche Bedeutung des Datensatzes abzielen und solche, die **anwendungsorientiert** sind und spezielle Fragestellungen im Zusammenhang mit der Belastung von Windenergieanlagen bearbeiten.

Die GROWIAN-Windmeßdaten sind bei Anströmung von See typisch für die maritime Grenzschicht. Wie die Berechnungen in 2.3.4 zeigen, liegt dann nur die untere Meßhöhe von 50 m innerhalb der sich ausbildenden Grenzschicht über Wiese, die anderen Meßstellen erfassen die Grenzschicht über See.

## 2.5.2 Dreidimensionale Turbulenzstruktur

### 2.5.2.1 Analyse der gesamten Zeitreihe

Die Einmaligkeit der GROWIAN-Winddaten besteht in der Meßanordnung, die flächenhaft das Windfeld in seiner turbulenten Struktur erfaßt. Über die zeitliche Messung kann als dritte Komponente die in Strömungsrichtung berechnet werden. Somit besteht die Möglichkeit, die dreidimensionale Wirbelstruktur in der atmosphärischen Grenzschicht zu bestimmen.

Zur Untersuchung werden folgende Verfahren verwendet:

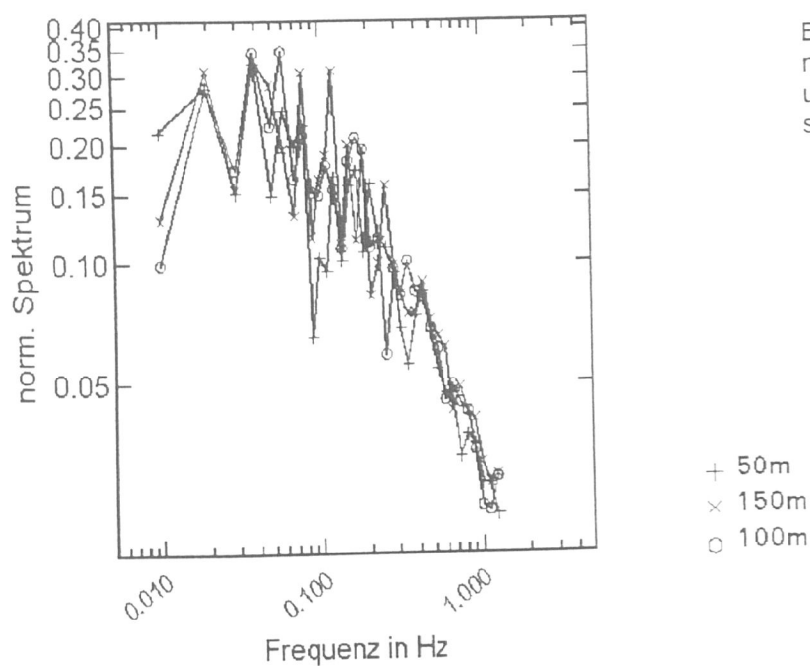
- Verteilungen von gemessenen oder abgeleiteten Größen,
- Schiefe und Exzeß der Verteilungen,
- Autokorrelationsfunktionen,
- Energiespektren,
- Kreuzkorrelationsfunktionen,
- Kreuzspektren.

Alle diese Verfahren analysieren trendbereinigte Datensätze (vgl. dazu z.B. Taubenheim, 1969 Kapitel 8.3.2) und unterscheiden die Windkomponenten in Richtung des mittleren Windes und senkrecht dazu in lateraler und vertikaler Richtung.

Vieles ist über die Struktur der atmosphärischen Turbulenz bereits bekannt. Daher stellt die Anwendung üblicher Analyseverfahren auch eine Überprüfung der Güte der Meßdaten dar. Die Abbildungen 15, 16 und 17 zeigen beispielhaft für einen Datensatz, der auch eine brauchbare Vertikalwindmessung

enthält, die Energiespektren der u-, v- und w-Komponente des Windes. In der Ordinate ist der Spektralwert normiert mit der Standardabweichung der jeweiligen Windkomponente und mit der Frequenz multipliziert. Auf diese Weise werden Energiespektren verschiedener Meßreihen untereinander vergleichbar und der Abfall des Spektrums im Inertialbereich wird  $-5/3$ .

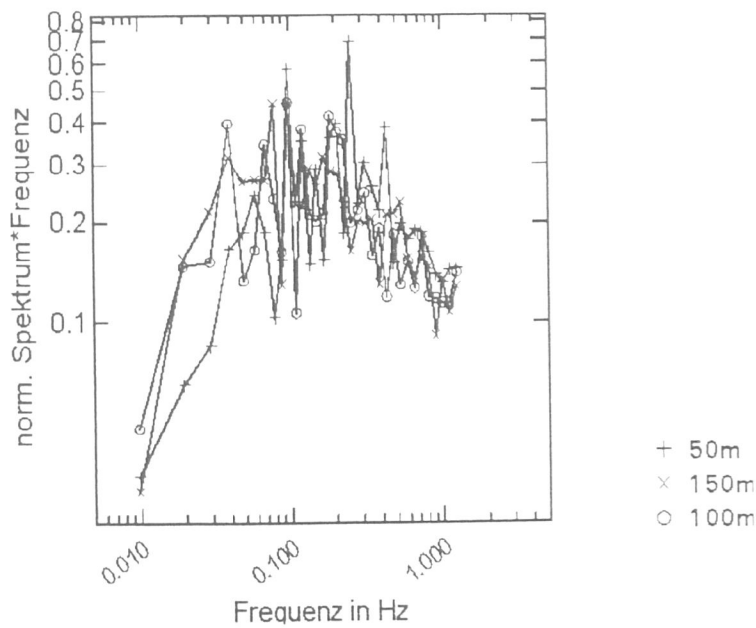
Man erkennt deutlich die Verschiebung des Maximums zu höheren Frequenzen für die v-Komponente und die w-Komponente des Windes. Ein 25 min-Abschnitt umfaßt das gesamte Energiespektrum des Vertikalwindes, während in der u- und v-Komponente noch längerperiodische Anteile enthalten sind.



**Abbildung 15**

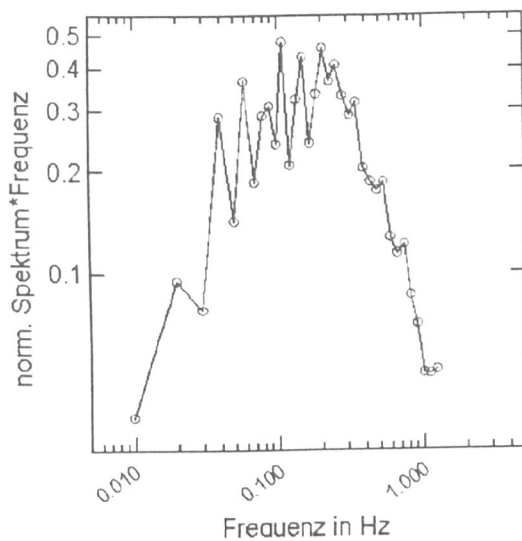
Energiespektrum der u-Komponente des Windes in 50m, 100m und 150m Höhe bei adiabatischer Schichtung

Abbildung 16



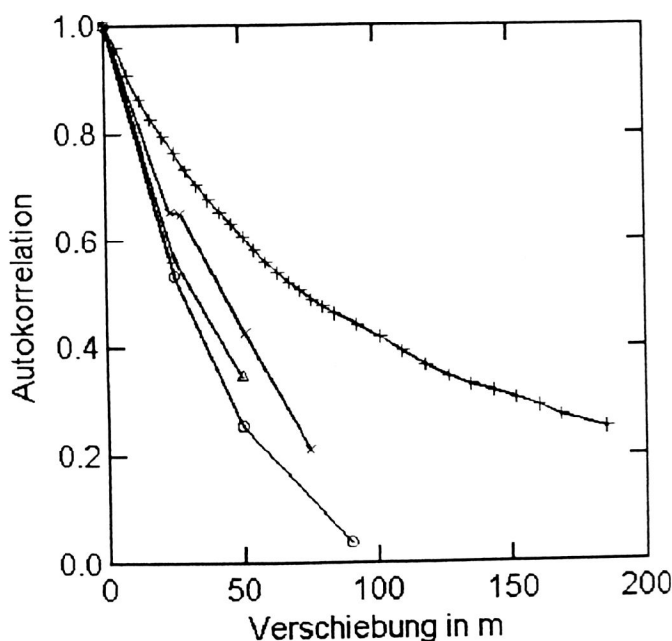
Energiespektrum der v-Komponente des Windes in 50m, 100m und 150 m Höhe bei adiabatischer Schichtung

Abbildung 17



Energiespektrum der w-Komponente des Windes in 125m Höhe bei adiabatischer Schichtung

Neben den Energiespektren sind Korrelationsfunktionen zur Strukturanalyse gebräuchlich. Die spezielle Meßfühleranordnung gestattet in diesem Fall nicht nur die Berechnung einer Autokorrelationsfunktion in longitudinaler Richtung (=x-Richtung) sondern auch die Bestimmung diskreter Werte in lateraler und



**Abbildung 18**

Dreidimensionale Autokorrelation für die u-Komponente in 100m Höhe, in longitudinaler Richtung: LONG, in lateraler Richtung: LAT, in vertikaler Richtung: UP und DOWN

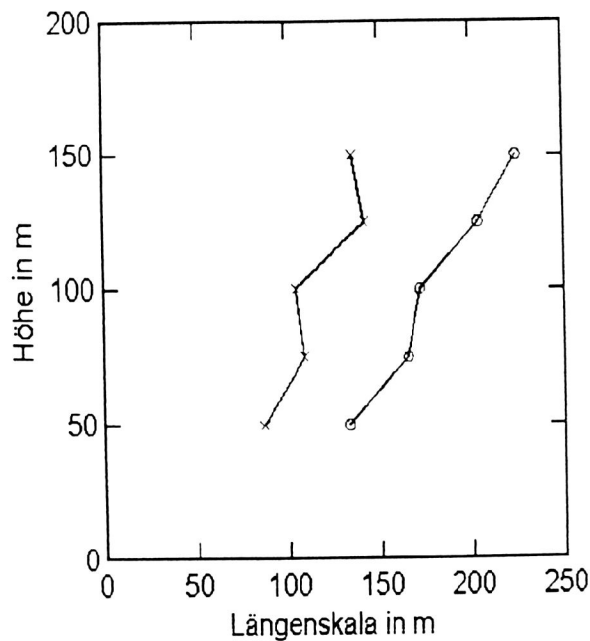
Höhe.

vertikaler Richtung.

Eine seitliche Korrelation kann nur exakt ausgewertet werden, wenn das Meßgitter senkrecht angeströmt wird. In den Fällen nichtsenkrechter Anströmung wird der Wert aus der Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Meßsignale für  $\Delta x = \Delta y \sin \alpha$  genommen, wobei  $\alpha$  der Winkel zwischen der Windrichtung und der Normalen zur Gitterebene ist.

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse für einen Datensatz für 100 m

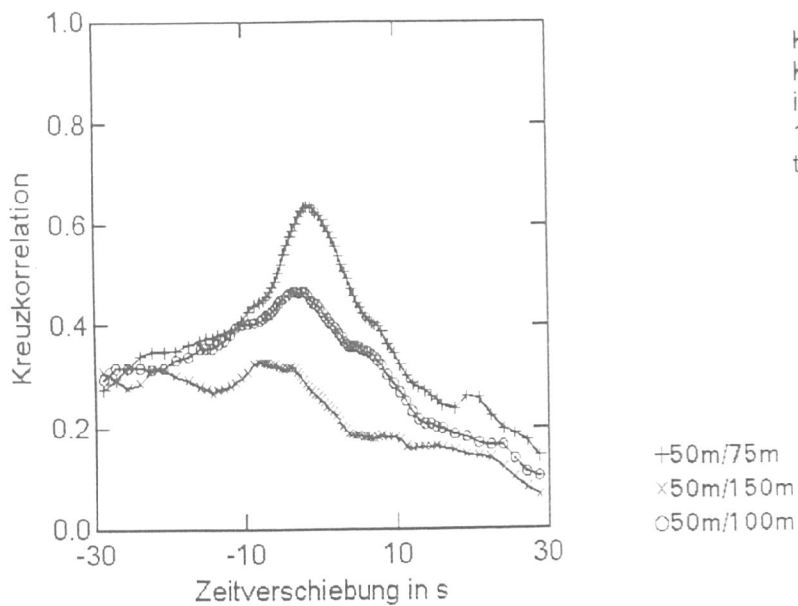
Die Autokorrelation fällt für laterale und vertikale Verschiebungen rascher ab als für longitudinale. Das bedeutet, daß die Strukturen in Strömungsrichtung eine größere Ausdehnung als in den anderen Raumrichtungen, d.h. über einen größeren Bereich korreliert sind. Ein Maß für die Größe der energieenthaltenden Wirbel ist die Makroskala, das ist das Längenmaß, das dem Integral über die Autokorrelation entspricht (Lumley und Panofsky, 1964). Nicht immer erreicht aber die Autokorrelation Werte von Null, etwa weil mesoskalige Effekte dies verhindern. In diesen Fällen hat es sich als praktikabel erwiesen, Längenskalen anzugeben, in denen die Korrelation auf  $1/e \approx 0.3$ , 0.4 oder auf 0.5 abgefallen ist. Die Auswertung von mehreren Zeitreihen (insgesamt 20 Zeitreihen von 25 min Dauer bei stabilen, adiabatischen und labilen Verhältnissen) ergibt folgendes Bild für die Meßhöhe 100m: im adiabatischen Fall entspricht die longitudinale Längenskala (Korrelation = 0.3) etwa dem Doppelten der Meßhöhe, laterale und vertikale Längenskalen sind geringer als die Meßhöhe, aber größer als die halbe Meßhöhe. Alle Längenskalen sind größer im Fall labiler Schichtung und kleiner im Fall stabiler Schichtung. Die Änderung der Längenskalen mit der Höhe kann sinnvoll nur für die longitudinale Skala bestimmt werden. Abbildung 19 zeigt das Vertikalprofil der 0.4-Skala und der 0.5-Skala. Die Längenskalen nehmen mit der Höhe zu, die Zunahme ist nicht proportional zur Höhenzunahme sondern geringer.



**Abbildung 19**

Vertikalprofil der longitudinalen Längenskala der u-Komponente für Korrelationen C von 0.4 und 0.5.

Die Kreuzkorrelationsfunktion zwischen zwei räumlich getrennt liegenden Meßpunkten zeigt, bei welchen Verschiebungen  $\Delta x$  die Korrelation maximal ist. Wählt man zwei seitlich versetzte Meßpunkte, so zeigt die Kreuzkorrelation im Fall senkrechter Anströmung ein Maximum bei der Verschiebung Null. Wählt man dagegen zwei vertikal versetzte Meßpunkte, so ist immer die Kreuzkorrelation maximal, wenn das Signal der oberen Meßstelle dem der unteren vorausläuft. Das ist ein Hinweis darauf, daß korrelierte Gebilde (=Wirbel) vorwärts geneigt sind. Abbildung 20 zeigt ein Beispiel einer Kreuzkorrelationsfunktion zwischen den u-Komponenten in 50m und 75m, 50m und 100m und 50m und 150m Höhe.



**Abbildung 20**

Kreuzkorrelationsfunktion der u-Komponenten in 50m und 75m, in 50m und 100m, in 50m und 150m bei adiabatischer Schichtung

Man erkennt in der Abbildung deutlich die Verschiebung des Maximums der Korrelation zu größeren  $\Delta t$  im Falle eines größeren vertikalen Abstandes zwischen den Meßstellen. Mit Hilfe der mittleren Windgeschwindigkeit kann die Zeitverschiebung des Maximums in eine Ortsverschiebung  $\Delta x$  umgewandelt werden, und aus dem Quotienten  $\Delta z / \Delta x$  kann ein Neigungswinkel bestimmt werden. Dieser Winkel ist positiv im Fall einer Vorwärtsneigung und wird gegen den horizontalen Untergrund gerechnet: kleine Winkel bedeuten flache Wirbel, große Winkel bedeuten steile Wirbel,  $90^\circ$  würde senkrecht stehende Wirbel bedeuten.

Diese Winkelgröße - bestimmt aus der Kreuzkorrelationsfunktion - ist eine gut zu bestimmende Größe, die Streuung ist nicht so groß wie bei der Längenskala. Daher kann der Neigungswinkel für die verschiedenen Schichtungen und für die u-Komponente und die v-Komponente angegeben werden. Die Abbildungen 21 und 22 zeigen dies.

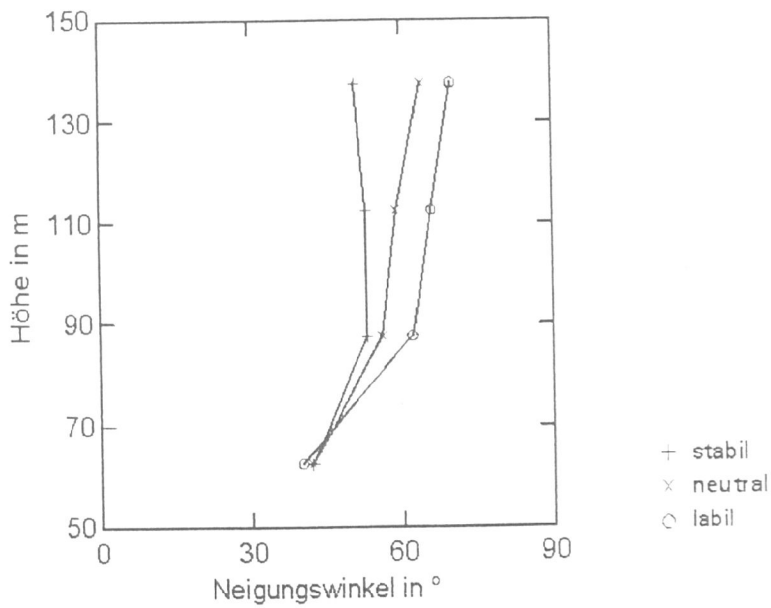


Abbildung 21

Winkel der Vorwärtsneigung der großen Wirbel der u-Komponente für verschiedene Schichtungen

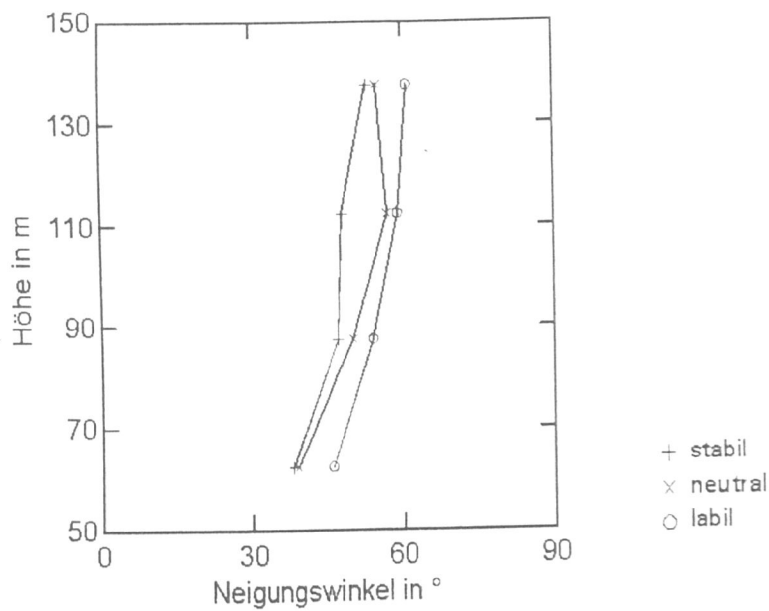


Abbildung 22

Winkel der Vorwärtsneigung der großen Wirbel der v-Komponente für verschiedene Schichtungen

Die Neigungswinkel der u- und der v-Komponente nehmen mit zunehmender Höhe zu. Die Strukturen,

die die Varianz der lateralen Windkomponente enthalten, sind weniger steil als die, in denen die Varianz der longitudinalen Windkomponente enthalten ist. Bei labiler Schichtung beobachtet man steilere Wirbel als bei stabiler Schichtung. Es treten auch Fälle auf, in denen bei labiler Schichtung die Wirbel oberhalb von 100 m Höhe nahezu senkrecht stehen.

Für Betreiber und Konstrukteure von Windenergieanlagen sind solche Ergebnisse von großer Bedeutung, da eine Neigung der Wirbel eine zusätzliche Belastung der Anlage darstellt. Die Ergebnisse aus den Abbildungen 21 und 22 zeigen aber auch, daß der Winkel der Vorwärtsneigung oberhalb von 100 m Höhe groß ist und daher die ungleichförmige Belastung nicht mehr so sehr ins Gewicht fällt.

Trifft ein Wirbel mit einer geneigten Front auf eine Windenergieanlage, so treten starke Windscherungen über der Rotorfläche auf. Eine Möglichkeit, diese Scherungen zu untersuchen und in einen Zusammenhang mit anderen Parametern wie mittlere Windgeschwindigkeit, Höhe und Ortsdifferenz zu stellen, ist die Bestimmung der Häufigkeitsverteilungen der Scherungen. Die turbulenten Windgrößen selbst sind normalverteilt, sie sind vollständig bestimmt durch die Standardabweichung, da die Mittelwerte  $u'$ ,  $v'$  und  $w'$  im Mittelungszeitraum Null sind, die Schiefe ist Null, die Kurtosis in ihrer Definition nach Taubenheim (1969) ist ebenfalls Null. Berechnet man nun Häufigkeitsverteilungen von Winddifferenzen, so kann man erwarten, daß die Winddifferenzen von weit auseinanderliegenden - d.h. von unkorrelierten - Meßpunkten ebenfalls einer Normalverteilung folgen. Die Häufigkeitsverteilung der Winddifferenzen nahe beieinander liegender - d.h. hoch korrelierter - Meßpunkte sollten mehr geringe Scherungen enthalten als die Normalverteilung angibt, da beide Meßpunkte innerhalb desselben Wirbelkörpers liegen. Entsprechend sollten große Winddifferenzen seltener vorkommen. In Momenten ausgedrückt, würde das bedeuten, daß das vierte Moment, die Kurtosis größer als Null sein sollte. Für die GROWIAN-Winddaten können diese Häufigkeitsverteilungen für Winddifferenzen zwischen vertikal versetzten Meßpunkten und zwischen horizontal versetzten Meßpunkten bestimmt werden. In der Vertikalen hat man Meßpunktabstände von 25m, 50m, 75m und 100m vorliegen, in der Lateralen Abstände von 24m, 28m, 52m und 76m. Nachfolgend werden Ergebnisse für die longitudinale Windkomponente gezeigt.

Die Abbildungen 23 und 24 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Winddifferenzen von seitlich versetzten Meßpunkten. Die Abbildungen 25 und 26 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Winddifferenzen von vertikal versetzten Meßpunkten. Es sind jeweils auch die Häufigkeitsverteilungen der Windkomponenten selbst mit eingetragen, die in erster Näherung eine Normalverteilung darstellen.

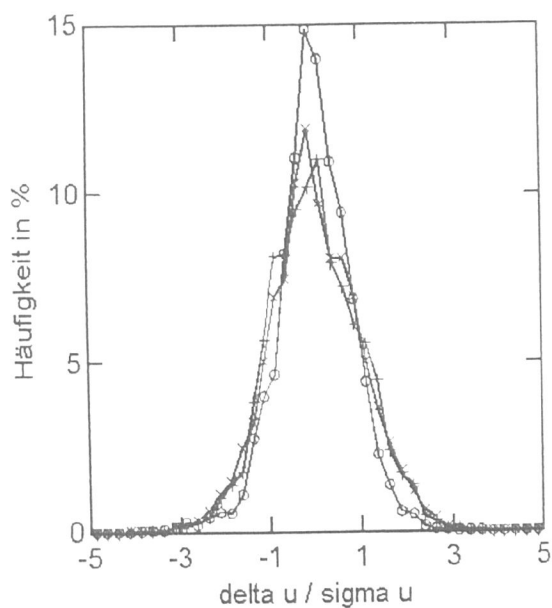


Abbildung 23

Häufigkeitsverteilung der longitudinalen Windkomponenten  $u_1$  und  $u_2$  an zwei Meßpunkten mit einem lateralen Abstand von 24m und deren Differenz  $\Delta U$

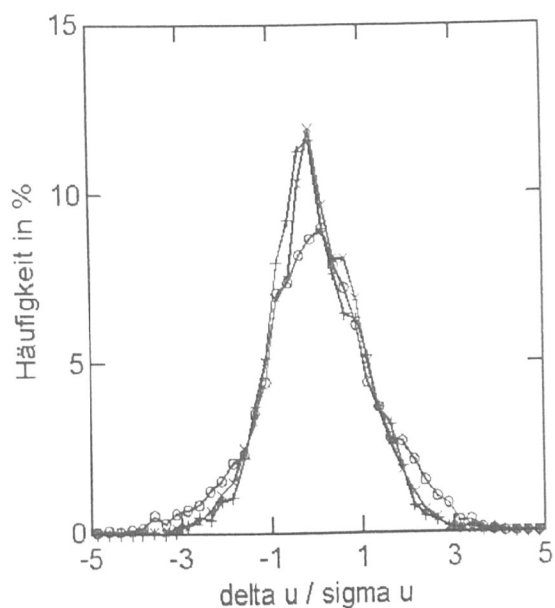


Abbildung 24

Häufigkeitsverteilung der longitudinalen Windkomponenten  $u_1$  und  $u_2$  an zwei Meßpunkten mit einem lateralen Abstand von 76m und deren Differenz  $\Delta U$

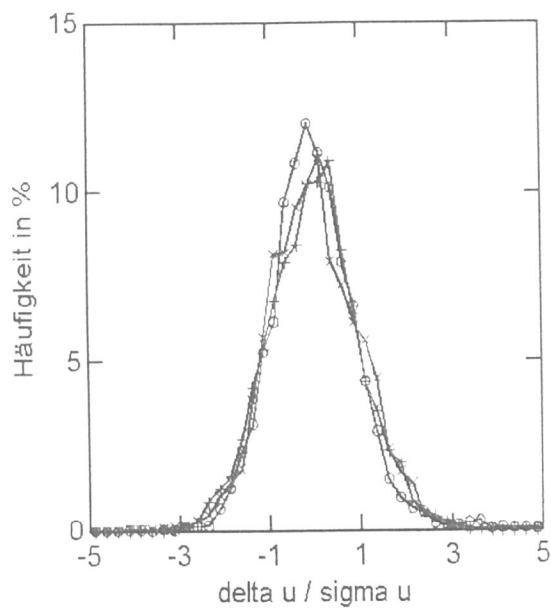


Abbildung 25

Häufigkeitsverteilung der longitudinalen Windkomponenten an einem Mast in 125m Höhe ( $u_{125}$ ) und in 100m Höhe ( $u_{100}$ ) und deren Differenz (DELTA\_U). Die mittlere Windscherung ist abgezogen.

+ U125  
× U100  
○ DELTA\_U

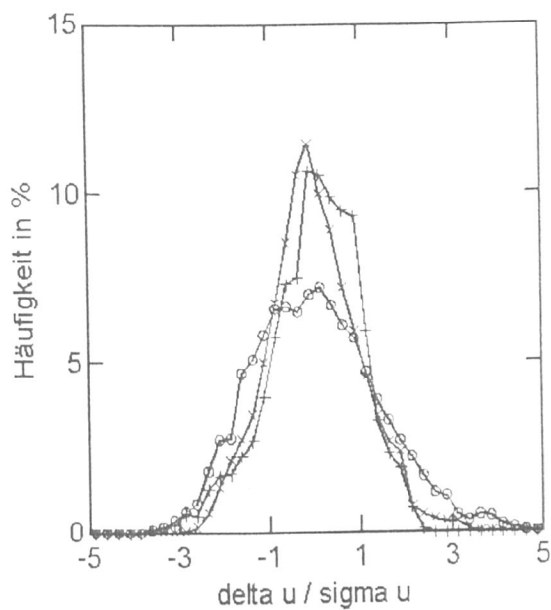


Abbildung 26

Häufigkeitsverteilung der longitudinalen Windkomponenten an einem Mast in 150m Höhe ( $u_{150}$ ) und in 50m Höhe ( $u_{50}$ ) und deren Differenz (DELTA\_U). Die mittlere Windscherung ist abgezogen.

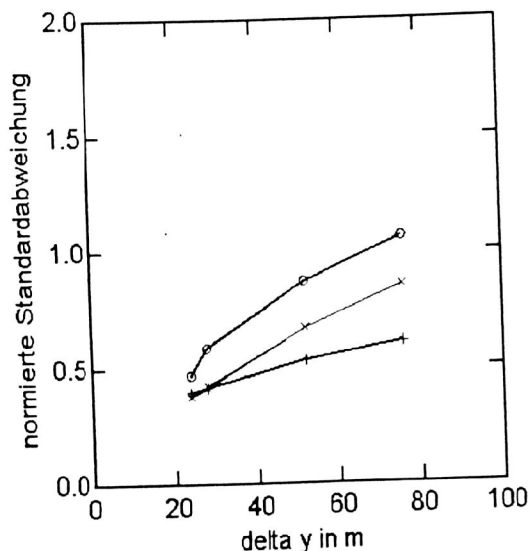
+ U50  
× U150  
○ DELTA\_U

Man erkennt deutlich, daß bei den Winddifferenzen dicht nebeneinanderliegender Meßpunkte (Abb. 23 für  $\Delta y=24\text{m}$ ) häufiger kleine Werte vorkommen und seltener große Werte als bei der Normalverteilung. Dagegen kommen für  $\Delta y=76\text{m}$  kleine Differenzen seltener vor und große Differenzen häufiger als bei der Normalverteilung (Abb. 24). Entsprechend sollte die Standardabweichung der Winddifferenzen für kleine  $\Delta y$  kleiner sein als die der Windkomponenten  $u'$ , und für große  $\Delta y$  sollte sie größer sein. Ähnlich sieht es bei den Winddifferenzen vertikal versetzter Meßpunkte aus. Die Abbildungen 25 und 26 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Winddifferenzen mit dem kleinsten Abstand  $\Delta z=25\text{m}$  und mit den größten Abstand  $\Delta z=100\text{m}$ . Die Häufigkeitsverteilung für  $\Delta z=25\text{m}$  ist noch geringfügig steilgipfliger als die Normalverteilung, für  $\Delta z=100\text{m}$  ist die Verteilung bereits wesentlich flachgipfliger, das bedeutet, daß große Winddifferenzen häufiger vorkommen.

Man kann nun aus den Häufigkeitsverteilungen als Parameter die Momente bestimmen und diese in Beziehung zur Meßhöhe, zum Meßfühlerabstand und zur thermischen Schichtung setzen. Dies ist für etwa 20 Datensätze getan worden.

Die ersten Momente - das sind die Mittelwerte - sind Null, da bei lateral versetzten Meßfühlern dieselbe mittlere Windgeschwindigkeit auftritt, die dritten Momente sind bei allen Häufigkeitsverteilungen nahezu Null. Somit reduziert sich die Fragestellung auf das zweite Moment, das ist die Standardabweichung, und auf das vierte Moment, die Kurtosis.

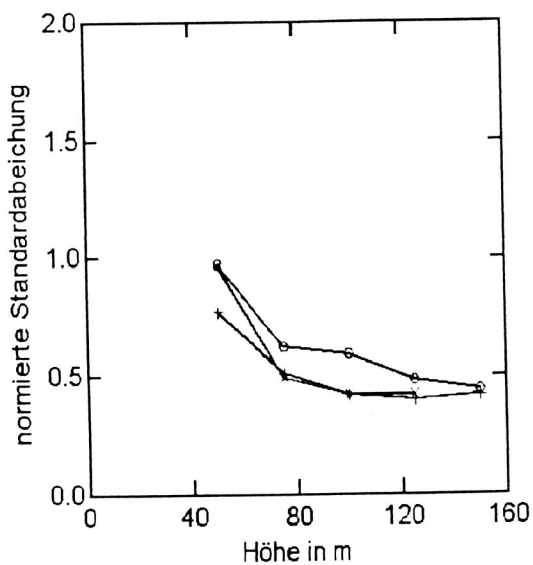
Die Standardabweichungen der Winddifferenz sind in den Abbildungen 27 und 29 gegen die Meßfühlerabstände aufgetragen und in den Abbildungen 28 und 30 gegen die Höhe.



**Abbildung 27**

Standardabweichung der Winddifferenz lateral versetzter Meßpunkte, normiert mit der Standardabweichung der Einzelkomponenten, aufgetragen gegen den lateralen Abstand für verschiedene Schichtungen, gültig für 100m Höhe

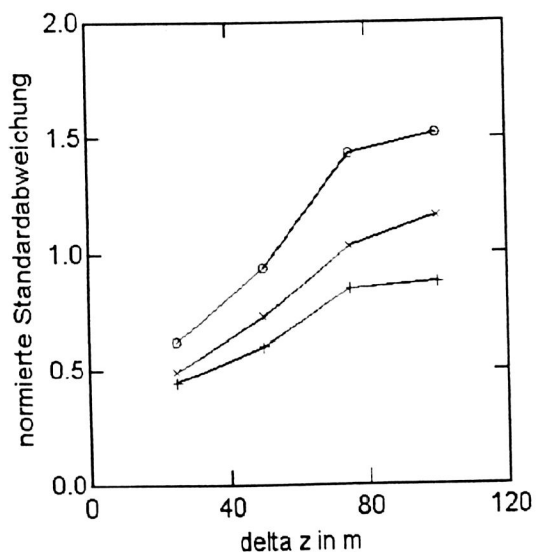
+ Stabil  
x Neutral  
o Labil



**Abbildung 28**

Standardabweichung der Winddifferenz über  $\Delta y = 24\text{m}$ , normiert mit der Standardabweichung der Einzelkomponenten, aufgetragen gegen die Meßhöhe für unterschiedliche Schichtung

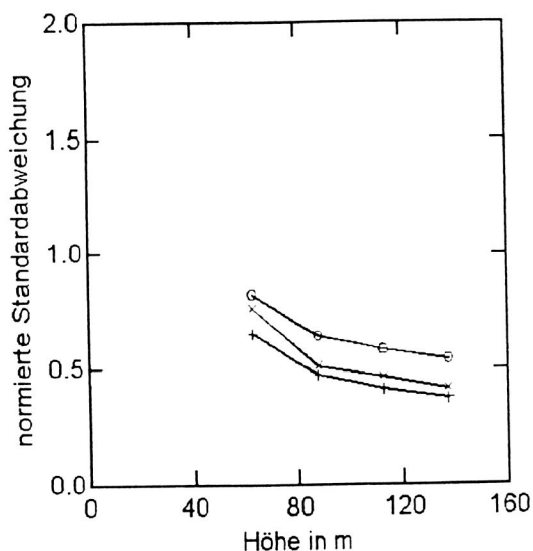
+ Stabil  
x Neutral  
o Labil



**Abbildung 29**

Standardabweichung der Winddifferenz vertikal versetzter Meßpunkte, normiert mit der Standardabweichung der Einzelkomponenten, aufgetragen gegen den vertikalen Abstand, für verschiedene Schichtungen, gültig für 100m Höhe

+ Stabil  
x Neutral  
o Labil



**Abbildung 30**

Standardabweichung der Winddifferenz über  $\Delta z=25\text{m}$ , normiert mit der Standardabweichung der Einzelkomponenten, aufgetragen gegen die Meßhöhe für verschiedene Schichtungen

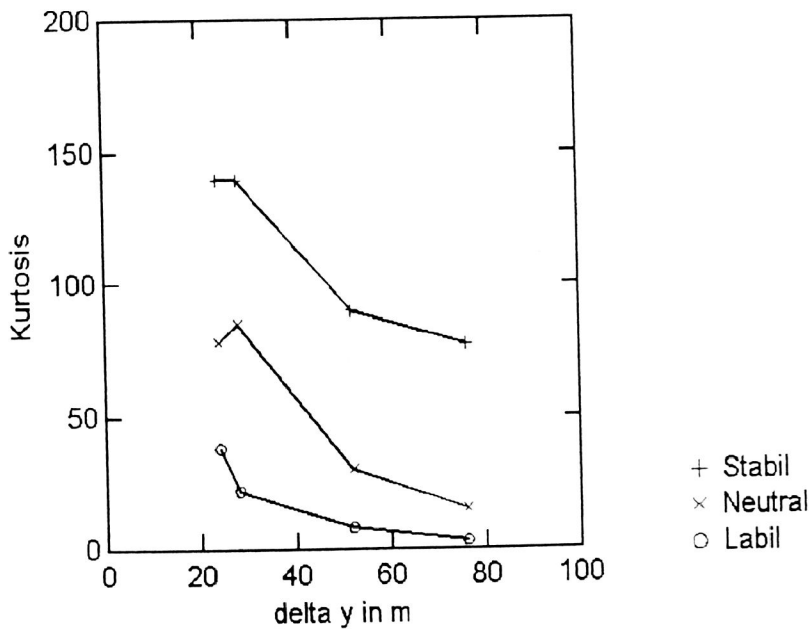
Die Abbildungen zeigen deutlich, daß mit zunehmendem Abstand zwischen den Meßpunkten die Standardabweichung der Winddifferenz zunimmt. Für laterale Abstände ist sie meist kleiner als die Standardabweichung der Windkomponente selbst, für vertikale Abstände wird sie auch größer als die Standardabweichung der Windkomponente. Mit zunehmender Labilisierung steigt das zweite Moment der Winddifferenz an und erreicht für vertikale Abstände von mehr als 75m etwa das 1.5fache des zweiten Momentes der u-Komponente. Die zunehmende Standardabweichung der Winddifferenz mit zunehmendem Meßfühlerabstand ist ein Indiz dafür, daß die hochkorrelierten Strukturen ein begrenztes Ausmaß haben. Zwei Meßfühler, die in 100m Meßhöhe einen seitlichen Abstand von 76m haben, liegen nicht mehr innerhalb desselben Wirbels, daher sind die Winddifferenzen relativ groß und bedingen eine große Standardabweichung. In der Vertikalen liegen zwei um 75m versetzte Meßfühler wegen der Vorwärtseigung der Wirbel bereits nicht mehr innerhalb desselben Wirbels, die Winddifferenzen nehmen große Werte an.

Mit zunehmender Meßhöhe nimmt die normierte Standardabweichung der Winddifferenz mit gleichem Meßfühlerabstand ab. Das ist ebenfalls ein Indiz für die Zunahme der Wirbelgröße mit der Höhe. Ein Beispiel soll das verdeutlichen: während in 50m Meßhöhe bei adiabatischer Schichtung die Winddifferenz zweier seitlich um 28m versetzter Meßpunkte etwa die Standardabweichung der Windkomponente selbst hat - also zwischen diesen Punkten schon kaum noch eine Korrelation besteht - hat die Winddifferenz über dieselbe Distanz oberhalb von 100m Höhe eine viel geringere Standardabweichung - die Punkte liegen fast immer innerhalb desselben hochkorrelierten Wirbelkörpers.

Noch deutlicher als die Standardabweichung der Winddifferenz zeigt das vierte Moment, die Kurtosis, die ein Maß für die Steilheit der Verteilung ist, daß mit zunehmendem Meßfühlerabstand die Korrelation - und damit die Neigung zu kleinen Winddifferenzen - abnimmt.

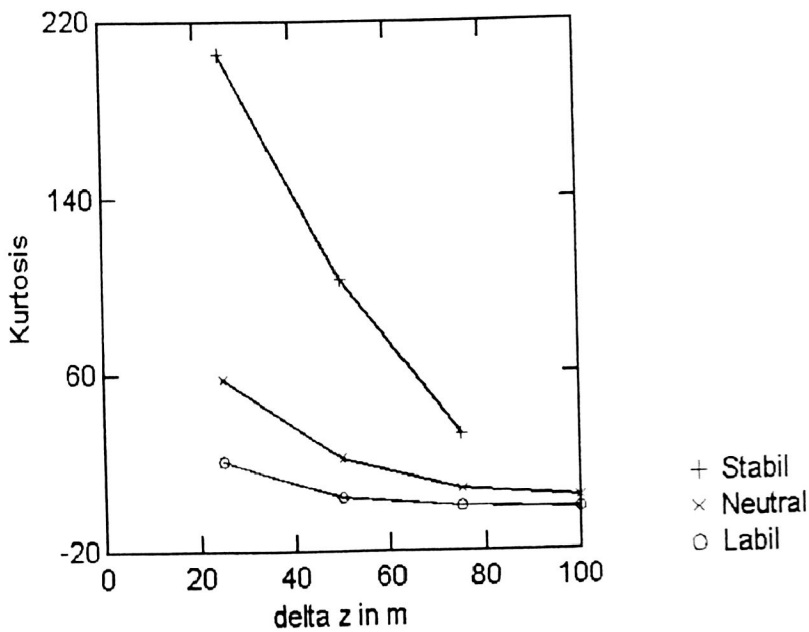
**Abbildung 31**

Kurtosis der Winddifferenz zwischen lateral versetzten Meßstellen in 100m Höhe für verschiedenen Schichtungen



**Abbildung 32**

Kurtosis der Winddifferenz zwischen vertikal versetzten Meßstellen für verschiedene Schichtungen, die mittlere Winddifferenz ist abgezogen



Die Abbildungen 31 und 32, die die Kurtosis der lateralen und der vertikalen Winddifferenz zeigen, daß sich für große Meßfühlerabstände die Kurtosis dem Wert der Normalverteilung annähert. Lediglich in stabiler Schichtung bleiben die Verteilungen der Winddifferenzen steilgipflig mit großer Kurtosis.

Die statistische Analyse von etwa 20 Zeitreihen bei unterschiedlichen thermischen Schichtungen liefert Längenskalen in allen drei Raumrichtungen für die Windkomponenten. Demnach sind die energieenthaltenden Wirbel in Strömungsrichtung stark gestreckt mit Skalen, die etwa der doppelten Meßhöhe entsprechen. Im lateraler und vertikaler Richtung sind die Ausmaße der Wirbel geringer als die Meßhöhe, und somit besteht für Windenergieanlagen die Gefahr einer starken Beanspruchung dadurch, daß der Rotor nur partiell von Wirbeln getroffen wird. Eine Analyse der Winddifferenzen in der Rotorebene über verschiedene laterale und vertikale Versetzungen zeigt, daß ab einem bestimmten Meßfühlerabstand die Winddifferenzen sich ähnlich verhalten wie die Windkomponenten selbst. Dann sind die Winddifferenzen etwa normalverteilt mit einer Standardabweichung die der der Windkomponente entspricht. Für kleinere Meßfühlerabstände ist die Chance größer, daß beide Meßfühler innerhalb desselben Wirbelkörpers liegen; die Winddifferenzen sind meist klein, was sich in geringeren Standardabweichungen und großen Kurtosiswerten äußert.

Solche Diagramme wie in den Abbildungen 27 bis 32, die die zweiten und vierten Momente der lateralen und vertikalen Winddifferenzen in Abhängigkeit von der Höhe, der seitlichen oder vertikalen Versetzung und der thermischen Schichtung zeigen, können zur Abschätzung der an einer geplanten Windenergieanlage zu erwartenden Scherung dienen.

#### 2.5.2.2 Analyse spezieller Ereignisse

Es stellt sich die Frage, ob die Maximalböen, die eine Windenergieanlage belasten, die gleiche Struktur haben wie die mittleren energieenthaltenden Wirbel, die im vorgegangenen Abschnitt analysiert wurden. Spezielle Ereignisse, die seltener auftreten, können u.U. nicht durch Längenskalen oder Neigungswinkel, die aus einer längeren Zeitreihe gewonnen wurden, beschrieben werden. Zu diesem Zweck haben z.B. Tetzlaff u.a. (1992) aus Meßreihen bestimmte Böenereignisse, die durch einen Schwellwert in der Beschleunigung bestimmt wurden, jeweils in Kurzzeitreihen von 20 s Dauer selektiert. Diese Ereignisse wurden dann gesondert analysiert.

Ein ähnliches Verfahren wird hier angewendet. Aus 10 min-Abschnitten der Zeitreihen werden jeweils die fünf stärksten Ereignisse bestimmt und Kurzzeitreihen von  $\pm 20$  s um das Maximum herum gespeichert. Die 40 s-Abschnitte dürfen sich nicht überschneiden, da sonst keine neue Information gewonnen wird. Diese Zeitreihen werden dann derselben statistischen Analyse unterzogen wie die gesamte Zeitreihe und Längenskalen und Neigungswinkel bestimmt.

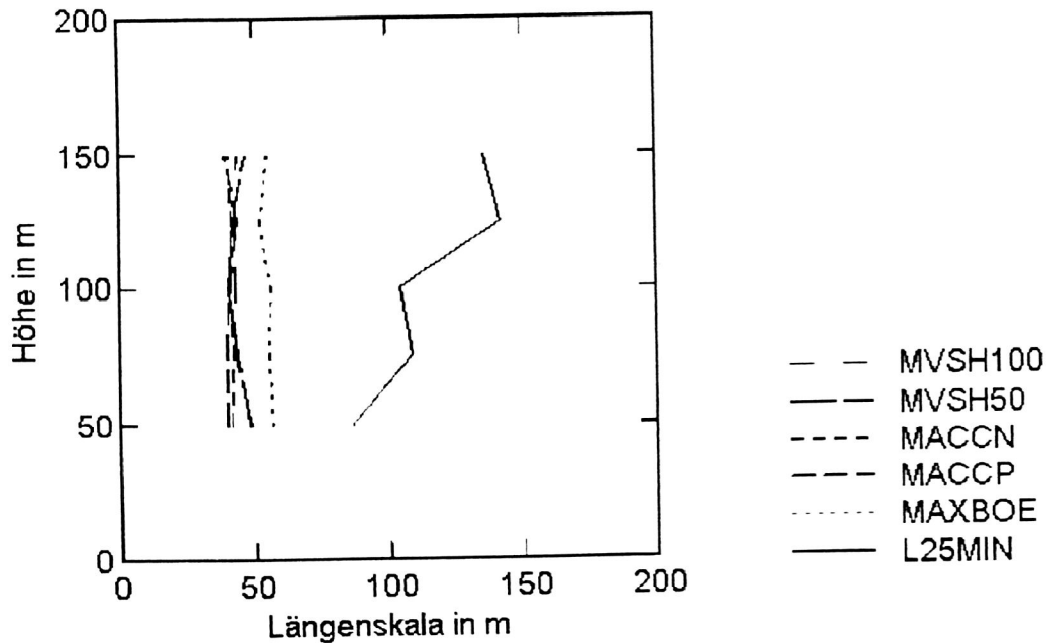
Es werden unterschiedliche Ereignisse ausgewählt und analysiert:

- maximale Böen, bestimmt durch die Windgeschwindigkeit,

- maximale vertikale Scherungen, bestimmt durch die Differenz der longitudinalen Windkomponente,
- maximale positive Beschleunigungen, bestimmt durch die Differenz von einem Wert zum anderen,
- maximale negative Beschleunigungen.

Die Maximalböen werden durch den momentanen Windgeschwindigkeitswert bestimmt. Dagegen hat es sich bei den Scherungs- und Beschleunigungsereignisse als sinnvoll erwiesen, die Differenzen nicht von den Momentanwerten, sondern von Mittelwerten aus fünf Einzelwerten zu bilden. Eine solche Mittelung über 2 s ( oder ca. 20 m) findet eher typische Strukturen als zufällige, kleinräumige Ereignisse, die von der hier nicht relevanten Mikroturbulenz erzeugt werden. Vertikale Scherungen werden um 100 m Meßhöhe herum ausgewertet, und zwar über eine Höhendifferenz von 50 m, d.h. aus den Meßstellen 125 m und 75 m, und über eine Höhendifferenz von 100 m, d.h. aus den Meßstellen 150 m und 50 m. Es werden ebenfalls 20 Zeitreihen von 25 min Dauer verwendet, also 40 10-minütige Zeitreihen, aus denen jeweils fünf Kurzzeitreihen genommen werden, so daß ein Kollektiv von 200 Ereignissen zur Analyse verwendet wird.

Die Ergebnisse streuen naturgemäß sehr stark. Daher werden hier nur Mittelwerte aus allen Ergebnissen gezeigt. Die Abbildung 33 zeigt die longitudinalen Längenskalen, die aus der Autokorrelationsfunktion für die Kurzzeitreihen bestimmt wurden. Es wird hier die 0.5-Skala gewählt. Zum Vergleich ist das Vertikalprofil der Längenskala für die gesamte Zeitreihe mit eingezeichnet.



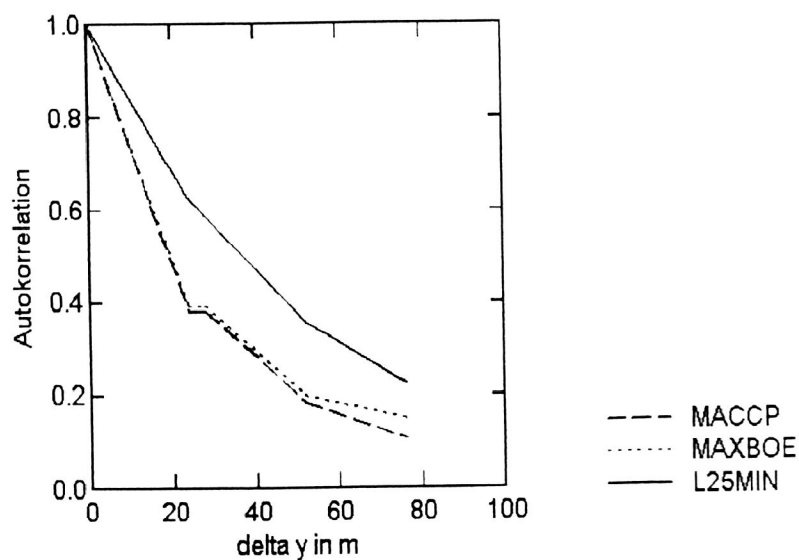
**Abbildung 33**

Längenskalen aus der Autokorrelationsfunktion für 20 Zeitreihen (L25MIN) sowie für 200 Kurzzeitreihen (40s) um bestimmte maximale Ereignisse: maximale Geschwindigkeit (MAXBOE), maximale positive Beschleunigung (MACCP), maximale negative Beschleunigung (MACCN), maximale vertikale Scherung über 50m (MVSH50) und über 100m (MVSH100)

Man erkennt deutlich, daß die Längenskalen, die für besondere Ereignisse bestimmt wurden, kleiner sind als die, die im Mittel für die gesamte Zeitreihe gelten. Die Autokorrelation fällt also hier wesentlich schneller ab. Die Längenskala liegt für Böenereignisse etwa bei 55 m, für Scherungs- und Beschleunigungsereignisse bei 40 m. Es wird keine Zunahme mit der Höhe beobachtet.

Die besondere Anordnung der Meßfühler gestattet auch die Berechnung lateraler Längenskalen aus der Autokorrelation in seitlicher Richtung in Fällen einer Anströmung senkrecht zum Meßgitter. Abbildung 34 zeigt die laterale Autokorrelation. Für 100 m Höhe bestimmt sich die Längenskala, bei der die Korrelation auf 0.5 abgefallen ist, zu etwa 40 m für die gesamte Zeitreihe und zu etwa 20 m für maximale Böen oder Beschleunigungen.

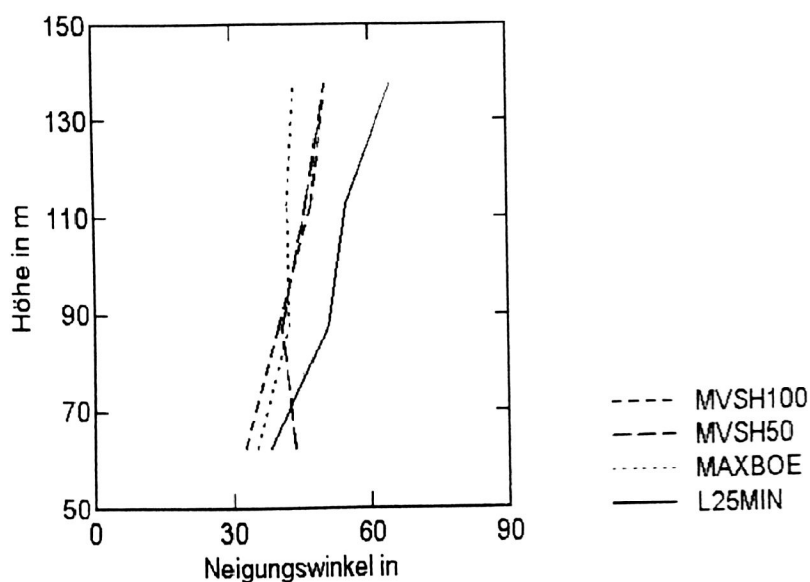
Auch die laterale Korrelation fällt für besondere Ereignisse stärker ab als für die gesamte Zeitreihe, wie die Abbildung 34 zeigt. Die entsprechenden Längenskalen liegen zwischen 20m (0.5-Skala) und 25m (0.4-Skala). Es gibt in diesem Korrelationsbereich keine nennenswerten Unterschiede zwischen Böenereignissen, Scherungsereignissen und Beschleunigungsereignissen.



**Abbildung 34**

Laterale Autokorrelation in 100m Höhe für 20 Zeitreihen (L25MIN) sowie für 200 Kurzzeitreihen (40s) um bestimmte maximale Ereignisse: maximale Geschwindigkeit (MAXBOE) und maximale positive Beschleunigung (MACCP)

Die Längenskalen zeigen, daß maximale Ereignisse geringere Ausmaße haben als die energieenthaltenden Wirbel, die aus der Korrelation der gesamten Zeitreihe bestimmt werden. Die aus der Kreuzkorrelation bestimmten Neigungswinkel dieser Strukturen unterscheiden sich ebenfalls von denen der gesamten Zeitreihe, wie Abbildung 35 zeigt.



**Abbildung 35**

Neigungswinkel aus der Kreuzkorrelationsfunktion vertikal versetzter Meßpunkte für 20 Zeitreihen (L25MIN) sowie für 200 Kurzzeitreihen (40s) um bestimmte Ereignisse: maximale Geschwindigkeit (MAXBOE), maximale vertikale Scherung über 50m (MVSH50) und über 100m (MVSH100)

Für Böenereignisse ist der Neigungswinkel etwa  $40^\circ$  und zeigt keine Höhenabhängigkeit. Für Scherungsereignisse nimmt er geringfügig von  $35^\circ$  bis  $50^\circ$  mit der Höhe zu.

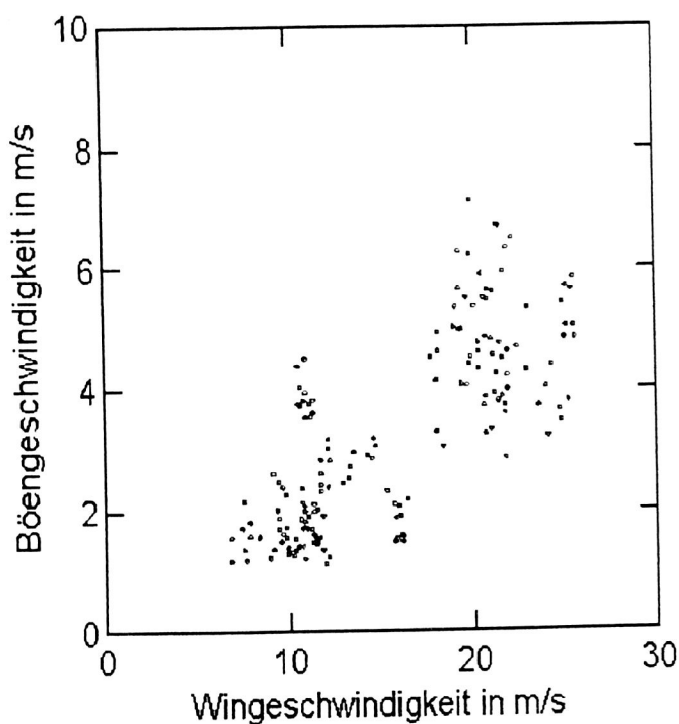
Die Abbildungen 33 bis 35 zeigen, daß sich die Strukturen bestimmter maximale Ereignisse deutlich von mittleren großen Strukturen unterscheiden. Dabei ist es nahezu gleich, wie die Strukturen definiert werden, ob durch Böenereignisse, Scherungsereignisse oder Beschleunigungsereignisse. Dies unterstützt die Annahme, daß ein extremes Ereignis immer mit großer Geschwindigkeit, starker Beschleunigung und Scherung verbunden ist.

### 2.5.3 Windverhältnisse in Richtlinien

Die Anforderungen aus der Praxis verlangen einfache Modelle der Windverhältnisse, nach denen etwa die Konstrukteure und Betreiber von Windenergieanlagen sich richten können und nach denen Anlagen zertifiziert werden. Dabei wird unterschieden zwischen 'normalen' Windverhältnissen, die eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von einmal pro Jahr haben und 'extremen' Ereignissen mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von einmal in 50 Jahren. In Richtlinien werden Modelle für das mittlere Windprofil, die Standardabweichung des Windes, die extreme mittlere Windgeschwindigkeit, die Amplitude und Form der Extreimbö, der extremen Richtungsänderung und der extremen Windscherung aufgestellt.

Die Überarbeitung der internationalen Richtlinie 'Wind Turbine Generator Systems - Part 1: Safety requirements' (IEC, 1994), insbesondere des Abschnitts 3 'External conditions' bot die Gelegenheit, die vorhandenen Meßdaten zur Überprüfung der Änderungsvorschläge der Kommission TC88 heranzuziehen. Vor allem die Datensätze bei hohen Windgeschwindigkeiten und die Möglichkeit, auch laterale Scherungen auszuwerten waren für die Kommission nützlich und gingen in die Änderungsvorschläge ein, wie die Dokumentation der IEC (Butterfield et al., 1996) zeigt.

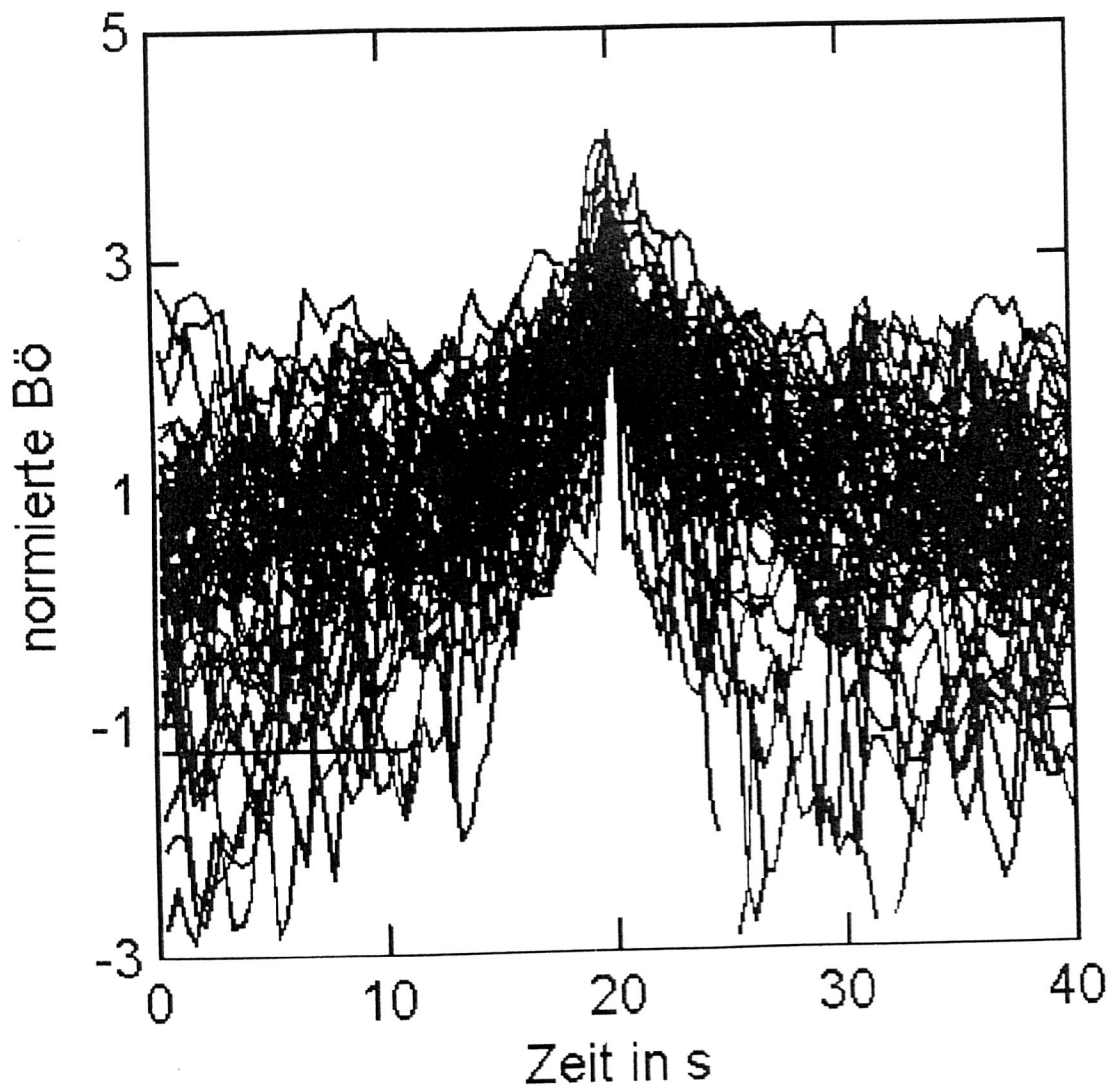
Abbildung 36 zeigt als Beispiel die maximale Böengeschwindigkeit, aufgetragen gegen die mittlere Windgeschwindigkeit im 10 min-Abschnitt für 100 m Höhe.



**Abbildung 36**

Maximale Böengeschwindigkeit im Zeitabschnitt von 10 min, aufgetragen gegen die mittlere Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe

In der IEC-Richtlinie von 1994 ist für den zeitlichen Verlauf der Extreimbö eine  $(1-\cos)$ -Kurve mit einer Anstiegszeit von 12 s angegeben. In dem Änderungsvorschlag wird eine weitere Schwingung überlagert, die bewirkt, daß die Windgeschwindigkeit zunächst unter das mittlere Windniveau abfällt, dann auf ein Maximum ansteigt und danach wieder unter das mittlere Niveau abfällt. Diese neue Form wird vom zeitlichen Verlauf der in 2.5.2 ausgewerteten maximalen Böen bestätigt. Abbildung 37 zeigt den Zeitverlauf von ca. 50 Böen um das Windmaximum herum.

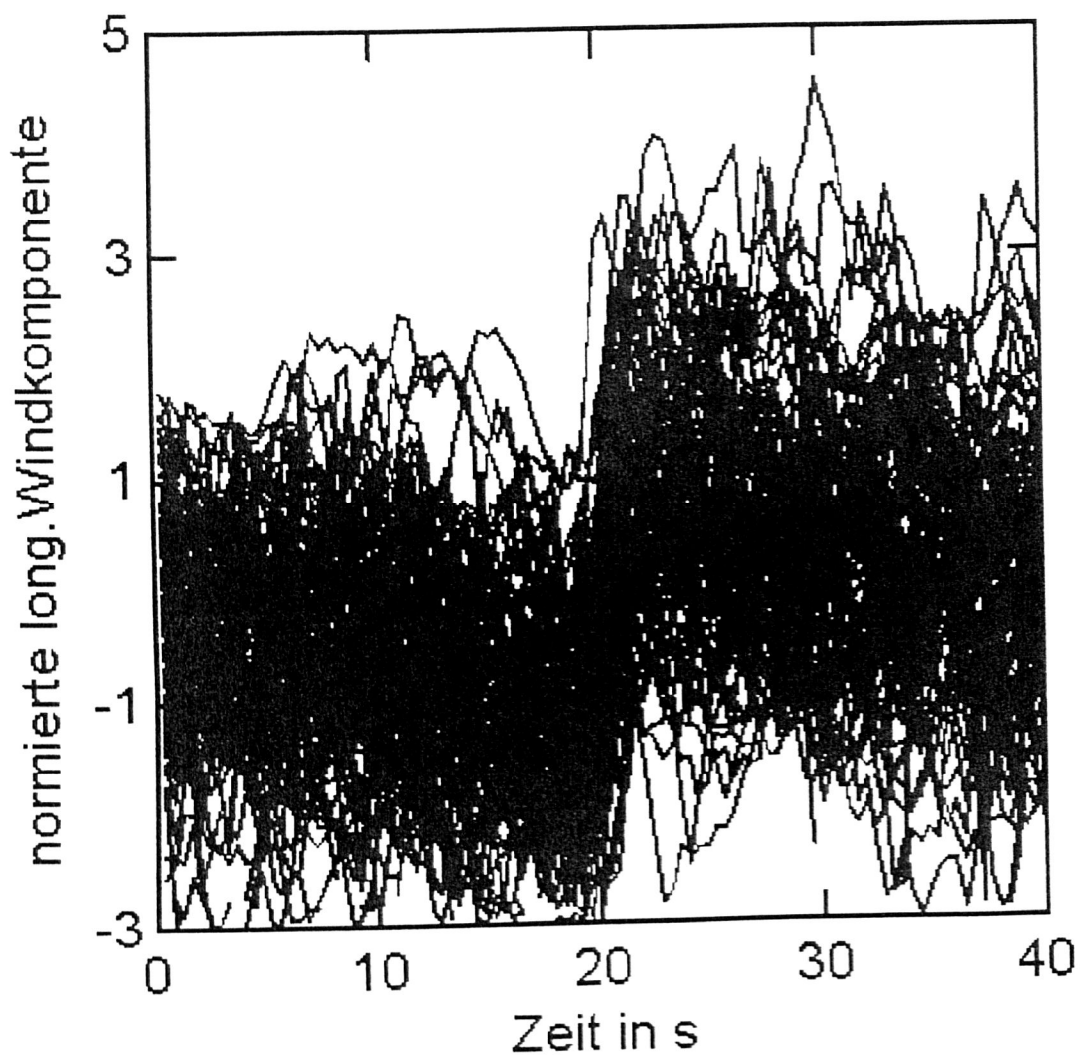


**Abbildung 37**

Zeitverlauf von 50 Maximalböen um das Maximum der Windgeschwindigkeit herum  
(=20s), normiert mit der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit

Obwohl die Streuung sehr groß ist, kann man doch eine gewisse Struktur erkennen, die die neue Richtlinienformel bestätigt.

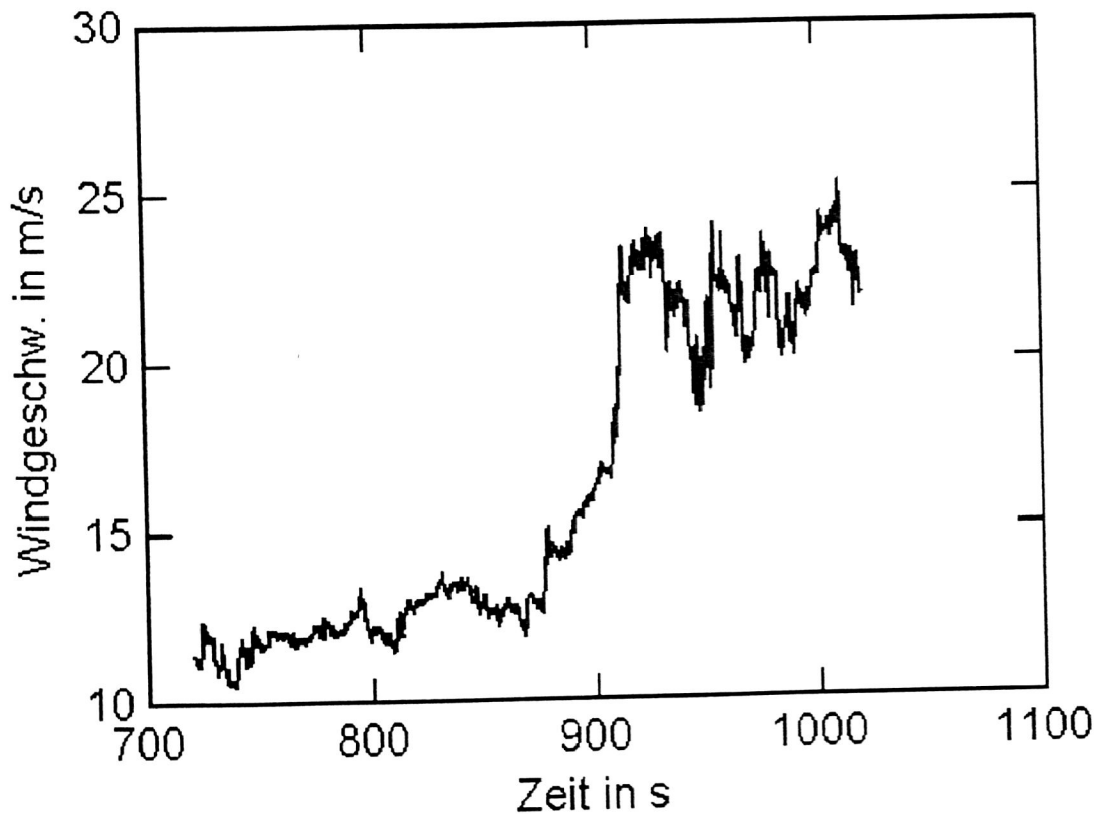
Auch für die 'kohärente Bö', d.h. für einen Anstieg der Windgeschwindigkeit von einem Niveau zum anderen, wird in der Richtlinie ein Modell mit einer Anstiegszeit von 10s angegeben. Trägt man die positiven Beschleunigungsereignisse auf, so kann man in etwa diese Struktur bestätigt finden (Abbildung 38).



**Abbildung 38**

Zeitverlauf von 100 Ereignissen mit maximaler positiver Beschleunigung, aufgetragen ist die longitudinale Windgeschwindigkeitsabweichung, normiert mit der Standardabweichung

Aus allen Datensätzen läßt sich auch die maximale kohärente Bö heraussuchen und darstellen (Abbildung 39).



**Abbildung 39**

Verlauf der größten kohärenten Bö im GROWIAN Datensatz

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, daß die turbulenten Winddaten, die während der GROWIAN-Meßkampagne gewonnen wurden, hervorragend geeignet sind, Windmodelle für Richtlinien zu überprüfen.

### 3      **Aufbereitung weiterer spezieller Winddaten**

#### 3.1      **Daten des 80m-Mastes auf Helgoland**

##### 3.1.1      Standort und Meßsystem

Von Mitte Juni 1989 bis Anfang April 1992 wurden auf der Insel Helgoland an einem 80m hohen Gittermast in verschiedenen Höhen Wind und Temperatur gemessen. Die Messungen wurden vom Deutschen Wetterdienst, Seewetteramt (heute: Geschäftsfeld Seeschifffahrt) durchgeführt im Rahmen des Projektes 'Ein begleitendes Windmeßprogramm auf der Insel Helgoland für die dort zu errichtende Windkraftanlage'. Vor und nach der Errichtung der 1.2 MW-Anlage WKA-60 mit 50m Nabenhöhe und 60m Rotordurchmesser sollten die Windverhältnisse im Bereich des Südhafens erfaßt werden zur Ermittlung der ungestörten Anströmung von See und der Störung durch den Inselkörper. Das Meßkonzept, die Aufbereitung der Daten und die Meßergebnisse sind in dem Abschlußbericht des o.g. Projektes (Schmidt et al., 1993) ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden nur die zur Beschreibung des Datensatzes notwendigen Angaben gemacht.

Der Standort des Mastes ist  $54^{\circ} 10.5' N$ ,  $06^{\circ} 53.5' E$ , die Höhe über NN beträgt 5m. Die WKA-60 - errichtet im Jahr 1990 - liegt 200m südöstlich des Mastes, der etwa 50m hohe Inselfelsen beginnt 700m nordwestlich des Mastes. Der 80m-Mast ist ein Dreiecksmast mit ca. 1.5m Seitenlänge, in den Meßniveaus 10m, 20m, 30m, 40m, 50m, 60m, 70m und 78m waren an drei 1.5m langen Auslegern in Richtung S, WNW und NE Schalensternanemometer der Fa. Friedrichs angebracht, am WNW-Ausleger je eine Windfahne und an den SE-Auslegern in 10, 30, 50 und 78m Höhe je ein Thermometer (Pt100, System Frankenberger).

Die Daten wurden mit einer zeitlichen Auflösung von 2s erfaßt und zu 1 min-Mittelwerten und Standardabweichungen verdichtet. Während spezieller Phasen wurden zusätzlich die 2s-Daten gespeichert.

##### 3.1.2      Datenaufbereitung

Die Meßdaten wurden im Rahmen des Projektes aufbereitet und ausgewertet. Die Auslegerlänge ist mit 1.5m nicht groß genug, um eine ungestörte Windmessung zu garantieren. So wurde mit einem numerischen Modell der Einfluß der Gitterkonstruktion auf das Windfeld in Abhängigkeit von der Anströmrichtung berechnet und damit aus den zwei jeweils luvseitigen Windmessungen der exakte Wind ermittelt. Das Verfahren ist in Schmidt et al. (1993) beschrieben. Für jede Anströmgeschwindigkeit und Anströmrichtung kann so eine Korrektur der gemessenen Daten erfolgen. Nach dieser Korrektur stellt der Datensatz eine sehr gute Wiedergabe der tatsächlichen Windverhältnisse an dem Ort dar.

Die 1 min-Daten werden zu Stundenwerten zusammengefaßt. Im Unterschied zu allen nachfolgend beschriebenen Datensätzen sind keine 10 min-Mittelwerte der Meßdaten gespeichert. Die Stundendaten werden jahresweise für 1989, 1990, 1991 und 1992 gespeichert. Da die Messungen erst im Juni 1989 beginnen und bereits im Februar 1992 enden, sind die Jahresdateien 1989 und 1992 unvollständig und daher nicht repräsentativ. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die zusätzlich erfaßten Kampagnen mit 2s-Daten.

Datei	Beginn	Ende
HE10A	14.06.89 15.32.32 -	15.06.89 07.57.06
HE13A	18.07.89 14.43.02 -	18.07.89 17.33.48
HE18A	26.09.89 10.45.02 -	26.09.89 15.10.52
HE19A	07.10.89 10.30.02 -	08.10.89 10.56.20
HE26A	01.01.90 14.39.00 -	03.01.90 07.14.00
HE33A	28.03.90 13.10.00 -	30.03.90 04.10.00
HE38A	28.05.90 12.53.00 -	28.05.90 18.43.00
HE40A	04.07.90 16.38.00 -	04.07.90 17.47.00
HE41A	22.07.90 10.35.00 -	22.07.90 13.28.00
HE41B	24.07.90 13.12.00 -	25.07.90 15.45.00
HE42A	02.08.90 10.49.00 -	04.08.90 04.26.34
HE42B	04.08.90 05.18.00 -	04.08.90 09.37.00
HE43A	13.08.90 08.34.00 -	13.08.90 12.10.00
HE46A	25.09.90 09.44.00 -	25.09.90 14.54.00
HE49A	18.11.90 11.28.00 -	22.11.90 03.12.00
HE50A	29.11.90 11.00.00 -	30.11.90 10.30.00
HE54A	17.01.91 11.38.00 -	18.01.91 16.01.00
HE55A	21.01.91 09.22.00 -	22.01.91 08.06.00
HE58A	27.02.91 13.40.00 -	28.02.91 20.41.00
HE60A	19.03.91 10.33.00 -	21.03.91 07.16.00
HE69A	15.07.91 10.10.00 -	17.07.91 02.56.00
HE70A	24.07.91 12.15.00 -	24.07.91 14.00.00
HE71A	06.08.91 20.56.00 -	06.08.91 21.21.00
HE75A	26.09.91 12.21.00 -	27.09.91 15.53.00
HE81A	02.01.92 11.24.00 -	03.01.92 19.12.00
HE82A	03.01.92 19.13.00 -	04.01.92 11.08.00

Datei	Beginn	Ende
HE84A	03.02.92 10.14.00 - 04.02.92 10.02.00	
HE86A	20.02.92 17.20.00 - 23.02.92 10.02.00	
HE87A	11.03.92 11.16.00 - 12.03.92 08.19.00	
HE90A	15.03.92 12.37.00 - 16.03.92 09.54.00	
HE91A	23.03.92 14.45.00 - 25.03.92 07.23.00	

**Tabelle 9**

Liste der 2 Sekunden-Datensätze an der Station Helgoland

### 3.1.3 Qualität des Datensatzes

Wegen der guten Qualität der korrigierten Daten stellen die Ausfallzeiten die größten Mängel des Helgoland-Datensatzes dar. Im Schnitt ist jeder Meßfühler etwa in 15 bis 20% aller Meßzeiten ausgefallen. Im Jahr 1990 ist in 58% aller Fälle ein vollständiges Windprofil vorhanden, im Jahr 1991 in 80% aller Fälle.

Die Umgebung des Maststandortes ist nicht homogen. Die Meßdaten spiegeln bei ungestörter Anströmung aus 210° bis 300° etwa die Windverhältnisse über See wider, bei Anströmung aus 320° bis 350° ist die Anströmung durch das Oberland der Insel stark gestört, bei allen anderen Anströmrichtungen gibt es Beeinflussungen des flachen Unterlandes der Insel (Schmidt et al., 1993). Diese Umstände sind bei der Verwendung des Datensatzes zu beachten.

### 3.1.4 Statistische Ergebnisse

Von den Meßgrößen werden jahresweise statistische Größen berechnet und gespeichert. Das entsprechende Programm ist für alle nachfolgend beschriebenen Datensätze gleich. Es werden von allen Windkanälen folgende statistische Größen berechnet:

- **Mittelwert** der Windgeschwindigkeit und Windrichtung für jede Meßhöhe
- **Standardabweichung** der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung  
(bei der Windrichtung wird zur Berechnung das Maximum der Verteilung abgezogen)
- **Turbulenzintensität** der Windgeschwindigkeit (Standardabw./Mittelwert) und der Windrichtung (=Standardabweichung in rad)
- **Anzahl** der gültigen Meßwerte und **prozentualer Anteil** aller Jahreswerte für jeden Meßkanal
- bei den später beschriebenen 10 min-Werten wird zusätzlich die **Standardabweichung** der

**Stundenwerte** berechnet, um insbesondere bei den SODAR-Daten die starke Variabilität von einem Meßwert zum anderen auszuschalten

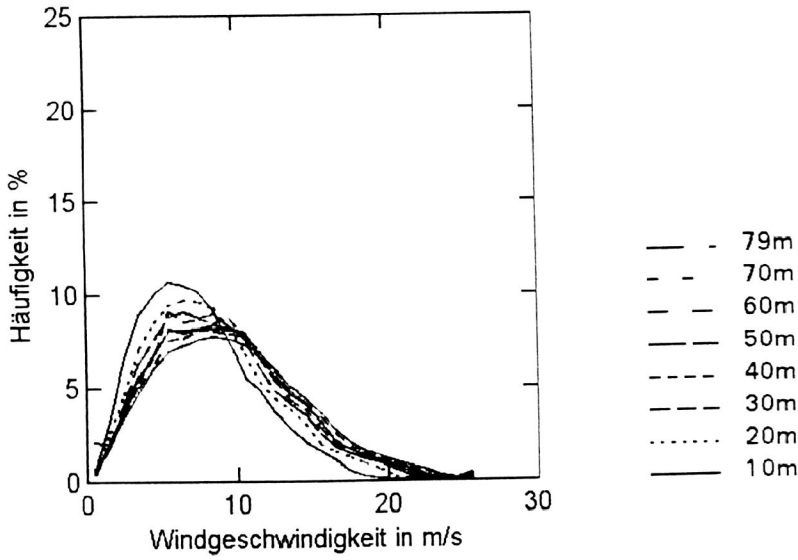
- **Anzahl der Meßwertausfälle** im Jahr und **prozentualer Anteil** aller Jahreswerte für jeden Meßkanal
- **Anzahl der Ausfälle von Windgeschwindigkeit oder Windrichtung** im Jahr und prozentualer Anteil aller Jahreswerte für jede Meßhöhe (d.h.
- **Anzahl der vollständig gemessenen Vertikalprofile** im Jahr und prozentualer Anteil
- **Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung**, die Klasseneinteilung bei der Windgeschwindigkeit beträgt 0-1m/s, 1-2m/s, ... 24-25m/s, >25m/s, bei der Windrichtung 0-10°, 10-20°, ... 350-360°. Die Verteilung wird in Anzahl der Werte pro Klasse und prozentualem Anteil angegeben.
- **Kombinierte Häufigkeitsverteilung aus Windrichtung und Windgeschwindigkeit**, für jede Meßhöhe wird die Anzahl und der prozentuale Anteil aller Werte in den Windrichtungsklassen 345-15°, 15-45°, ... 315-345° und in den Geschwindigkeitsklassen 0-5m/s, 5-10m/s, 10-15m/s, 15-20m/s, >20m/s angegeben.
- **maximale Windgeschwindigkeit** für jede Meßhöhe
- **maximale positive und negative Windgeschwindigkeitsdifferenz** von einem Meßwert zum anderen (Maß für die maximale Beschleunigung)
- **maximale vertikale Windgeschwindigkeitsdifferenz** zwischen je zwei Meßhöhen (Maß für die maximale Windscherung)
- **maximale zyklonale und antizyklonale Winddrehung** von einem Meßwert zum anderen (dabei bedeutet zyklonal: Winddrehung im Uhrzeigersinn, antizyklonal: Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn).

Das Protokoll dieser Berechnungen wird gespeichert. Aus den Jahresstatistiken wird dann für den Gesamtzeitraum eine gleichartige statistische Auswertung berechnet und protokolliert. Für die einzelnen Jahre und für den Gesamtzeitraum werden die Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie die kombinierte Verteilung geplottet.

Die Abbildungen 40, 41 und 42 zeigen diese Verteilungen für den Gesamtzeitraum, das sind knapp drei zusammenhängende Jahre, Tabelle 10 zeigt Mittelwert, Standardabweichung und Turbulenzintensität für die verschiedenen Meßkanäle.

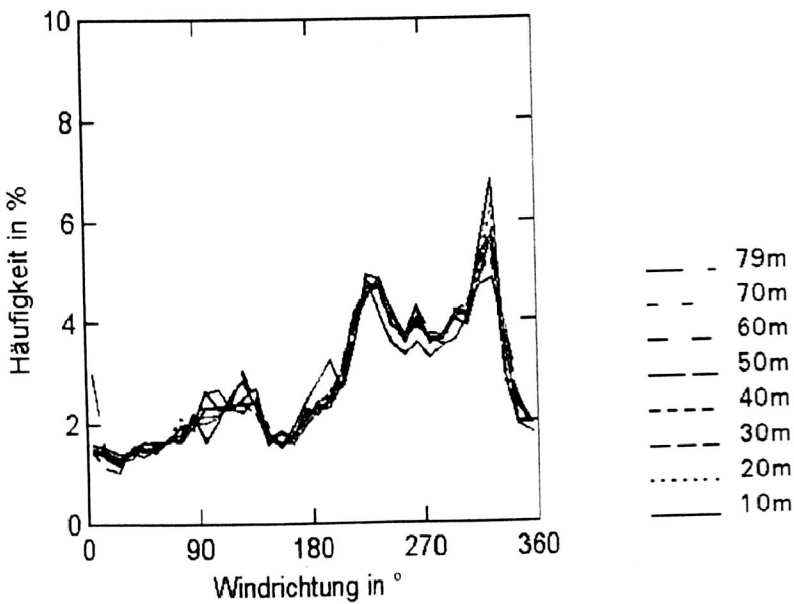
**Abbildung 40**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit in den 8 Meßhöhen an der Station Helgoland, 10m Höhe: FF10M, 20m Höhe: FF20M, ..., 79m Höhe: FF79M

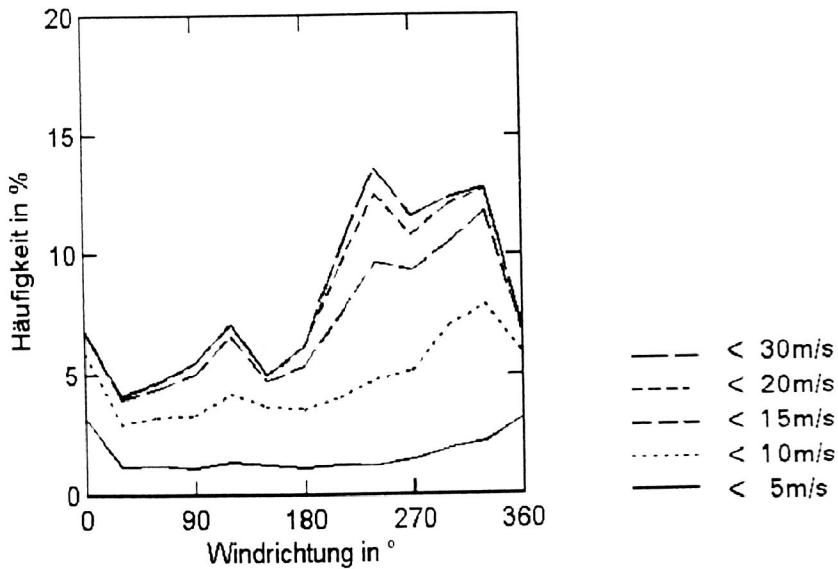


**Abbildung 41**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in den 8 Meßhöhen an der Station Helgoland, 10m Höhe: DD10M, 20m Höhe: DD20M, ..., 79m Höhe: DD79M



**Abbildung 42**



Größe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl	Prozent
ff in 10m Höhe	7.4 +/- 3.74m/s	0.506	20035 Werte	57.14%
ff in 20m Höhe	8.2 +/- 4.15m/s	0.505	21040 Werte	60.00%
ff in 30m Höhe	8.8 +/- 4.39m/s	0.501	21048 Werte	60.03%
ff in 40m Höhe	9.1 +/- 4.48m/s	0.493	21040 Werte	60.00%
ff in 50m Höhe	9.2 +/- 4.63m/s	0.501	20598 Werte	58.74%
ff in 60m Höhe	9.2 +/- 4.52m/s	0.489	20304 Werte	57.91%
ff in 70m Höhe	9.6 +/- 4.78m/s	0.499	20216 Werte	57.65%
ff in 79m Höhe	9.6 +/- 5.00m/s	0.521	21081 Werte	60.12%
dd in 10m Höhe	275. +/- 98.3°	1.716	21048 Werte	60.03%
dd in 20m Höhe	275. +/- 97.5°	1.702	21048 Werte	60.03%
dd in 30m Höhe	275. +/- 97.5°	1.701	21048 Werte	60.03%
dd in 40m Höhe	275. +/- 97.2°	1.696	21048 Werte	60.03%
dd in 50m Höhe	276. +/- 97.0°	1.693	21048 Werte	60.03%
dd in 60m Höhe	275. +/- 96.8°	1.690	21048 Werte	60.03%

Größe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl	Prozent
ff in 10m Höhe	7.4 +/- 3.74m/s	0.506	20035 Werte	57.14%
dd in 70m Höhe	275. +/- 96.4°	1.682	21047 Werte	60.02%
dd in 79m Höhe	278. +/- 95.9°	1.674	21373 Werte	60.95%

**Tabelle 10**

Mittelwert, Standardabweichung, Turbulenzintensität und Anzahl der Werte für jeden Meßfühler an der Station Helgoland für 1989 bis 1992, dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, dd für Windrichtung.

Man erkennt in der Verteilung der Windgeschwindigkeit deutlich die Auffächerung für die verschiedenen Meßhöhen, die entsprechend dem logarithmischen Windprofil für die unteren Meßhöhen größer ist als für die oberen. Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind für diese Inselstation mit mehr als 9 m/s oberhalb 50 m Höhe sehr hoch.

Die Windrichtungsverteilung ist für die verschiedenen Meßhöhen kaum unterschiedlich, lediglich für die 10 m Meßhöhe gibt es merkliche Abweichungen. Dort kommen Winde aus 230 bis 300° seltener vor als in den anderen Höhen, und Winde aus 180 bis 200° sowie aus 330° kommen häufiger vor. Eine Beeinflussung der Strömung durch den Inselfelsen kann man auch in den Windmessungen oberhalb 10 m erkennen: die Windrichtung 320-330° ist umso häufiger vertreten, je geringer die Meßhöhe ist. Das ist eine Anströmung gerade östlich des Inselfelsens. Bei einer Anströmung aus Richtung des Inselfelsens wird in den unteren Höhen die Strömung rechts und links des Hindernisses vorbeigeführt, was zu einer Erhöhung der Windhäufigkeit aus 320-330° führt.

Jede Windmessung, die nicht in absolut homogener Umgebung stattfindet, ist von ihrer Umgebung beeinflusst und folglich gestört. Dieser Umstand muß bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Ein Ziel des Projektes 'Ein begleitendes Windmeßprogramm auf der Insel Helgoland für die dort zu errichtende Windkraftanlage' war es, gerade diesen Einfluß der Umgebung auf die Messung herauszurechnen (Schmidt et al., 1993).

Die windgeschwindigkeitsabhängige Richtungsverteilung in 79 m Höhe (Abb. 42) zeigt für geringe Windgeschwindigkeiten <5m/s eine nahezu gleichförmige Richtungsverteilung. Bei Windgeschwindigkeiten zwischen 5 und 10 m/s herrschen Nordwestwinde vor, erst ab Windgeschwindigkeiten bis 20m/s zeigt sich die tatsächliche Windrichtungsverteilung mit einem Maximum bei 240°. Stürmischer Wind und Sturm treten also vornehmlich bei Südwestwind auf, ein lokales Maximum ist auch bei 120° zu beobachten.

Tabelle 11 gibt die maximalen Windgeschwindigkeiten an, die im Meßzeitraum beobachtet wurden.

Höhe	Max. Geschw.	Datum	Uhrzeit
10 m	28.1 m/s	25.1.1990	23.00
20 m	32.0 m/s	25.1.1990	23.00
30 m	34.3 m/s	25.1.1990	23.00
40 m	35.5 m/s	25.1.1990	23.00
50 m	36.0 m/s	26.2.1990	15.00
60 m	28.3 m/s	25.1.1990	19.00
70 m	37.6 m/s	26.2.1990	15.00
79 m	36.9 m/s	26.2.1990	15.00

**Tabelle 11**

Maximale Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Meßhöhen an der Station Helgoland in Zeitraum 1989 bis 1992.

Die maximalen Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit liegen deutlich über 30 m/s oberhalb 10 m Höhe. Wollte man diese Werte auf 10 min-Mittel umrechnen, müßte man sie mit 1.1 multiplizieren (Wieringa, 1973, Schroers und Lösslein, 1983, Germanischer Lloyd, 1993). Die geringe Maximalgeschwindigkeit in 60 m Höhe ist auf einen Ausfall des Meßfühlers gerade zum Höhepunkt des Sturms am 25.1.1990 zurückzuführen.



telwerte von Varianzen. Wartungszeiten, in denen die Meßwerte gestört sein können, sind gekennzeichnet. Datenausfälle sind durch Default-Werte erkennbar.

An einem Standort, der auf dem Kernkraftwerksgelände liegt, wurde 1992 von der Preußen Elektra ein Sodar-Gerät zur Überwachung des Windfeldes in Betrieb genommen (s. 3.6). Zwei Jahre lang konnten so Parallelmessungen gewonnen werden. Die Ergebnisse eines Vergleichs werden in dem Abschnitt 3.6.5 dargestellt.

### 3.2.2 Datenaufbereitung

#### 3.2.2.1 Originaldaten

Das Niedersächsische Landesamt für Ökologie archivierte die 10 min-Werte der für die Überwachung relevanten Daten von 1981 bis 1993. Sie wurden auf Video-Kassetten in komprimierter Form zur Verfügung gestellt. Tabelle 12 zeigt die Meßstellen. Während des Meßzeitraums trat eine Änderung des Meßkonzepts auf: von 1981 bis 1991 wurde zur Festlegung der Diffusionskategorie die Standardabweichung der vertikalen Windrichtung ('sigma phi') verwendet, ab 1992 gemäß der Richtlinie 'Instrumentierung zur Ermittlung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre' (KTA, 1988) die Standardabweichung der vertikalen Windgeschwindigkeit ('sigma w').

Kanal	Einheit	Größe	Höhe	Ausleger
KKSMFF62N	m/s	Windgeschwindigkeit	62m	Nord
KKSMFFK114N	m/s	Windgeschwindigkeit	114m	Nord
KKSMFF160N	m/s	Windgeschwindigkeit	160m	Nord
KKSMFF62S	m/s	Windgeschwindigkeit	62m	Süd
KKSMFFK114S	m/s	Windgeschwindigkeit	114m	Süd
KKSMDD62N	Grad	Windrichtung	62m	Nord
KKSMDDK114N	Grad	Windrichtung	114m	Nord
KKSMDD160N	Grad	Windrichtung	160m	Nord
KKSMDD62S	Grad	Windrichtung	62m	Süd
KKSMDDK114S	Grad	Windrichtung	114m	Süd
KKSMDDV62N	Grad	Windricht.Vert.wind	62m	Nord
KKSMDDV62S	Grad	Windricht.Vert.wind	62m	Süd
KKSMDDVK114N	Grad	Windricht.Vert.wind	114m	Nord
KKSMDDVK114S	Grad	Windricht.Vert.wind	114m	Süd

KKSMDDV160N	Grad	Windricht.Vert.wind	160m	Nord
KKSMTT2	°C	Lufttemperatur	2m	
KKSMTTD62	Grad	Temperaturdifferenz	62m-2m	
KKSMTTDK114	Grad	Temperaturdifferenz	114m-2m	
KKSMTTD160	Grad	Temperaturdifferenz	160m-2m	
KKSMU2	%	Relative Feuchte	2m	
KKSMEQ2	W/m2	Strahlungsbilanz	2m	
KKSMIN2	mm/min	Niederschlagsintensit .	2m	
KKSMPPPP2	hPa	Luftdruck	2m	
KKSMST62N	Grad	Stdrdabw.hor.W.richt.	62m	Nord
KKSMSTK114N	Grad	Stdrdabw.hor.W.richt.	114m	Nord
KKSMST160N	Grad	Stdrdabw.hor.W.richt.	160m	Nord
KKSMST62S	Grad	Stdrdabw.hor.W.richt.	62m	Süd
KKSMSTK114S	Grad	Stdrdabw.hor.W.richt.	114m	Süd
KKSMSP62N	Grad	Stdrdabw.vert.W.richt.	62m	Nord
KKSMSP62S	Grad	Stdrdabw.vert.W.richt.	62m	Süd
KKSMSPK114N	Grad	Stdrdabw.vert.W.richt.	114m	Nord
KKSMSPK114S	Grad	Stdrdabw.vert.W.richt.	114m	Süd
KKSMSP160N	Grad	Stdrdabw.vert.W.richt.	160m	Nord
KKSM62N	cm/s	Stdrdabw.Vertikalwind	62m	Nord
KKSM62S	cm/s	Stdrdabw.Vertikalwind	62m	Süd
KKSMWK114N	cm/s	Stdrdabw.Vertikalwind	114m	Nord
KKSMWK114S	cm/s	Stdrdabw.Vertikalwind	114m	Süd
KKMSW160N	cm/s	Stdrdabw.Vertikalwind	160m	Nord

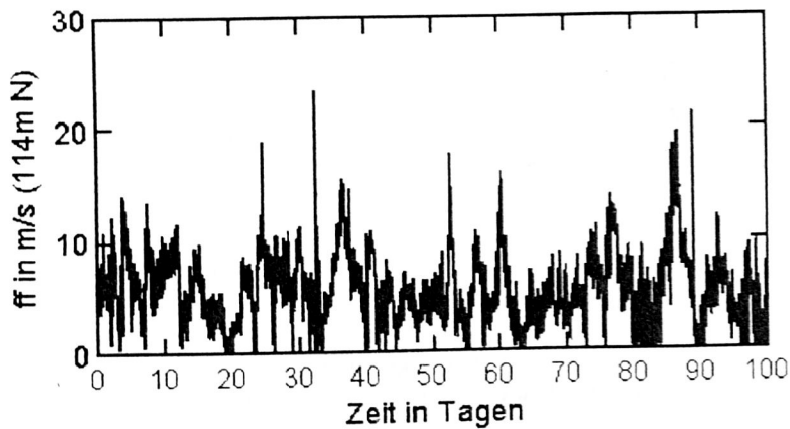
**Tabelle 12**

Meßkanäle an der Station Lühesand, dabei bedeuten: Stdrdabw.hor.W.richt: Standardabweichung der horizontalen Windrichtung, Stdrdabw.vert.W.richt.: Standardabweichung der vertikalen Windrichtung, Stdrdabw.Vertikalwind: Standardabweichung der vertikalen Windgeschwindigkeit

### 3.2.2.2 Qualitätskontrolle

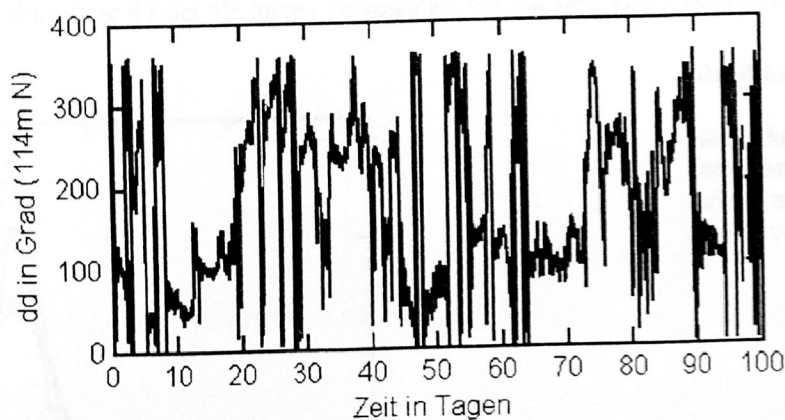
Die Qualitätskontrolle der Daten wird in diesem Abschnitt ausführlich beschrieben, denn auch die später beschriebenen Datensätze werden nach einem ähnlichen Schema geprüft und korrigiert. Später wird auf diesen Abschnitt Bezug genommen.

Die Originaldaten werden zunächst 'dekomprimiert' und jahresweise zu Dateien zusammengefaßt. Dabei werden Fehlzeiten ergänzt und Ungereimtheiten bei der Zeitumstellung korrigiert. Die Zeitangabe ist nun einheitlich in MEZ. Von einigen Meßgrößen werden Zeitplots über ein Jahr erstellt, um die Qualität beurteilen zu können.



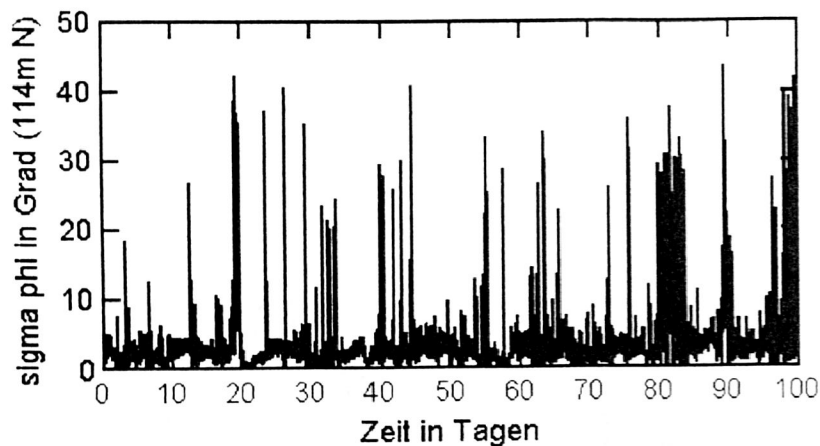
**Abbildung 44**

Zeitreihe der Windgeschwindigkeit vom 1. Januar bis 31. März 1990 in 114 m Höhe am nördlichen Ausleger des Gittermastes in Lühesand



**Abbildung 45**

Zeitreihe der Windrichtung vom 1. Januar bis 31. März 1990 in 114 m Höhe am nördlichen Ausleger des Gittermastes in Lühesand

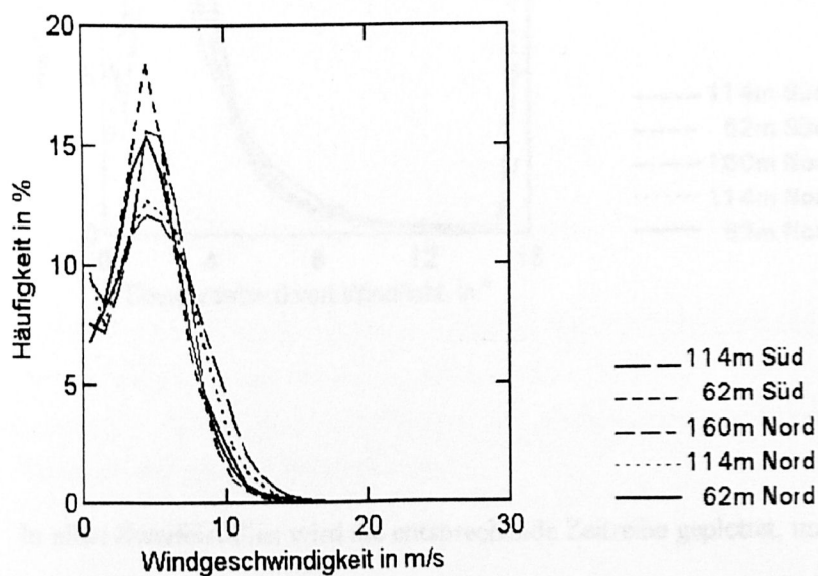


**Abbildung 46**

Zeitreihe der Standardabweichung der vertikalen Windrichtung vom 1. Januar bis 31. März 1990 in 114 m Höhe am nördlichen Ausleger des Gittermastes in Lühesand

In den Abbildungen 44 bis 46 sind für die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung und die Standardabweichung der vertikalen Windrichtung Beispiele gezeigt.

Dieser Datensatz wird benutzt, um von allen Größen Häufigkeitsverteilungen zu berechnen und darzustellen. Abbildung 47 bis 49 zeigen beispielhaft für ein Jahr Häufigkeitsverteilungen der Windge-



**Abbildung 47**

Häufigkeitsverteilung der unkorrigierten Windgeschwindigkeiten an der Station Lühesand in den verschiedenen Höhen

schwindigkeiten, Windrichtungen und der Standardabweichungen der vertikalen Windrichtungen. Häufigkeitsverteilungen sind ein ausgezeichnetes Maß, um Fehler in den Datensätzen zu erkennen.

Abbildung 48

Häufigkeitsverteilung der unkorrigierten Windrichtungen an der Station Lühesand in den verschiedenen Höhen

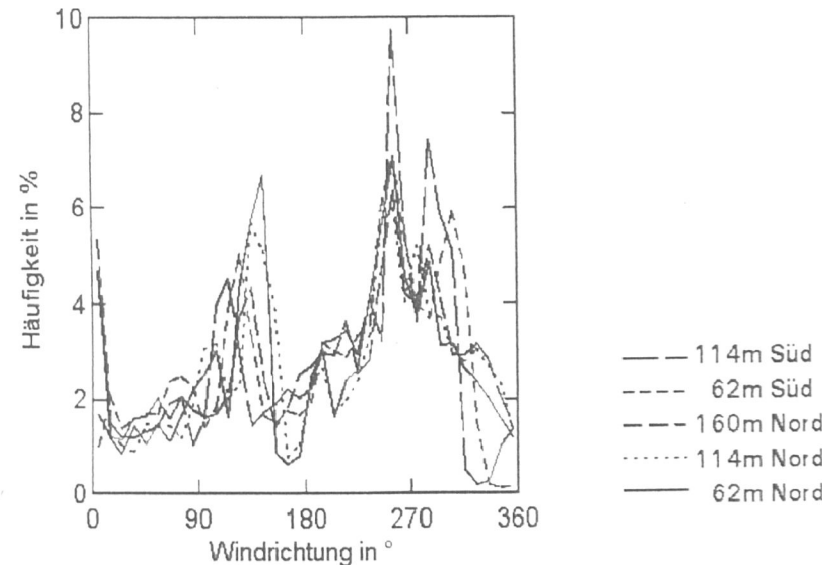
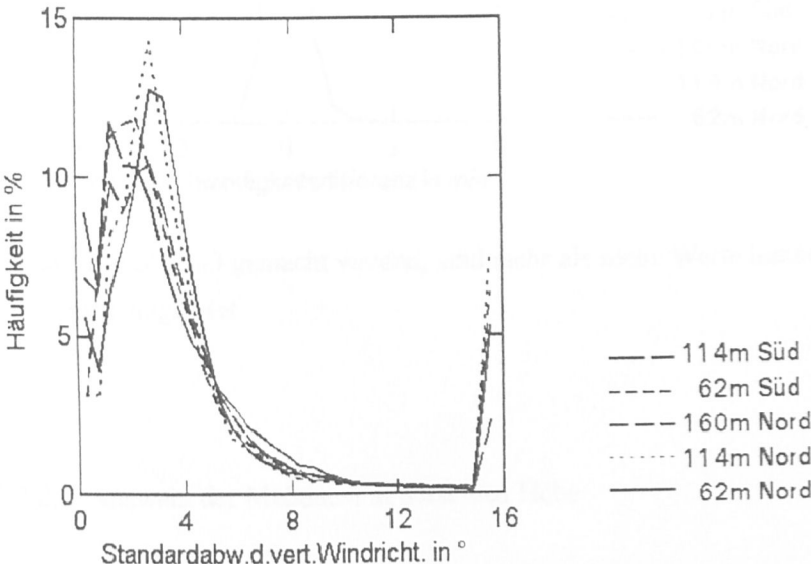


Abbildung 49

Häufigkeitsverteilung der unkorrigierten Standardabweichungen der vertikalen Windrichtung an der Station Lühesand in den verschiedenen Höhen



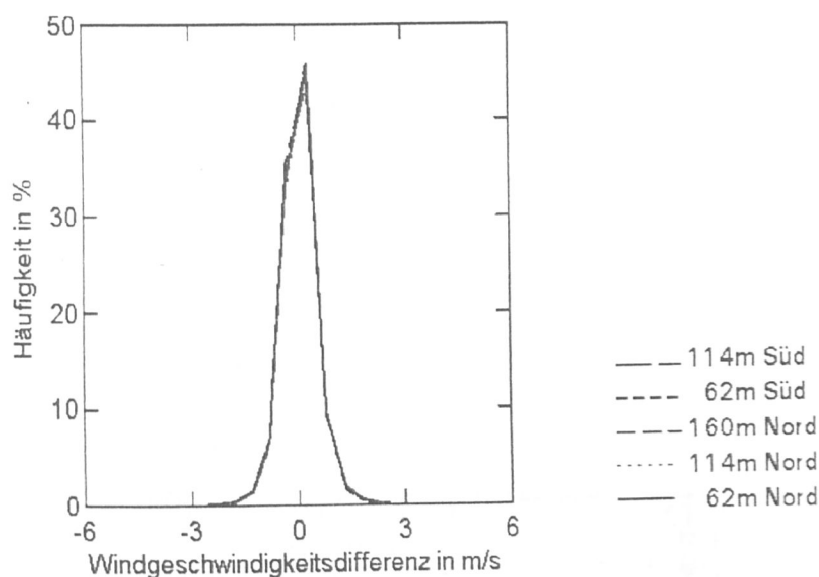
In allen Zweifelsfällen wird die entsprechende Zeitreihe geplottet, um so die fehlerhaften Zeitabschnitte

festzulegen zu können.

In nächsten Schritt werden die Meßdaten auf Ausreißer kontrolliert und ggf. korrigiert. Dabei können fehlerhafte Bereiche angegeben werden und die Daten in den Bereichen durch Fehlerkennungen ersetzt werden. Für eine Qualitätskontrolle wird abgefragt, ob absolute Schrankenwerte über- oder unterschritten werden und ob plausible Abweichungen vom Vorgänger überschritten werden.

Die zulässigen Differenzen von einem Wert zum anderen werden durch eine Häufigkeitsverteilung der Differenzwerte ermittelt. Abbildung 50 zeigt ein Beispiel einer solchen Verteilung.

Man erkennt, daß die Schranke von 4 m/s ein geeigneter Wert ist, gelegentlich auftretende größere Differenzen sind auf fehlerhafte Werte zurückzuführen und werden korrigiert. Nicht plausible Meßwerte werden ersetzt durch den Wert des Vorgängers, dies kann maximal für sechs falsche Werte (also



**Abbildung 50**

Beispiel für die Häufigkeitsverteilung der Differenz der Windgeschwindigkeitswerte an der Station Lühesand

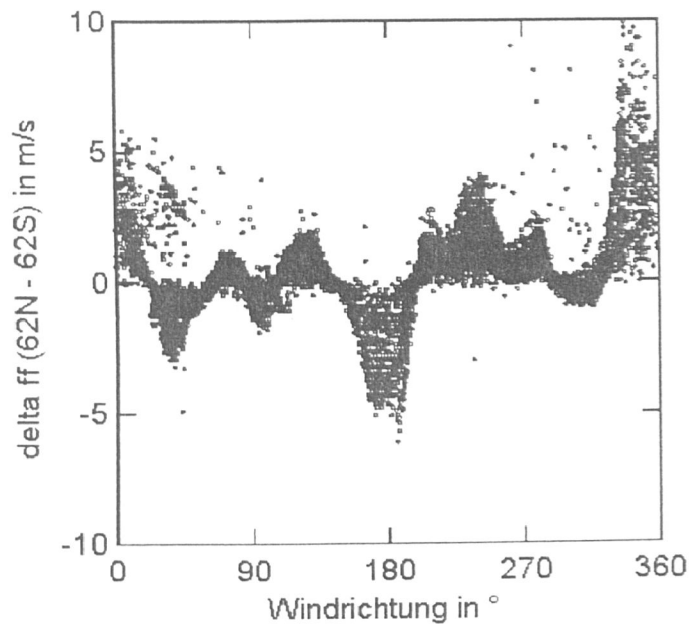
bis zu einer Stunde) gemacht werden, sind mehr als sechs Werte hintereinander falsch, werden Fehlerkennungen eingesetzt.

### 3.2.2.3 Auswahl der Meßdaten in derselben Höhe

Im letzten Schritt werden dann die Meßdaten der nördlichen und südlichen Ausleger zu einem Meßwert zusammengefaßt. Das Vorgehen wird im Folgenden beschrieben. Die Abbildungen 51 und 52 zeigen beispielhaft für ein Jahr die Differenzen der Meßdaten des nördlichen und des südlichen Auslegers in Abhängigkeit von der Windrichtung.

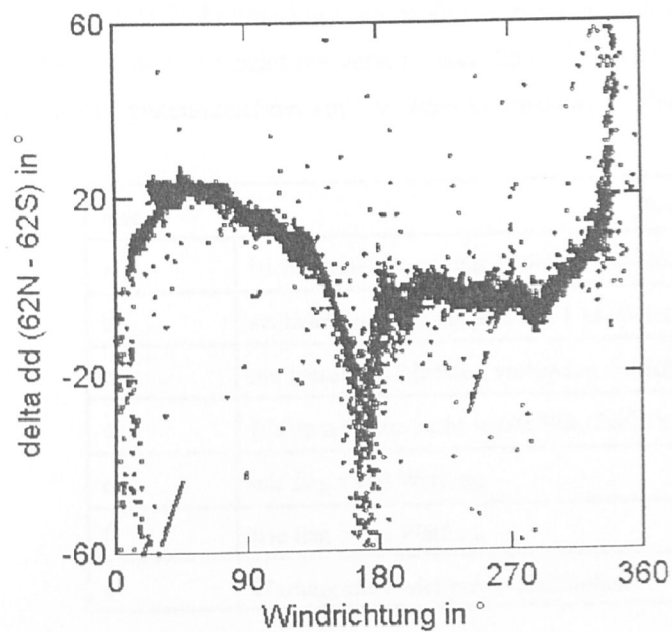
**Abbildung 51**

Darstellung aller Windgeschwindigkeitsdifferenzen des nördlichen und südlichen Meßfühlers in Abhängigkeit von der Windrichtung an der Station Lühesand



**Abbildung 52**

Darstellung aller Windrichtungsdifferenzen des nördlichen und südlichen Auslegers gegen die Windrichtung an der Station Lühesand



Diese wird vom nördlichen Ausleger genommen, falls dieser Meßwert zwischen  $270^\circ$  und  $90^\circ$  liegt, andernfalls vom südlichen Meßwert. Man erkennt deutlich eine große Differenz der Meßdaten in den Anströmbereichen um  $10^\circ$  und um  $190^\circ$ , wo jeweils der leeseitige Meßfühler stark vom Mast gestört ist. Es wurde erwartet, daß bei seitlicher Anströmung ( $\text{ca. } 100^\circ \pm 60^\circ$  und  $280^\circ \pm 60^\circ$ ) die beiden Meßwerte übereinstimmen, es sind jedoch auch in diesen Bereichen Abweichungen der Windgeschwindigkeit von bis zu 4 m/s und der Windrichtung von bis zu  $20^\circ$  erkennbar. Die Ursache ist vermutlich, daß die Länge der Ausleger bei einem so umfangreichen Gittermast nicht ausreichend ist, um eine Störung ganz zu vermeiden. Bei dieser Messung bot sich auch nicht die Möglichkeit, die Störung rechnerisch zu eliminieren, wie dies bei dem Gittermast auf Helgoland getan werden konnte (Schmidt et al., 1993), da die Konstruktion in den Meßhöhen nicht explizit bekannt ist.

Bei der Reduzierung der nördlichen und südlichen Meßwerte zu einem Meßwert werden auch Qualitätsangaben in Form von 'flags' gemacht. Zuerst wird der Windrichtungssektor bestimmt. Falls keine Richtungsangabe vorhanden ist, werden alle Meßdaten durch Fehlerkennungen ersetzt. Falls nur eine Windrichtungsangabe vorhanden ist, wird diese verwendet und eine flag gesetzt. Wenn beide Meßwerte vorhanden sind, wird die Richtungsmessung aus dem ungestörten Halbkreis verwendet. Es werden drei Richtungssektoren unterschieden:

- a) Nordanströmung von  $140^\circ$  bis  $200^\circ$ ,
- b) Südanströmung von  $320^\circ$  bis  $20^\circ$ , beide festgelegt aus den o.g. Abbildungen,
- c) seitliche Anströmung.

Bei Nordanströmung wird der Meßwert des nördlichen Auslegers verwendet, bei Südanströmung der des südlichen Auslegers, bei seitlicher Anströmung wird ein Mittelwert aus beiden Meßwerten verwendet. Steht bei a) nur der südliche Meßwert zur Verfügung, wird er verworfen (Fehlerkennung eingesetzt), umgekehrt bei b). (Der letztgenannte Fall tritt in 160m Höhe, wo nur ein Nordausleger vorhanden ist, immer ein!) Steht bei c) nur ein Meßwert zur Verfügung, wird dieser verwendet, aber mit einer flag versehen. Tabelle 13 zeigt die verwendeten flags. Die Meßwerte, die im Originaldatensatz als 'Wartungswerte' gekennzeichnet sind, werden übernommen, aber mit einer flag versehen.

flag	Bedeutung
a	Richtungssektor nur aus 1 Meßwert bestimmt
b	seitliche Anströmung, aber nur 1 Meßwert vorhanden
c	nur leeseitiger Meßwert vorhanden, Fehlerkennung einsetzen
d	Richtungssektor nicht feststellbar, Fehlerkennung einsetzen
e	wie flag a und Wartung
f	wie flag b und Wartung
g	Wartung einer oder beider Meßstellen

**Tabelle 13** Bedeutung der im korrigierten Datensatz Lühesand gesetzten flags

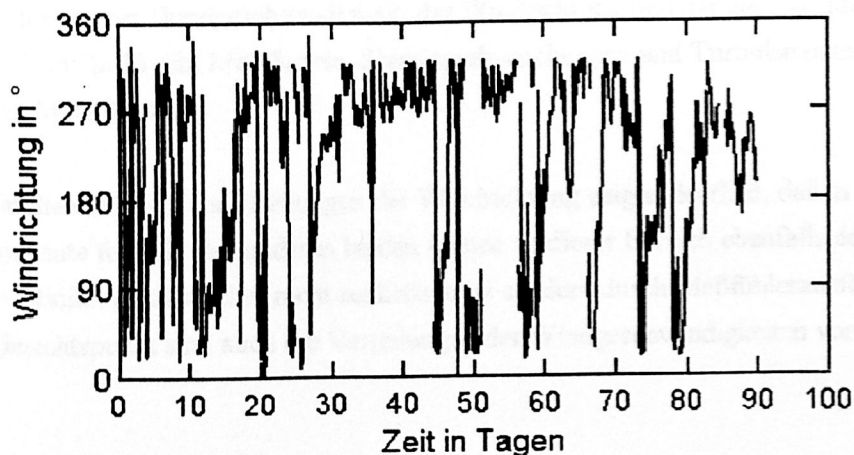
Dieser korrigierte und reduzierte Datensatz mit 10 min-Daten wird gespeichert. Es werden ebenfalls einige Zeitplots angefertigt. Aus diesen Werten werden dann Stundenwerte berechnet. Es werden alle (also ein bis sechs) Daten innerhalb einer Stunde, die nicht mit der flag 'Wartung' gekennzeichnet sind, zur Mittelbildung verwendet. Dieser Datensatz wird ebenfalls gespeichert und stellt den für dieses Vorhaben endgültigen Datensatz dar. Auch von diesem Datensatz werden ausgewählte Zeitplots erstellt.

### 3.2.3 Qualität des Datensatzes

Trotz umfangreicher Qualitätskontrolle und redundanter Messungen ist der korrigierte Datensatz mit Mängeln behaftet. Es handelt sich um unsystematische und systematische Fehler.

Durch die Begutachtung der Häufigkeitsverteilung für jede einzelne Meßstelle können zwar die meisten Datenfehler gefunden werden, es ist aber nicht auszuschließen, daß geringfügigere Fehler (z.B. über kurze Zeitabschnitte oder mit geringen Abweichungen von den erwarteten Werten) übersehen werden. Streng genommen müßten von allen Meßgrößen Zeitplots angefertigt werden, um alle Fehler zu finden. Das ist aber bei 38 Meßgrößen und Plotfiles von mehr als 1 MB pro Größe nicht vertretbar. Daher ist der Datensatz nicht als völlig fehlerfrei anzusehen. In dem reduzierten Datensatz, der in einer Meßhöhe nur einen Meßwert enthält, fällt ein möglicher Fehler nicht so auf, da es sich um eine 'Mischung' aus N- und S-Daten handelt, ist aber dennoch enthalten.

Ein systematischer Fehler kann durch die Verwendung von Meßdaten der südlichen und/oder nördlichen Ausleger auftreten. Fällt über längere Zeit ein Meßfühler - z.B. des nördlichen Auslegers - aus, dann sind in dem reduzierten Datensatz zu wenig Nordwinde enthalten, da bei Nordanströmung der südliche Meßwert verworfen wird. Abbildung 53 zeigt ein Beispiel.



**Abbildung 53**

Zeitreihe über 100 Tage der Windrichtung in 114 m Höhe an der Station Lühesand, Ausfall des nördlichen Meßfühlers

In 160m Höhe ist nur der nördliche Meßwert vorhanden und prinzipiell kein Südwind meßbar. Für statistischen Aussagen ist eine derartige Messung nicht brauchbar.

Der letztgenannte systematische Fehler tritt bei allen Mastmessungen auf, sofern nicht der Einfluß des Mastes (Abschattung, Umströmung und Vorstau) rechnerisch eliminiert werden kann. Bei einem derart ausladenden Gittermast wie dem Freileitungsmast mit noch dazu relativ kurzen Auslegern ist die Störung durch den Mast - und daher der Ausfall an Daten - allerdings besonders gravierend. Dennoch sollten solche Daten gesammelt und archiviert werden; bei der Interpretation muß dann aber ausreichend Sorgfalt angewendet werden.

Die Ausfälle der korrigierten Daten betragen für den Gesamtzeitraum von 13 Jahren etwa 20% für die Höhen 62 und 114 m und 38% für 160 m. Es liegen für 66% aller Fälle vollständige Vertikalprofile von Windgeschwindigkeit und Windrichtung vor.

Für alle 10 min-Daten, die in das Archiv aufgenommen werden, wird zusätzlich zu den in 3.1.4 genannten statistischen Größen und Qualitätsmerkmalen noch angegeben, wie viele Stundenwerte aus 6 10 min-Werten gewonnen wurden, wie viele aus 5, 4, 3, 2 und 1 Wert. So erhält man Angaben über die Lückenhaftigkeit des Datensatzes. Der Lühesand-Datensatz enthält nur wenige Stundenwerte mit 4, 3, 2 oder 1 10 min-Wert, jeweils unter 1%. Die Meßfühlerausfälle sind also nicht über den Gesamtzeitraum verstreut sondern treten eher in bestimmten Abschnitten auf.

#### 3.2.4 Statistische Ergebnisse

Wie in 3.1.4 geschildert, werden auch für den Datensatz Lühesand jahresweise und für den gesamten Meßzeitraum statistische Ergebnisse berechnet.

Die Abbildungen 54, 55 und 56 zeigen für den gesamten Meßzeitraum - das sind 13 Jahre - die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der geschwindigkeitsabhängigen Richtung. Tabelle 14 gibt Mittelwerte, Standardabweichungen und Turbulenzintensität für die verschiedenen Meßhöhen an.

Die gemittelten Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung zeigen deutlich, daß in 160 m Höhe die Südkomponente fehlt. In den anderen beiden Höhen ist dieser Bereich ebenfalls deutlich erkennbar durch ein Minimum, das sicher nicht realistisch ist sondern durch Meßfühlerausfälle geprägt ist. Unter diesem Gesichtspunkt sind auch die Verteilungen der Windgeschwindigkeiten vorsichtig zu beurteilen.

Abbildung 54

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Lühesand für die Jahre 1981 bis 1993

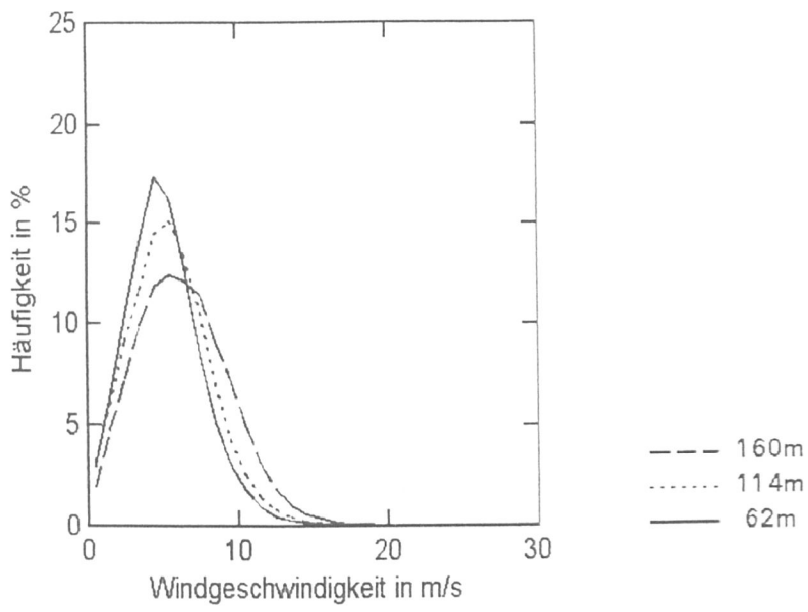


Abbildung 55

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Lühesand für die Jahre 1981 bis 1993

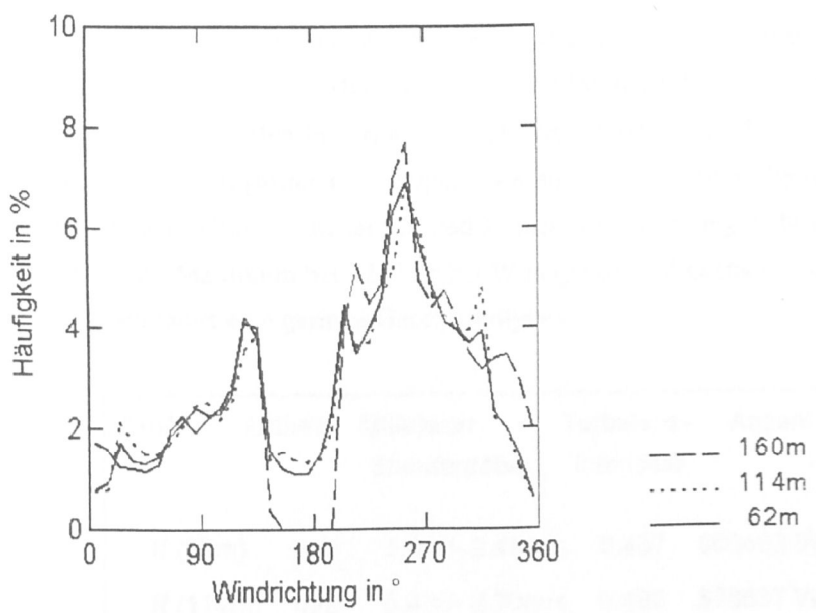
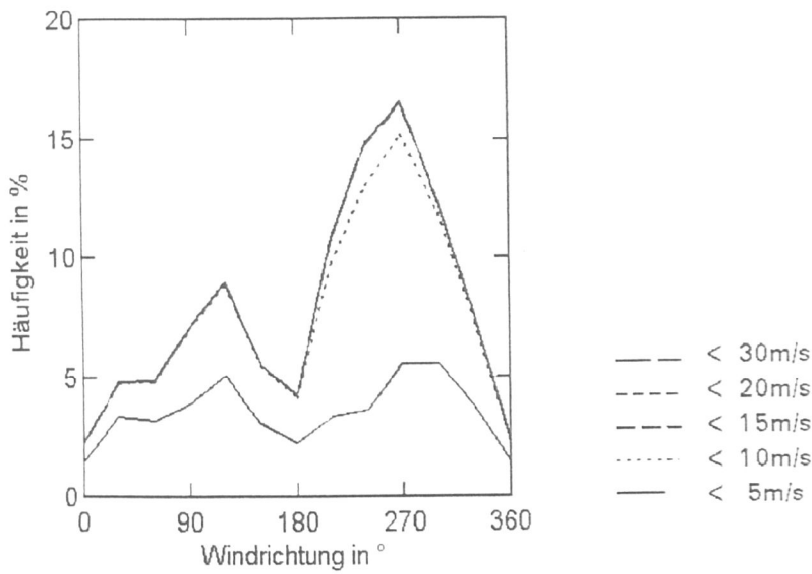


Abbildung 56



Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung an der Station Lühesand für die Jahre 1981 bis 1993

Der Unsicherheit der Windmessung ist in diesem Fall besonders bedauerlich, da es sich um eine 13jährige Meßreihe - die längste in diesem Archiv - handelt.

In der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtungsverteilung fällt gegenüber der Inselstation Helgoland auf, daß sich die typische Verteilung mit einem Maximum bei 270° bereits bei Geschwindigkeiten <5m/s, ganz deutlich aber bei Geschwindigkeiten <10m/s zeigt. Lühesand liegt ca. 50 km landeinwärts und weist wesentlich geringere Windgeschwindigkeiten auf als Helgoland, daher kommen Windgeschwindigkeiten >10m/s seltener vor und können die Verteilung nicht mehr wesentlich beeinflussen. Das sekundäre Maximum bei 120° ist bei Windgeschwindigkeiten <5m/s stark ausgeprägt, östliche Winde haben meist eine geringe Geschwindigkeit.

Größe	Einheit	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl	Prozent
ff (62m)	m/s	5.0 +/- 2.46m/s	0.487	563492 Werte	82.42%
ff (114m)	m/s	5.4 +/- 2.70m/s	0.495	578637 Werte	84.63%
ff (160m)	m/s	6.2 +/- 3.09m/s	0.498	479332 Werte	70.11%
dd (62m)	Grad	236. +/- 87.1°	1.520	564298 Werte	82.53%
dd (144m)	Grad	240. +/- 87.9°	1.535	580511 Werte	84.91%
dd (160m)	Grad	239. +/- 85.8°	1.497	483897 Werte	70.77%

**Tabelle 14**

Mittelwert, Standardabweichung, Turbulenzintensität und Anzahl der Werte für jede Meßhöhe an der Station Lühesand für 1981 bis 1993, dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, dd für Windrichtung

Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind geringer als in Helgoland, die Turbulenzintensität liegt etwa im gleichen Bereich.

Die maximalen Windgeschwindigkeiten sind in Tabelle 15 aufgelistet. Sie erreichen nicht die 30 m/s Marke.

62 m	23.6 m/s	14.1.1993	0.00 Uhr
114m	27.8 m/s	25.3.1986	5.30 Uhr
160m	26.3 m/s	14.1.1986	0.00 Uhr

**Tabelle 15**

Maximale Windgeschwindigkeiten in den verschiedenen Meßhöhen an der Station Lühesand im Zeitraum 1981-1993

### 3.3 Sodar-Daten Esenshamm (Unterweser) I

#### 3.3.1 Standort und Meßsystem

Beim Kernkraftwerk Unterweser bei Esenshamm wurden vom Niedersächsischen Landesamt für Ökologie für die Fernüberwachung meteorologische Daten erfaßt. Die Koordinaten des Standortes sind  $53^{\circ} 26.1' \text{ N}$ ,  $08^{\circ} 28.9' \text{ E}$ . Neben dem Reaktor wurde von 1981 bis 1989 ein Doppler-Sodar-Gerät der Fa. Rosenhagen betrieben (Müller, 1981). Es war etwa 300 m südwestlich der Reaktorgebäude aufgestellt.

Ab 1992 wurde am gleichen Standort von der Preußen Elektra ein neues Sodar-Gerät (Fa. Metek) in Betrieb genommen (s. 3.7).

Sodar steht für 'Sound detecting and ranging'. Drei Schallsender, die gleichzeitig Empfänger sind, senden in kurzen Zeitabständen Schallimpulse aus - bei dem verwendeten Gerät alle 2 s, die an turbulenten Fluktuationen rückgestreut werden. Da sich diese Inhomogenitäten mit dem Wind verlagern, ergibt sich eine Frequenzverschiebung infolge des Dopplereffektes, die zur Windgeschwindigkeitsmessung ausgenutzt werden kann (s. Verein Deutscher Ingenieure, 1994, Beyrich et al., 1994). Die drei Antennen sind in unterschiedliche Richtungen gerichtet und ermöglichen so über Umrechnungen eine Erfassung des dreidimensionalen Windvektors mit hoher zeitlicher Auflösung. Die Meßwerte können nicht wie bei in-situ-Messungen einer festen Höhe zugeordnet werden sondern einem Höhenintervall - genauer: einem Luftvolumen -, das mit zunehmender Höhe größer wird, da die drei Antennen unterschiedliche Rückstreuolumina erfassen. Auch aus diesem Grund werden die zeitlich hochaufgelösten Meßdaten über einen längeren Zeitraum gemittelt, üblicherweise über 10 min. Die angegebenen Meßhöhen entsprechen etwa dem Schwerpunkt des Höhenintervalls. Beim Kernkraft-

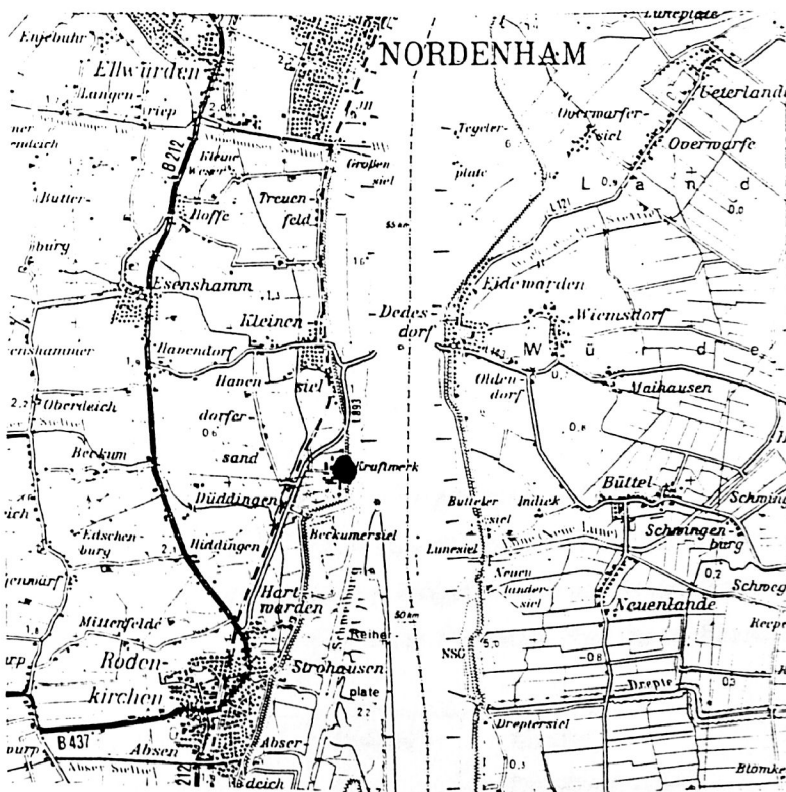


Abbildung 57

Standort des Sodars des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie (Kartengrundlage C2714, vervielfältigt mit Genehmigung der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, 52-678/97))

dem einem Höhenintervall - genauer: einem Luftvolumen -, das mit zunehmender Höhe größer wird, da die drei Antennen unterschiedliche Rückstreuolumina erfassen. Auch aus diesem Grund werden die zeitlich hochaufgelösten Meßdaten über einen längeren Zeitraum gemittelt, üblicherweise über 10 min. Die angegebenen Meßhöhen entsprechen etwa dem Schwerpunkt des Höhenintervalls. Beim Kernkraft-

werk Unterweser sind die gespeicherten Höhen 25m, 50m, 75m, 100m und 150m.

Ein Sodar-Gerät mißt in umso größeren Höhen, je höher die Windgeschwindigkeit ist. Das bedeutet aber auch, daß bei geringen Windgeschwindigkeit häufig kein Signal mehr aus großen Höhen empfangen wird. Somit kann die mittlere Windgeschwindigkeit vornehmlich in größeren Höhen überschätzt werden.

Der Standort des Sodar-Geräts ist nicht ganz ungestört, in östlicher Richtung gibt es in den unteren Höhen Abschattungen durch das Kernkraftwerk und das Umspannwerk, was ein Photo in Müller (1981) dokumentiert.

Neben dem Sodar-Gerät stand ein 10m-Mast, dem mit einem konventionellen Meßgerät (Schalensternanemometer und Windfahne) die horizontale Windgeschwindigkeit und -richtung erfaßte. Ferner wurden Strahlungsbilanz und Niederschlagsintensität in 2m Höhe gemessen.

Das Sodar der Fa. Rosenhagen lieferte Winddaten bis Ende 1989, danach wurde die Betreuung der Meßwerterfassung an das zuständige Energieversorgungsunternehmen, die Preußen Elektra übergeben. Ab 1992 werden die Meßdaten von einem ungestörteren Standort in das Archiv übernommen (s. 3.6). Daten aus einer Zwischenphase mit Mastmessungen in Kaminhöhe werden nicht in das Archiv aufgenommen.

### 3.3.2 Datenaufbereitung

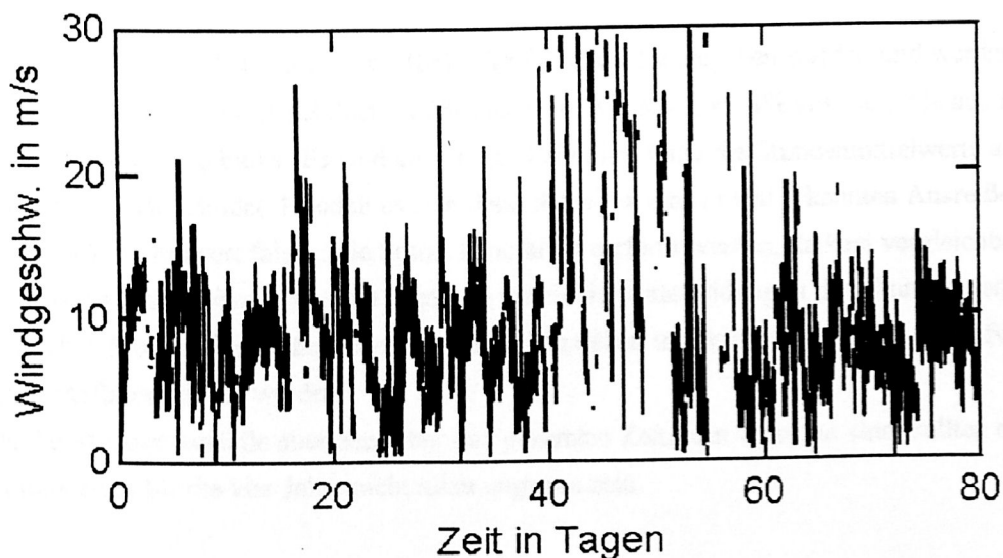
Die 10 min-Mittelwerte der gemessenen Daten wurden in komprimierter Form auf Video-Kassetten vom Niedersächsischen Landesamt für Ökologie übergeben. Die Daten wurden 'dekomprimiert', jahresweise zu Dateien zusammengefaßt und als Originaldaten auf MOD und auf dem Großrechner gespeichert. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die Meßkanäle der Originaldaten.

Kanal	Einheit	Größe	Höhe
KKUMFF25	m/s	Windgeschwindigkeit	25
KKUMFF50	m/s	Windgeschwindigkeit	50
KKUMFF75	m/s	Windgeschwindigkeit	75
KKUMFFK100	m/s	Windgeschwindigkeit	100
KKUMFF150	m/s	Windgeschwindigkeit	150
KKUMDD25	Grad	Windrichtung	25
KKUMDD50	Grad	Windrichtung	50
KKUMDD75	Grad	Windrichtung	75
KKUMDDK100	Grad	Windrichtung	100
KKUMDD150	Grad	Windrichtung	150
KKUMDD10	Grad	Windrichtung	10
KKUMFF10	m/s	Windgeschwindigkeit	10
KKUMEQ2	W/m <sup>2</sup>	Strahlungsbilanz	2
KKUMIN2	mm/min	Niederschlagsintensität	2

KKUMSW25	cm/s	Std. abw. Vert. wind	25
KKUMSW50	cm/s	Std. abw. Vert. wind	50
KKUMSW75	cm/s	Std. abw. Vert. wind	75
KKUMSW100	cm/s	Std. abw. Vert. wind	100
KKUMSW150	cm/s	Std. abw. Vert. wind	150

**Tabelle 16** Meßkanäle an der Station Esenshamm (Unterweser)

Von diesen Datensätzen werden Häufigkeitsverteilungen und selektiv Zeitreihenplots angefertigt. Die Häufigkeitsverteilungen geben bereits Aufschluß über die Güte der Daten. Dabei zeigt sich, daß ab dem Jahr 1985 ein Fehler in den Sodar-Daten auftritt, der nicht korrigiert werden kann. Zeitreihenplots bestätigten dies. Es werden also nur die Daten der Jahre 1981 bis 1984 aufbereitet und archiviert. Ähnlich wie die Mastdaten werden auch die Sodar-Daten zunächst auf Ausreißer durchsucht und korrigiert. Häufigkeitsverteilungen der Größen geben Aufschluß über die absoluten Schrankenwerte, die nicht über- bzw. unterschritten werden sollen, und Häufigkeitsverteilungen der Differenzen von einem Wert zum nächsten geben plausible Abweichungen vom Vorgänger an. Abbildung 58 zeigt ein Beispiel für die Geschwindigkeitsmessung in einem Zeitraum mit vielen Fehlmessungen. Die Variabilität der Sodar-Meßwerte ist größer als die der Mast-Meßwerte, und es treten auch höhere Windgeschwindigkeitswerte auf. So werden viele Ausreißer nicht erkannt.



**Abbildung 58**

Beispiel für die Windgeschwindigkeitsmessung des Sodars Esenshamm in 150 m Höhe für April bis Juni 1983

Ein weiteres Problem bei diesen Daten sind die vielen Datenausfälle, die nicht auf bestimmte Zeitabschnitte beschränkt sind sondern immer wieder verstreut auftreten. Damit entfällt bei sehr vielen Meßwerten der Plausibilitätsvergleich mit dem Vorgänger. Diese Umstände tragen dazu bei, daß viele Ausreißer nicht erkannt werden. Nur ein Vergleich mit den Messungen in den anderen Höhen könnte die Fehler finden, aber das Verfahren wäre sehr aufwendig. Zudem erschweren die vielen Datenausfälle und auch das Auftreten zu hoher Windgeschwindigkeitswerte in einer der anderen Meßhöhen eine solche Korrektur. Daher muß vermerkt werden, daß der 'korrigierte' Datensatz nicht frei von Ausreißern ist.

Von den korrigierten Daten werden ebenfalls einzelne Zeitreihenplots zur Überprüfung angefertigt. Dann werden die Daten zu Stundenmittelwerten zusammengefaßt und gespeichert. Hierbei werden Meßwerte, die mit einer Flag für 'Wartung' versehen sind, nicht verwendet. Das häufige Auftreten von Datenausfällen führt auch zu wenig geglätteten Stundenmittelwerten.

### 3.3.3 Qualität des Datensatzes

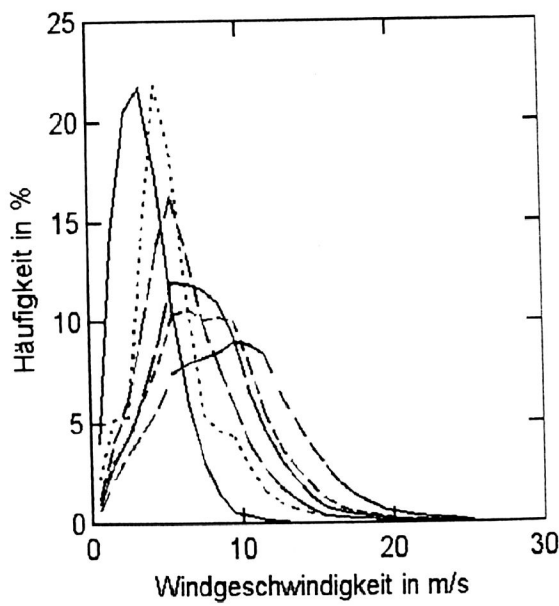
Die Meßdatenaufzeichnung beginnt erst im Juli 1981, so daß die Aussagen für das Jahr 1981 nicht repräsentativ sind. Die 10m-Mastdaten von Windgeschwindigkeit und Windrichtung fehlen in den Jahren 1981-1983, Meßdaten der Strahlungsbilanz und Niederschlagsintensität fehlen in den Jahren 1981-1984. Die Ausfälle der Meßkanäle betragen in den vier Jahren etwa 40% (in 25 m Höhe 57%, in 50 m Höhe 35%).

Stundenmittelwerte können in etwa 30% aller Fälle nicht angegeben werden und werden in 2% aller Fälle aus einem Meßwert gebildet, in 2% aus zwei, 3% aus drei, 4% aus vier, 8% aus fünf und 50% aus 6 Meßwerten gebildet. Es sind also in ca. 10% aller Fälle die Stundenmittelwerte aus einem, zwei oder drei Daten gebildet. Handelt es sich dann dabei um einen nicht erkannten Ausreißer, so ist auch der Stundenmittelwert falsch: die Spitze kann nicht entfernt werden, da kein vergleichbarer Wert in der Nähe ist und die Spitze geht ohne Filterung durch die Mittelbildung in den Stundenwert ein. Dies ist ein generelles Problem bei Datensätzen mit vielen Ausfällen und könnte nur durch ein aufwendigeres Korrekturverfahren gelöst werden.

Da die Meßwertausfälle aber eher über den gesamten Zeitraum verstreut sind, sollten die Angaben von Mittelwerten für die vier Jahre nicht allzu ungenau sein.

### 3.3.4 Statistische Ergebnisse

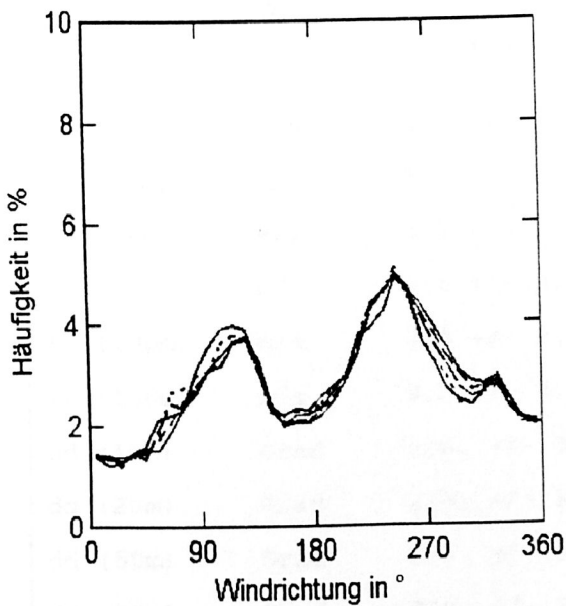
Die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und geschwindigkeitsabhängigen Richtung der Station Esenshamm für die Jahre 1981 bis 1984 sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.



**Abbildung 59**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Esenshamm (Unterweser) für die Jahre 1981 bis 1984, in 10 m Höhe nur für 1984

- - - 150m  
 — 100m  
 - - - 75m  
 - · - 50m  
 ····· 25m  
 — 10m

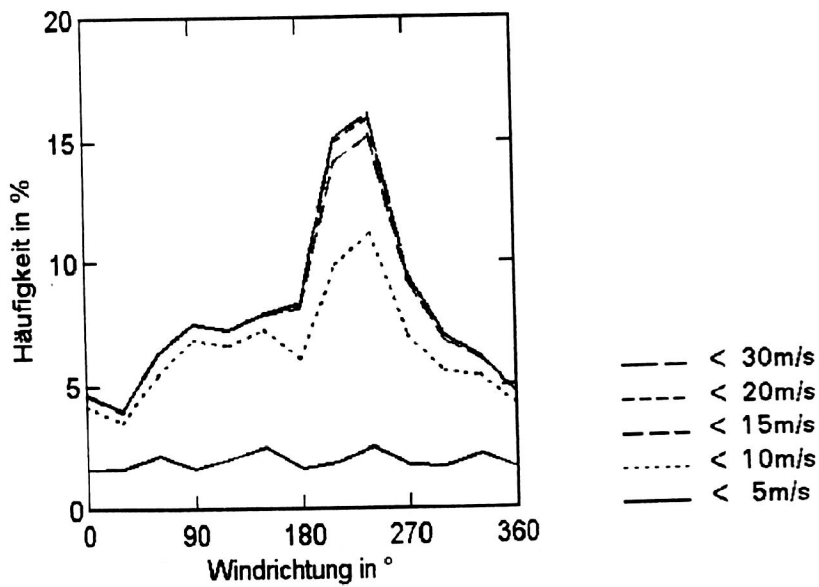


**Abbildung 60**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Esenshamm (Unterweser) für die Jahre 1981 bis 1984, in 10 m Höhe nur für 1984

- - - 150m  
 - - - 125m  
 — 100m  
 ····· 75m  
 — 50m

**Abbildung 61**



Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung an der Station Esenshamm (Unterweser) für die Jahre 1981 bis 1984 in 100 m Höhe

Die mittleren statistischen Daten für den Meßzeitraum sind in Tabelle 17 enthalten.

Größe	Einheit	Mittelwert Standardabw.	Turbul. Intensität	Anzahl	Prozent
ff (10m)	m/s	3.7 +/- 1.87m/s	0.506	27383 Werte	13.02%
ff (25m)	m/s	5.6 +/- 2.96m/s	0.528	90900 Werte	43.21%
ff (50m)	m/s	6.3 +/- 3.14m/s	0.496	135098 Werte	64.21%
ff (75m)	m/s	7.8 +/- 3.75m/s	0.479	130283 Werte	61.93%
ff (100m)	m/s	7.5 +/- 3.49m/s	0.468	131430 Werte	62.47%
ff (150m)	m/s	9.2 +/- 4.30m/s	0.465	113823 Werte	54.10%
dd (10m)	Grad	226. +/- 82.8°	1.445	27420 Werte	13.03%
dd (25m)	Grad	226. +/- 91.3°	1.593	90901 Werte	43.21%
dd (50m)	Grad	226. +/- 90.4°	1.577	135119 Werte	64.22%
dd (75m)	Grad	228. +/- 89.2°	1.557	130589 Werte	62.07%
dd (100m)	Grad	227. +/- 89.3°	1.559	131631 Werte	62.57%
dd (150m)	Grad	232. +/- 87.3°	1.523	114447 Werte	54.40%

**Tabelle 17** Mittlere statistische Größen an der Station Esenshamm für 1981 bis 1984 (10 m Höhe nur für 1984), dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, dd für Windrichtung

Im Vergleich zu den Mastdaten Lühesand mit einem langjährigen Mittelwert von 6.2 m/s in 160m Höhe erscheinen hier die Windgeschwindigkeiten relativ hoch. Das mag an dem Meßsystem Sodar liegen, das zu einer Überschätzung der mittleren Windgeschwindigkeiten führt, wenn viele Ausfälle vorliegen. Im 150 m-Niveau liegen die Ausfälle bei 45%.

In der Windrichtung ist eine Abnahme der Turbulenzintensität (Standardabweichung der Windrichtung im Bogenmaß) zu verzeichnen, das ist bei einer Zunahme der Windgeschwindigkeit auch zu erwarten und daher vom Meßsystem realistisch erfaßt. In der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung (Abb. 60) unterscheidet sich die Meßhöhe 10 m deutlich von den anderen, vom Sodar gemessenen Richtungen. Auch in 25 m Höhe gibt es noch Abweichungen. Diese sind auf die Abschattungseffekte der Gebäude in der Umgebung zurückzuführen.

Die Strömung zeigt bei geringen Windgeschwindigkeiten  $< 5 \text{ m/s}$  keine bevorzugte Richtung, erst bei größeren Windgeschwindigkeiten überwiegt ein Wind aus 200 bis 250° (Abb. 61).

Maximale Windgeschwindigkeiten können nicht ausgewertet werden, da die obere Schranke bei der Korrektur der sehr unruhigen Meßdaten diese bestimmt.

### 3.4 Die 46 m-Masten bei Bredstedt, Esens und Tating

#### 3.4.1 Standorte und Meßsystem

Im Rahmen eines Forschungsprojektes des Bundesministeriums für Forschung und Technologie wurden vom Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover (Prof. Tetzlaff) im norddeutschen Küstengebiet mehrere 46 m hohe Masten zur Windmessung aufgestellt. Die Messungen fanden von April 1979 bis Februar 1982 statt. Die Messungen und die Ergebnisse des Projektes sind in dem Forschungsbericht G.Tetzlaff et al.: 'Meteorologische Messungen zur Standortwahl für Windenergieanlagen im Küstengebiet', 1984, beschrieben. Dieser Veröffentlichung wurden die Angaben über Standorte, Masten und Instrumentierung entnommen. In einem weiteren Forschungsvorhaben der Preußen Elektra 'Nutzung der Windenergie mit großen Windkraftkonvertern' wurden diese Daten ebenfalls verwendet (Theunert et al., 1989).

Für das geplante Windarchiv wurden die Meßdaten der Standorte Bredstedt, Esens und Tating verwendet, da sie ohne längere Ausfallzeiten über den dreijährigen Meßzeitraum vorliegen.

Der Standort **Bredstedt** hat die Koordinaten  $54^{\circ}37.93'N$ ,  $8^{\circ}59.16'E$ . Er liegt ca. 1 km nordöstlich der Ortschaft Bredstedt in flachhügeliger Weidelandschaft. In unmittelbarer Umgebung ist ein lockerer Bestand niedriger Kiefern. Die Entfernung zur Küste beträgt 7 km. Die Abbildung 62 zeigt die Umgebung des Standortes.

Der Standort **Esens** ( $53^{\circ}36.54'N$ ,  $7^{\circ}37.00'E$ ) liegt etwa 10 km landeinwärts. In 20-25 m Abstand verlaufen im Osten eine höhergelegene Straßentrasse und im Norden, Westen und Süden Deiche. Die Umgebung ist offenes Weideland, im Norden moorige Landschaft. Die Abbildung 63 zeigt die Umgebung des Standortes.



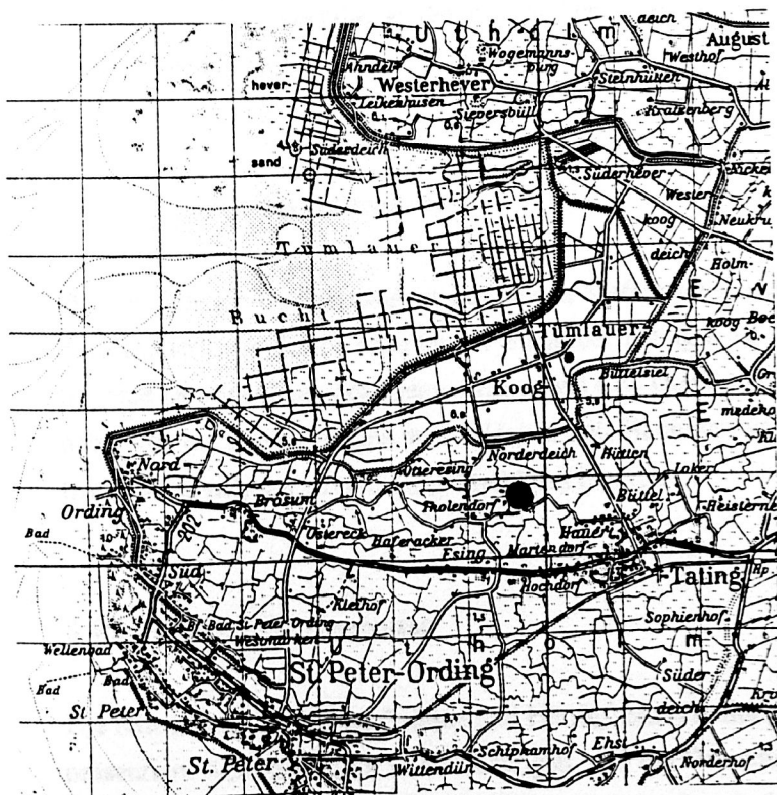
**Abbildung 62**

Standort der Station Bredstedt  
(Kartengrundlage C1518, vervielfältigt mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holstein vom 25.9.1997, 3-562.6S)



**Abbildung 63**

Standort der Station Esens  
(Kartengrundlage C2310, ver-  
vielfältigt mit Genehmigung der  
Landesvermessung und Geo-  
basisinformation Niedersach-  
sen, 52-678/97)



**Abbildung 64**

Standort der Station Tating  
(Kartengrundlage C1918,  
vervielfältigt mit Genehmigung  
des Landesvermessungsamtes  
Schleswig-Holstein vom  
25.9.1997, 3-562.6S)

Der Standort **Tating** ( $54^{\circ}20.03'N$ ,  $8^{\circ}41.05'E$ ) liegt inmitten von flacher Marschlandschaft auf einem kleinen Geesthügel (4 m ü.NN). Die Abbildung 64 zeigt die Umgebung des Standortes.

Alle drei Standorte sind mit dem gleichen Meßsystem ausgestattet. Ein 45 m hoher Dreiecksgittermast von 2 m Kantenlänge ist mit drei 3 m langen Auslegern, die in Hauptwindrichtung ausgerichtet sind, ausgerüstet. Die Meßhöhen sind 12.5 m, 26 m und 46 m bei Bredstedt, 11.5 m, 23.5 m und 46 m bei Esens und 12.5 m, 26 m und 46 m bei Tating. Die Windgeschwindigkeit wird mit Schalensternanemometern in allen Meßhöhen gemessen, die Windrichtung mit einer Windfahne in der oberen Meßhöhe. Ferner wird die Lufttemperatur in der jeweils unteren und mittleren Meßhöhe mit Platindrahtthermometern in Kugelhütten gemessen.

Registriert werden 2 min-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der Temperaturdifferenz.

#### 3.4.2 Datenaufbereitung

Die Meßdaten wurden in aufbereiteter Form als 2 min-Mittelwerte übernommen und zunächst lediglich zu 10 min-Mittelwerten verdichtet. Somit sind sie vergleichbar mit den oben beschriebenen Mast- und Sodardaten. Wie schon dem Bericht von Tetzlaff et al. (1984) zu entnehmen ist, gab es in den mittleren Meßhöhen etliche Ausfälle, so daß nur die Daten des unteren Meßniveaus und des 46 m-Niveaus gespeichert werden.

#### 3.4.3 Qualität des Datensatzes

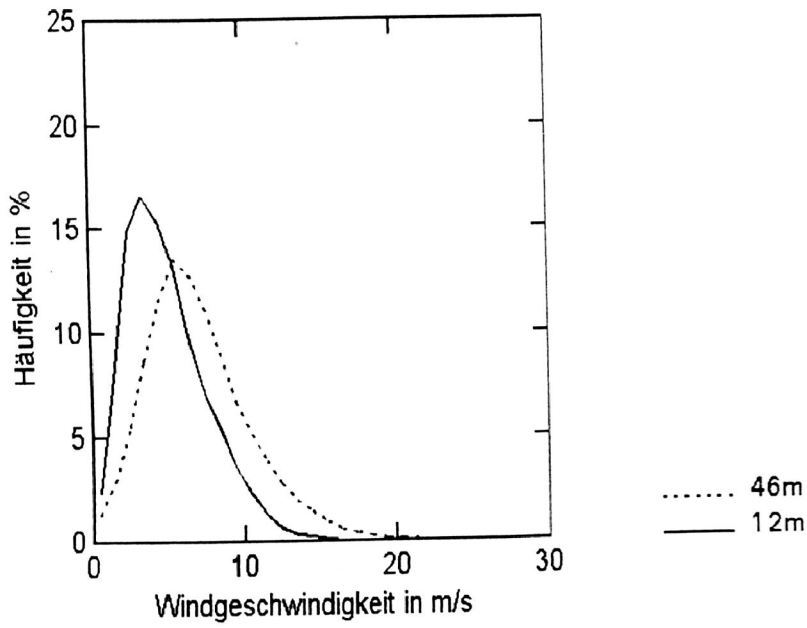
Die Ausfälle an den Stationen in den beiden Meßniveaus sind nicht allzu groß, sie liegen bei Bredstedt etwa bei 16%, bei Esens etwa bei 11% und bei Tating etwa bei 9%. Da eine Kalibrierung der Meßfühler, eine Überwachung der Messungen sowie eine Qualitätskontrolle und ggf. Korrektur der Originaldaten von der Projektgruppe an der Universität Hannover vorgenommen wurde, kann man davon ausgehen, daß es sich um zuverlässige Meßdaten handelt.

#### 3.4.4 Statistische Ergebnisse

Die mittleren statistischen Größen und Häufigkeitsverteilungen werden für die Jahre 1979 bis 1982 präsentiert. Man muß aber berücksichtigen, daß die Datenaufzeichnung erst im April bzw. Mai 1979 begonnen und im Februar 1982 endeten, so daß nur knapp drei Jahre durch Messungen abgedeckt sind. Die Abbildungen 65 bis 73 zeigen die mittleren Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit in den zwei Niveaus, der Windrichtung in 46 m Höhe und die geschwindigkeitsabhängige Richtungsverteilung ebenfalls für 46 m Höhe an den drei Meßstationen.

**Abbildung 65**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Bredstedt für die Jahre 1979 bis 1982



**Abbildung 66**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Bredstedt für die Jahre 1979 bis 1982

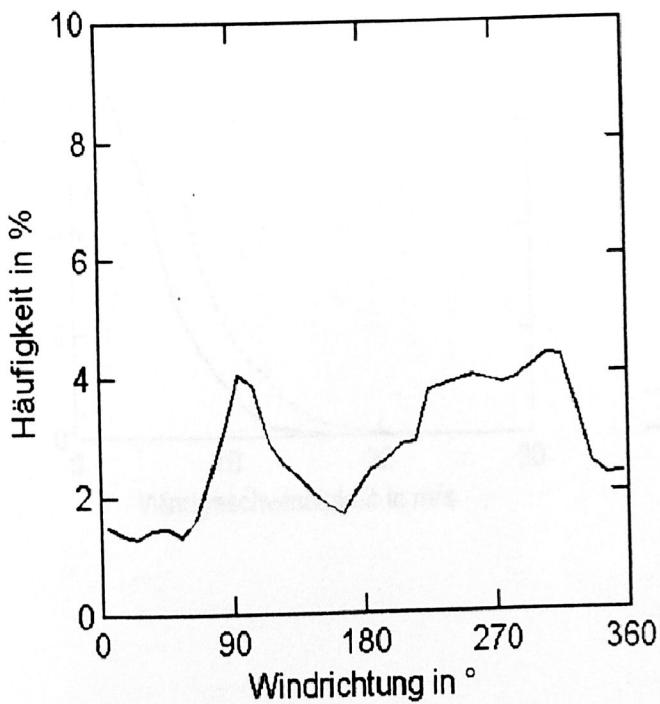


Abbildung 67

Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung an der Station Bredstedt für die Jahre 1979 bis 1982

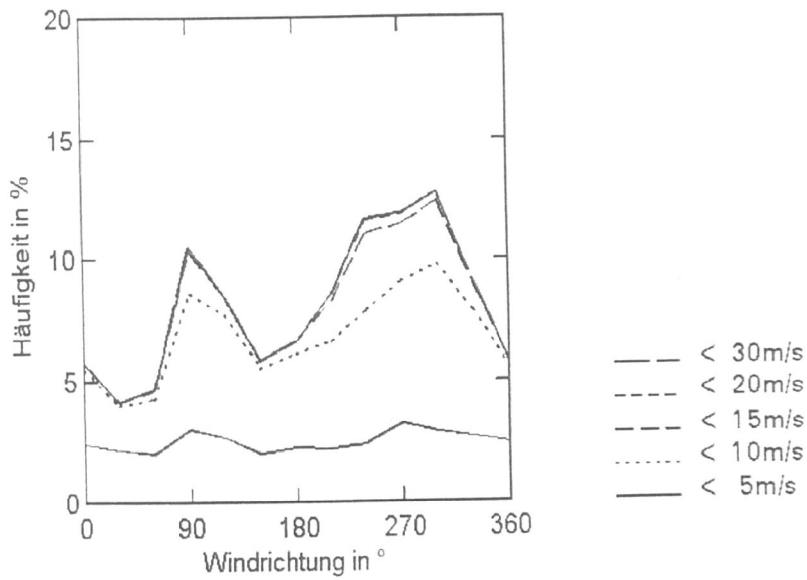
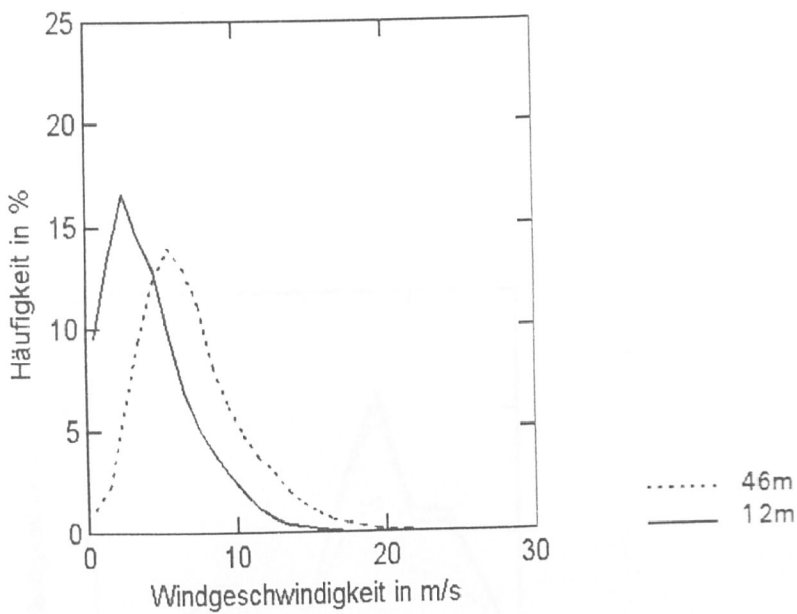


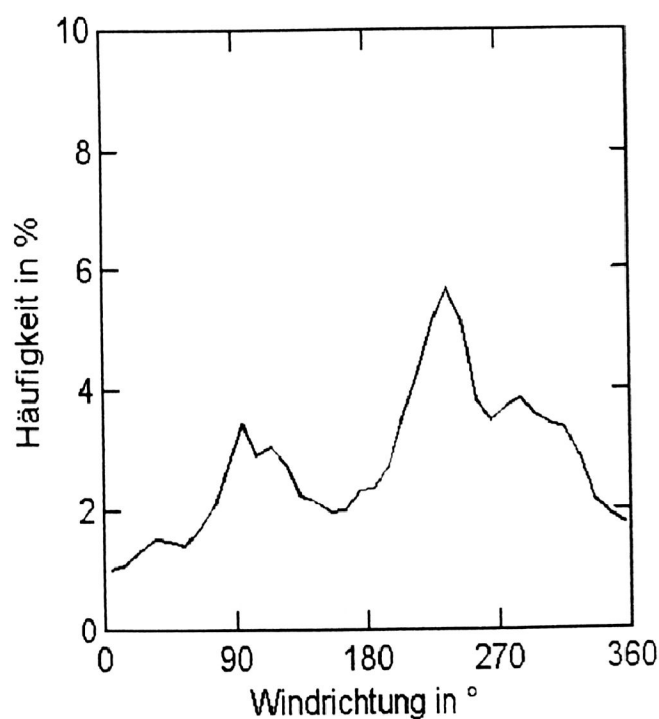
Abbildung 68

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Esens für die Jahre 1979 bis 1982



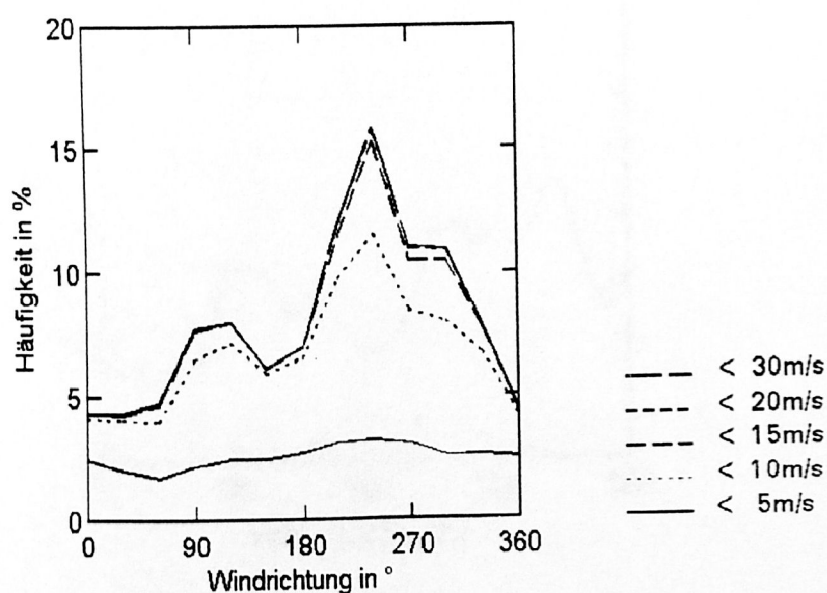
**Abbildung 69**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Esens für die Jahre 1979 bis 1982



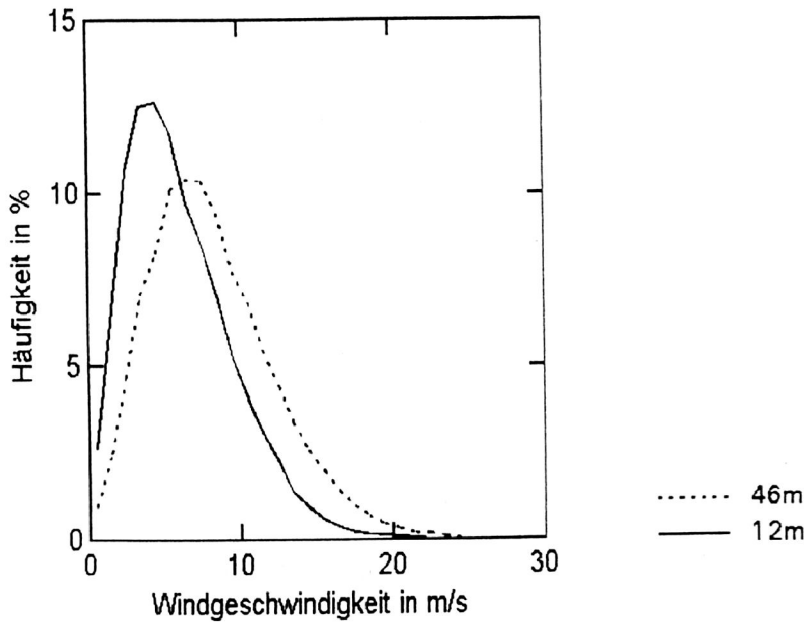
**Abbildung 70**

Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung in 46 m Höhe an der Station Esens für die Jahre 1979 bis 1982



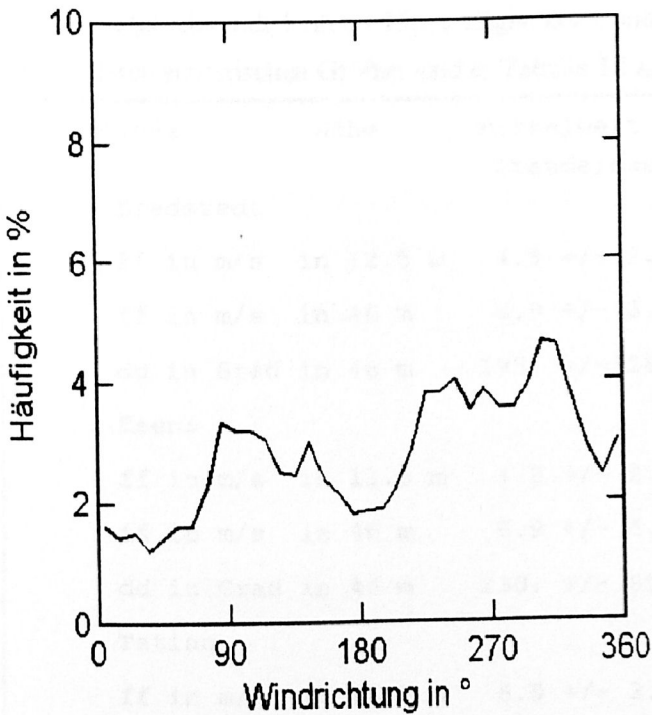
**Abbildung 71**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Tating für die Jahre 1979 bis 1982



**Abbildung 72**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Tating für die Jahre 1979 bis 1982



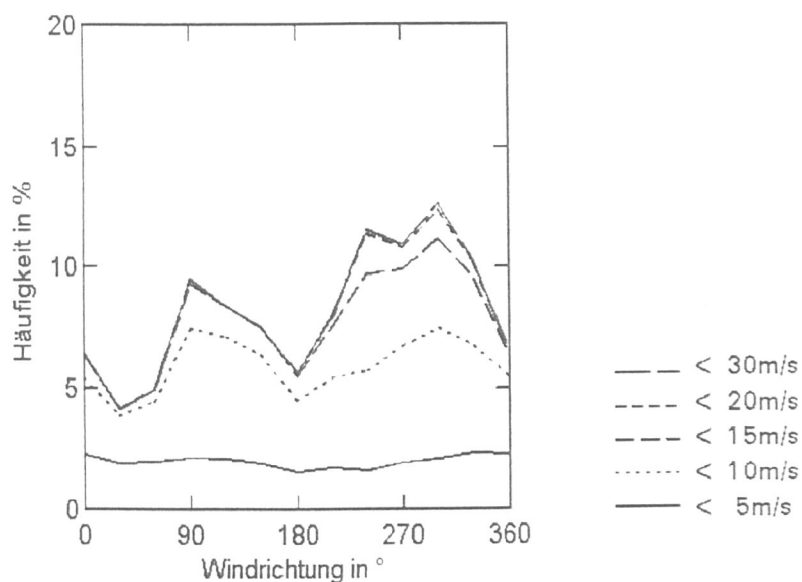


Abbildung 73

Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung in 46 m Höhe an der Station Tating für die Jahre 1979 bis 1982

Während Bredstedt und Esens ähnliche Windgeschwindigkeitsverteilungen aufweisen, beobachtet man an der küstennahen Station Tating einen größeren Anteil von Winden  $> 20 \text{ m/s}$ . Die Windrichtungsverteilungen zeigen für alle drei Stationen sekundäre Maxima bei  $100^\circ$  und breite Maxima bei  $240$  bis  $300^\circ$ . Windgeschwindigkeiten  $> 15 \text{ m/s}$  zeigen keine andere Verteilung als solche  $< 15 \text{ m/s}$ .

Die mittleren statistischen Größen sind in Tabelle 18 zusammengefaßt.

Größe	Höhe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl
Bredstedt				
ff in m/s	in 12.5 m	4.9 +/- 2.62m/s	0.535	122915 Werte
ff in m/s	in 46 m	6.9 +/- 3.34m/s	0.485	122789 Werte
dd in Grad	in 46 m	195. +/- 128.2°	2.237	123793 Werte
Esens				
ff in m/s	in 11.5 m	4.2 +/- 2.85m/s	0.682	129949 Werte
ff in m/s	in 46 m	6.9 +/- 3.38m/s	0.490	126736 Werte
dd in Grad	in 46 m	230. +/- 89.7°	1.565	131837 Werte
Tating				
ff in m/s	in 12.5 m	5.9 +/- 3.43m/s	0.576	131117 Werte
ff in m/s	in 46 m	8.0 +/- 4.02m/s	0.500	131799 Werte
dd in Grad	in 46 m	265. +/- 101.7°	1.776	132433 Werte

**Tabelle 18** Mittelwert, Standardabweichung, Turbulenzintensität und Anzahl der Werte für jede Meßhöhe an den Stationen Bredstedt, Esens und Tating, dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, dd für Windrichtung.

Man erkennt, daß der küstennächste Standort Tating die höchsten Windgeschwindigkeiten, aber auch in 46 m Höhe die größten Turbulenzintensitäten aufweist.

Die maximalen Windgeschwindigkeiten im Meßzeitraum sind mit dem Eintrittsdatum in Tabelle 19 angegeben.

Bredstedt			
12.5m	19.1m/s	26.11.1979	14.40 Uhr
46m	24.2m/s	3. 2.1981	8.20 Uhr
Esens			
11.5m	19.1m/s	23.10.1979	14.30 Uhr
46m	23.6m/s	23.10.1979	14.30 Uhr
Tating			
12.5m	23.5m/s	24.11.1981	12.10 Uhr
46m	24.6m/s	24.11.1981	4.40 Uhr

**Tabelle 19** Maximale Windgeschwindigkeiten an den Stationen Bredstedt, Esens und Tating

Tating zeigt auch die höchsten Maximalwinde, insbesondere in Bodennähe wird die sehr hohe Windgeschwindigkeit von 23.5m/s gemessen.

### 3.5 Sodar-Daten Brokdorf

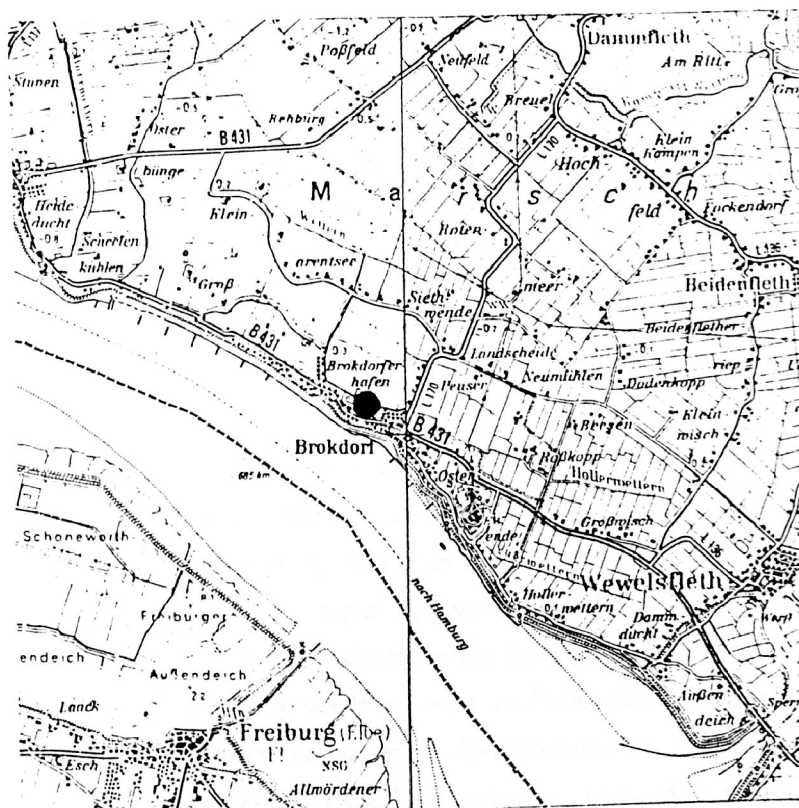
#### 3.5.1 Standort und Meßsystem

Beim Kernkraftwerk Brokdorf betreibt die Preußen Elektra AG zur Überwachung des Windfeldes ein

Doppler-Sodar, das bis in große Höhen die drei Windkomponenten mißt. Es handelt sich um ein Meßsystem der Firma Metek in Elmshorn. Das Meßprinzip ist das gleiche wie in 3.3.1 beschrieben.

Der Standort hat die Koordinaten:  $53^{\circ} 37' 0'' \text{ N}$ ,  $9^{\circ} 33' 0'' \text{ E}$ . Die Höhe beträgt 1.5 m ü.NN. Das Sodar steht ca. 300 m nordnord-östlich des Kernkraftwerkskomplexes. Abbildung 74 zeigt die Umgebung des Standortes.

Die Daten liegen ab Februar 1990 vor und wurden bis einschließlich 1996 übernommen. Der Umfang der Originaldaten beträgt 320 MB. Die Meßhöhen an diesem Standort sind von 40 m an in 20 m-Intervallen bis 280 m Höhe.



**Abbildung 74**

Standort des Sodar-Gerätes beim Kernkraftwerk Brokdorf, (Kartengrundlage C2318/2322, vervielfältigt mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holstein vom 25.9.1997, 3-562.6S)

#### 3.5.2 Datenaufbereitung

Sodar-Daten der Firma Metek wurden für insgesamt vier Standorte, Brokdorf, Stade, Unterweser und Emsland verwendet. Da alle Datensätze in ähnlicher Form vorliegen, wird an dieser Stelle die Datenaufbereitung detailliert beschrieben, für die anderen Standorte wird auf diesen Abschnitt verwiesen und sonst nur die standortspezifischen Besonderheiten geschildert.

Die Meßdaten wurden als Monatsfiles mittels ftp (file transfer protocol) direkt auf den Großrechner überspielt. Sie liegen als 10 min-Mittelwerte vor. Zur Archivierung werden die Meßgrößen Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Standardabweichung des Vertikalwindes von 40 m bis 160 m verwendet und in Jahresfiles zusammengefaßt. Durch diese Auswahl reduziert sich der ursprüngliche Datensatz auf 47 MB.

Die gelesenen Meßdaten werden in standardisierte Jahresfiles, die mit Fehlerkennungen vorbesetzt sind, eingefügt. Dabei werden zusätzliche Zeilen entfernt, falsche Datums- und Zeitangaben geprüft und ggf. korrigiert. Die Originaldaten liegen zwar als 10 min-Mittelwerte vor, dabei können aber gelegentlich Zeitumstellungen vorkommen, so daß einmal mehr als 10 Minuten einmal weniger als 10 Minuten zwischen den Intervallen liegen. In Einzelfällen können auch wenige Datensätze im Minutenabstand gespeichert sein. Die Ursache ist die Rechnersteuerung, bei der ein Nachstellen der Uhr oder wiederholte Abfragen der Daten vorkommen können. Bei der Übertragung in die Jahresfiles wird die Datenzeile dem nächstgelegenen 10 min-Intervall zugeordnet, überzählige Datenzeilen werden verworfen.

Der Originaldatensatz enthält Fehlermarken ('error flag') für die drei Antennen, die die Güte des jeweiligen 10 min-Mittelwertes angeben. Da eine Antenne in senkrechter Richtung ausgerichtet ist und somit die vertikale Windkomponente erfaßt, ist die error flag dieser Antenne ausschlaggebend für die Vertikalwindkomponente und die error flags der beiden anderen Antennen für die horizontale Windgeschwindigkeit und -richtung. Bei einer Fehlermarke größer 40 wird der jeweilige Meßwert verworfen und die Fehlerkennung eingesetzt. Ist jedoch die Fehlermarke größer als 1000, so bedeutet das, daß kein Rauschspektrum berechnet werden konnte. Nach Angaben der Firma Metek (Kirtzel, 1997) ergab aber eine Überprüfung der Windwerte bei fehlendem Rauschspektrum keine signifikante Abweichung von anderen Werten, bei denen das Rauschspektrum ausgewertet werden konnte. Daher werden bei error flags größer als 1000 die Meßwerte nicht verworfen. Die vorliegenden Brokdorf-Daten haben in den ersten vier Jahren (1990-1993) stets error-flags = Null, so daß hier nicht schon beim Einlesen Meßdaten eliminiert werden können.

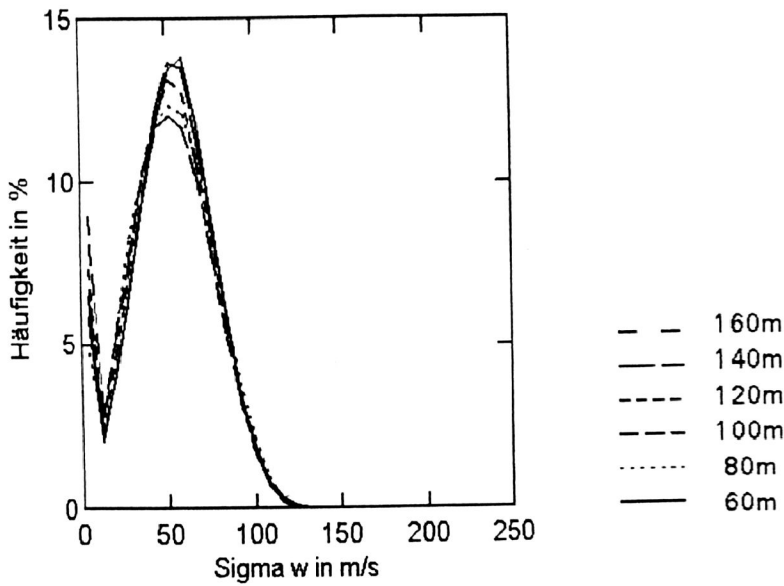
Die Jahresdatensätze werden anschließend überprüft, um fehlerhafte Daten auszuschneiden. Dazu werden - wie dies auch in 3.2.2 und 3.3.2 beschrieben ist - Häufigkeitsverteilungen der Meßgrößen erstellt, um absolute Fehlergrenzen festlegen zu können, und Häufigkeitsverteilungen der Differenzen der Meßgrößen erstellt, um plausible Abweichungen vom Vorgängerwert festlegen zu können.

Abbildung 75 zeigt als Beispiel der Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung des Vertikalwindes der unkorrigierten Daten für das Jahr 1992. Die Häufigkeitsverteilung von  $\sigma_w$  weist für die ersten vier Jahre zu viele Werte = Null auf, die durch Fehlerkennungen ersetzt werden müssen. Dieser Fehler hängt wahrscheinlich mit den fehlenden error-flags zusammen.

Die Abbildungen 76 bis 78 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Differenzen der Windgeschwindigkeits- und Windrichtungswerte und der Standardabweichung des Vertikalwindes, die zur Bestimmung der Schrankenwerte im Korrekturverfahren verwendet werden.

**Abbildung 75**

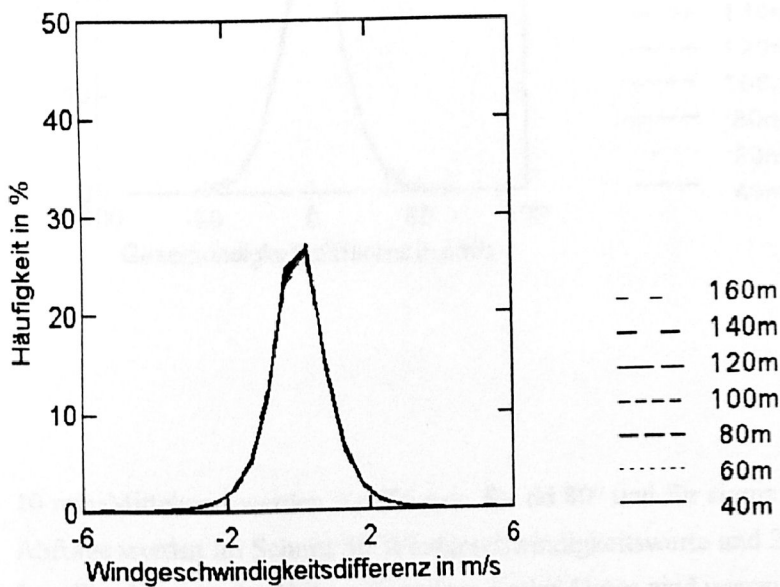
Häufigkeitsverteilung der Standardabweichung des Vertikalwindes an der Station Brokdorf im Jahr 1992



Es fällt auf, daß weiterhin große absolute Differenzen vorkommen, so etwa Windrichtungs-differenzen größer als  $100^\circ$ . Der Grund ist, daß Sodar-Meßwerte - wie bereits in 3.3.2 erwähnt - eine größere Variabilität als konventionelle Meßdaten besitzen, daher sind Ausreißerwerte schwer zu finden. Als zulässige maximale Abweichung vom vorhergehenden

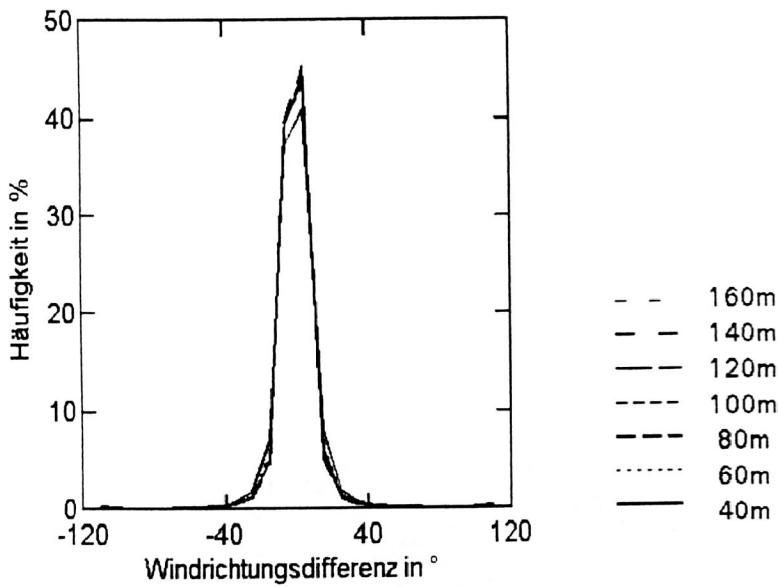
**Abbildung 76**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeitsdifferenz an der Station Brokdorf, Beispiel für das Jahr 1990



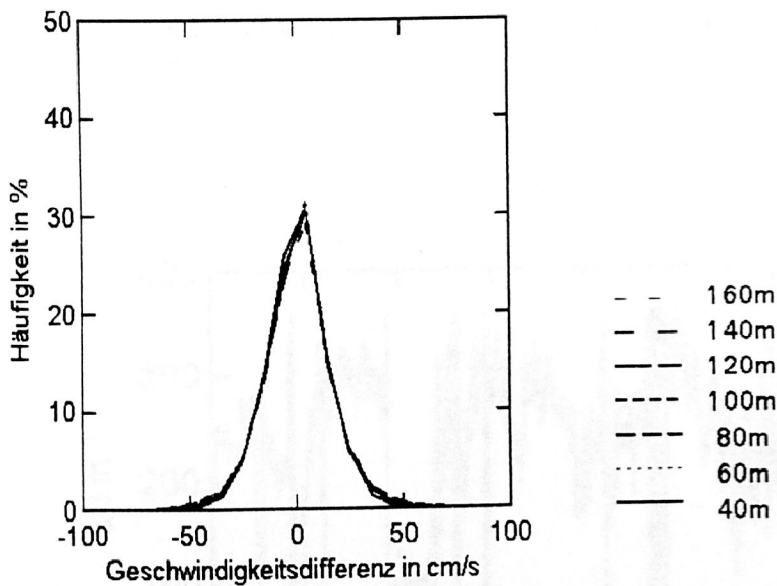
**Abbildung 77**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtungsdivergenzen an der Station Brokdorf, Beispiel für das Jahr 1990



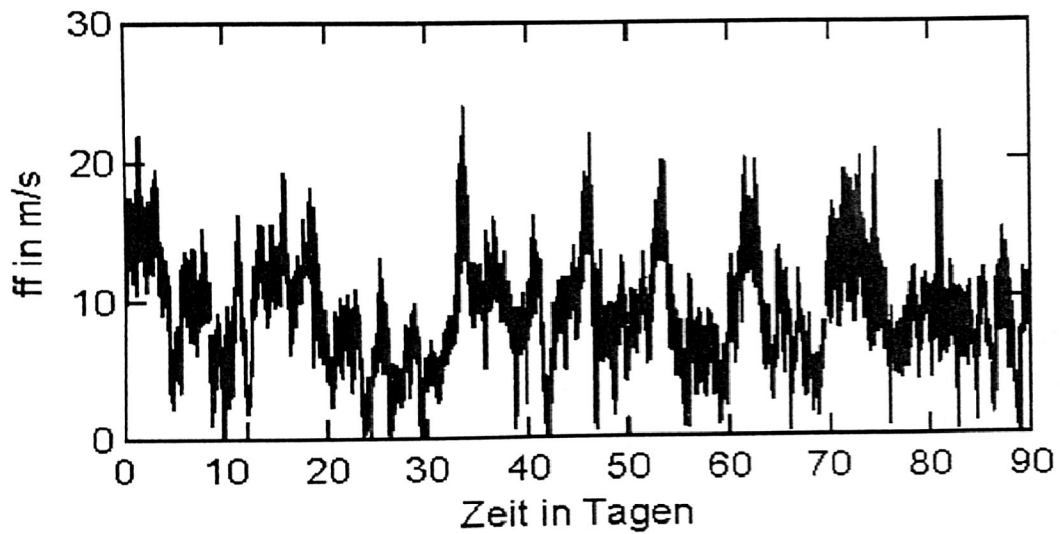
**Abbildung 78**

Häufigkeitsverteilung der Differenzen der Standardabweichungen des Vertikalwindes an der Station Brokdorf, Beispiel für das Jahr 1990



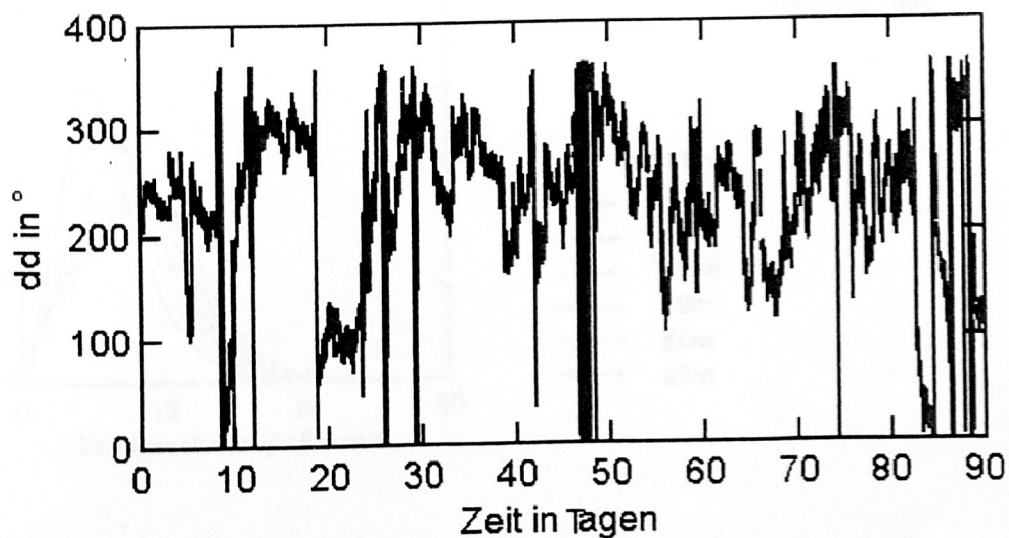
10 min-Mittelwert werden für  $\bar{u}$  5 m/s, für  $\bar{d}$  80° und für  $\sigma_w$  80 cm/s gewählt. Durch diese Abfrage werden im Schnitt 50 Windgeschwindigkeitswerte und 250 Windrichtungswerte - ohne erkennbare Tendenz mit der Höhe - eliminiert. Sodar-Daten sind wegen ihrer großen Variabilität nicht ge-

eignet, maximale Windgeschwindigkeitsdifferenzen - also maximale Beschleunigungen - auszuwerten oder maximale Windrichtungsdifferenzen - also maximale Winddrehungen, da diese Werte automatisch durch die vorgegebenen Schrankenwerte bestimmt wären.



**Abbildung 79**

Verlauf der Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe an der Station Brokdorf vom 1. Januar bis 30. März 1992



**Abbildung 80**

Verlauf der Windrichtung in 100 m Höhe an der Station Brokdorf vom 1. Januar bis 30. März 1992

Von den korrigierten Daten werden stichprobenartig Zeitreihenplots zur Kontrolle angefertigt. Die Abbildungen 79 und 80 zeigen je ein Beispiel. Dann werden Stundenmittelwerte berechnet und beide Datensätze gespeichert.

### 3.5.3 Qualität des Datensatzes

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Besonderheiten der Sodar-Daten bestimmen auch die Qualität des Datensatzes. Die Variabilität der Daten ist groß, die 10 min-Mittelwerte sind nicht geeignet, maximale Beschleunigungen oder Winddrehungen auszuwerten. Die Stundenmittelwerte dagegen sind von guter Qualität.

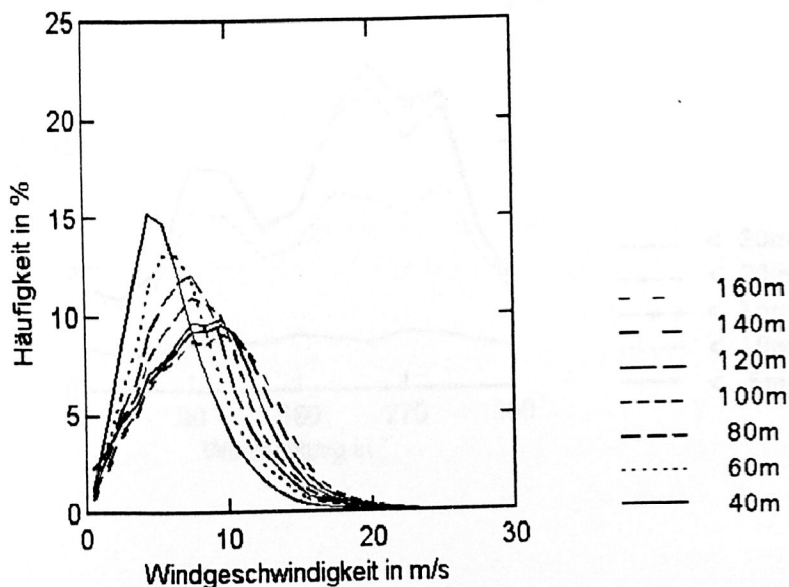
Die Ausfälle bei den Brokdorf-Daten sind gering. Die Ausfälle pro Meßkanal liegen für den sieben Jahre umfassenden Zeitraum bei weniger als 7% unterhalb von 100 m Höhe und steigen bis auf 16% in 160 m Höhe. Damit liegen in 80% aller Fälle vollständige Windprofile - mit Geschwindigkeit und Richtung - von 40 m bis 160 m in 20 m-Schritten vor. ungewöhnlich umfangreicher Datensatz.

### 3.5.4 Statistische Ergebnisse

Die mittleren Häufigkeitsverteilungen für den Meßzeitraum sind in den Abbildungen 81 bis 83 gezeigt.

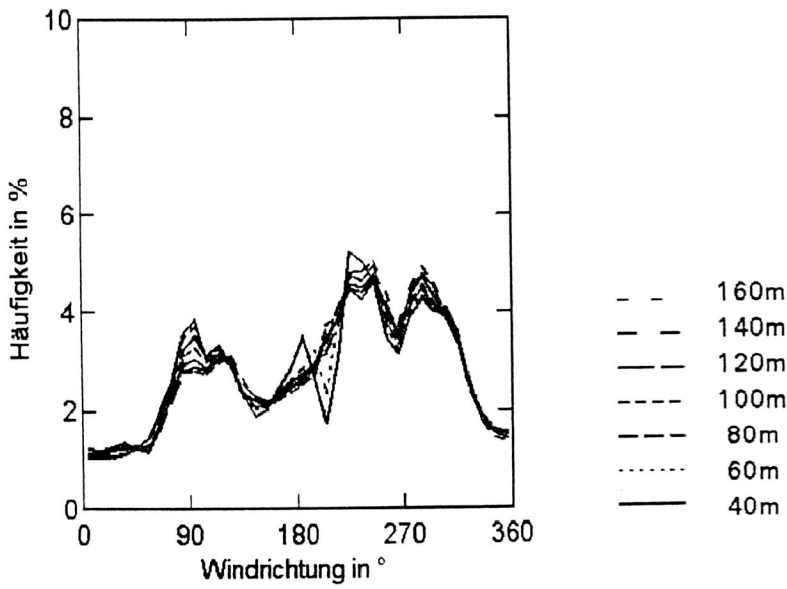
**Abbildung 81**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Brokdorf für die Jahre 1990 bis 1996



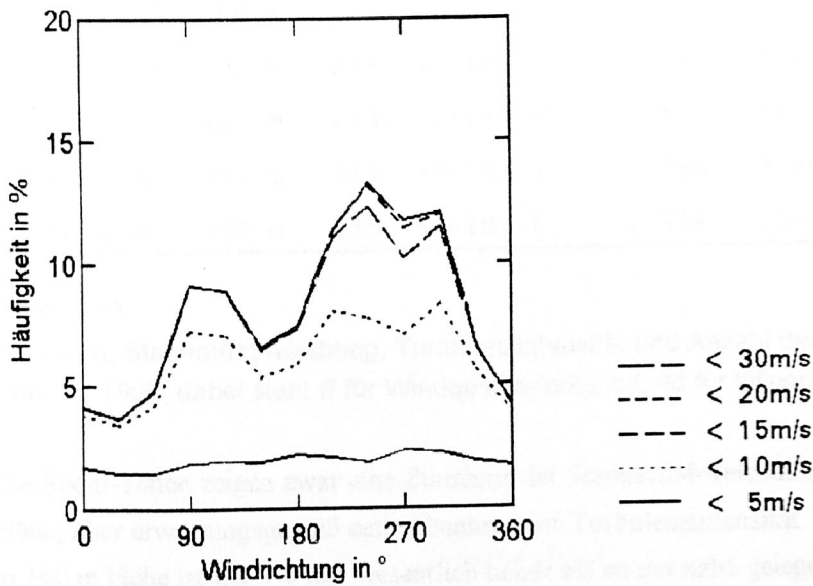
**Abbildung 82**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Brokdorf für die Jahre 1990 bis 1996



**Abbildung 83**

Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung an der Station Brokdorf für die Jahre 1990 bis 1996



Man erkennt deutlich in Abbildung 81 die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Abbildung 82 zeigt eine sehr einheitliche Windrichtungsverteilung mit der Höhe, lediglich in den unteren Meßhöhen 40 und 60 m ist eine Abschattung des Sodar-Gerätes aus 205° durch die Reaktorgebäude erkenn-

bar, statt dessen sind die benachbarten Richtungen 195 und 215° häufiger vertreten als in den größeren Höhen. Die geschwindigkeitsabhängige Richtungsverteilung zeigt für Windgeschwindigkeiten >10 m/s, noch deutlicher bei Wind >15 m/s eine Bevorzugung westlicher Richtungen.

Tabelle 20 gibt die mittleren statistischen Größen an.

Größe	Höhe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl der Werte	Prozent
ff(m/s)	40 m	6.0 +/- 3.08m/s	0.513	348410	94.62%
ff(m/s)	60 m	6.8 +/- 3.40m/s	0.498	345459	93.82%
ff(m/s)	80 m	7.4 +/- 3.56m/s	0.483	343212	93.21%
ff(m/s)	100 m	7.8 +/- 3.73m/s	0.477	341509	92.75%
ff(m/s)	120 m	8.1 +/- 3.97m/s	0.490	330492	89.76%
ff(m/s)	140 m	8.6 +/- 3.96m/s	0.460	319130	86.67%
ff(m/s)	160 m	9.0 +/- 4.08m/s	0.455	309825	84.14%
dd(Grad)	40 m	212. +/-106.8°	1.865	348060	94.53%
dd(Grad)	60 m	212. +/-106.2°	1.854	345186	93.75%
dd(Grad)	80 m	212. +/-105.7°	1.845	342909	93.13%
dd(Grad)	100 m	213. +/-105.1°	1.834	341188	92.66%
dd(Grad)	120 m	213. +/-103.9°	1.814	330146	89.66%
dd(Grad)	140 m	214. +/-103.5°	1.806	318887	86.61%
dd(Grad)	160 m	215. +/-102.8°	1.794	309608	84.09%

**Tabelle 20**

Mittelwert, Standardabweichung, Turbulenzintensität und Anzahl der Werte für die Station Brokdorf, 1990 bis 1996, dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, dd für Windrichtung.

Die Sodar-Daten zeigen zwar eine Zunahme der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe, aber erwartungsgemäß eine Abnahme der Turbulenzintensität. Die mittlere Windgeschwindigkeit in 160 m Höhe ist mit 9.0 m/s wesentlich höher als an der nahe gelegenen Station Lühesand. Das kann ein weiteres Indiz für die Überschätzung der Windgeschwindigkeit durch Sodar-Messungen sein.

### 3.6 Sodar-Daten Stade

#### 3.6.1 Standort und Meßsystem

Beim Kernkraftwerk Stade an der Elbe wird seit 1993 von der Preußen Elektra das Windfeld mit einem Sodar-Gerät gemessen. Vorher hatte das Niedersächsische Landesamt für Ökologie an einem nahegelegenen Standort Mastmessungen von 1981 bis 1993 betrieben (s. 3.2). Der Standort hat die Koordinaten  $53^{\circ} 37.3' \text{ N}$ ,  $9^{\circ} 32.0' \text{ E}$  und liegt ca. 300 m nordnordwestlich der Reaktorgebäude direkt hinter dem Elbdeich. Die Umgebung des Standortes ist in Abbildung 84 zu sehen.

Die Sodar-Messungen werden von der Firma Metek (Elms-horn) durchgeführt. Es handelt sich um den gleichen Typ, wie er in Brokdorf eingesetzt wird (vgl. 3.5). Die Meßhöhen sind in Stade

50 m und in 25 m-Stufen bis 250m. Der Originaldatensatz der Jahre 1993 bis 1996 umfaßt 140 MB.

#### 3.6.2 Datenaufbereitung

Es liegen Meßdaten für die Jahre 1992 bis 1996 vor. Die gelieferten Daten werden in der gleichen Weise behandelt, wie es in 3.5.2 für die Brokdorf-Daten beschrieben ist. Aus den Originaldaten werden Jahresfiles erstellt, die geprüft und korrigiert werden. Die Originaldaten sind in den Jahren 1992 und 1993 in MEZ gespeichert, von 1994 bis 1996 in MEZ und MESZ. Die Umstellung erfolgt jeweils um 2 Uhr. Die zu archivierenden Daten werden in MEZ gespeichert.

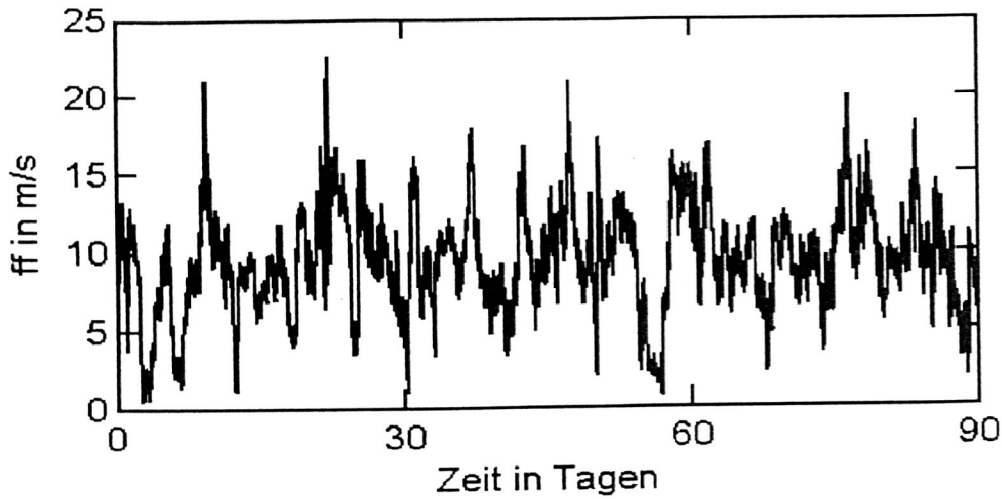
Die Abbildungen 85 und 86 zeigen beispielhaft die Zeitreihen der Stundenwerte der Windgeschwindigkeit



**Abbildung 84**

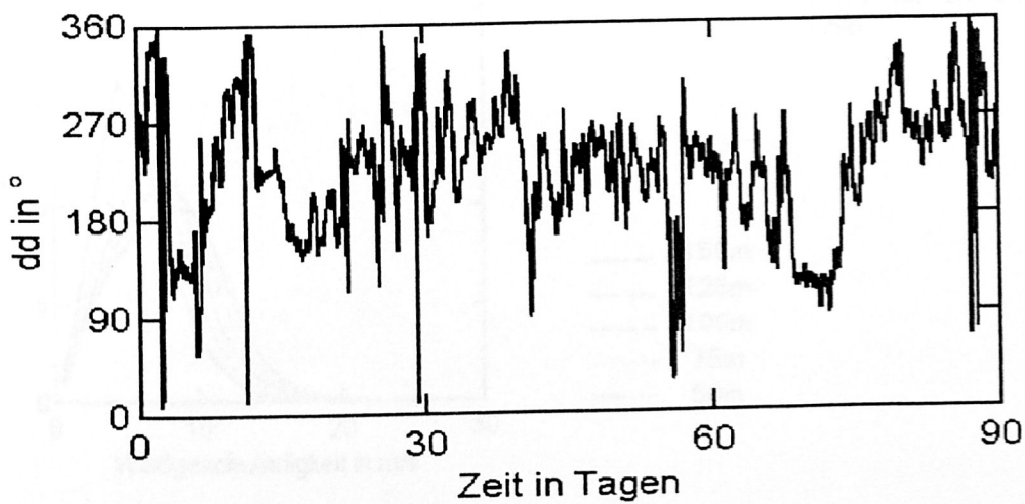
Standort des Kernkraftwerkes Stade und des Sodar-Gerätes (Kartengrundlage C2318/C2322, vervielfältigt mit Genehmigung der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, 52-678/97)

und Windrichtung in 100 m Höhe für die ersten drei Monate des Jahres 1995. Es handelt sich um einen Zeitabschnitt mit überwiegendem südwestlichem Wind.



**Abbildung 85**

Verlauf der Windgeschwindigkeit an der Station Stade im 100 m Höhe vom 1. Januar bis 30. März 1995



**Abbildung 86**

Verlauf der Windrichtung an der Station Stade in 100 m Höhe vom 1. Januar bis 31. März 1995

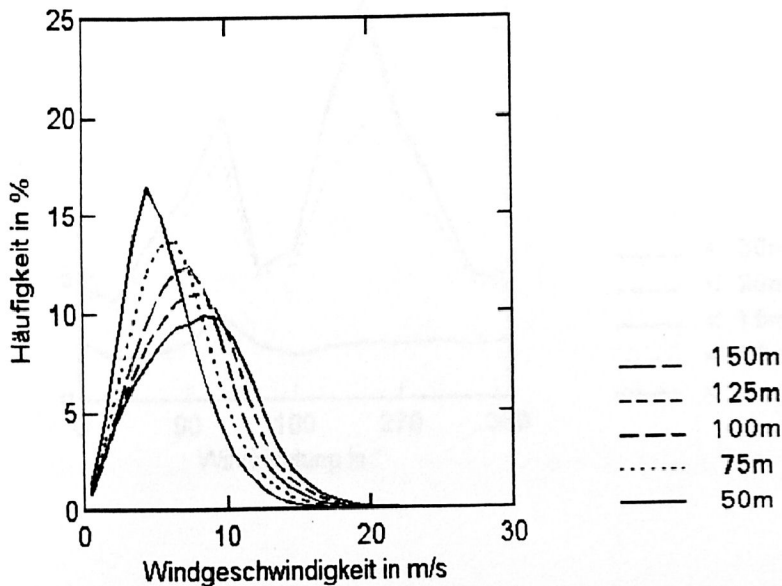
### 3.6.3 Qualität der Daten

Im Vergleich zu konventionellen Meßdaten zeigen die Stade-Daten eine größere Variabilität der 10 min-Mittelwerte, wie dies allgemein in 3.5.2 geschildert ist. Im übernächsten Abschnitt wird darauf noch näher eingegangen.

Die Ausfallzeiten der Meßwerte sind gering, allerdings fehlen im Jahr 1992 etwa 2 Monate die Daten, 1996 etwa 3 Monate. In diesen Jahren sind die statistischen Ergebnisse wie Mittelwerte, Standardabweichungen und Häufigkeitsverteilungen nicht repräsentativ. In den anderen Jahren liegen die Ausfallzeiten bei 6 bis 11%, in den oberen Höhe von 150 m auch bei 15%. Insgesamt liegen für den fünfjährigen Meßzeitraum für 80% aller Fälle vollständige Vertikalprofile des Windes bis 150 m Höhe vor. Somit ist der Gesamtzeitraum gut abgedeckt.

### 3.6.4 Statistische Ergebnisse

Wie für die anderen Stationen werden hier für den Meßzeitraum Häufigkeitsverteilungen und statistische Mittelwerte gezeigt.

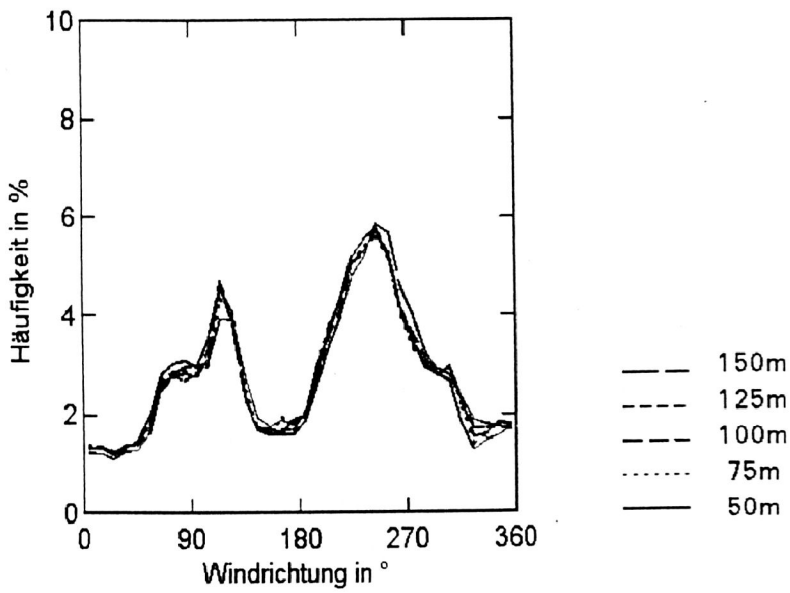


**Abbildung 87**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Stade für die Jahre 1992 bis 1996

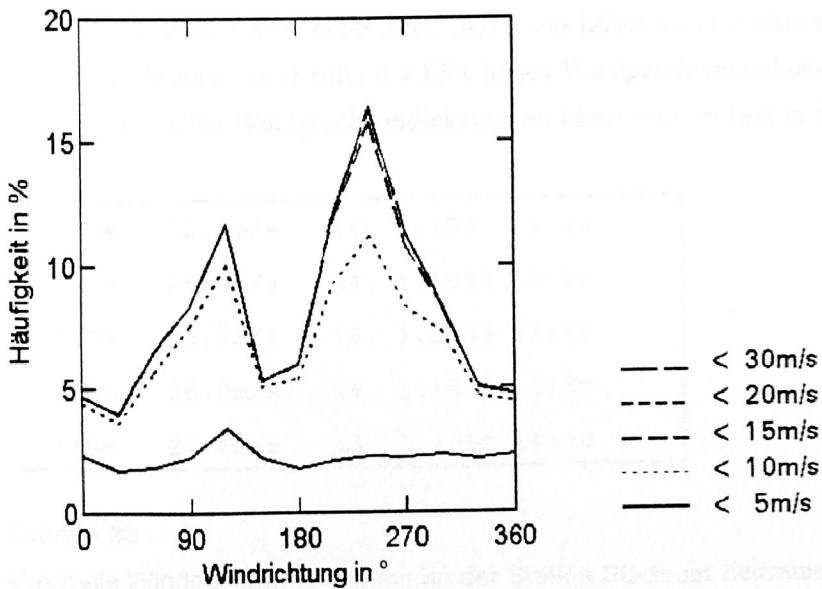
**Abbildung 88**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Stade für die Jahre 1992 bis 1996



**Abbildung 89**

Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung an der Station Stade in 100 m Höhe für die Jahre 1992 bis 1996



An dieser Station gibt es offensichtlich keine Abschattungseffekte wie an der Station Brokdorf. Mittelwerte und Standardabweichungen des Windes sind in Tabelle 21 angegeben.

Größe	Höhe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl	Prozent
ff(m/s)	in 50 m Höhe	5.6 +/- 2.72m/s	0.485	229047	87.06%
ff(m/s)	in 75 m Höhe	6.4 +/- 2.97m/s	0.463	230946	87.78%
ff(m/s)	in 100 m Höhe	7.1 +/- 3.20m/s	0.452	229645	87.29%
ff(m/s)	in 125 m Höhe	7.6 +/- 3.45m/s	0.454	227045	86.30%
ff(m/s)	in 150 m Höhe	8.0 +/- 3.73m/s	0.465	222567	84.60%
dd(Grad)	in 50 m Höhe	205. +/- 98.6°	1.721	228824	86.98%
dd(Grad)	in 75 m Höhe	206. +/- 99.1°	1.730	230736	87.70%
dd(Grad)	in 100 m Höhe	207. +/- 99.4°	1.736	229491	87.23%
dd(Grad)	in 125 m Höhe	207. +/- 99.2°	1.731	226861	86.23%
dd(Grad)	in 150 m Höhe	207. +/- 98.6°	1.721	222397	84.53%

**Tabelle 21**

Mittelwert, Standardabweichung, Turbulenzintensität und Anzahl der Werte für die Station Stade, 1992 bis 1996, dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, dd für Windrichtung

Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind etwas höher als in Brokdorf, das näher an der Küste liegt und durch seine Position am Ostufer der Elbe hohen Windgeschwindigkeiten aus Nordwest stärker ausgesetzt ist. Die maximalen Windgeschwindigkeiten im Meßzeitraum sind in Tabelle 22 angegeben.

50m	22.2m/s	14. 1.1993	1:10
75m	25.3m/s	24. 1.1993	16:10
100m	26.7m/s	13. 1.1993	23:40
125m	26.0m/s	14. 1.1993	1:30
150m	27.6m/s	13. 3.1994	19:40

**Tabelle 22**

Maximale Windgeschwindigkeiten an der Station Stade im Zeitraum 1992 bis 1996 mit Datumsangabe

### 3.6.5 Vergleich der Sodar-Daten Stade mit den Mastdaten Lühesand

Für die Jahre 1992 und 1993 besteht die Möglichkeit, die Sodar-Daten am Standort Stade mit den Mastdaten Lühesand zu vergleichen. Dazu eignen sich von den Mastdaten nur die in 62 m Höhe und in 114 m Höhe, da für die obere Höhe 160 m die Südanströmung ausfällt.

Zum Vergleich der mittleren Windgeschwindigkeiten werden die Sodar-Werte durch lineare Interpolation

auf 62 m und 114 m Höhe umgerechnet. Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse für das Jahr 1993. Man erkennt, daß die mit dem Sodar gemessenen Geschwindigkeiten höher sind, die Standardabweichungen aber nicht, so daß sich geringere Turbulenzintensitäten ergeben.

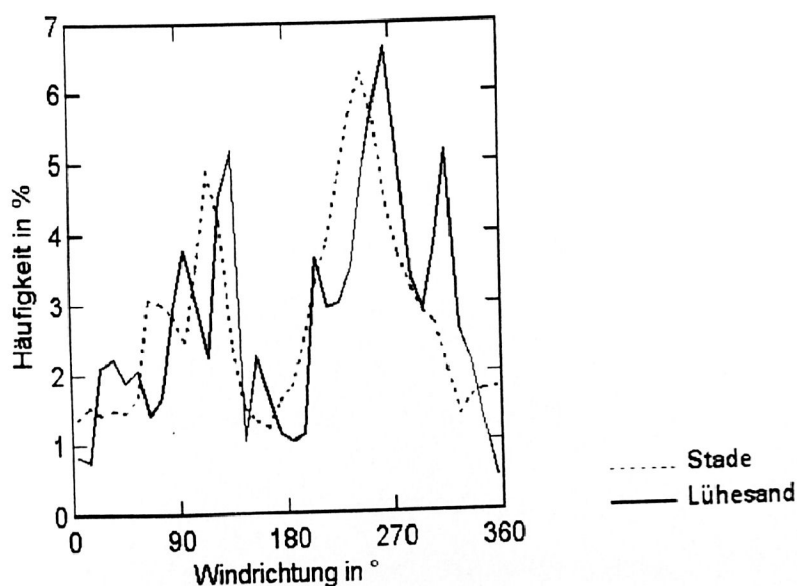
	Lühesand		Stade	
	62m	114m	62m	114m
ff	5.0	5.4	5.7	6.4
sigff	2.71	2.71	2.75	3.01
TI	0.539	0.503	0.480	0.471

**Tabelle 23**

Vergleich der Windgeschwindigkeitsdaten an den Stationen Lühesand und Stade für das Jahr 1993, dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, sigff für die Standardabweichung von ff, TI für die Turbulenzintensität.

Die Ausfälle in diesem Jahr an beiden Stationen sind gering, sie liegen unter 5%. Die Windrichtungsverteilungen für 114 m Höhe in Lühesand und 100 m Höhe in Stade sind in Abbildung 90 gezeigt.

**Abbildung 90**



Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in 114 m Höhe an der Station Lühesand und in 100 m Höhe an der Station Stade für das Jahr 1993

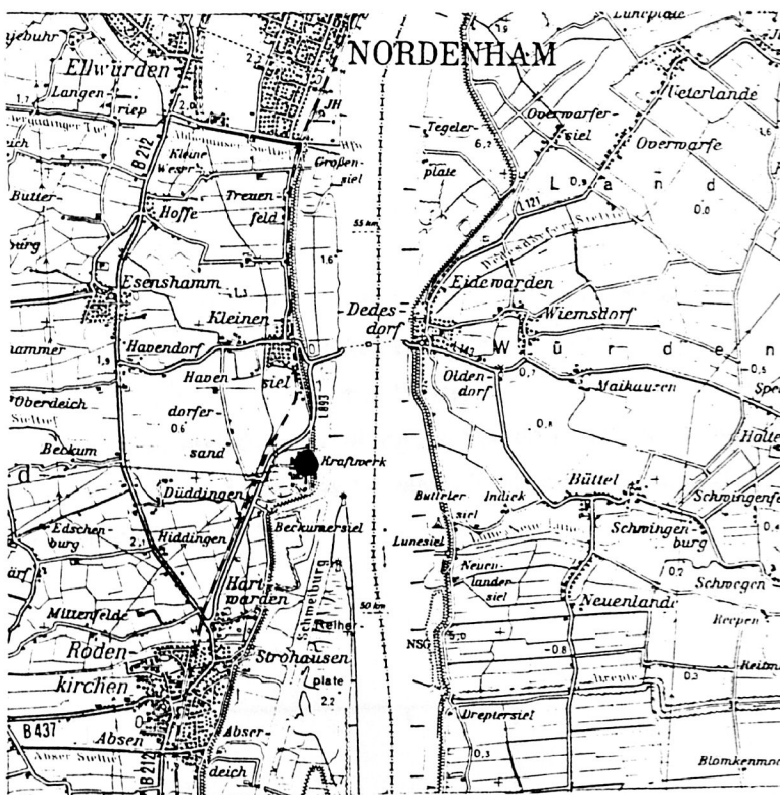
Für die Windrichtung ist die Höhendifferenz von 14 m unerheblich, da die Sodar-Messungen Stade ohnehin eine nahezu höhenkonstante Richtungsverteilung aufweisen. Man erkennt in Abbildung eine ähnliche Struktur der Windrichtungsverteilung, aber eine systematische Verschiebung der Mastmessungen zu 'kleineren' Windrichtungen (=Rückdrehung). Diese systematische Verschiebung kann in den unter-

schiedlichen Meßsystemen oder in der problematischen Gittermastmessung Lühesand begründet sein. Die für das Jahr 1993 gezeigten Unterschiede zeigen sich ebenso 1992.

### 3.7 Sodar-Daten Esenshamm (Unterweser) II

#### 3.7.1 Standort und Meßsystem

Bei dem nahe Esenshamm an der Weser gelegenen Kernkraftwerk Unterweser wird seit 1992 von der Preußen Elektra ein Sodar-Gerät betrieben. Die Koordinaten des Standorts sind  $53^{\circ} 26.1' \text{ N}$ ,  $08^{\circ} 28.9' \text{ E}$ . Der Meßort liegt etwa 300 m südwestlich der Reaktorgebäude. Die weitere Umgebung des Standortes ist in Abbildung 91 zu sehen.



**Abbildung 91**

Standort des Kernkraftwerks und des Sodar-Gerätes bei Esenshamm (Unterweser), (Kartenausschnitt C2714, vervielfältigt mit Genehmigung der Landesvermessung und Geoinformationsbasis Niedersachsen 52-678/97)

#### 3.7.2 Datenaufbereitung

Die Originaldaten werden, wie in 3.5.2 beschrieben, aufbereitet. Der korrigierte Datensatz der 10 min-

Es handelt sich um ein Doppler-Sodargerät der Firma Metek (Elmshorn), das in 3.5.1 beschrieben ist. Die Meßhöhen in Esenshamm betragen 50m und in 25 m-Schritten aufwärts bis 250 m. Der Originaldatensatz umfaßt 140 MB für die Jahre 1992 bis 1996.

Bis Ende 1989 war dort ein anderes Sodar-Gerät vom Niedersächsischen Landesamt für Ökologie, Hannover betrieben worden (s.3.3). Da sich die Meßzeiten nicht überschneiden, können keine direkten Vergleiche zwischen den Meßreihen gezogen werden.

Mittelwerte über die fünf Jahre umfaßt 25 MB.

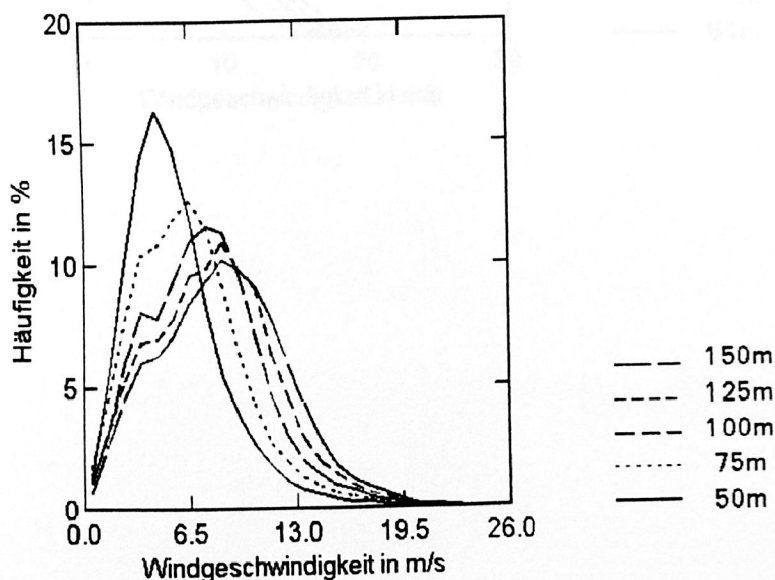
Die Originaldaten sind in MEZ und MESZ gespeichert, sie werden zur Archivierung in MEZ gespeichert. Die Zeitumstellung erfolgte nicht immer zum gesetzlichen Termin um 2.00 Uhr sondern teilweise am nächsten oder auch einem späteren Tag. Die Umstellungstermine müssen also jedesmal explizit herausgesucht werden, und es kommt gelegentlich vor, daß Lücken in den Zeitreihen zum fraglichen Termin diese Suche erschweren. Die 10 min-Mittelwerte in der Nähe der Umstellungstermine sollten daher nicht als exakte Windwerte zu den gespeicherten Terminen angesehen werden (um z.B. ein Sturmereignis genau zu datieren).

### 3.7.3 Qualität der Daten

Die Sodar-Daten Esenshamm weisen die gleichen Besonderheiten auf wie die anderen Sodar-Daten: große Variabilität der 10 min-Mittelwerte und dadurch bedingt eine erschwerte Korrektur von Ausreißerwerten (vgl. 3.5.3).

Die Ausfallzeiten der Sodar-Werte Esenshamm sind etwas größer als an den Standorten Brokdorf und Stade. Es fehlen im Jahr 1992 ca. 45% der Daten, 1993 13%, 1994 6%, 1995 5% und 1996 14%. Für den Gesamtzeitraum ergibt sich ein Anteil vom 70% mit vollständig gemessenen Vertikalprofilen, also von 50 m bis 150 m Höhe. Für die einzelnen Kanäle enthalten etwa 12% der Stunden keine Werte, 1% nur einen Wert, 1.5% zwei Werte, 2% drei Werte, 3% vier Werte, 9% fünf Werte und 71% alle sechs Werte.

Die Windgeschwindigkeitsverteilung am Standort Unterweser weicht etwas von den vorher beschriebenen Standorten ab. Die Abbildung 92 zeigt als Beispiel die Häufigkeitsverteilung der 10 min-Windgeschwindigkeiten im Jahr 1993.



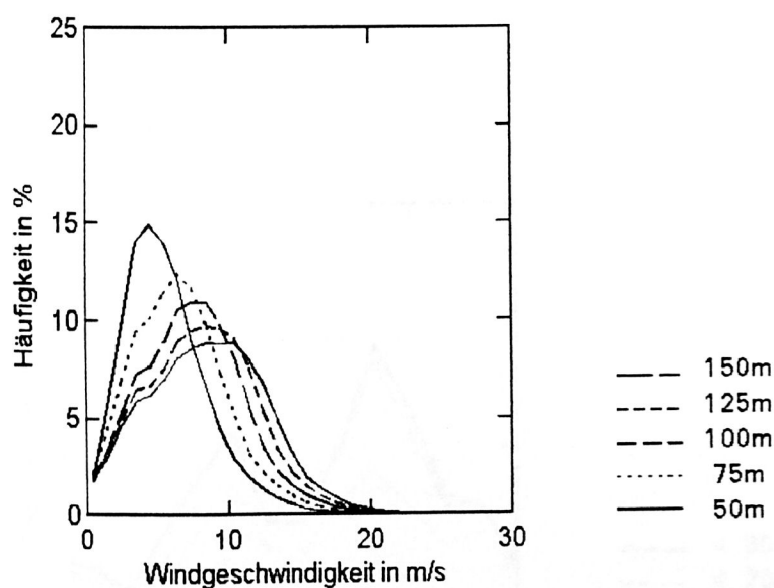
**Abbildung 92**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Esenshamm im Jahr 1993

Man erkennt in den oberen Höhen eine flache, fast zweigipflige Verteilung mit einer geringen Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten von 4 bis 6 m/s. Da ähnliche Verteilungen in allen Jahren beobachtet werden, scheint es sich eher um eine standortspezifische Besonderheit als um einen technischen Effekt zu handeln.

#### 3.7.4 Statistische Ergebnisse

Die Häufigkeitsverteilungen von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und geschwindigkeitsabhängiger Windrichtung für den Standort Stade für den gesamten Meßzeitraum von 5 Jahren sind in den Abbildungen 93 bis 95 gezeigt.



**Abbildung 93**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Esenshamm für die Jahre 1992 bis 1996

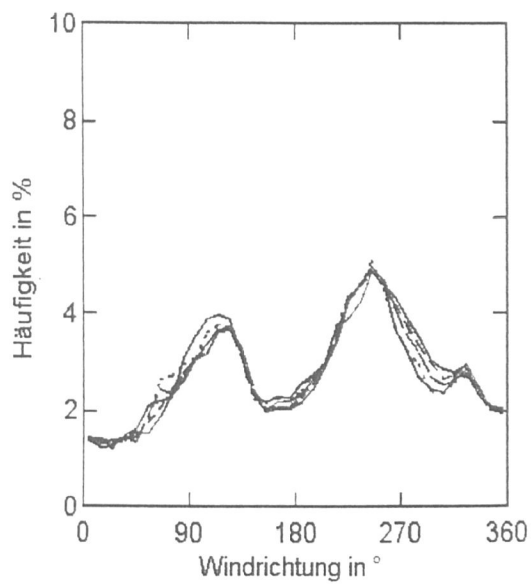


Abbildung 94

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Esenshamm für die Jahre 1992 bis 1996

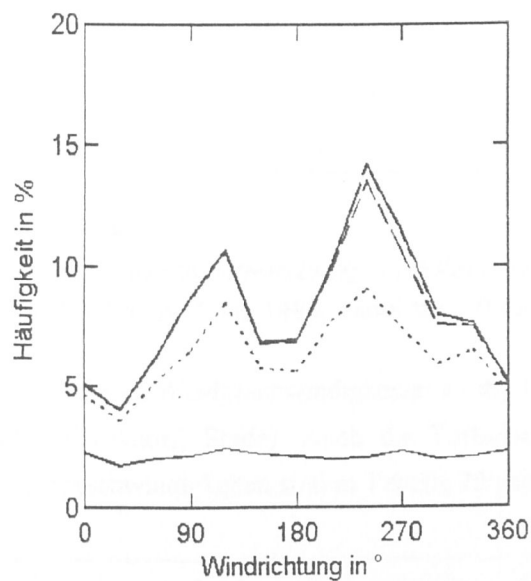


Abbildung 95

Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung an der Station Esenshamm in 100 m Höhe für die Jahre 1992 bis 1996

Die oben erwähnte flache bis zweigipflige Geschwindigkeitsverteilung erkennt man auch im mehrjährigen Mittel. Die Richtungsverteilung zeigt einen großen Anteil von südöstlichen Winden. Das ist zum Teil auf das Jahr 1996 zurückzuführen, das überwiegend Ostwind aufweist und ein fünfjähriges Kollektiv immerhin zu 20% bestimmt. Über den gleichen Meßzeitraum zeigt aber auch die Station Stade eine ähnliche Häufigkeitsverteilung der Windrichtung. Hohe Windgeschwindigkeiten treten aber vornehmlich bei westlichen Winden auf, wie die Abbildung 93 zeigt.

Die mittleren statistischen Größen sind in Tabelle 24 angegeben.

Größe	Höhe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl	Prozent
ff(m/s)	50m Höhe	5.6 +/- 2.95m/s	0.524	215438 Werte	81.89%
ff(m/s)	75m Höhe	6.6 +/- 3.34m/s	0.506	217438 Werte	82.65%
ff(m/s)	100m Höhe	7.5 +/- 3.57m/s	0.476	223238 Werte	84.85%
ff(m/s)	125m Höhe	8.0 +/- 3.86m/s	0.482	219089 Werte	83.28%
ff(m/s)	150m Höhe	8.5 +/- 4.06m/s	0.478	214293 Werte	81.45%
dd(Grad)	50m Höhe	203. +/-106.1°	1.852	215132 Werte	81.77%
dd(Grad)	75m Höhe	202. +/-106.2°	1.854	217101 Werte	82.52%
dd(Grad)	100m Höhe	204. +/-106.9°	1.865	222930 Werte	84.74%
dd(Grad)	125m Höhe	204. +/-107.1°	1.869	218789 Werte	83.16%
dd(Grad)	150m Höhe	205. +/-107.2°	1.871	214029 Werte	81.35%

**Tabelle 24**

Mittelwert, Standardabweichung, Turbulenzintensität und Anzahl der Werte an der Station Esenshamm für die Jahre 1992 bis 1996, dabei steht ff für Windgeschwindigkeits, dd für Windrichtung

Die mittleren Windgeschwindigkeiten an der Unterweser sind vergleichbar zu denen an Stationen an der Elbe (Brokdorf, Stade). Auch die Turbulenzintensitäten unterscheiden sich kaum. Die maximalen Windgeschwindigkeiten sind in Tabelle 25 gezeigt.

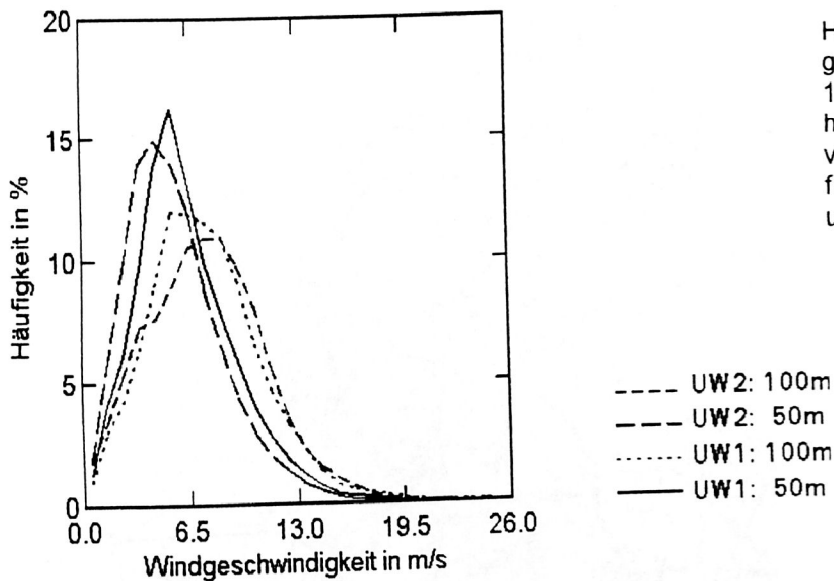
50m	24.3m/s	17.2.1995	6:10
75m	25.9m/s	24.1.1993	13:40
100m	28.0m/s	17.2.1995	6:10
125m	27.8m/s	17.2.1995	6:10
150m	27.2m/s	10.1.1995	5: 0

**Tabelle 25**

Maximale Windgeschwindigkeiten an der Station Esenshamm, 1992 bis 1996

### 3.7.5 Vergleich der beiden Stationen Esenshamm

Beim Kernkraftwerk Unterweser (Esenshamm) wurde das seit 1981 registrierende Sodar-Gerät 1992 durch ein neues ersetzt. Die Ergebnisse beider Geräte sind nur bedingt vergleichbar, da die Zeiträume 1981-1984 und 1992-1996 unterschiedlich sind. Die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung unterscheiden sich daher auch sehr, wie die Abbildungen 60 und 94 zeigen. Die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten in 50 und 100 m Höhe von beiden Sodar-Geräten sind in Abbildung 96 gegenübergestellt.



**Abbildung 96**

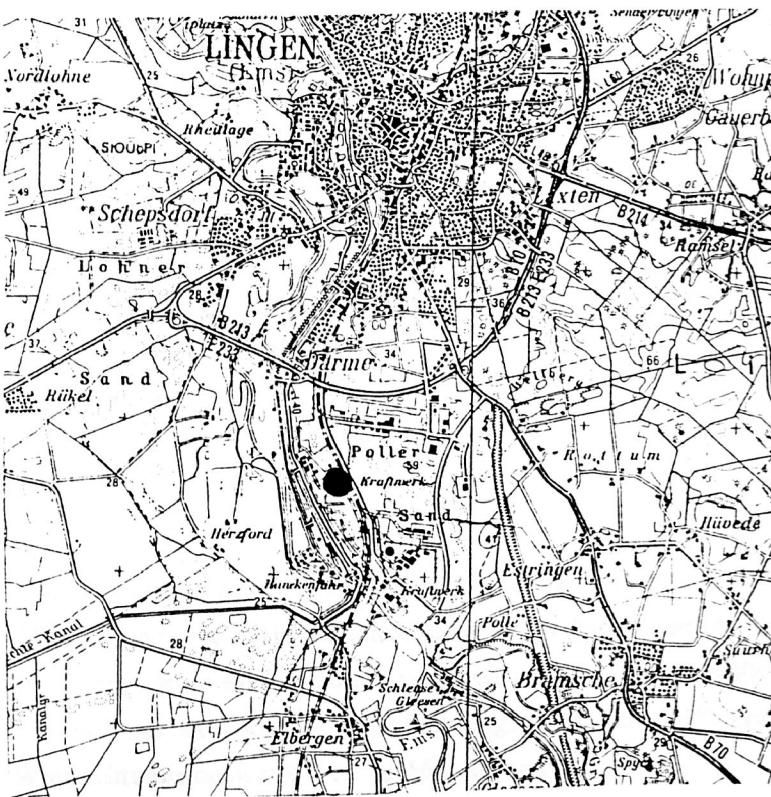
Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit in 50m und 100m Höhe am Standort Esenshamm, gemessen von zwei verschiedenen Sodar-Geräten für die Jahre 1981-1984 (UW1) und 1992-1996 (UW2)

Während die Windgeschwindigkeitsmittelwerte in 100 m Höhe gleich sind, die Verteilungen aber etwas gegeneinander verschoben sind, wird am früher aufgestellten Sodar (UW1) eine höhere 50m-Geschwindigkeit ermittelt als am UW2. Allein daraus kann nicht entschieden werden, ob eines der beiden Geräte fehlerhaft mißt. Die insgesamt eher 'unruhigen' Häufigkeitsverteilungen des Sodar UW1, die hohe Ausfallquote und der spätere Ausfall des Gerätes sprechen aber eher für die Meßwerte des Sodars UW2.

### 3.8 Sodar-Daten Lingen (Emsland)

#### 3.8.1 Standort und Meßsystem

Beim Kernkraftwerk Emsland bei Lingen an der Ems betreibt die Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH seit 1990 ein Sodar-Gerät zur Überwachung des Windfeldes. Die Koordinaten des Standortes sind  $53^{\circ} 22.8' N$ ,  $07^{\circ} 16.3' E$ , die Höhe beträgt 34 m ü.NN. Abbildung 97 zeigt die Umgebung des Standortes, der südlich von Lingen liegt.



Die Messungen werden mit einem Sodar-Gerät der Firma Metek (Elmshorn) durchgeführt, der Gerätetyp ist in 3.5.1 beschrieben. Die Meßhöhen an diesem Standort sind von 40 m an in 30 m-Intervallen bis 220 m. Meßdaten liegen von 1990 bis 1996 vor. Der Datenumfang beträgt 175 MB.

**Abbildung 97**

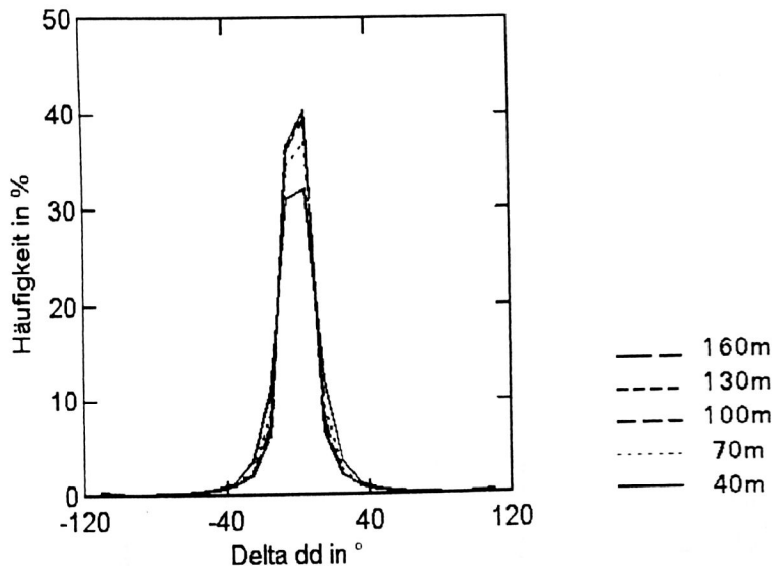
Standort des Kernkraftwerks und Sodar-Gerätes bei Lingen (Emsland),  
(Kartengrundlage C3506/3510, vervielfältigt mit Genehmigung der Landesvermessung und Geobasisinformation Nieder-sachsen, 52-678/97)

#### 3.8.2 Datenaufbereitung

Die Daten werden in der in 3.5.2 beschriebenen Weise bearbeitet und archiviert. Die Originaldaten sind

in MEZ gespeichert. Die Emsland-Daten weisen häufiger Lücken auf als die anderen Sodar-Daten. Ferner ist der Meßwert der Standardabweichung des Vertikalwindes häufig Null und wird im Korrekturprogramm durch die Fehlerkennung ersetzt. Die Korrektur der Windrichtungsdaten ist schwierig, da die Variabilität sehr groß ist. Die Häufigkeitsverteilung der Differenzen von einem 10 min-Wert zum nächsten (Abbildung 98) zeigt, daß auch Sprünge von mehr als  $100^\circ$  noch vorkommen.

**Abbildung 98**



Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeitsdifferenzen an der Station Lingen im Jahr 1995

Wie die anderen Sodar-Meßdaten schon zeigten, ist generell bei diesem Meßsystem die Variabilität der Windrichtung größer als bei konventionellen Meßsystemen. An diesem Standort kommt zusätzlich durch die Topographie eine erhöhte Rauigkeit und damit eine größere Turbulenz hinzu. Dennoch wird als Schranke zur Korrektur der Windrichtungsdaten  $\Delta dd = 80^\circ$  verwendet. Dadurch werden im Schnitt 300 Windrichtungsmeßwerte (von 52 560) verworfen.

In den Jahren 1993, 1994 und 1995 muß die Windrichtungsmessung für 130 m Höhe ganz verworfen werden. Sie zeigt eine zu große Häufigkeit der Richtungen  $45^\circ$  und  $225^\circ$ . Die Daten sind nicht korrigierbar.

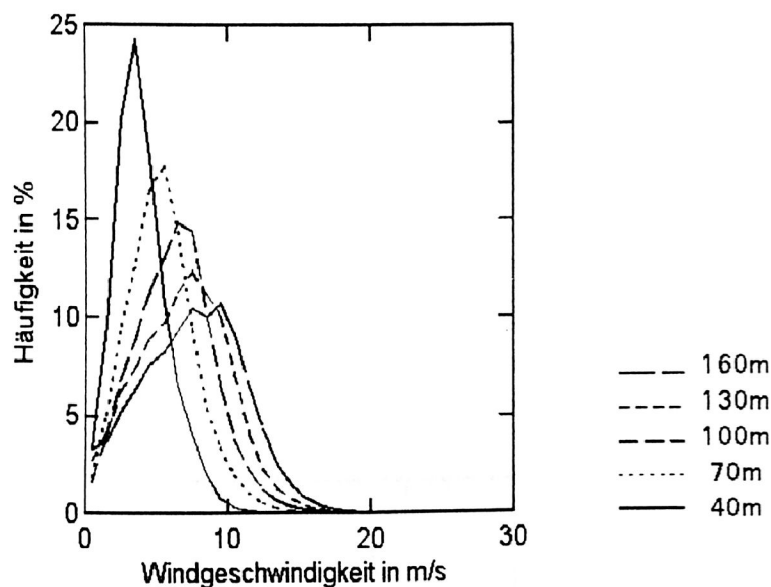
### 3.8.3 Qualität der Daten

Aufgrund häufiger Datenausfälle sind die statistischen Größen für einige Jahre nicht ganz repräsentativ. Die Ausfallrate der 10 min-Daten beträgt etwa 17% im Gesamtzeitraum von sieben Jahren, in 130 m und 160 m Höhe 19%. In 78% aller Fälle liegen vollständige Windprofile von 40 m bis 160 m Höhe vor. Die Anzahl der Stundenwerte, die aus weniger als 5 Werten gebildet werden, liegt aber unter 5%. Die Meßdaten können wegen der großen Variabilität nur schwer von Ausreißern bereinigt werden, daher

ist bei der Auswertung von Extremwerten Vorsicht geboten

### 3.8.4 Statistische Ergebnisse

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung für den gesamten Meßzeitraum von sieben Jahren

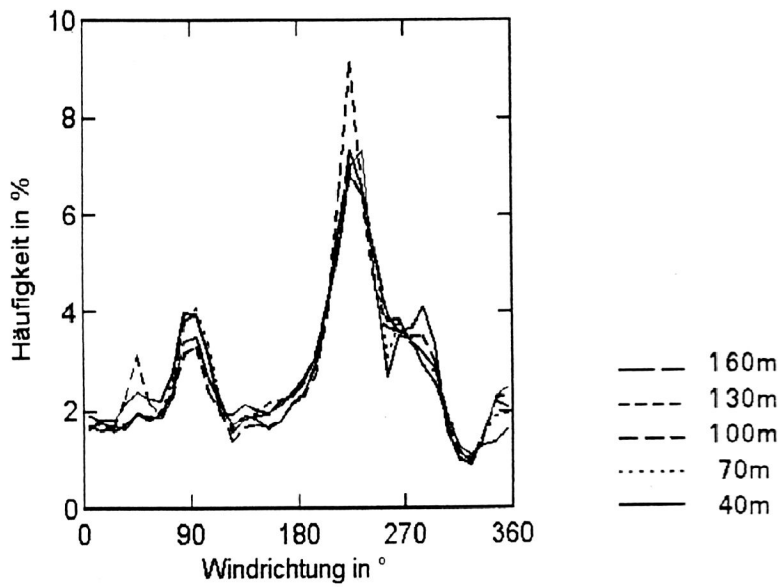


**Abbildung 99**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Lingen für die Jahre 1990 bis 1996

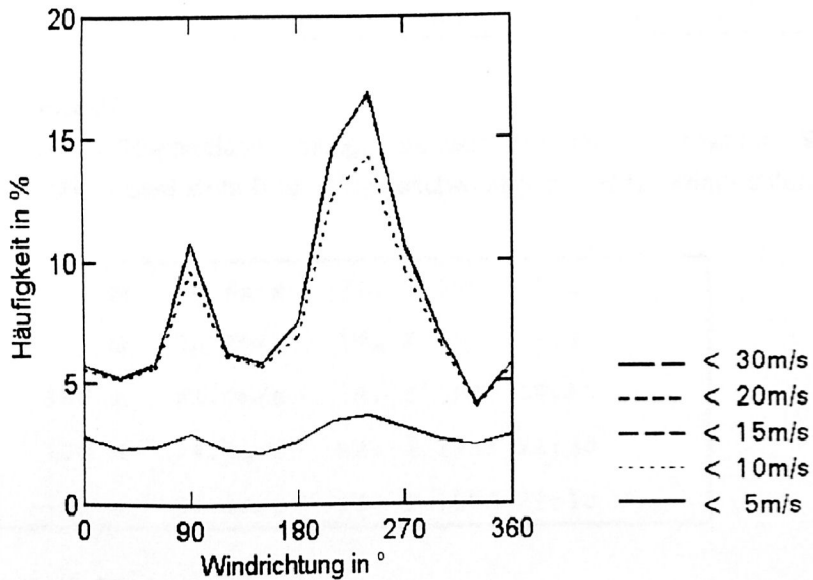
**Abbildung 100**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Lingen für die Jahre 1990 bis 1996



**Abbildung 101**

Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung in 100 m Höhe an der Station Lingen für die Jahre 1990 bis 1996



Die Station Lingen im Emsland ist von allen vorgestellten Stationen die küstenfernste und weist daher eine größere Häufigkeit von geringen Windgeschwindigkeiten auf: in 40 m Höhe sind Geschwindigkeiten zwischen 3 und 4 m/s mit fast 25% am häufigsten. Die Windrichtungen zeigen ein deutliches Maximum

bei 220 bis 230°, die Ostkomponente ist seltener als bei den anderen Stationen vertreten. Die Verschiebung zu geringeren Windgeschwindigkeiten zeigt sich auch in der geschwindigkeitsabhängigen Richtungsverteilung, dort zeigen auch Geschwindigkeiten < 5m/s schon die bimodale Verteilung.

Auch in den statistischen Mittelwerten und maximalen Windgeschwindigkeiten (Tabelle 26 und 27) wird die Binnenlandlage von Lingen deutlich.

Größe	Höhe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl	Prozent
ff (m/s)	in 40m Höhe	3.9 +/- 1.88m/s	0.486	302879	2.26%
ff (m/s)	in 70m Höhe	5.3 +/- 2.38m/s	0.448	304153	82.60%
ff (m/s)	in 100m Höhe	6.2 +/- 2.74m/s	0.439	303230	82.35%
ff (m/s)	in 130m Höhe	6.8 +/- 3.19m/s	0.468	297685	80.85%
ff (m/s)	in 160m Höhe	7.5 +/- 3.56m/s	0.476	296030	80.40%
dd (Grad)	in 40m Höhe	208. +/-101.9°	1.778	302097	82.05%
dd (Grad)	in 70m Höhe	208. +/-101.0°	1.762	303531	82.43%
dd (Grad)	in 100m Höhe	210. +/-100.7°	1.758	302658	82.20%
dd (Grad)	in 130m Höhe	217. +/-102.9°	1.795	296985	80.66%
dd (Grad)	in 160m Höhe	213. +/-101.4°	1.770	295400	80.23%

**Tabelle 26**

Mittelwert, Standardabweichung, Turbulenzintensität und Anzahl der Werte für die Station Lingen, 1990 bis 1996, dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, dd für Windrichtung

40 m	18.6m/s	27. 7.1991 22:10
70 m	20.2m/s	17. 2.1995 1:40
100 m	21.2m/s	9. 3.1990 10:50
130 m	24.9m/s	22. 1.1995 22:30
160 m	27.3m/s	13. 1.1993 22:10

**Tabelle 27**

Maximale Windgeschwindigkeiten an der Station Lingen mit Datumsangabe im Zeitraum 1990 bis 1996

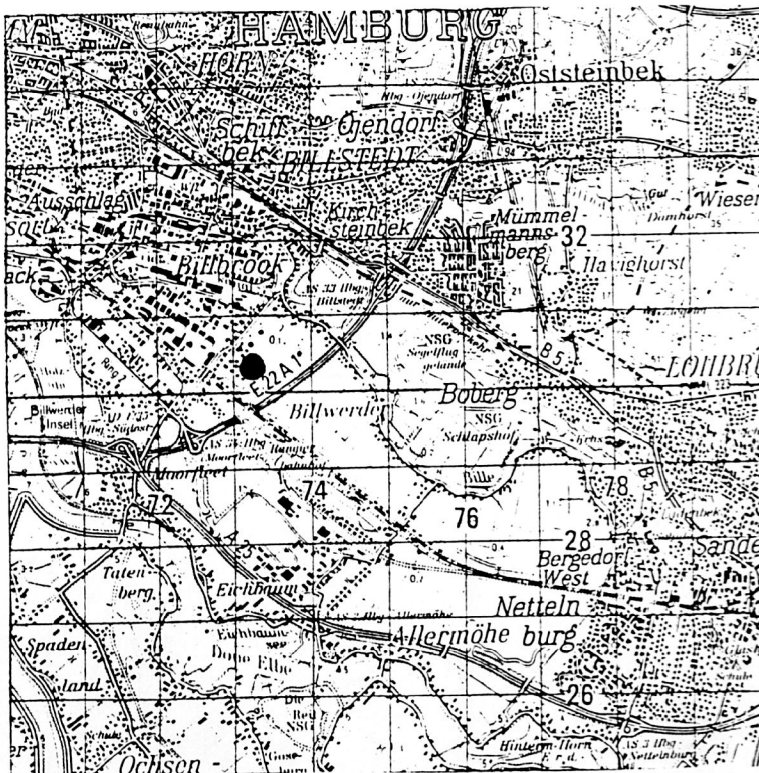
Die mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten sind geringer als an den vorher beschriebenen Stationen. Eine mögliche Erhöhung der Turbulenzintensität an dem Binnenlandstandort ist jedoch nicht festzustellen.

### 3.9 Mastdaten Hamburg-Billwerder

#### 3.9.1 Standort und Meßsystem

Seit vielen Jahren werden am Sendemast des Norddeutschen Rundfunks (NDR) in Hamburg-Billwerder meteorologische Messungen durchgeführt. 1994 wurde vom Meteorologischen Institut der Universität Hamburg eine neue Meßanlage mit neuen Meßfühlern und einer digitalen Datenerfassungsanlage installiert und 1995 endgültig in Betrieb genommen.

Der Standort befindet sich im Südosten von Hamburg in flachem Gelände mit Wiesen und Kleingärten. Die Koordinaten sind  $53^{\circ} 31.4' \text{ N}$ ,  $10^{\circ} 05.9' \text{ E}$ , die Höhe beträgt 0.3 m ü.NN. Abbildung 102 zeigt die Umgebung des Standortes.



**Abbildung 102**

Standort des NDR-Mastes in Hamburg-Billwerder  
(Kartengrundlage C2726, vervielfältigt mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holstein vom 25.9.1997, 3-562.6S)

Am 300 m hohen Sendemast des NDR werden in den Höhen 50 m, 110 m, 175 m und 250 m Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen, in diesen und noch zusätzlich in 70 m Höhe werden außerdem Temperatur- und Feuchtegrößen gemessen. Die Meßfühler sind an 5 m langen Auslegern, die nach Süden ( $190^{\circ}$ ) weisen, installiert. An einem etwa 200 m nordöstlich des Sendemastes stehenden 10 m-Mast werden Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur in 10 m Höhe gemessen. In 2 m Höhe werden zusätzlich Temperatur, Feuchte, Luftdruck, Wolkenuntergrenze sowie Strahlungswerte gemessen. Die Meßanlage ist in Brümmer et al. (1997)

ausführlich beschrieben.

Die Windgeschwindigkeit wird mit selbstgefertigten Schalenkreuzanemometern mit einer Auflösung von 0.1 m/s gemessen, die Windrichtung mit selbstgefertigten Windfahnen mit einer Auflösung von 1.4°. Die Lufttemperatur wird mit Pt-100 Thermometern mit einer Auflösung von 0.02 K und der Luftdruck mit einem PTB 200A der Firma Vaisala mit einer Auflösung von 0.01 hPa gemessen.

Die Daten werden sekundlich abgefragt und zu 1 min-Mittelwerten aufsummiert und gespeichert.

Der gesamte Datensatz seit März 1995 ist beim Meteorologischen Institut der Universität Hamburg (Prof. Dr. B. Brümmer) verfügbar, für das Sonderwindarchiv wurden die Daten des Jahres 1996 zur Verfügung gestellt. Der Originaldatensatz für dieses Jahr hat einen Umfang von 175 MB.

### 3.9.2 Datenaufbereitung

Die Daten wurden als Wochendateien auf ZIP-Kassetten geliefert. Sie werden zu 10 min-Werten gemittelt und in eine mit Defaultwerten vorbesetzte Jahresdatei eingelesen. Es werden die Meßgrößen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 10, 50, 110, 175 und 250 m Höhe, der Lufttemperatur in 2 und 10 m Höhe und des Luftdrucks in 2m Höhe gespeichert. Durch diese Auswahl reduziert sich der Originaldatensatz auf 5 MB.

Die 10 min-Mittelwerte werden geprüft, und Ausreißer werden entfernt. Die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten (Abb. 103) und der Windrichtungen der Originalwerte zeigen noch einige Mängel: die Windwerte in 250 m Höhe müssen für etwa vier Monate verworfen werden; es gibt zu viele Geschwindigkeitswerte gleich Null und kleiner 1 m/s.

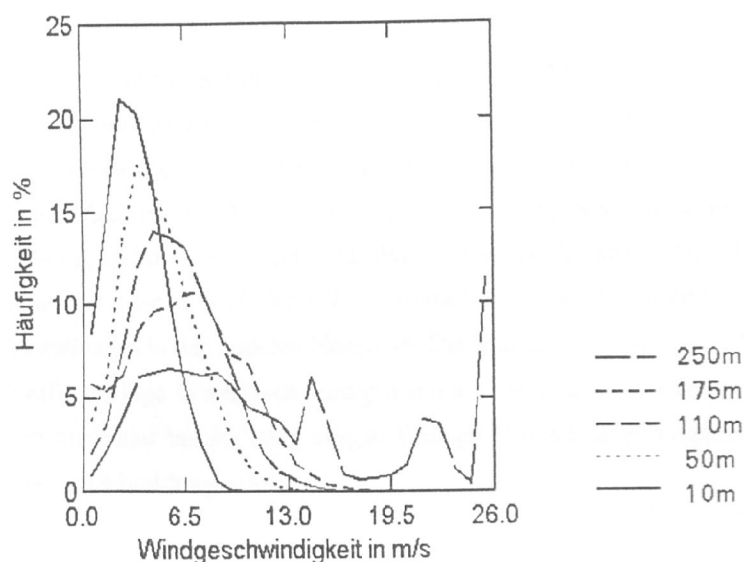


Abbildung 103

Häufigkeitsverteilung der unkorrigierten Windgeschwindigkeit an der Station Hamburg-Billwerder im Jahr 1996

In einem Korrekturprogramm werden Ausreißer eliminiert durch die Abfrage absoluter Schrankenwerte und relativer Schrankenwerte für die Abweichung eines Meßwertes vom Vorgänger. Die relativen Schrankenwerte werden aus der Häufigkeitsverteilung der Differenzwerte zu  $\Delta ff = 5 \text{ m/s}$  und  $\Delta dd = 80^\circ$  bestimmt. Auch im Fall von  $ff=0.0\text{m/s}$  und  $dd=0.0^\circ$  werden Fehlerkennungen eingesetzt. Die Meßwerte, die vor oder hinter Fehlerkennungen oder Null-Werten folgen, sind oft ebenfalls fehlerhaft, können aber nicht korrigiert werden.

Eine Datei mit Stundenmittelwerten wird ebenfalls archiviert.

### 3.9.3 Qualität des Datensatzes

Bei den Meßwerten handelt es sich um kalibrierte und ständig überwachte Daten. Die Mängel liegen in zeitweisen Ausfällen einzelner Meßfühler, wie dies in 250 m Höhe der Fall ist, und in häufigen Schwachwindlagen, während der die Meßdaten von Windgeschwindigkeit und Windrichtung unzuverlässig sind. Die Ausfälle der Meßfühler liegen zwischen 5 und 9%, in 250 m Höhe bei 35%. Letzteres läßt die Angabe eines repräsentativen Jahresmittelwertes nicht zu. Vollständige Windprofile ( $ff$  und  $dd$ ) in allen 5 Höhen liegen in 56% aller Fälle vor. In 88 bis 94% aller Fälle kann das Stundenmittel aus 6 10 min-Mitteln gebildet werden.

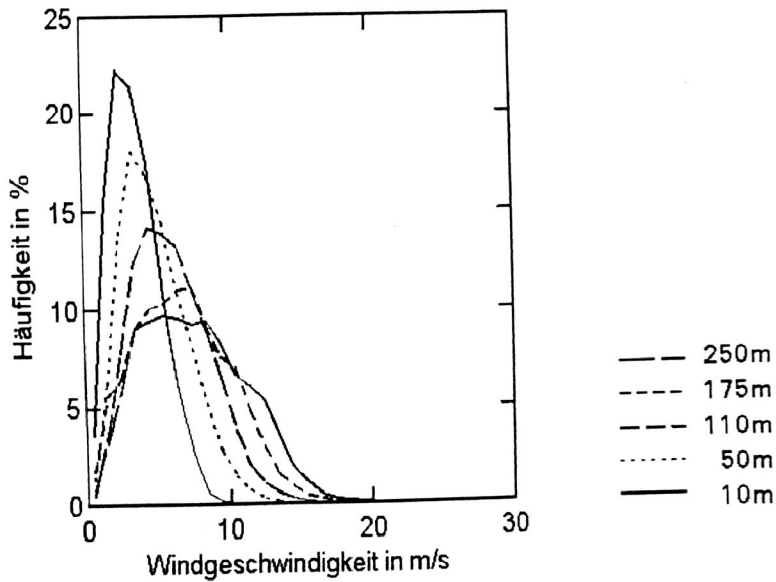
### 3.9.4 Statistische Ergebnisse

Da die Daten nur für das Jahr 1996 vorliegen, ist bei der Verwendung der statistischen Ergebnisse Vorsicht geboten. Sie sind nicht allgemein für den Standort typisch, da der Erfassungszeitraum zu kurz ist und zudem das Jahr 1996 kein 'typisches' Jahr ist. Wetterlagen mit schwachen östlichen Winden sind 1996 wesentlich häufiger vertreten als in anderen Jahren.

Die Abbildungen 104 bis 106 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung. Die Häufigkeitsverteilungen für 250 m Höhe repräsentieren wegen der hohen Ausfallrate nicht das Jahresmittel und weichen daher auch von den Verteilungen in den anderen Höhen ab. Der Standort ist mehr als 100 km von der Küste entfernt und weist häufig geringe Windgeschwindigkeiten auf. Wie schon bei der vorher vorgestellten Station Lingen zeigt sich auch hier bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten andeutungsweise die bimodale Richtungsverteilung (Abbildung 106).

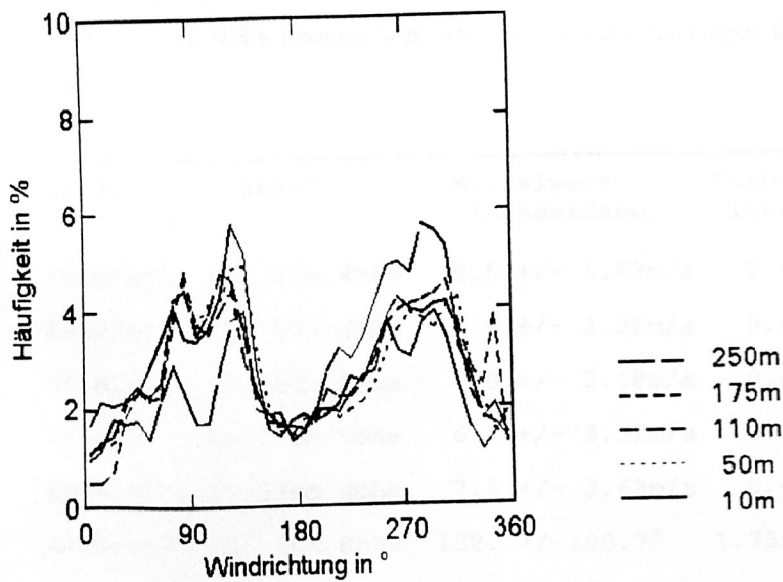
**Abbildung 104**

Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit an der Station Hamburg-Billwerder im Jahr 1996



**Abbildung 105**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Hamburg-Billwerder im Jahr 1996



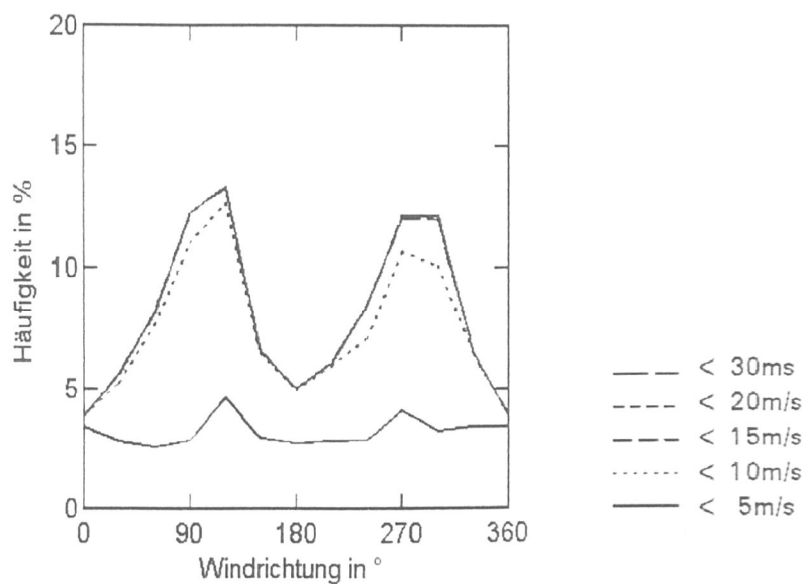


Abbildung 106

Häufigkeitsverteilung der geschwindigkeitsabhängigen Windrichtung in 110 m Höhe an der Station Hamburg-Billwerder im Jahr 1996

Tabelle 28 zeigt Mittelwerte und Standardabweichungen der Meßwerte in den verschiedenen Höhen. Die Werte in 250 m Höhe können vom wahren Jahresmittel wegen der hohen Ausfallrate von über 35% abweichen.

Größe	Höhe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl	Prozent
ff(m/s)	in 10m Höhe	3.5 +/- 1.69m/s	0.483	47902 Werte	90.89%
ff(m/s)	in 50m Höhe	4.9 +/- 2.30m/s	0.469	48789 Werte	92.57%
ff(m/s)	in 110m Höhe	6.0 +/- 2.68m/s	0.447	50141 Werte	95.14%
ff(m/s)	in 175m Höhe	6.7 +/- 3.32m/s	0.496	48398 Werte	91.83%
ff(m/s)	in 250m Höhe	7.5 +/- 3.63m/s	0.484	32191 Werte	61.08%
dd(Grad)	in 10m Höhe	132. +/-100.7°	1.758	47859 Werte	90.81%
dd(Grad)	in 50m Höhe	126. +/-104.7°	1.827	48755 Werte	92.51%
dd(Grad)	in 110m Höhe	132. +/-105.4°	1.840	50102 Werte	95.06%
dd(Grad)	in 175m Höhe	130. +/-108.8°	1.899	48379 Werte	91.79%

Größe	Höhe	Mittelwert Standardabw.	Turbulenz- intensität	Anzahl	Prozent
ff(m/s)	in 10m Höhe	3.5 +/- 1.69m/s	0.483	47902 Werte	90.89%
dd(Grad)	in 250m Höhe	148. +/-112.9°	1.970	34213 Werte	64.92%

**Tabelle 28**

Mittelwert, Standardabweichung, Turbulenzintensität und Anzahl der Werte an der Station Hamburg-Billwerder, 1996, dabei steht ff für Windgeschwindigkeit, dd für Windrichtung

Tabelle 29 zeigt die Maximalwerte der Windgeschwindigkeit für das Jahr 1996. Gegenüber vorher besprochenen Standorten erkennt man hier den Binnenlandstandort mit geringeren Windgeschwindigkeiten.

10 m	11.7m/s	30.10.1996	1:40
50 m	18.4m/s	29.10.1996	23:30
110 m	20.7m/s	30.10.1996	1:40
175 m	22.3m/s	30.10.1996	1:40
250 m	24.1m/s	30.10.1996	1:40

**Tabelle 29**

Maximale Windgeschwindigkeiten an der Station Hamburg-Billwerder im Jahr 1996 mit Datumsangabe

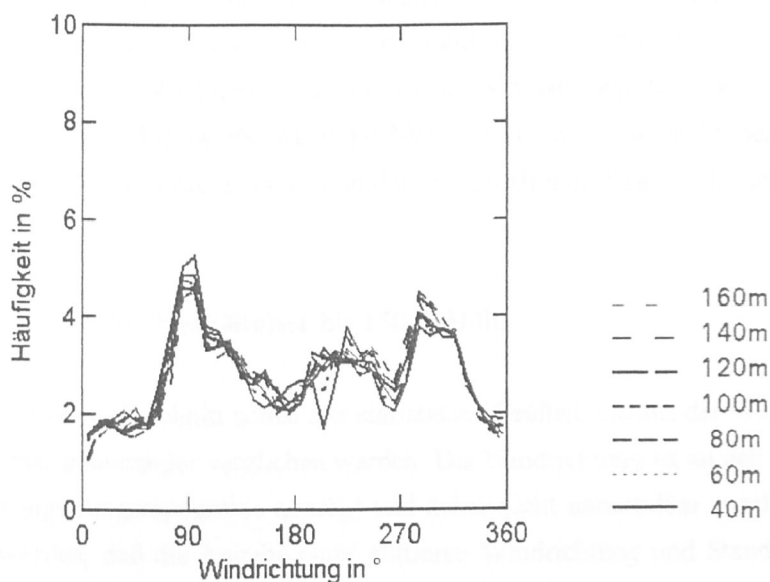
## 4 Zusammenschau der Ergebnisse

### 4.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Es liegen von 11 verschiedenen Stationen in Norddeutschland zum Teil recht lange Reihen von Winddaten vor. Somit ist eine vergleichende Zusammenschau der Ergebnisse naheliegend. Bevor das im nächsten Abschnitt geschieht, sollen einige grundsätzliche Bemerkungen vorgestellt werden.

Die GROWIAN-Meßdaten sind nicht mit den anderen Daten vergleichbar, da es sich hier nur um sporadische Zeitabschnitte handelt, die in keiner Weise standorttypische Mittelwerte liefern.

Von allen anderen Datensätzen können grundsätzlich Mittelwerte einzelner Jahre oder langjährige Mittelwerte miteinander verglichen werden. Ein Mittelwert ist umso eher repräsentativ für den jeweiligen Standort, je länger der Meßzeitraum ist. Erwünscht sind mindestens fünfjährige Meßreihen. Dennoch gibt es typische Unterschiede auch in 5-Jahres-Mittelwerten, die durch einzelne extreme Ereignisse wie Stürme oder Witterungsbesonderheiten wie langanhaltende Hochdrucklagen bedingt sind. Ein Beispiel ist das Jahr 1996, das durch überdurchschnittlich viele Hochdruckwetterlagen mit östlichen Winden geprägt war. Die Abbildung 107 zeigt die Windrichtungsverteilung an der Station Brokdorf im Jahr 1996, die sich deutlich vom mehrjährigen Mittel unterscheidet (vgl. Abb. 82 in 3.5.4).



**Abbildung 107**

Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der Station Brokdorf im Jahr 1996

Insofern sind die in Abschnitt 3.9 gezeigten Ergebnisse des Standortes Hamburg-Billwerder, die hier nur für das Jahr 1996 vorliegen, nicht repräsentativ.

Bei einem Vergleich der statistischen Ergebnisse muß auch auf die Fehlerquote der einzelnen Meßfühler geachtet werden, die jeweils in den Abschnitten 'Qualität des Datensatzes' angegeben ist. Ausfälle von weniger als 5% sind i.a. unbedeutend, bei Ausfällen von mehr als 5% muß man aber unbedingt klären, ob systematische Fehler vorliegen. So treten bei den Sodar-Messungen in großen Höhen meist Ausfälle bei niedrigen Windgeschwindigkeiten auf, es besteht also die Gefahr der Überschätzung der mittleren Windgeschwindigkeit. Vor allem bei Jahresmittelwerten ist es wichtig zu wissen, ob die Ausfälle über das Jahr gestreut sind oder ob zusammenhängende Zeitabschnitte nicht belegt sind. Im letzteren Fall kann der Mittelwert falsch sein, wenn etwa besonders windschwache oder stürmische Perioden im Jahr fehlen.

Die Meßstandorte sind nicht immer in homogenem Gelände gelegen, das heißt, daß die Messungen durch Hindernisse wie Gebäude (z.B. die Reaktorgebäude bei Kernkraftwerksstandorten) in Bodennähe beeinträchtigt sind. Beim Standort Brokdorf ist das in der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in Bodennähe deutlich zu erkennen (s. Abb.82). Bei anderen Stationen ist das Windfeld durch die Topographie bestimmt, etwa bei Helgoland durch den Inselfelsen nordwestlich der Station oder bei Brokdorf durch das Elbetal. Diese Einflüsse sind typisch für die jeweilige Station, eine Übertragung der Meßdaten auf die Umgebung ist deswegen nicht ohne weiteres möglich (vgl. dazu auch Schmidt et al., 1993).

Ein weiteres Problem bei der Vergleichbarkeit der Meßdaten stellen die unterschiedlichen Meßsysteme dar. Natürlich sollte das Meßergebnis unabhängig vom Meßsystem sein, aber die spezifischen Probleme bei Mastmessungen und Sodar-Messungen konnten hier nicht immer vermieden werden. Bei Mastmessungen müssen entweder die Ausleger ausreichend lang sein, um den Einfluß des Gittermastes auf die Windmessung zu vermeiden, oder der Einfluß des Gittermastes muß explizit herausgerechnet werden. Das ist bei den Mastmessungen nur an der Station Helgoland der Fall. Sodar-Messungen geben nur zuverlässige Mittelwerte, wenn der Meßzeitraum zu 95% mit Meßdaten abgedeckt ist (Kirtzel, 1997), das ist nur in den unteren Höhen an der Station Brokdorf gewährleistet.

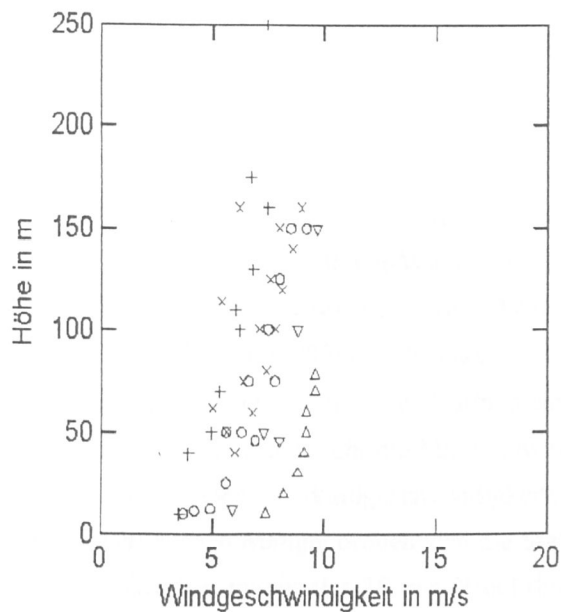
#### **4.2 Windverhältnisse bis 150 m Höhe**

In diesem Abschnitt sollen nur statistische Größen, die aus der Windgeschwindigkeitsmessung abgeleitet sind, miteinander verglichen werden. Die Windrichtung ist an den verschiedenen Stationen stark von der Umgebungstopographie geprägt und daher nicht unmittelbar vergleichbar. Allgemein sollte festgehalten werden, daß die Angabe einer mittleren Windrichtung und Standardabweichung nicht ausreichend ist. Häufig beobachtet man eine bimodale Richtungsverteilung (s. auch Abb. 100), für die eine Angabe einer mittleren Richtung sogar unsinnig ist. Es muß daher immer die Verteilung der Windrichtung - die ja auch als Windrose darstellbar wäre - betrachtet werden. Für Windenergienutzer ist aber die Windgeschwindigkeit bei weitem die wichtigere Größe.

In der Zusammenschau der statistischen Mittelwerte werden nicht die einzelnen Stationen dargestellt, vielmehr werden sie in fünf verschiedenen, die Standorte kennzeichnende Gruppen eingeordnet. Der Küstenabstand der Gruppen und die enthaltenen Stationen sind:

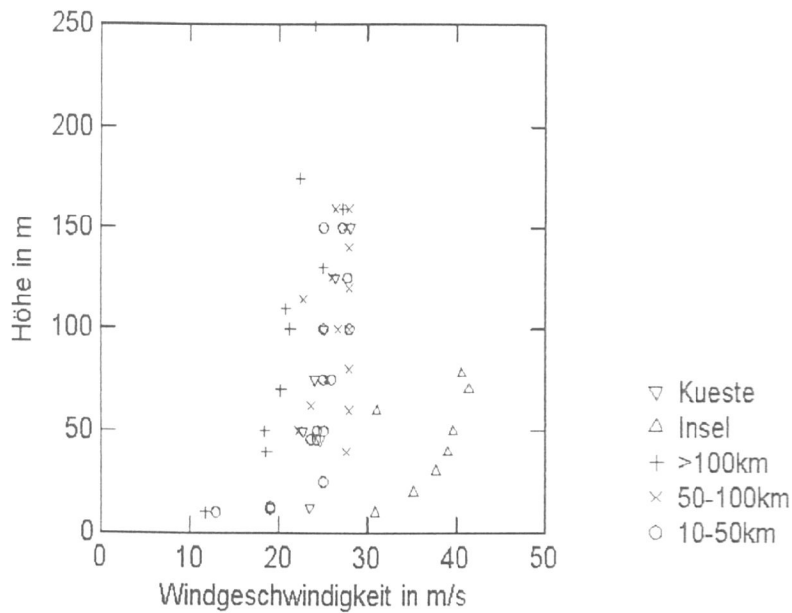
- Insel (Helgoland)
- Küste: 0-10km (Tating)
- Küstennah: 10-50km (Esens, Bredstedt, Esenshamm)
- Küstenfern: 50-100km (Lühesand, Stade, Brokdorf)
- Binnenland: >100km (Lingen, Hamburg-Billwerder).

Abbildung 108 zeigt die langjährigen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für alle Stationen und Höhen, Abbildung 109 zeigt die maximale Windgeschwindigkeit in dem jeweiligen Meßzeitraum.



**Abbildung 108**

Langjährige mittlere Windgeschwindigkeit an Insel-, Küsten- und Binnenlandstationen



**Abbildung 109**

Maximaler 10 min-Wert der Windgeschwindigkeit im Meßzeitraum für Insel-, Küsten- und Binnenlandstationen

Da für Helgoland nur Stundenmittelwerte vorliegen, wird der Maximalwind mit dem Faktor 1.1 multipliziert, um auf den maximalen 10 min-Wind zu kommen (Wieringa, 1993). In die Abbildungen sind für den GROWIAN-Standort (Küste) die mittlere Windgeschwindigkeit in 50, 100 und 150 m Höhe aus der Studie von Tetzlaff et al. (1985) und die maximalen 25 min-Windgeschwindigkeiten aus allen Datensätzen für 50, 75, 100, 125 und 150 m Höhe ebenfalls eingetragen. Die höchsten gemessenen Windgeschwindigkeiten sind aber vermutlich nicht die Maximalwinde im Meßzeitraum.

Man erkennt, daß sich die Windgeschwindigkeiten von See bis ins Binnenland abschwächen. Trotz aller vorher beschriebenen Mängel ordnen sich die Stationen gut in die definierten Gruppen ein. Der Quotient aus beiden Größen: maximaler 10 min-Wind dividiert durch Mittelwind, der auch Böenfaktor genannt wird, ist in Abbildung 110 dargestellt.

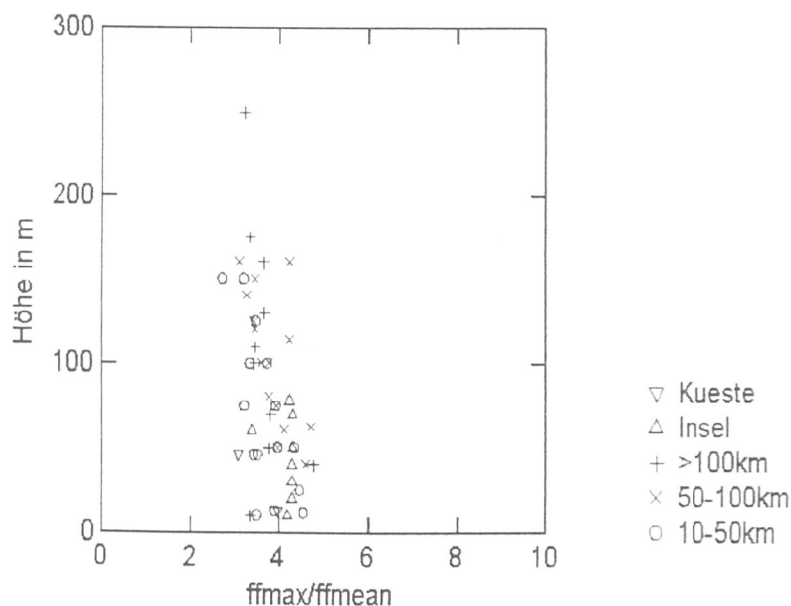


Abbildung 110

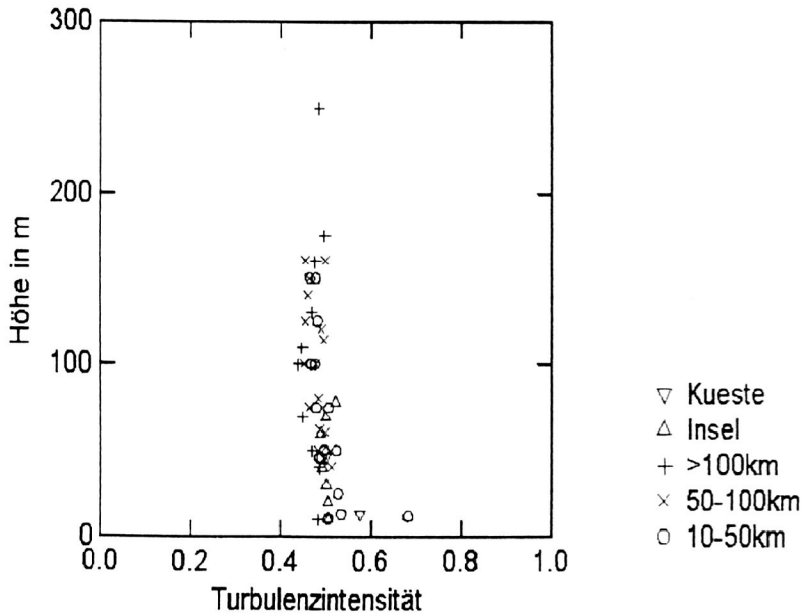
Quotient aus maximalem 10 min-Wind und mittlerer Windgeschwindigkeit an Insel-, Küsten- und Binnenlandstationen

Der Böenfaktor zeigt keine Abhängigkeit von der Lage der Station. Er ist unterhalb von 100 m Höhe etwa 4 und nimmt mit der Höhe ab. In der 'Richtlinie für die Zertifizierung von Windkraftanlagen' (Germanischer Lloyd, 1993) ist das extreme 10 min-Mittel der Windgeschwindigkeit mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von einmal in 50 Jahren als der fünffache Wert der mittleren Windgeschwindigkeit angegeben.

Ebenfalls unabhängig von der Küstendistanz der Station ist die 'Turbulenzintensität': Standardabweichung der Windgeschwindigkeit dividiert durch mittlere Windgeschwindigkeit. Sie ist in Abbildung 111 gezeigt.

**Abbildung 111**

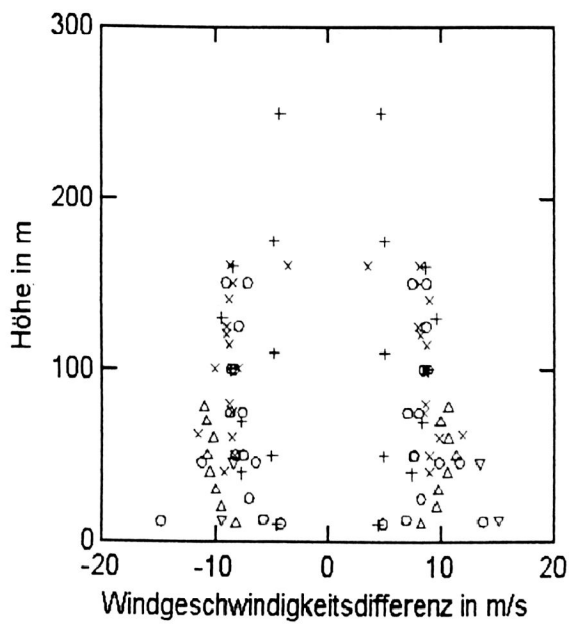
Turbulenzintensität für Insel-,  
Küsten und Binnenlandstationen



Die Turbulenzintensität nimmt ebenfalls mit der Höhe ab, und es deutet sich an, daß die Größe in Bodennähe (unterhalb 20 m) wesentlich größer ist. Der hier gebildete Wert der Turbulenzintensität ist ein Maß für die Variabilität des 10 min-Windes, nicht - wie der Begriff meist verwendet wird - für die Turbulenz, d.h. für die Windfluktuationen im Bereich von 1/100s bis 10s. Eine solche Größe ist wesentlich kleiner, etwa 0.05 (vgl. Schmidt et al., 1993).

Eine weitere Größe gibt Aufschluß über die Belastung von Windenergieanlagen, es ist die maximale Differenz der 10 min-Mittel der Windgeschwindigkeit. Eine große Änderung von einem Wert zum anderen muß von der Anlage ohne Schaden verkraftet werden. Bei der Differenzbildung müssen positive und negative Änderungen unterschieden werden, also starke Windzunahme und starke Windabnahme. Bei den hier vorliegenden Datensätzen - insbesondere bei den Sodar-Meßdaten - sind die maximalen Differenzen der 10 min-Werte wegen der großen Variabilität häufig durch die obere Schranke der Plausibilitätsabfrage bestimmt. Daher werden in diesen Fällen die maximalen Differenzen über 20 Minuten gebildet.

In Abbildung 112 sind diese maximalen Windgeschwindigkeitsdifferenzen aufgetragen. Positive und negative Differenzen sind etwa von gleicher Größe, sie liegen meist zwischen 7 und 12 m/s. Es besteht eine geringe Tendenz zur Abnahme der Differenz mit der Höhe.



**Abbildung 112**

Maximale Windgeschwindigkeitsdifferenz der 10 min- oder 20 min-Windwerte an Insel-, Küsten- und Binnenlandstationen

- ▽ Küste
- △ Insel
- + >100km
- × 50-100km
- 10-50km

Man erkennt an den letzten Abbildungen bereits, daß die Datensätze nicht für allzu detaillierte Untersuchungen geeignet sind. So ist etwa die Darstellung maximaler vertikaler Scherungen im jeweiligen Meßzeitraum nicht aussagekräftig; die Werte streuen ohne Gesetzmäßigkeit im Bereich von 0.1/s bis 0.8/s. Für spezielle Fragestellungen benötigt man Daten von besonders auf die Probleme abgestimmte Meßkampagnen.

## 5 Abschließende Bemerkungen

Das Archiv für Sonderwindmessungen in Norddeutschland ist nicht vollständig. Es wurden bisher die Datensätze aufbereitet, die bereits beim Geschäftsfeld Seeschifffahrt des Deutschen Wetterdienstes vorlagen oder leicht beschafft werden konnten. Weitere Datensätze sollten hinzukommen, um den norddeutschen Bereich, insbesondere das Küstengebiet besser abzudecken.

Die Kriterien für die Aufnahme in das Archiv sind :

- Windmessungen bis in große Höhen, d.h. deutlich über die Standardhöhe von 10 m hinausragend,
- langjährige Datenaufnahme, um zuverlässige und repräsentative Statistiken berechnen zu können oder
- spezielle Meßkampagnen mit hochaufgelösten Daten, die Aussagen über die Belastung von Windenergieanlagen zulassen.

Bisher fehlen Datensätze aus dem Ostseeraum noch völlig. Im Hinblick auf zukünftige offshore-Standorte sind aber Meßdaten aus diesem Insel- und Küstenbereich wünschenswert.

## Literaturverzeichnis

- Beyrich, F., H.Klug, A.Schomburg, D.Kalaß, U.Weisensee, A.Albers, 1994: Messung des Wind- und Turbulenzfeldes im JADE-Windpark mittels Sodar. 2.Deutsche Wind-Energiekonferenz DEWEK '94, Wilhelmshaven, Bd. 1, 229-234.
- Brümmer, B., H.Brecht, R.Kapp, M.Oesau, M.Offermann, 1997: Die meteorologische Meß-Anlage am Sendemast des NDR in Hamburg-Billwerder. Met.Inst. Univ.Hamburg, 10 pp.
- Butterfield, S., B.Holey, P.H.Madsen, C.Stork, 1996: 88/69/CD - Wind turbine generator Systems. Part 1: Safety requirements, 2.edition. Report 26July, 1996, 41 pp.
- Christoffer, J., M.Ulbricht-Eissing, 1989: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland. Ber.Dtsch.Wetterdienst Nr 147, Offenbach, 191 pp.
- Counihan, J., J.C.R.Hunt, P.S.Jackson, 1974: Wakes behind two-dimensional surface obstacles in turbulent boundary layers. J.Fluid Mech. **64**, 529-563.
- Deutscher Wetterdienst, 1967: Klima-Atlas von Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen. Selbst-verlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a.M.
- Fiedler, F., H.A.Panofsky, 1970: Atmospheric scales and spectral gaps. Bull. Am. Meteorol.Soc. **51**, 1114-1119.
- Gerth, W.P., J.Christoffer, 1994: Windkarten von Deutschland. Meteorol.Zeitschrift NF **3**, 67-77.
- Gerz, T., 1995: Kohärente Wirbelstrukturen und Mikrofronten. Ann.Meteorol. **31**, 382-383.
- Hau, E., 1988: Windkraftanlagen. Springer-Verlag Berlin, 685pp.
- Hennemuth, B., 1995: Dreidimensionale Struktur der atmosphärischen Turbulenz, gemessen in einem 110m x 76m großen Meßgitter. Ann.Meteorol. **31**, 380-381.
- Hennemuth, B., 1996: Dreidimensionale Struktur von Böen, gemessen in einem 100m x 76m großen Meßgitter. DEWEK '96, Wilhelmshaven, Tagungsband, 306-309.
- Hennemuth, B., 1997: Three-dimensional structure of gusts, measured over the rotor area of a wind turbine with 100m hub height. 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, January 6-10, 1997, Reno, NV, 9 pp.
- Herzog, R., 1992: Das große FoxPro 2.0 Buch. Data Becker, Düsseldorf, 860pp.

IEC, 1994: Wind turbine generator systems - Part 1: Safety requirements. International Standard CEI/IEC 1400-1:1994, 105pp.

Lumley, J.L., H.A. Panofsky, 1964: The structure of atmospheric turbulence. Interscience, New York, 239 pp.

Kerntechnischer Ausschuß (KTA), 1988: Instrumentierung zur Ermittlung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre. C.Heymanns Verlag, Köln, 12pp.

Kirtzel, H.J., 1997: Persönliche Mitteilung.

Körber, F., G.Besel, H.Reinhold, 1988: Meßprogramm an der 3 MW-Windkraftanlage GROWIAN. BMFT Forschungsbericht 03E-4512-A, 141pp.

Müller, W.J., 1981: Meteorologische Instrumentierung im Kernreaktor-Fernüberwachungs-System (KFÜ) Niedersachsen. Aus: Kernreaktor Fernüberwachungssystem Niedersachsen - Eine Information der Niedersächsischen Landesregierung, Hannover. 12-14.

Panofsky, H.A., A.A.Townsend, 1964: Change of terrain roughness and the wind profile. Q.J.R.Meteorol.Soc. 90, 147-155.

Roth, M., 1993: Turbulent transfer relationships over an urban surface. Part II: Integral statistics. Q.J.R.Meteorol.Soc. 119, 1105-1120.

Schmidt, H., J.Pätsch, H.Günther, B.Hennemuth-Oberle, 1993: Ein begleitendes Windmeßprogramm auf der Insel Helgoland für die dort zu errichtende Windkraftanlage. Abschlußbericht des Forschungsvorhabens 0328508C des BMFT, DWD Hamburg, 71pp.

Schreiber, K.-J., G.Tetzlaff, 1987a: Die GROWIAN-Windmessungen - Aufbereitung und Überprüfung der Datensätze. Arbeitsber.Abschn.1 der meteorol. Auswert.i.Rahmen d.GROWIAN-Meßprogr., Inst.f.Meteorol.Klimatol.Univ.Hannover, 131pp.

Schreiber, K.-J., G.Tetzlaff, 1987a: Die GROWIAN-Windmessungen - Berechnung und Auswertung der Windgeschwindigkeitsscherungen. Arbeitsber.Abschn.2 der meteorol.Auswert. i.Rahmen .GROWIAN-Meßprogr., Inst.f.Meteorol.Klimat. Univ.Hannover, 93pp.

Schreiber, K.-J., G.Tetzlaff, 1987b: Die GROWIAN-Windmessungen - Ansätze zur Zeitreihenanalyse der Windgeschwindigkeit und der Leistungsdifferenzen. Abschl.ber.Abschn.2 der meteorol. Auswert.i.R.d.GROWIAN-Meßprogr., Inst.f.Meteorol.Klimatol. Univ.Hannover, 100pp.

Schreiber, K.-J., G.Tetzlaff, 1988: Die GROWIAN-Windmessungen - Kohärenzuntersuchungen zwischen der Windgeschwindigkeit und ausgewählten Anlagenparametern. Abschl.ber.Abschn. 3 der Meteorol.Auswert.i.Rahmen d.GROWIAN Meßprogr., Inst. f.Meteorol.Klimatol. Univ. Hannover, 155pp.

Schroers, H., H.Lösslein, 1983: Extremwertextrapolation und Windprofile bei Starkwind und Sturm. Meteorol.Rdsch. **36**, 205-213.

Siebers, T., 1990: Aufbereitung und Analyse der verbundenen Langzeitmessungen von Leistung der Windkraftanlagen und Wind im Windpark Westküste. Diplomarbeit, Inst.f.Schiffbau a.d.Univ. Hamburg, 94pp.

Strack, M., A.Albers, 1996: Extrapolation gemessener vertikaler Windgeschwindigkeitsprofile. DEWEK '96, Wilhelmshaven, Tagungsband, 388-391.

Taubenheim, J., 1969: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten. Akad.Verl.ges. Leipzig, 384pp.

Tetzlaff, G., S.Theunert, A.Hoff, H.Laude, H.-J.Belitz, R.Beyer, 1984: Meteorologische Messungen zur Standortwahl für Windenergieanlagen im Küstengebiet. Forschungsber.T 84-017. Inst.f. Meteorol.-u.Klimatol.d.Univ.Hannover, 221pp.

Tetzlaff, G., W.Ruhe, S.Theunert, A.Hoff, R.Trapp, 1985: Windmessungen bis in große Höhen. Abschlußber.Forsch.vorhaben 617544/BE29 u.23/11 der Hamb.Electr.-Werke, Inst.f.Meteorol. Klimatolog.Univ.Hannover, 86pp.

Tetzlaff, G., J.Franke, A.Linse, 1989: Quantitative Bestimmung des klimatologisch gemittelten Windfeldes in der Umgebung von typischen Hindernissen Norddeutschlands. Ber.Inst. f. Meteorol.-Klimatol.Univ.Hannover **38**, 251pp.

Tetzlaff, G, U.Hoppmann, 1996: Die Leistungskurve von AEOLUS II in Abhängigkeit von mittlerem Windprofil und Turbulenz im Bereich der Rotorfläche. Leipzig und Hannover, 13pp.

Theunert, S., G.Tetzlaff, H.Bufe, 1989: Auswertung der Windmeßdaten von sechs Standorten in Norddeutschland. Ber.Inst.f.Meteorol.Klimatol. Univ.Hannover **B1**, 57pp.

Troen, I, E.L.Petersen, 1989: European Wind Atlas. Risø Nat.Lab., Roskilde, Denmark, 656pp

Verein Deutscher Ingenieure, 1994: Bestimmung der vertikalen Windprofils mit Doppler-Sodar Meßgeräten. VDI 3786, Weißdruck, 1/94, Blatt 11.

Wieringa, J., 1973: Gust factors over open water and built-up country. Boundary Layer Meteorol. **3**, 424- 441.

## Anhang A

### Liste aller korrigierten GROWIAN-Datensätze

Filename	Datum	Zeit (MEZ)	Länge (s)	Windgeschw. (m/s)	Windrichtung (°)
gr005_1	18-Jan-84	99.99	3278	12.1	224
gr005_2	18-Jan-84	0	3543	11.9	226
gr005_3	13-Jan-84	13.29	3468	21.3	246
gr011_1	26-Apr-84	0.56	3279	7	39
gr011_2	26-Apr-84	16.3	3592	6.2	38
gr011_3	26-Apr-84	0	3585	6.5	43
gr011_4	26-Apr-84	99.99	3378	7.7	43
gr012_4	07-May-84	0.56	3576	10.4	301
gr021_1	08-Nov-84	20.21	3575	11.6	97
gr021_2	08-Nov-84	20.46	3552	10.1	43
gr021_3	08-Nov-84	21.09	3546	10	105
gr022_3	29-Nov-84	8.19	3548	7.4	196
gr023_2	20-Nov-84	10.12	3550	7.5	134
gr023_3	20-Nov-84	10.36	3520	5.9	137
gr023_4	20-Nov-84	11	3499	5.4	139
gr024_1	20-Nov-84	11.24	3517	4.7	140
gr024_2	22-Nov-84	11.48	3030	4	143
gr024_3	21-Nov-84	11.03	3515	8.8	136
gr024_4	21-Nov-84	11.27	3549	8.8	132
gr025_1	21-Nov-84	11.52	3482	9.4	134
gr025_2	21-Nov-84	12.16	3067	9.7	139
gr025_3	21-Nov-84	13.25	3497	8.7	137
gr025_4	21-Nov-84	13.48	3537	8.5	138
gr026_1	21-Nov-84	14.13	3527	7.5	141
gr026_2	21-Nov-84	14.37	3547	6.7	141
gr026_3	21-Nov-84	15.01	3527	4.7	143
gr027_2	21-Nov-84	16.22	3537	5.4	178
gr027_3	21-Nov-84	16.46	3508	5.9	201
gr027_4	21-Nov-84	17.1	3546	7	220
gr028_1	21-Nov-84	18.27	3518	10.3	243
gr028_2	21-Nov-84	18.04	3531	10.3	243
gr028_3	21-Nov-84	17.57	3453	8.7	238

gr028_4	21-Nov-84	18.51	3543	10.2	242
gr029_1	21-Nov-84	19.16	3501	10.3	239
gr029_2	21-Nov-84	19.4	3549	10.1	236
gr029_4	22-Nov-84	10.2	3516	10.9	164
gr030_1	22-Nov-84	10.44	3494	10.7	163
gr030_2	22-Nov-84	11.08	3538	10.4	162
gr030_4	22-Nov-84	14.41	3536	10	187
gr031_1	22-Nov-84	15.06	3492	9.8	188
gr031_3	28-Nov-84	10.15	3253	10.7	186
gr032_1	30-Nov-84	9.45	3532	10.5	131
gr040_2	19-Mar-85	16.07	3376	4.1	55
gr040_4	19-Mar-85	9.23	1854	1.2	41
gr041_1	07-Oct-86	15.08	3630	11.7	266
gr041_2	07-Oct-86	15.32	3682	12.3	246
gr041_3	07-Oct-86	15.08	3630	12.1	263
gr041_4	04-Jun-85	11.12	3626	0.6	41
gr042_1	06-Nov-85	8.57	3507	18.8	276
gr042_2	06-Nov-85	9.21	3599	17	273
gr042_3	06-Nov-85	9.45	3533	20.9	275
gr042_4	06-Nov-85	10.09	3600	20.3	274
gr043_1	05-Nov-85	21.06	3584	17.1	228
gr043_2	05-Nov-85	21.3	3608	18	230
gr043_3	05-Nov-85	21.55	3603	19.1	234
gr043_4	05-Nov-85	22.19	3595	19.5	235
gr044_2	05-Nov-85	23.09	3534	17.7	233
gr044_3	05-Nov-85	23.32	3535	18.9	254
gr044_4	05-Nov-85	23.56	3605	13.9	265
gr045_1	06-Nov-85	10.34	3549	20.2	280
gr045_2	06-Nov-85	10.58	3606	20	276
gr045_3	06-Nov-85	11.22	3539	21	266
gr045_4	06-Nov-85	11.46	3567	21.3	268
gr046_1	11-Nov-85	16.27	3486	12.1	253
gr046_3	08-Nov-85	99.99	3601	10.3	135
gr046_4	11-Nov-85	16.51	2912	9.8	253
gr048_1	09-Nov-85	14.14	3533	9.1	201
gr048_2	09-Nov-85	14.43	3547	8.6	198
gr048_3	09-Nov-85	15.21	3511	8.8	193
gr049_1	28-Nov-85	14.17	3519	9.8	307

gr049_2	28-Nov-85	14.41	3533	9.6	312
gr049_4	29-Nov-85	10.07	3553	9.1	248
gr050_2	29-Nov-85	13.41	3587	10.1	243
gr050_3	29-Nov-85	14.05	3494	9.6	238
gr050_4	29-Nov-85	14.29	3559	9.1	232
gr051_1	02-Dec-85	15.04	3535	9	232
gr051_2	03-Dec-85	10.53	3595	16	226
gr051_3	12-Dec-85	9.44	3539	8.2	189
gr051_4	09-Feb-86	8.09	3396	2.2	42
gr054_1	20-Jan-86	12.46	3481	13.4	261
gr054_3	20-Jan-86	13.19	3507	6.2	249
gr054_4	20-Jan-86	13.42	3524	7.3	246
gr064_2	21-Feb-86	11.03	3635	0.8	34
gr064_3	09-Mar-86	10.14	3520	6.2	122
gr064_4	09-Mar-86	10.38	3537	6.6	124
gr065_1	24-Apr-86	14.08	3534	5.3	96
gr065_2	24-Apr-86	14.32	3524	7	104
gr065_3	24-Apr-86	14.55	3534	8.1	111
gr065_4	24-Apr-86	15.19	3514	7.6	112
gr068_1	27-Mar-86	12.28	3078	11.5	243
gr068_2	27-Mar-86	6	3467	10.2	269
gr068_3	27-Mar-86	18	3511	3.9	274
gr068_4	27-Mar-86	20	3514	11	244
gr070_1	05-May-86	8.52	3589	7.8	103
gr070_2	05-May-86	9.16	3568	8.6	106
gr070_3	05-May-86	9.41	3533	7	102
gr070_4	05-May-86	10.05	3590	5	100
gr071_1	05-May-86	10.39	3576	6.6	266
gr071_2	05-May-86	11.04	3545	7.6	107
gr071_3	05-May-86	11.28	3539	4.7	102
gr072_1	05-May-86	15.12	3569	9.1	123
gr072_2	05-May-86	15.36	3588	9.4	123
gr072_3	05-May-86	16	3584	8.6	121
gr072_4	05-May-86	16.25	1651	9.3	118
gr073_1	13-May-86	9.37	3589	7.6	228
gr073_2	13-May-86	10.01	3580	6.5	221
gr073_3	13-May-86	11.02	3546	7.4	229
gr073_4	13-May-86	11.26	3596	8.1	232

gr074_2	14-May-86	14.28	3591	4.4	197
gr074_4	14-May-86	16.46	3590	5.7	305
gr075_1	15-May-86	9.35	3618	10.6	137
gr075_2	15-May-86	10	3597	10.5	139
gr075_3	15-May-86	10.24	3573	9.8	136
gr075_4	15-May-86	10.49	1945	9.4	139
gr076_1	16-May-86	11.33	3591	12	249
gr076_2	16-May-86	11.57	3603	12.1	254
gr076_3	16-May-86	12.21	3500	12.8	258
gr076_4	16-May-86	12.45	3588	13	262
gr077_3	29-May-86	8.44	3587	15.2	297
gr077_4	29-May-86	9.08	3583	15.1	298
gr078_1	04-Jun-86	9.33	3580	14.6	298
gr078_2	04-Jun-86	9.57	3601	14.8	298
gr078_3	04-Jun-86	10.22	3588	14.8	294
gr078_4	04-Jun-86	10.46	3587	14.9	294
gr081_1	05-Jun-86	8	3576	15.9	200
gr081_2	05-Jun-86	8.24	3615	15.7	200
gr081_3	05-Jun-86	8.49	3600	15.3	202
gr081_4	05-Jun-86	9.13	3595	15.2	203
gr082_1	05-Jun-86	9.41	3300	15	202
gr082_2	05-Jun-86	10.03	3599	14.1	198
gr082_3	05-Jun-86	10.27	3596	13.5	192
gr082_4	05-Jun-86	10.52	3604	13.2	195
gr083_1	10-Jun-86	12.51	3595	8.5	147
gr083_2	10-Jun-86	13.15	3582	9.8	142
gr083_3	10-Jun-86	13.39	3591	9	144
gr083_4	10-Jun-86	14.04	3598	8	145
gr089_1	24-Jun-86	7.58	3587	9.3	112
gr089_2	24-Jun-86	8.22	3606	9.9	111
gr089_3	24-Jun-86	8.47	3597	10.5	113
gr089_4	24-Jun-86	9.11	3559	10.2	113
gr090_1	24-Jun-86	9.36	3580	10.4	112
gr090_2	24-Jun-86	10	3580	10.6	111
gr090_3	24-Jun-86	10.25	3607	11.2	110
gr090_4	24-Jun-86	10.49	3589	10.1	110
gr091_3	05-Jul-86	11.2	3651	10.5	217
gr092_1	17-Jul-86	16.08	3646	10	314

gr092_2	17-Jul-86	16.32	3682	10.1	320
gr092_3	17-Jul-86	16.57	3674	10.2	327
gr093_1	24-Jul-86	9.13	3629	7	245
gr093_3	24-Jul-86	14.1	3649	11.4	271
gr093_4	24-Jul-86	14.35	3683	11.3	282
gr094_1	24-Jul-86	15.01	3611	11.3	276
gr094_2	24-Jul-86	15.25	3680	12.8	287
gr094_3	24-Jul-86	15.5	3650	10.9	293
gr094_4	24-Jul-86	16.15	3657	13.5	287
gr095_1	25-Jul-86	7.57	3645	9.2	222
gr095_2	25-Jul-86	8.21	3662	9.4	223
gr095_3	25-Jul-86	7.57	3645	9.2	222
gr095_4	25-Jul-86	9.11	3661	9.9	228
gr096_1	25-Jul-86	9.39	3649	9.6	228
gr096_2	25-Jul-86	10.03	3675	9.7	226
gr096_3	25-Jul-86	10.28	3658	9.3	226
gr099_2	31-Jul-86	8.4	3633	9.4	125
gr099_3	31-Jul-86	9.04	3654	8.1	129
gr099_4	31-Jul-86	9.29	3648	7.6	133
gr100_1	31-Jul-86	9.54	3662	7	134
gr100_3	31-Jul-86	10.43	3675	7.5	136
gr101_2	31-Jul-86	15.34	2764	13	284
gr101_3	31-Jul-86	15.54	3618	11.4	282
gr101_4	31-Jul-86	16.18	3688	10.1	281
gr102_1	31-Jul-86	16.43	3678	11	283
gr102_2	31-Jul-86	17.08	3688	10.3	290
gr102_3	31-Jul-86	17.33	3680	10.9	287
gr102_4	31-Jul-86	17.58	922	9.8	286
gr103_1	01-Aug-86	7.55	3631	9.5	221
gr103_2	01-Aug-86	8.2	3654	8.8	219
gr103_3	01-Aug-86	8.44	3639	9.4	224
gr103_4	01-Aug-86	9.09	3679	9.8	229
gr104_1	01-Aug-86	9.36	3655	10.4	233
gr104_2	01-Aug-86	10	3664	11.3	238
gr104_3	01-Aug-86	10.25	3656	11.2	241
gr104_4	01-Aug-86	10.5	3684	10.9	241
gr110_1	12-Aug-86	8.42	3690	5.2	0
gr110_4	20-Aug-86	12.21	3671	9.8	253

gr111_1	20-Aug-86	12.51	3623	9.2	255
gr111_2	20-Aug-86	13.15	3695	8.1	289
gr111_3	20-Aug-86	13.4	3671	8.7	291
gr111_4	20-Aug-86	14.05	3173	8.6	286
gr116_1	28-Aug-86	13.22	1896	14.3	218
gr116_2	28-Aug-86	13.47	3700	12.7	216
gr116_3	28-Aug-86	14.12	3683	12.3	212
gr116_4	28-Aug-86	14.37	2835	12.6	214
gr118_1	01-Sep-86	10.42	3665	10.6	232
gr118_2	01-Sep-86	11.07	3692	11	233
gr118_3	01-Sep-86	11.32	3670	11.1	233
gr118_4	01-Sep-86	11.56	3702	10.9	234
gr119_1	01-Sep-86	12.23	3632	11.6	235
gr119_2	01-Sep-86	12.47	3700	12.3	246
gr119_3	01-Sep-86	13.12	3679	11.8	247
gr119_4	01-Sep-86	13.37	3698	11.9	246
gr120_1	03-Sep-86	13.22	3693	10.9	221
gr120_2	03-Sep-86	13.47	3699	11	228
gr120_3	03-Sep-86	14.12	3685	9.7	235
gr120_4	03-Sep-86	14.37	3697	9.4	240
gr122_1	08-Sep-86	15.32	3601	9.4	295
gr122_2	08-Sep-86	15.56	3695	9	299
gr122_3	08-Sep-86	16.22	3639	8.6	302
gr122_4	08-Sep-86	16.46	3578	8.9	303
gr123_1	09-Sep-86	13.11	3702	8.2	305
gr123_3	09-Sep-86	14.01	3664	7.5	304
gr123_4	09-Sep-86	14.26	3723	6.7	308
gr125_1	11-Sep-86	15.13	3648	7.8	262
gr125_2	11-Sep-86	14.48	3653	7.4	271
gr125_3	11-Sep-86	14.23	3675	7.8	264
gr125_4	11-Sep-86	15.38	3693	7.3	263
gr126_1	18-Sep-86	14.07	3681	8.1	315
gr126_2	18-Sep-86	14.32	3681	8.4	315
gr126_3	18-Sep-86	14.56	3674	7.9	317
gr126_4	18-Sep-86	15.21	3695	8.1	312
gr127_1	18-Sep-86	15.53	3681	7.8	318
gr127_2	18-Sep-86	16.18	3690	7.9	319
gr127_4	22-Sep-86	13.14	3673	12.6	261

gr128_1	22-Sep-86	13.45	3682	13.1	261
gr128_2	22-Sep-86	14.1	3616	12.3	267
gr128_3	22-Sep-86	13.45	3689	13.1	261
gr129_1	22-Sep-86	15.28	3672	11.4	0
gr129_2	22-Sep-86	15.53	3708	11.7	268
gr129_3	22-Sep-86	16.18	3664	10.9	272
gr129_4	22-Sep-86	16.42	3716	10.9	272
gr130_1	22-Sep-86	17.09	3672	10.6	272
gr130_2	22-Sep-86	17.33	3722	10.9	273
gr130_3	22-Sep-86	17.58	3690	11.4	269
gr130_4	22-Sep-86	18.24	3655	11.3	267
gr131_1	23-Sep-86	8.48	3697	8.6	269
gr131_2	23-Sep-86	9.13	3694	8	265
gr131_3	23-Sep-86	9.38	3697	9	258
gr131_4	23-Sep-86	10.03	3698	8.8	255
gr132_1	19-Oct-86	12.42	3634	13.1	240
gr132_2	19-Oct-86	13.07	3704	13.5	244
gr132_3	19-Oct-86	13.32	3679	13.4	264
gr132_4	19-Oct-86	13.56	3643	14.1	260
gr133_1	19-Oct-86	14.3	3669	15.3	257
gr133_2	19-Oct-86	14.55	3693	15.1	253
gr133_3	19-Oct-86	15.2	3675	13.5	250
gr133_4	19-Oct-86	15.45	3703	16.3	267
gr139_1	29-Sep-86	16.01	3696	8.6	300
gr139_2	29-Sep-86	16.26	3694	8.5	294
gr139_3	29-Sep-86	16.51	3676	8.2	292
gr139_4	29-Sep-86	17.15	3690	9.9	301
gr140_1	02-Oct-86	9.16	3688	9.2	239
gr140_2	02-Oct-86	9.41	3701	9.8	245
gr140_3	02-Oct-86	10.06	3679	9.9	250
gr140_4	02-Oct-86	10.3	3702	10.7	251
gr141_1	02-Oct-86	10.57	3695	10.9	256
gr141_2	02-Oct-86	11.22	3693	10.9	260
gr141_3	02-Oct-86	11.47	3670	9.4	274
gr142_1	02-Oct-86	12.4	3688	9.7	284
gr142_2	02-Oct-86	13.05	3702	9.3	281
gr142_3	02-Oct-86	13.3	3607	8.7	277
gr142_4	02-Oct-86	13.54	3710	9	281

gr143_1	15-Oct-86	9.43	3681	9.7	210
gr143_2	15-Oct-86	10.08	3688	8.7	211
gr143_3	15-Oct-86	10.32	3672	8.7	210
gr143_4	15-Oct-86	10.57	3689	7.9	216
gr144_1	20-Oct-86	8.04	3665	11.8	203
gr144_2	20-Oct-86	8.28	3664	11.2	203
gr144_3	20-Oct-86	8.53	3662	11.3	202
gr144_4	20-Oct-86	9.18	3673	10.8	201
gr145_1	20-Oct-86	9.44	3661	10.7	198
gr145_3	20-Oct-86	14.53	3551	13.7	125
gr146_1	21-Oct-86	8.13	3655	13.3	297
gr146_3	21-Oct-86	9.02	3671	9.8	268
gr146_4	21-Oct-86	9.27	3685	7.9	302
gr147_3	21-Oct-86	12.06	3679	14.8	244
gr148_1	30-Jan-87	10.25	3596	10.2	219
gr148_2	30-Jan-87	10.49	3664	9.6	218
gr148_3	30-Jan-87	11.14	3606	9.2	218
gr148_4	30-Jan-87	11.38	3670	10.4	222
gr149_1	30-Jan-87	12.06	3603	9.7	223
gr149_2	30-Jan-87	12.3	3679	10.3	219
gr149_3	30-Jan-87	12.55	3652	9.8	222
gr150_1	30-Jan-87	13.45	3660	9.8	225
gr150_2	30-Jan-87	14.1	3186	9.3	223
gr150_3	30-Jan-87	14.4	3669	8.9	232
gr150_4	30-Jan-87	15.04	3690	8.4	234
gr151_2	06-Feb-87	9.02	3638	18.6	223
gr151_3	06-Feb-87	9.27	3594	19.1	222
gr151_4	06-Feb-87	9.51	3663	19.7	222
gr152_1	06-Feb-87	10.16	3688	20.3	222
gr152_2	06-Feb-87	10.41	3676	20.5	223
gr152_3	06-Feb-87	11.06	3651	20.7	224
gr152_4	06-Feb-87	11.31	3684	20.5	223
gr153_1	06-Feb-87	16.42	3681	24.8	252
gr153_2	06-Feb-87	17.07	3680	24.8	254
gr153_3	06-Feb-87	18.03	3607	25.5	256
gr153_4	06-Feb-87	19.3	3669	23.5	256
gr154_2	09-Feb-87	11.25	3680	7.9	251
gr154_3	09-Feb-87	11.5	3674	7.5	251

gr154_4	09-Feb-87	12.15	3698	7.6	239
---------	-----------	-------	------	-----	-----

1	12.15	1.000	1.000	1.000
2	12.15	1.000	1.000	1.000
3	12.15	1.000	1.000	1.000
4	12.15	1.000	1.000	1.000
5	12.15	1.000	1.000	1.000
6	12.15	1.000	1.000	1.000
7	12.15	1.000	1.000	1.000
8	12.15	1.000	1.000	1.000
9	12.15	1.000	1.000	1.000
10	12.15	1.000	1.000	1.000
11	12.15	1.000	1.000	1.000
12	12.15	1.000	1.000	1.000
13	12.15	1.000	1.000	1.000
14	12.15	1.000	1.000	1.000
15	12.15	1.000	1.000	1.000
16	12.15	1.000	1.000	1.000
17	12.15	1.000	1.000	1.000
18	12.15	1.000	1.000	1.000
19	12.15	1.000	1.000	1.000
20	12.15	1.000	1.000	1.000
21	12.15	1.000	1.000	1.000
22	12.15	1.000	1.000	1.000
23	12.15	1.000	1.000	1.000
24	12.15	1.000	1.000	1.000
25	12.15	1.000	1.000	1.000
26	12.15	1.000	1.000	1.000

## Anhang B

Beispiel für eine Tabelle der Korrekturterme eines GROWIAN-Datensatzes

(Offset, Faktor f1 zur Anpassung an Mast 2 innen, Faktor f2\*f3 zur Anpassung an das theoretisch berechnete Windprofil, f4: evtl. Nullsetzen des Kanals)

Datensatz: ko050\_4

Kanal	Offset	f1	f2*f3	f4
1	0.00	.943	1.050	1.000
2	0.00	.945	1.000	1.000
3	0.00	.993	.968	1.000
4	0.00	1.000	1.037	1.000
5	0.00	1.000	1.028	1.000
6	0.00	1.000	1.060	1.000
7	0.00	.937	1.060	1.000
8	0.00	1.000	1.000	1.000
9	0.00	1.000	1.000	1.000
10	0.00	1.000	1.009	1.000
11	0.00	.977	1.009	1.000
12	0.00	1.000	.967	0.000
13	0.00	.976	1.028	1.000
14	0.00	.977	1.060	1.000
15	0.00	.955	1.060	1.000
16	0.00	.984	1.000	1.000
17	0.00	1.002	1.000	1.000
18	0.00	1.022	1.009	0.000
19	0.00	1.009	1.009	1.000
20	0.00	1.036	.967	0.000
21	0.00	1.000	1.000	1.000
22	7.10	1.000	1.000	1.000
23	7.10	1.000	1.000	1.000
24	7.10	1.000	1.000	1.000
25	-9.90	1.000	1.000	1.000
26	-1.30	1.000	1.000	1.000

27	-5.70	1.000	1.000	1.000
28	2.80	1.000	1.000	1.000
29	7.10	1.000	1.000	1.000
30	0.00	1.000	1.000	1.000
31	1.90	1.000	1.000	1.000
32	2.50	1.000	1.000	1.000
33	.60	1.000	1.000	1.000
34	-1.10	1.000	1.000	1.000
35	-2.30	1.000	1.000	1.000
36	-1.00	1.000	1.000	1.000
37	-4.70	1.000	1.000	1.000
38	.90	1.000	1.000	1.000
39	-4.70	1.000	1.000	1.000
40	-12.70	1.000	1.000	1.000
41	-7.70	1.000	1.000	1.000
42	0.00	1.000	1.000	1.000
43	0.00	1.000	1.000	0.000
44	0.00	1.000	1.000	0.000
45	0.00	1.000	1.000	0.000
46	0.00	1.000	1.000	0.000
47	0.00	1.000	1.000	0.000
48	0.00	1.000	1.000	0.000
49	0.00	1.000	1.000	0.000
50	0.00	1.000	1.000	0.000
51	1.81	1.000	1.000	1.000
52	0.00	1.000	1.000	1.000
53	.27	1.000	1.000	1.000
54	.13	1.000	1.000	0.000
55	0.00	1.000	1.000	1.000

## Danksagung

Das Geschäftsfeld Seeschifffahrt des Deutschen Wetterdienstes bedankt sich bei allen Personen, Institutionen und Unternehmen für die Überlassung der Daten, namentlich bei

- MDE, MAN Dezentrale Energiesysteme, München
- Prof. Dr. G. Tetzlaff, Universität Leipzig
- Prof. Dr. B. Brümmer, Universität Hamburg
- Dipl.-Met. W.J. Müller, Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hannover
- PreussenElektra AG, Hannover
- Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH, Lingen (Ems)
- Firma Metek, Elmshorn.