

Arbeitsgemeinschaft

Ingenieurbüro Matthias Rau

Bottwarbahnstraße 4
74081 Heilbronn
Ingenieurbuero.rau@online.de

Umweltmeteorologische Beratung Dr. Klaus Bigalke

METCON
Jappopweg 9h
25421 Pinneberg
info@metcon-umb.de
www.metcon-umb.de

Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken für Baden-Württemberg

Hinweise für Anwender

Auftraggeber:

Landesanstalt für Umwelt, Messungen
und Naturschutz Baden-Württemberg

Griesbachstraße 1

76185 Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

Definition.....	1
Vorbemerkung.....	2
Teil 1: Grundlagen.....	4
1 Wozu synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken	5
2 Was sind und wie entstehen synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken	7
2.1 Einführung.....	7
2.2 Das Verfahrenskonzept.....	7
2.3 Die Datenbasis.....	11
2.3.1 Antriebsdaten.....	11
2.3.2 Topographie und Landnutzung.....	13
2.4 Das Windfeldmodell METRAS PC.....	14
2.4.1 Modellbeschreibung	14
2.4.2 Qualitätssicherung	16
2.5 Simulationsrechnungen.....	17
2.5.1 Testrechnungen zur Modellgebietsgröße	17
2.5.2 Produktionsrechnungen	18
2.6 Die Berechnung synthetischer Windstatistiken.....	19
2.7 Erweiterung auf synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken	20
3 AKS für Baden-Württemberg / Datenlieferung	23
3.1 Angaben zu den Daten.....	23
3.2 Angaben zu den Steckbriefen im Internet.....	24
Teil 2: Anwendungen	25
4 Einführung.....	26
5 Wie unterscheiden sich synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken von gemessenen?	28
5.1 Raumbezug.....	28
5.2 Höhenbezug.....	29
5.3 Horizontale Repräsentativität	29
5.4 Mögliche Fehlerquellen	30
5.5 Fazit	30

6	Vergleich gemessener und synthetischer AKS	32
6.1	Einführung.....	32
6.2	Allgemeine Anforderungen an die Qualität synthetischer AKS	32
6.3	Bandbreite berechneter Immissionswerte bei Verwendung	
	unterschiedlicher meteorologischer Messdaten.....	33
6.3.1	Unterschiede zwischen Rechnungen mit AKTerm oder AKS.....	33
6.3.2	Einfluss zeitlicher und räumlicher Variabilität gemessener AKS	33
6.3.3	Auswirkung räumlicher Übertragung (QPR)	34
6.3.4	Konkret formulierte Anforderungen an die Qualität von synAKS.....	35
6.4	Ergebnisse der Vergleichsrechnungen	35
6.5	Fazit	38
7	Bedeutung des Repräsentativitätsbereichs synthetischer Daten	
	für die Vergleichbarkeit mit Messungen.....	39
7.1	Station Wendelstein (DWD).....	39
7.2	Station Spitzingsattel/Schliersee (Meteo Media).....	41
7.3	Fazit	42
8	Konkrete Anwenderhinweise zum Umgang mit synthetischen Statistiken.....	43
8.1	Horizontale Repräsentativität, Höhen- und Raumbezug	43
8.1.1	Wann kann eine synthetische Statistik in welchem Umkreis	
	angewendet werden und wann nicht?	43
8.1.2	Die mittlere Windgeschwindigkeit ist im Vergleich	
	zu einer städtischen Messstation zu hoch	44
8.1.3	Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind in Kuppenlagen zu gering.....	45
8.2	Was beinhalten synthetische Statistiken alles?	46
8.2.1	Sind in den synthetischen Statistiken Kaltlufteinflüsse enthalten?	46
8.2.2	Können die synthetischen Statistiken auch für Ausbreitungsrechnungen in	
	Waldgebieten verwendet werden?	46
8.2.3	Können die synthetischen Statistiken auch für eine City mit.....	
	Hochhäusern verwendet werden?	47
8.3	Zukünftige Entwicklungen	47
8.3.1	Gibt es bald auch synthetische Statistiken in noch besserer Auflösung?.....	47
8.3.2	Das Klima ändert sich! Ist das in den synthetischen Statistiken berücksichtigt? .	48
8.3.3	Die Flächennutzung ändert sich; wie kann das in den synthetischen	
	Statistiken berücksichtigt werden?	48
8.3.4	Gibt es auch Statistiken für größere Höhen, z.B. 40 m über Grund?	48
8.4	Akzeptanz der synAKS für Ausbreitungsrechnungen – Erfahrungen	49
8.4.1	Können synAKS für jede Anwendung gleichermaßen verwendet werden?.....	49

8.4.2	Grundsätzlicher Umgang bei Verwendung von meteorologischen Daten	49
9	Literatur	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiel Ilmensee: Messungen lassen sich auch auf nahe gelegene Standorte... nicht immer einfach übertragen (Erläuterungen dazu im Text).....	6
Abbildung 2:	Illustration des Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken..... (Erläuterungen im Text).....	8
Abbildung 3:	Illustration des modifizierten statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text).....	10
Abbildung 4:	Lage der Gitterpunkte mit Analysedaten über Deutschland	11
Abbildung 5:	Reduzierung der Anzahl meteorologischer Antriebssituationen mittels Clusteranalyse. Jeder Datenpunkt ist durch die geostrophischen Windkomponenten u und v (x - und y -Achse) und einen Temperaturgradienten (Farbe des Datenpunktes) definiert.....	12
Abbildung 6:	Abbildung der realen topographischen Verhältnisse (links) auf mittlere Geländehöhen (Mitte) und Landnutzungen (rechts) in jeder Modell-Gitterzelle.....	13
Abbildung 7:	Auf Basis der physikalischen Gesetze für die Atmosphäre und Daten zum Modellgebiet und der meteorologischen Situation berechnet METRAS PC die bodennahen Windsysteme.....	14
Abbildung 8:	Beispiel für ein mit METRAS PC berechnetes bodennahes Windfeld im Großraum Stuttgart bei stabil geschichteter Atmosphäre und schwachem östlichen Höhenwind.....	15
Abbildung 9:	Prinzipiskizze zum Berechnungsverfahren synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken	20
Abbildung 10:	Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade im Jahresverlauf (links) und Tagesverlauf (rechts) für Hamburg oben (nach (18)) und München unten (nach (19)).....	22
Abbildung 11:	Beispiel eines Steckbriefes	24
Abbildung 12:	Vom Standort abhängige horizontale Repräsentativität von Messungen (links) und einheitliche Repräsentativität synthetischer Windstatistiken auf Modellgitterflächen von 500 m Kantenlänge (rechts)	29
Abbildung 14:	Relative Immissionskennwerte Jahresmittel (JM) und maximales Stundenmittel mit 18 Überschreitungen (S18), berechnet an zehn Stationen in Baden- Württemberg für Quellhöhen von 10 m	37
Abbildung 15:	Relative Immissionskennwerte Jahresmittel (JM) und maximales Stundenmittel mit 18 Überschreitungen (S18), berechnet an zehn Stationen in Baden- Württemberg für Quellhöhen von 50 m	37
Abbildung 16:	Darstellung des Standorts der DWD Station Wendelstein mit gemessener Windrose	39

Abbildung 17: Synthetische Windrosen in 500 m Auflösung im	
Bereich des Wendelstein-Massivs	40
Abbildung 18: Synthetische Windrosen in 150 m Auflösung im	
Bereich des Wendelstein-Massivs	40
Abbildung 19: Darstellung des Standorts der Meteo Media-Station	
Spitzingsattel/Schliersee mit gemessener Windrose	41
Abbildung 20: Synthetische Windrosen in 500 m Auflösung im	
Bereich Spitzingsattel/Schliersee	41
Abbildung 21: Synthetische Windrosen in 150 m Auflösung im	
Bereich Spitzingsattel/Schliersee	42
Abbildung 22: Aufbau von Grenzschichten in innerstädtischen Bereichen (23)	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterschiedliche Merkmale gemessener und synthetischer Statistiken	30
---	----

Definition

In diesem Dokument werden an vielen Stellen die Begriffe *gemessene Windstatistik*, *gemessene Ausbreitungsklassenstatistik*, *synthetische Windstatistik* und *synthetische Ausbreitungsklassenstatistik* verwendet. Dabei wird immer der Begriff gewählt, der im Kontext gerade passend ist. Bei einigen Kapiteln ist bzgl. der Begrifflichkeit zusätzlich zu Beginn ein kleiner Hinweis gegeben. Um bezüglich der Begriffe etwas Klarheit zu schaffen, werden im Folgenden ein paar Definitionen gegeben.

Windstatistik:

Unter Windstatistik wird die 2-parametrische Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung verstanden. Das übliche Format ist eine 36 x 9-Matrix mit 36 Windrichtungsklassen zu 10° und 9 Windgeschwindigkeitsklassen nach TA Luft.

Ausbreitungsklassenstatistik:

Bei einer Ausbreitungsklassenstatistik kommt die Ausbreitungsklasse als 3. Parameter dazu. Es erfolgt eine Unterteilung der Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung für jede der insgesamt 6 AK-Klassen. Das übliche Format ist eine 36 x 54-Matrix mit 36 Windrichtungsklassen zu 10° und 9 Windgeschwindigkeitsklassen für jede der 6 AK-Klassen.

Gemessene Wind- bzw. Ausbreitungsklassenstatistik:

Eine gemessene Wind- bzw. Ausbreitungsklassenstatistik ist eine aus Messdaten abgeleitete 2- bzw. 3-parametrische Häufigkeitsverteilung.

Synthetische Wind- bzw. Ausbreitungsklassenstatistik (synWS bzw. synAKS):

Eine synthetische Wind- bzw. Ausbreitungsklassenstatistik ist eine aus Berechnungen abgeleitete 2- bzw. 3-parametrische Häufigkeitsverteilung.

Überführung einer AKS in eine WS:

Eine 3-parametrische gemessene oder synthetische Ausbreitungsklassenstatistik kann auf eine 2-parametrische Windstatistik zurückgeführt werden, indem die Häufigkeiten der Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten für die einzelnen AK-Klassen zusammengefasst werden.

Vorbemerkung

Baden-Württemberg ist ein Bundesland mit großen Unterschieden in der Geländehöhe und ausgeprägten Geländestrukturen. Insbesondere vom Rheintal über den Schwarzwald und die Schwäbische Alb sowie im Verlauf des Neckartals gestaltet sich das Gelände kleinräumig hoch variabel. Aufgrund des Geländereiefs herrschen in Baden-Württemberg sehr unterschiedliche Windverhältnisse vor. Während in freien Lagen als häufigste Windrichtungen Südwest und Nordost auftreten, kann der Wind in engen Tälern durch Kanalisierung auf wenige Richtungssektoren eingeschränkt werden. In manchen Hangbereichen und Tälern spielen thermische Windsysteme, insbesondere nächtliche Kaltluftwindsysteme, eine erhebliche Rolle.

Die Kenntnis der lokal repräsentativen Windverhältnisse ist für viele Fragen des Umweltschutzes von großer Bedeutung. So werden beispielsweise bei der Prognostizierung von Schadstoffimmissionen (Luftschadstoffe, Gerüche) im Nahbereich von kleineren Industriebetrieben, genehmigungsbedürftigen Anlagen, Straßen etc. bevorzugt mikro- und mesoskalige Ausbreitungsmodelle eingesetzt. Zur Ermittlung von statistischen Kenngrößen (Jahresmittelwerte, Perzentile) benötigen diese Modelle als Antrieb eine für das Untersuchungsgebiet repräsentative Windstatistik, die nicht durch lokale Effekte geprägt sein sollte. Des Weiteren besteht ein Bedarf an nicht nur lokal repräsentativen Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken im Rahmen von Standortprüfungen oder Regionalklimafragen.

Im Jahr 2002 hat die LUBW, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (damals: LfU) erstmals die Arge Ingenieurbüro Rau (Heilbronn) und METCON (Pinneberg) mit der Berechnung räumlich hoch auflösender synthetischer Windstatistiken (synWS) für den Raum Stuttgart beauftragt. Diese sollten den Behörden als Hilfsmittel zur Verwaltungsvereinfachung und Beschleunigung immissionsschutzrechtlicher Verfahren dienen. In den Jahren 2002 bis 2006 wurden die Berechnungen sukzessive auf die ganze Landesfläche erweitert.

Dieses Projekt wurde im Jahr 2006 erfolgreich abgeschlossen. Es standen somit für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg Windstatistiken, also zweidimensionale Häufigkeitsverteilungen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit, zur Verfügung, die auf dem Antriebszeitraum 1985 – 1995 basieren.

Im Jahr 2007 wurden die damals vorliegenden synWS über das Internet einem größeren Nutzerkreis zugänglich gemacht.

Bei Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft Anhang 3, Abs. 8 (1) wird ein vollständiger meteorologischer Datensatz benötigt. Dieser besteht neben Windgeschwindigkeit und Windrichtung noch aus einem Stabilitätsmaß der Atmosphäre (Monin-Obukhov-Länge bzw. Ausbreitungsklasse). Bei den synthetischen Windstatistiken handelt es sich um 2-parametrische Statistiken mit den Parametern Windgeschwindigkeit und Windrichtung, die kein Stabilitätsmaß

beinhalten. Das Stabilitätsmaß "Ausbreitungsklasse" wird an Stationen des DWD aus vollständigen Wolkenbeobachtungen bestimmt. Da die Anzahl der DWD-Stationen mit vollständigen Wolkenbeobachtungen recht gering ist (aktuell bspw. in Baden-Württemberg nur drei Stationen), ist die Datenlage zur Ermittlung von Ausbreitungsklassenstatistiken auf Basis gemessener Daten dünn. Dabei wurde und wird meist das Kolb-Verfahren (2) angewendet, wobei sich je nach Gutachter und verwendeten Datensätzen die ermittelten Ausbreitungsklassenstatistiken am Standort zum Teil deutlich unterscheiden können. Bei diesem Verfahren werden die Häufigkeiten kombinierter Ausbreitungs- und Geschwindigkeitsklassen räumlich übertragen und damit implizit vorausgesetzt, dass an Mess- und Zielort bei großräumig gleichen meteorologischen Bedingungen gleiche Windgeschwindigkeiten auftreten. Weil die Windgeschwindigkeit eine sehr lokal beeinflusste Größe ist, ist diese Annahme nur selten eine gute Näherung.

Dieser Mangel an Konsistenz sowie die berechtigte Kritik an den Übertragungsverfahren gaben den Ausschlag für ein weiteres Vorhaben, in dem das Berechnungsverfahren zur Berechnung von synthetischen Windstatistiken um Ausbreitungsklassen zur Berechnung von synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken (synAKS) erweitert wurde. Dieses Projekt wurde im Jahr 2007 erfolgreich abgeschlossen (3).

In den letzten Jahren wurde das Verfahren zur Erzeugung synAKS durch die ARGE kontinuierlich verbessert und weiterentwickelt. Mittlerweile stehen auch für das Land Baden-Württemberg neu berechnete synthetische AKS zur Verfügung, die auf einem aktualisierten Antriebszeitraum 2001 bis 2010 basieren. Diese komplett neu berechneten Datensätze wurden von der LUBW bestellt und im Februar 2013 ausgeliefert.

Die wesentlichen Informationen zu den synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken, und zwar die Windrichtungsverteilung sowie die Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungsklassen und der TA Luft Windgeschwindigkeitsklassen sollen über das Internet der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Um diese synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken sachgerecht interpretieren und anwenden zu können, ist die Kenntnis der Berechnungsgrundlagen sowie die Kenntnis des wesentlichen Unterschieds zwischen berechneten und gemessenen Statistiken von großer Bedeutung. Hierzu soll die vorliegende Dokumentation einen Beitrag leisten.

Der erste Teil „Grundlagen“ umfasst die Kapitel 1 bis 3 und beschreibt das Verfahren, das der Erstellung von synthetischen Windstatistiken bzw. synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken zu Grunde liegt.

Der zweite Teil der Dokumentation, mit „Anwendungen“ betitelt, befasst sich mit dem Vergleich zwischen gemessenen und synthetischen Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken, zeigt die Möglichkeit und die Grenzen von synthetischen Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken auf und befasst sich mit der sachgerechten Anwendung von synthetischen Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken. Dieser zweite Teil umfasst die Kapitel 4 bis 8.

Teil 1: Grundlagen

1 Wozu synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken

Zweiparametrische Wind- bzw. dreiparametrische Ausbreitungsklassenstatistiken sind unverzichtbare Eingangsdaten für anlagenbezogene Immissionsprognosen im Rahmen von Genehmigungsverfahren nach TA Luft (1) und GIRL (4), für die Berechnung von Verkehrsimmissionen sowie für die schnelle Einordnung von Nachbarschaftsbeschwerden durch Gerüche und Lärm. Auch für die Einschätzung klimatischer Verhältnisse, Fragen der Standortfindung oder technische Auslegungen spielen Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken eine wichtige Rolle. Meist liegt jedoch für einen konkreten Standort keine gemessene Wind- oder Ausbreitungsklassenstatistik vor.

Da die von den Landesbehörden, dem DWD sowie von Privatanbietern betriebenen stationären Messnetze nur aus einer beschränkten Anzahl von Messstationen bestehen und diese häufig lokal beeinflusst sind, müssten bei vielen Fragestellungen des Immissionsschutzes bzw. des Regionalklimas über einen längeren Zeitraum Windmessungen durchgeführt werden, um eine für einen Anlagenstandort oder ein Untersuchungsgebiet repräsentative Wind- oder Ausbreitungsklassenstatistik zu erhalten. Dies scheitert in aller Regel am zeitlichen und finanziellen Aufwand. Man behilft sich daher in der Regel mit der Übertragung der Winddaten einer nächstgelegenen, langjährig betriebenen Station auf den zu untersuchenden Standort oder das Untersuchungsgebiet. Teilweise führen diese Übertragungsverfahren mitunter zu ungenauen Ergebnissen. Vor allem in orographisch stark gegliedertem Gelände mit einer lokalen Prägung einer gemessenen Windverteilung ist die Übertragung einer auf Messdaten basierender Windstatistik oder einer daraus abgeleiteten Ausbreitungsklassenstatistik oft nicht mehr zu verantworten.

Das folgende Beispiel verdeutlicht, dass die Nähe einer guten, d. h. räumlich repräsentativen Messstation kein ausreichendes Kriterium ist, um eine für einen Standort geeignete Wind- oder Ausbreitungsklassenstatistik zu erhalten.

Die LUBW hat von 1990-1996 im Linzgau in weitgehend freiem Gelände eine meteorologische Messstation betrieben. Aus der **Abbildung 1** kann die Lage der Station (blauer Stern) und die gemessene Windstatistik entnommen werden. Obwohl die Windmessung bei Lichtenegg-Glashütten als recht repräsentativ und ungestört von lokalen Einflüssen gewertet werden kann, ist sie doch für die Übertragung, auf den ca. 2 km südwestlich gelegenen Standort bei Ellenfurt (blaues Kreuz) ungeeignet. Während an der Messstation fast ausschließlich südwestliche und nordöstliche Windrichtungen vorherrschen und mit 3,7 m/s ein relativ hohes Jahresmittel der Windgeschwindigkeit vorliegt, treten 200 m tiefer im Tal bei Ellenfurt überwiegend Winde aus Nordnordwest und ein sekundäres Maximum bei Südsüdost auf und die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt mit 1,4 m/s nur gut ein Drittel der weiter oben gemessenen Geschwindigkeit. Sind an der Messstation die Windgeschwindigkeitsklassen (blaue Farbabstufungen) in beiden Hauptwindrichtungen etwa gleich verteilt, so sind im Tal höhere

Windgeschwindigkeiten eher mit nördlichen Windrichtungen und niedrige Windgeschwindigkeiten überproportional mit südlichen Windrichtungen verbunden.

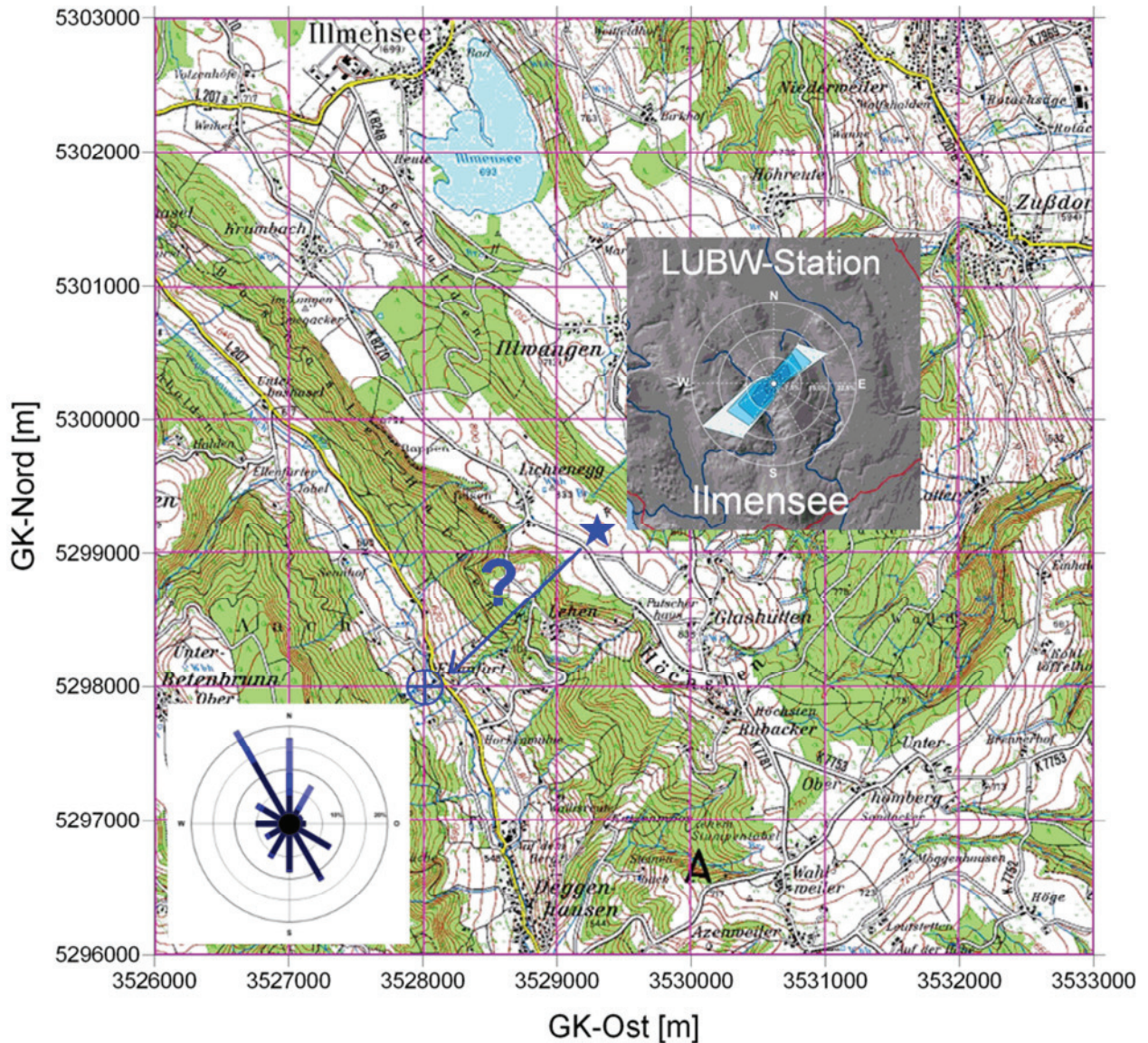


Abbildung 1: Beispiel Ilmensee: Messungen lassen sich auch auf nahe gelegene Standorte nicht immer einfach übertragen (Erläuterungen dazu im Text).

Dies macht deutlich, dass räumlich hoch auflösende synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken ein wertvolles Hilfsmittel für Planer, Behörden und Gutachter darstellen. Sie machen weitgehend unabhängig von Messungen, aufwändigen Repräsentanzprüfungen und Übertragungen sowie den damit verbundenen Kosten und Zeitverlusten.

Aber: Um synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken richtig interpretieren und anwenden zu können, sind Informationen wichtig und hilfreich, wie diese Statistiken berechnet worden sind und worin sie sich von Messungen unterscheiden!

2 Was sind und wie entstehen synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken

2.1 Einführung

Zunächst soll ein häufiges Missverständnis geklärt werden. Synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken sind

- **nicht** gemessen,
- **nicht** aus gemessenen Windstatistiken interpoliert oder anders abgeleitet,
- enthalten **keine** Informationen aus bodennahen Messungen und
- sind **nicht** als punktbezogene Informationen zu verstehen.

Synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken werden vielmehr ohne Messungen vor Ort **durch Zusammenführung** von topographischen und meteorologisch-statistischen Informationen sowie aus den Ergebnissen von Modellrechnungen **künstlich hergestellt**.

Hinweis: In den folgenden Unterkapiteln wird das Verfahren zur Erstellung synthetischer Windstatistiken beschrieben. In Kapitel 2.7 wird dann die Erweiterung des Verfahrens zur Ermittlung einer 3-parametrischen synthetischen Ausbreitungsklassenstatistik erläutert. In den Kapiteln 2.2 bis 2.6 wird dementsprechend konsequent von synthetischen Windstatistiken gesprochen, ab Kapitel 2.7 von synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken.

2.2 Das Verfahrenskonzept

Die Erdoberfläche mit ihren wechselnden Geländehöhen und Flächennutzungen beeinflusst die Windverhältnisse und andere atmosphärischen Größen ganz erheblich. Oberhalb der bodennahen Grenzschicht, die sich in Mitteleuropa über einige hundert Meter bis etwa 2 km Höhe erstrecken kann, ist der Einfluss des Bodens gering. Die atmosphärischen Verhältnisse werden dort fast nur von der großräumigen Wetterlage bestimmt. In dieser Höhe stellen sich die Windverhältnisse großräumig relativ homogen dar und werden deshalb mit regelmäßigen meteorologischen Messungen und globalen Wettervorhersagemodellen recht gut dargestellt. Die Grundidee des Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken beruht auf dem Konzept des statistisch-dynamischen Ansatzes, wie er in (5) beschrieben wird. Dieser Ansatz geht davon aus, dass das lokale bodennahe Windklima eindeutig von wenigen Parametern des übergeordneten großskaligen Windklimas und dessen langjähriger Häufigkeit sowie der Geländeoberfläche bestimmt wird. Das großskalige Windklima wird durch die Häufigkeit einer Anzahl charakteristischer Klassen („Cluster“) und deren mittleren Windrichtungen und -geschwindigkeiten sowie ggf. der Schichtung, der Geländeoberfläche und der topographischen Gegebenheiten (Landnutzung, Geländehöhe) charakterisiert. Außerdem wird angenommen,

dass thermodynamisch bedingte Windsysteme im Vergleich zu der durch den großskaligen Druckgradienten (geostrophischer Wind) angetriebenen Strömung vernachlässigbar sind. Wird jede dieser großskaligen repräsentativen Situationen stationär simuliert, so resultieren daraus die jeweils zugehörigen mesoskalig geprägten bodennahen Strömungsmuster. Die bodennahe Windstatistik an jedem Gitterpunkt ergibt sich dann aus der Wichtung des für jedes Cluster am Gitterpunkt bodennah simulierten Windes mit dessen relativer Häufigkeit.

Diese Grundidee ist in der **Abbildung 2** illustriert: Zu jeder großräumigen Wettersituation („Antriebswind 1“; „Antriebswind 2“; usw.) wird jeweils eine Modellsimulation durchgeführt. Daraus werden eindeutige mit diesen Wettersituationen verbundene Bodenwindfelder berechnet. Während die Höhenwinde recht homogen sind, stellen sich bodennah unter Umständen sehr heterogene Windfelder ein. Jede Höhenwindsituation ist im langjährigen Mittel mit bestimmten Auftretungshäufigkeiten verknüpft. Somit tritt auch das zugehörige Bodenwindfeld mit der gleichen Häufigkeit auf. Für jeden Ort im Modellgebiet kann durch gewichtete Mittelung aller dort berechneten Bodenwinde eine Windstatistik abgeleitet werden. In der **Abbildung 2** ist rechts beispielhaft skizziert, wie damit eine 30°-Windrichtungsverteilung im Höhenwind (blau) auf eine bodennahe Windrichtungsverteilung (grün) an einen bestimmten Ort abgebildet wird.

Mit dieser Art von Modellrechnungen können alle dynamisch bedingten Einflüsse des Geländes auf das bodennahe Windklima erfasst werden. Dazu gehören beispielsweise Leewirbel hinter Bergen, Kanalisierungen des Windes in Tälern und Abbremsen des Windes über rauem Gelände (Wald, Bebauung).

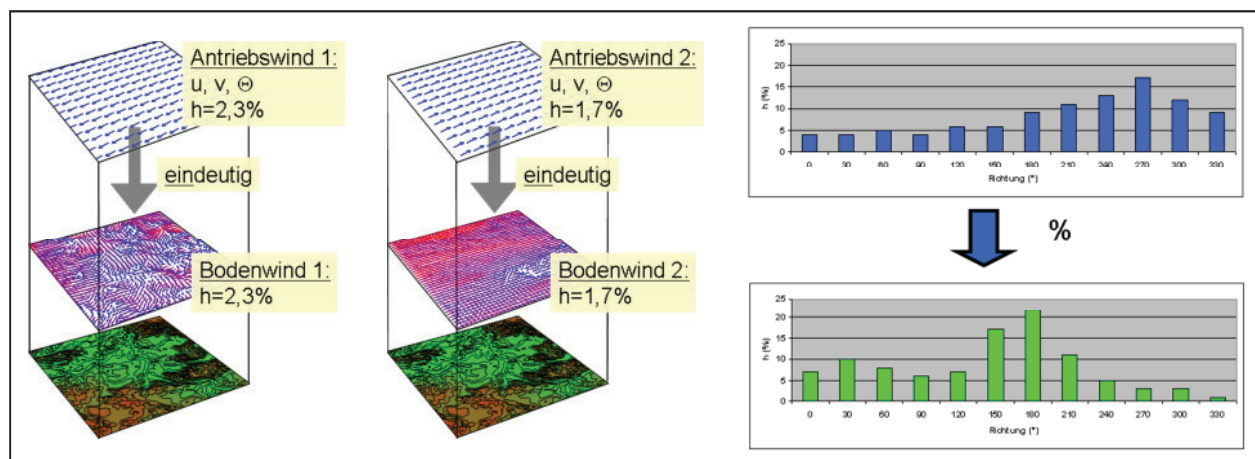


Abbildung 2: Illustration des Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text).

In vielen Teilen Deutschlands ist eine wesentliche Voraussetzung dieses kurz geschilderten Verfahrens, welches lediglich dynamische Windsysteme berücksichtigt, nicht erfüllt. In diesen Teilen spielen thermisch bedingte Kaltluftwindssysteme eine erhebliche Rolle. Nächtliche Kaltluftabflusssysteme bilden sich bevorzugt bei schwachwindigen Strahlungswetterlagen mit

dem Einsetzen einer negativen Strahlungsbilanz kurz vor Sonnenuntergang aus und können bis in die Vormittagsstunden anhalten. Solche Kaltluftsysteme können je nach Topographie und übergeordnetem Antrieb zwischen 12 und knapp 17 Stunden andauern. Da sich mit der nächtlichen Ausstrahlung die bodennahen Luftschichten vom Boden ausgehend stabilisieren und häufig von den Strömungsverhältnissen der darüber liegenden Luftschichten abkoppeln, können Kaltluftabflüsse auch noch bei mittleren Windgeschwindigkeiten (am Tage bzw. nachts oberhalb der Inversion) beobachtet werden. Ein Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe (10 m), Bedeckungsgrad und Stabilitätsverhältnissen wird in der VDI-Richtlinie 3782 Blatt 1 (6) beschrieben. Danach ist nachts bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s bei allen Bedeckungsgraden von den stabilen Ausbreitungsklassen I bzw. II auszugehen. Der Einfluss thermisch bedingter Windsysteme auf die charakteristischen lokalen Windverhältnisse zeigt sich an einigen Messstationen in Form ausgeprägter „Kaltluftsektoren“ in den gemessenen Windrichtungsverteilungen. Um diesem Phänomen in den synthetischen Windstatistiken Rechnung tragen zu können, wurde das Verfahren erweitert. Neben den stationären dynamischen Modellrechnungen wurden zusätzliche Modellrechnungen für windschwache Strahlungswetterlagen durchgeführt, um die regional bedeutsamen thermischen Windsysteme wie eben diese nächtlichen Kaltluftabflüsse zu erfassen. Je nach Auftrittshäufigkeit solcher Wetterlagen werden diese dann in die statistische Auswertung der Modellrechnungen für jeden Ort eingebunden. Dieses erweiterte Verfahren wird im Folgenden als **modifiziertes statistisch-dynamisches Verfahren** bezeichnet. In der **Abbildung 3** ist der erweiterte Verfahrensablauf dargestellt.

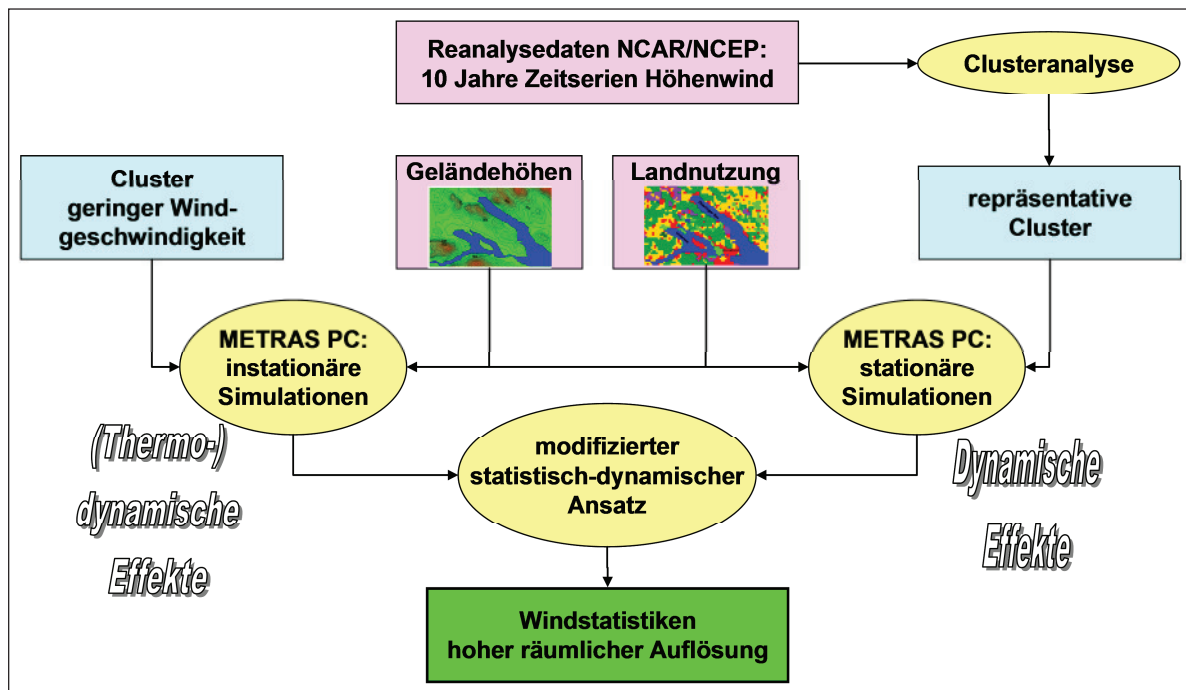


Abbildung 3: Illustration des modifizierten statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text).

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Bausteine des Verfahrens, und zwar die benötigten Eingangsdaten sowie das verwendete Berechnungsmodell, beschrieben.

2.3 Die Datenbasis

2.3.1 Antriebsdaten

Als Datenbasis für die meteorologischen Antriebsdaten wird eine charakteristische großskalige Klimatologie, beschrieben durch den geostrophischen Wind und den vertikalen Temperaturgradienten, benötigt. Als Datengrundlage zur Analyse der charakteristischen großskaligen Klimatologie sind langjährige Zeitreihen von NCAR/NCEP-Reanalysedaten geeignet, wie sie vom NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) bereitgestellt werden (7). Die Reanalysedaten basieren auf einer Datenassimilation von Messdaten (Bodenmessungen, Radiosonden, Satelliten usw.) in einem globalen Vorhersagemodell. Diese Daten liegen seit 1979 zu täglich vier Terminen (0^{00} , 6^{00} , 12^{00} und 18^{00} UTC) auf einem globalen $2,5^\circ$ -Gitter und allen Hauptdruckniveaus vor. Im Rahmen umfangreicher Analysen, die von der Arge IB Rau und METCON durchgeführt wurden, wurde festgestellt, dass der bodennahe geostrophische Wind am besten als Antrieb geeignet ist. Die statistische Analyse der meteorologischen Zeitreihen zur Bereitstellung von Modellantriebsdaten erfolgte für einen aktuellen 10-Jahreszeitraum (01.01.2001 – 31.12.2010).

Die **Abbildung 4** zeigt die Verteilung der Analysepunkte über Deutschland. Baden-Württemberg wird in etwa von vier Analysepunkten eingeschlossen, aus denen die Antriebsdaten abgeleitet wurden.



Abbildung 4: Lage der Gitterpunkte mit Analysedaten über Deutschland

Die zehnjährige Antriebszeitreihe umfasst etwa 14.600 meteorologische Situationen, die natürlich nicht alle simuliert werden können. Darum werden diese Daten mittels einer Clusteranalyse auf eine handhabbare Zahl meteorologischer Situationen reduziert, für die dann einzeln Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Eine Clusteranalyse funktioniert prinzipiell so, dass alle Datenpunkte, die eine ähnliche meteorologische Situation beschreiben, mithilfe einer gewichteten Mittelung zu einem neuen Datenpunkt zusammengefasst werden. Die **Abbildung 5** veranschaulicht diesen prinzipiellen Vorgang. Auf der linken Seite sind alle Datenpunkte einer zehnjährigen Zeitreihe dargestellt. Jeder Datenpunkt ist definiert durch die beiden Komponenten u und v des Höhenwindes (sog. geostrophischer Wind), die auf den x - und y -Achsen aufgetragen sind. Die Farbe eines Datenpunktes entspricht der zugehörigen Temperaturschichtung. Als Ergebnis der Clusteranalyse (rechts) liegen Modellantriebsdaten für eine begrenzte Anzahl meteorologischer Situationen vor, die in ihren statistischen Eigenschaften mit den ursprünglich 14.600 Situationen in guter Näherung übereinstimmen. Diese verdichteten Situationen (Cluster) werden dann tatsächlich mit dem Modell simuliert. Durch umfangreiche Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die auf der Basis von 120 Clustern berechneten bodennahen Windverteilungen Messungen gut wiedergeben. Durch eine Verdopplung (Verfeinerung) der Clusteranzahl konnte keine nennenswerte Verbesserung in den Windverteilungen erzielt werden.

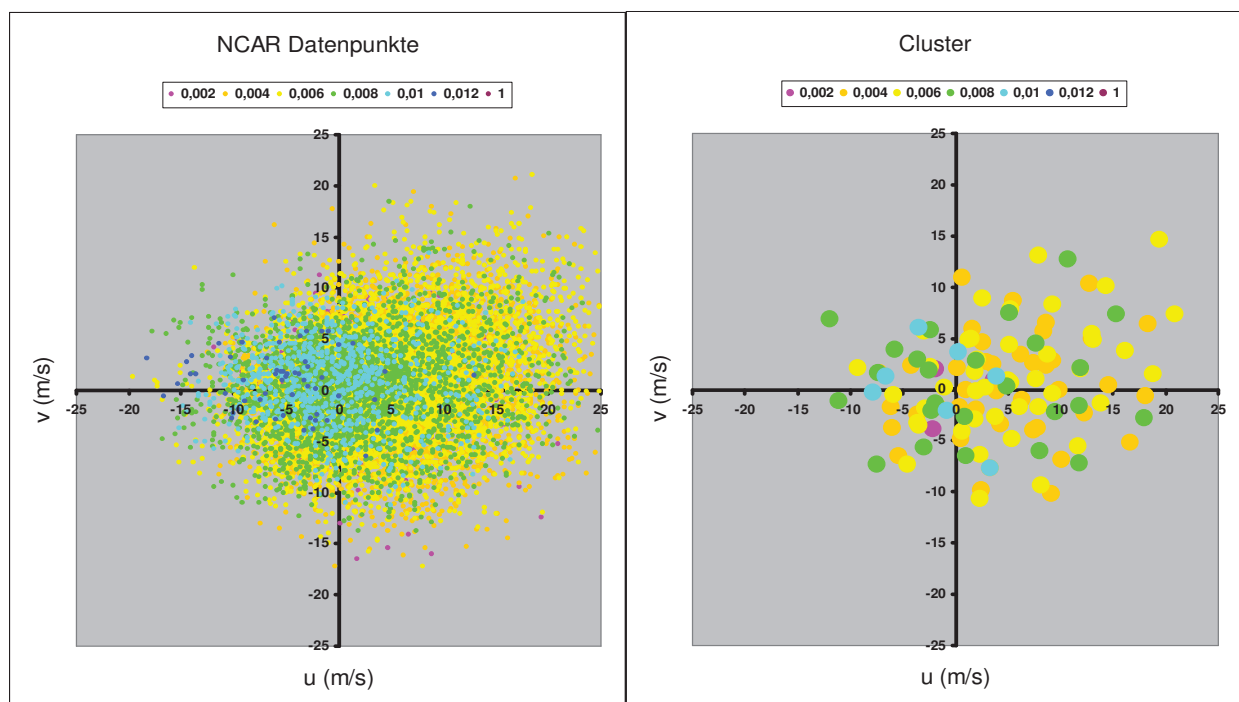


Abbildung 5: Reduzierung der Anzahl meteorologischer Antriebssituationen mittels Clusteranalyse. Jeder Datenpunkt ist durch die geostrophischen Windkomponenten u und v (x - und y -Achse) und einen Temperaturgradienten (Farbe des Datenpunktes) definiert.

2.3.2 Topographie und Landnutzung

Neben den meteorologischen Antriebsdaten müssen für die Modellrechnungen Topographiedaten, d.h. die Geländehöhen und die Landnutzungen, bereitgestellt werden. Hierfür werden die CORINE-Landnutzungsdaten (8) und Geländehöhen aus dem GlobDEM50-Datensatz (9) verwendet.

Die **Abbildung 6** zeigt beispielhaft für einen Gebietsausschnitt in Baden-Württemberg, wie die realen Verhältnisse auf das Modellgitter abgebildet werden. Bei den Modellrechnungen wird das einzelne Rechengebiet in einheitliche Gitterzellen von $500 \times 500 \text{ m}^2$ Grundfläche aufgeteilt. Innerhalb jeder Gitterzelle „sieht“ das Modell nur eine mittlere Geländehöhe und die prozentualen Anteile von zehn verschiedenen Landnutzungskategorien (Wasser, Wiese, Acker, Wald, Bebauung, usw.). Alle räumlichen Strukturen innerhalb dieser Gitterzellen werden vom Modell nicht aufgelöst und deshalb in ihrer Wirkung auf die Strömungsverhältnisse auch nicht berücksichtigt. Dies ist für die Anwendung synthetischer Windstatistiken von großer Wichtigkeit und bedeutet z. B., dass ein Tal mindestens eine Breite von 500 m aufweisen muss, um näherungsweise auf dem Gitter abgebildet werden zu können. In der mittleren Abbildung ist das niedrige Gelände grün dargestellt, Höhenzüge sind braun und violett. Das nach Südosten verlaufende Tal wird von dem Modellraster gerade noch aufgelöst. Die Ortschaften heben sich auf dem Modellgitter als überwiegend bebaute Bereiche rot ab (rechts), landwirtschaftliche Flächen sind braun, Wälder in unterschiedlichen Grüntönen zu erkennen.

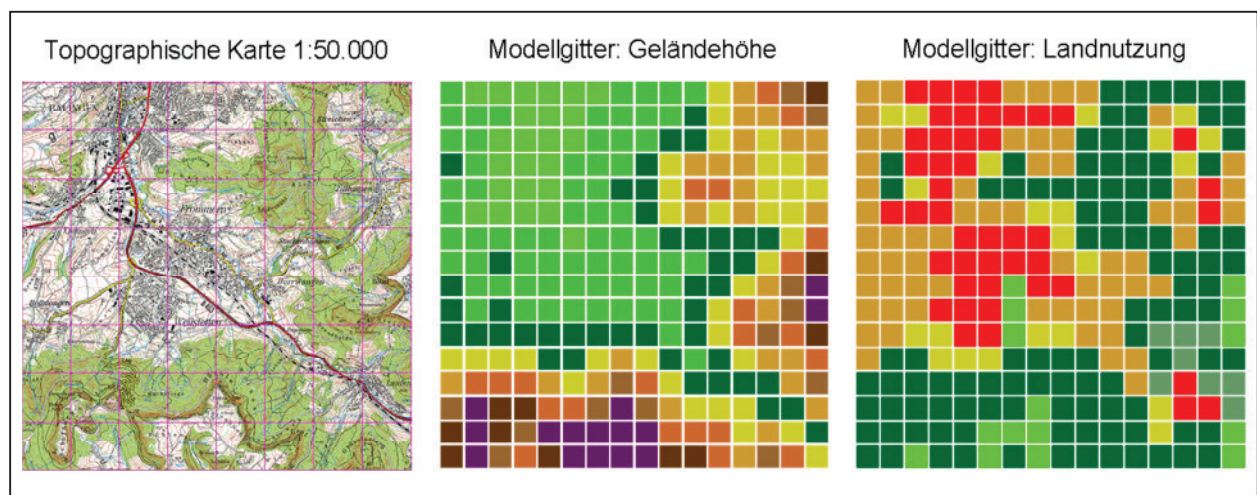


Abbildung 6: Abbildung der realen topographischen Verhältnisse (links) auf mittlere Geländehöhen (Mitte) und Landnutzungen (rechts) in jeder Modell-Gitterzelle.

2.4 Das Windfeldmodell METRAS PC

2.4.1 Modellbeschreibung

Basis für die synthetischen Windstatistiken bilden Modellrechnungen mit dem prognostischen nicht-hydrostatischen Strömungsmodell METRAS PC¹ (10); (11); (12). In diesem Modell wird das Rechengebiet mit einem dreidimensionalen Maschennetz von Gitterpunkten überzogen. An jedem der Gitterpunkte werden die grundlegenden atmosphärischen Zustandsgleichungen (Bewegungsgleichungen, erster Hauptsatz, Kontinuitätsgleichung u.a.) numerisch gelöst. In das Modell gehen der Druckgradient bzw. der geostrophische Wind und die atmosphärische Stabilität (**Kap. 2.3.1**), die Geländehöhen und Flächennutzungen (**Kap. 2.3.2**) sowie die geographische Lage und weitere Eingangsdaten ein. Daraus berechnet METRAS PC die Windverhältnisse, wie sie sich unter den großräumigen meteorologischen Einflussgrößen in dem Modellgebiet einstellen (**Abbildung 7**).

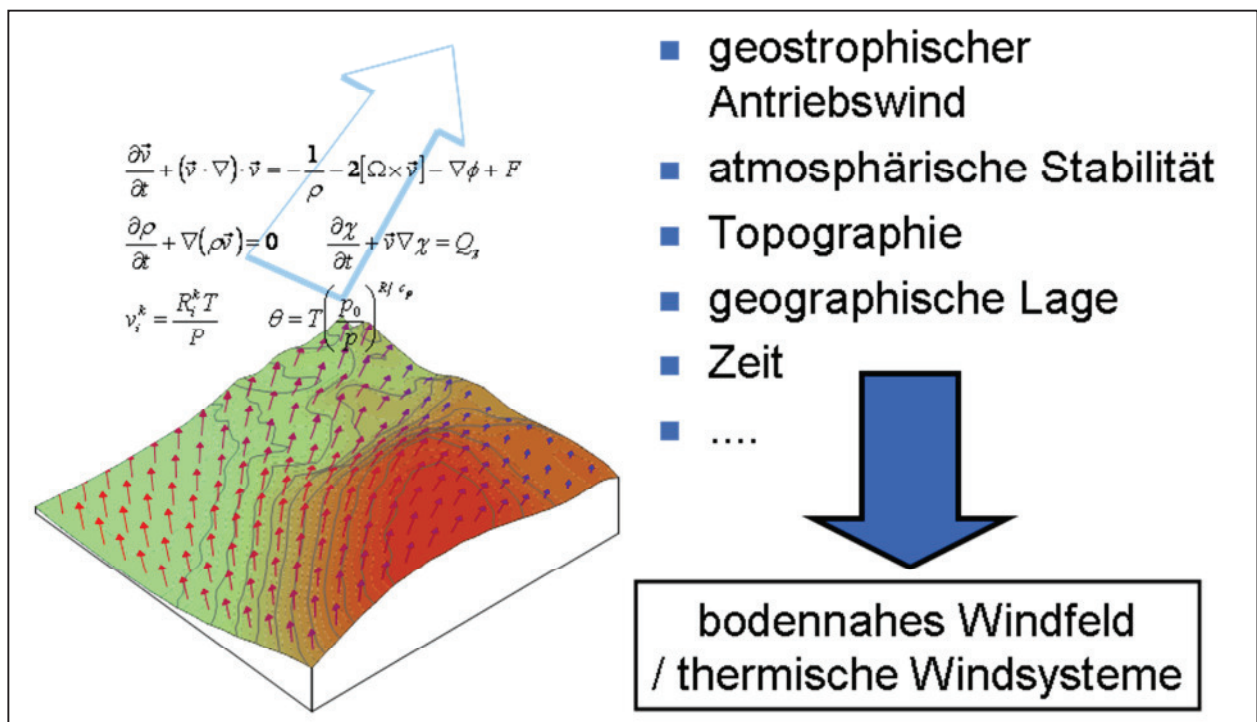


Abbildung 7: Auf Basis der physikalischen Gesetze für die Atmosphäre und Daten zum Modellgebiet und der meteorologischen Situation berechnet METRAS PC die bodennahen Windsysteme.

Ein Beispiel eines mit METRAS PC berechneten bodennahen Windfeldes ist in der **Abbildung 8** gegeben. Es handelt sich hier um den Großraum Stuttgart. Gezeigt ist eine Anströmung mit einem schwachen Höhenwind aus östlichen Richtungen und stabil geschichteter Atmosphäre. Es ist deutlich zu sehen, dass der bodennahe Wind stark durch das Gelände gelenkt wird. Im

¹ METRAS PC wurde gemeinsam von Dr. K.H. Schlünzen, S. Dierer, H. Pankus (Meteorologisches Institut, Universität Hamburg) und Dr. K. Bigalke (METCON Umweltmeteorologische Beratung, Pinneberg) im Auftrag des Umweltbundesamtes im FE Projekt 104 04 354 aufbauend auf dem Modell METRAS entwickelt.“

südöstlichen Modellgebiet ist beispielsweise die Kanalisierung des Windes durch das Neckartal deutlich zu erkennen. Hier wie auch in einigen anderen Gebieten innerhalb des Modellgebietes stellt sich sogar ein dem Höhenwind entgegengerichteter bodennaher Wind ein. Das Beispiel zeigt, dass mit METRAS typische Strömungskonfigurationen wie durch Topographie bedingte Kanalisierungen, Nachlaufzonen mit Rückströmgebieten in Lee von ausgeprägten Topographien etc. gut wiedergegeben werden können.

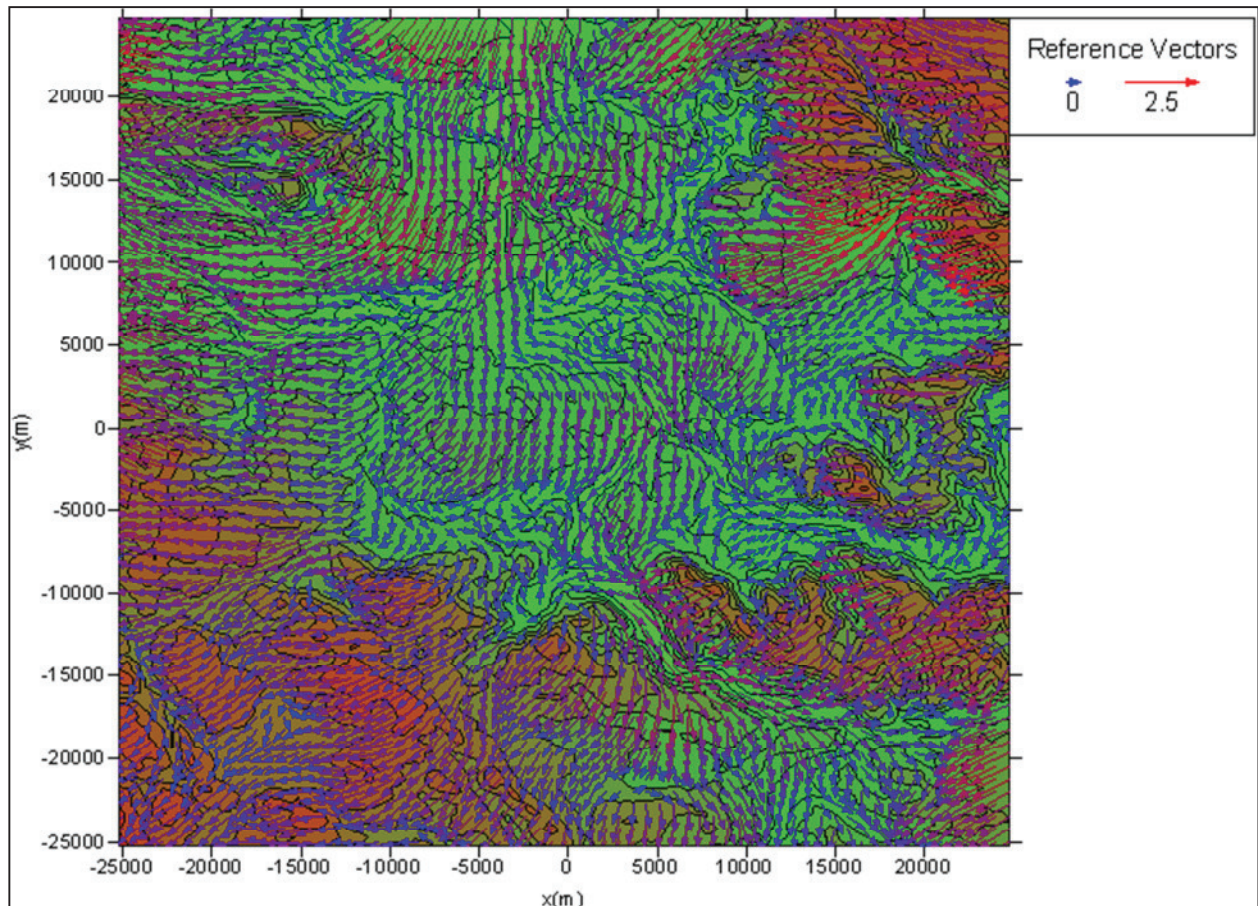


Abbildung 8: Beispiel für ein mit METRAS PC berechnetes bodennahes Windfeld im Großraum Stuttgart bei stabil geschichteter Atmosphäre und schwachem östlichen Höhenwind.

Alle in der **Abbildung 8** sichtbaren Effekte auf das bodennahe Windfeld sind rein dynamischer Natur, d.h. auf die Wirkung des Geländereiefs und die unterschiedliche Bodenrauigkeit durch Bewuchs und Bebauung zurückzuführen. Neben diesen stationären Modellrechnungen werden mit METRAS PC auch instationäre Modellrechnungen durchgeführt, mit denen der zeitliche Verlauf thermisch bedingter Windsysteme, wie z.B. Kaltluftabflüsse, simuliert werden können (**Kap. 2.5.2**).

2.4.2 Qualitätssicherung

Die Ergebnisgüte des Modells METRAS ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert (13); (14). Es erfüllt bereits die nach der in Arbeit befindlichen VDI-Richtlinie 3783, Blatt 7 (Umweltmeteorologie – Prognostische mesoskalige nichthydrostatische Windfeldmodelle) bzgl. der Qualitätssicherung formulierten Anforderungen hinsichtlich Zugänglichkeit, Vollständigkeit, Evaluierung, Nachweis der Ergebnisgüte und Tests durch Dritte vollständig:

- **Verfügbarkeit:**

Das Modell METRAS-PC ist gegen eine Aufwandsentschädigung bei der Universität Hamburg frei verfügbar.

- **Vollständigkeit:**

Das Modell ist vollständig bzgl. der notwendigen Modelleigenschaften für die Mesoskalen Beta und Gamma. Für eine genaue Modellbeschreibung wird auf die Literatur verwiesen (12); (14).

- **Evaluierung:**

Das Modell METRAS-PC erfüllt bereits heute die nach der geplanten VDI-Richtlinie VDI 3783, Blatt 7 zu erwartenden Anforderungen.

- **Nachweis der Ergebnisgüte:**

Die Ergebnisgüte des Modells ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert z.B. (13); (15); (16); (17).

- **Test durch Dritte:**

Das Modell ist nicht nur durch den Anbieter selbst ausgiebig getestet worden, sondern wird darüber hinaus bei über 20 externen Institutionen eingesetzt.

Über diese Anforderungen hinaus werden weitere Maßnahmen zur Qualitätssicherung getroffen:

1. Das Modell METRAS PC wird mit charakteristischen Klassen des großskaligen Windklimas angetrieben. Dahinter steht die Philosophie, dass das bodennahe Windklima nur dann realitätsnah bestimmt werden kann, wenn alle topographischen Einflüsse nur durch das Modell selbst berechnet, nicht aber zusätzlich über die Modellantriebsdaten vorgegeben werden. Häufig werden bei anderen Modellen / Verfahren zunächst bodennah gemessene Winddaten mit Hilfe eindimensionaler Modellrechnungen auf Höhenwinddaten umgerechnet, die dann zum Antrieb der dreidimensionalen Modellrechnungen verwendet werden. Dabei wird außer Acht gelassen, dass jede bodennahe Messung mehr oder weniger durch die Umgebungstopographie oder sogar lokale Effekte (z.B. Bebauung) geprägt sein kann, so dass die daraus abgeleiteten Höhenwinde bereits Topographie- bzw. Bebauungseinflüsse enthalten können. Gerade in topographisch stark gegliedertem Gelände wie den südlichen Bundesländern Bayern

und Baden-Württemberg ist dies von elementarer Bedeutung wenn man berücksichtigt, dass die großräumige Strömung bis zur doppelten Höhe ausgeprägter Erhebungen beeinflusst werden kann.

2. Das Modell METRAS PC wird mit sogenannten offenen Rändern betrieben, an denen sich die Strömung frei einstellen kann. Im Gegensatz zu festen (Einström-) Randbedingungen passen sich die Strömungsverhältnisse im Modellgebiet vor allem in Randnähe besser an die topographischen Strukturen an. Dieser Qualitätsgewinn in den Simulationsergebnissen kostet allerdings einen erheblichen Mehraufwand an Rechnerressourcen und Bearbeitungszeit, da aufgrund der offenen Ränder die Einschwingzeiten des Modells bis zum Erreichen quasi-stationärer Verhältnisse stark anwachsen.
3. Mesoskalige Modelle sind komplexe Programmwerkzeuge, deren Ergebnisse regelmäßig auf Plausibilität und Anzeichen möglicher Fehler (zum Beispiel numerische Instabilitäten) geprüft werden müssen. Von daher ist eine automatisierte Berechnung von der Modellanwendung bis zur statistischen Auswertung, das bei der Fülle der Modellrechnungen und gleichartiger Verarbeitungsschritte nahe liegen würde, nicht möglich. Bei der Erstellung synthetischer Windstatistiken werden die Ergebnisse jeder einzelnen Clusterrechnung anhand von Laufprotokollen und graphisch aufbereiteten Zeitserien und Modellschnitten für den gesamten Simulationszeitraum geprüft. Im Einzelfall wird entschieden, ob die vorliegenden Ergebnisse für die statistische Auswertung geeignet sind oder ob gegebenenfalls Restarts / Neuinitialisierungen erforderlich werden.

2.5 Simulationsrechnungen

2.5.1 Testrechnungen zur Modellgebietsgröße

Bei numerischen Berechnungen sind die seitlichen Ränder eines Modellgebietes ebenso wie der obere Rand künstliche Ränder ohne Entsprechung in der Natur. Obwohl die seitlichen Randbedingungen in METRAS PC als sogenannte „offene Ränder“ (**Kap. 2.4.2**) implementiert sind und sich die Strömungsverhältnisse dort weitgehend frei einstellen können, sollten Modellergebnisse in Randnähe nicht interpretiert werden, da sie aufgrund numerischer Einflüsse unrealistische Verhältnisse widerspiegeln können. Hinzu kommt, dass die realen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet auch von topographischen Einflüssen außerhalb über mehr oder weniger große Entfernungen beeinflusst sein können. Diese Einflüsse können von METRAS PC nur berücksichtigt werden, wenn die entsprechenden Geländestrukturen im Modellgebiet enthalten sind.

Trotz heutzutage sehr leistungsfähiger Rechner ist bei einer Auflösung von 500 x 500 m² die Anzahl der Gitterpunkte, die mit einem vertretbaren Rechenaufwand berechnet werden können,

beschränkt. Bei einer Landesfläche von der Größe Baden-Württembergs ist es aus diesem Grund notwendig, die Berechnungen für einzelne Teilgebiete durchzuführen. Das Modellgitter eines einzelnen Teilgebietes ist horizontal äquidistant mit einer Gitterweite von 500 m. Der Modelloberrand liegt in ca. 12 km Höhe. Die vertikale Gitterauflösung reicht von 20 m bodennah bis zu 1 km am Modelloberrand. Allerdings ist das eigentliche Rechengebiet deutlich größer zu wählen, da die Einflüsse topographischer Strukturen außerhalb des Teilgebietes auf das Strömungsfeld innerhalb des Teilgebietes möglichst realistisch erfasst werden müssen. Dies erfordert für jedes einzelne Teilgebiet vorab Testrechnungen zur Festlegung der erforderlichen Rechengebietsgröße. Dabei wird anhand von unterschiedlich großen Rechengebieten und den individuellen meteorologischen Initialisierungsdaten für das jeweilige Teilgebiet für unterschiedliche Cluster untersucht, welches Modellgebiet zu einer möglichst realitätsnahen Darstellung der Verhältnisse im Untersuchungsgebiet geeignet ist.

2.5.2 Produktionsrechnungen

Für jedes der 120 Cluster eines jeden Teilgebietes wird eine Modellrechnung unter Berücksichtigung der dynamischen Einflüsse des Geländes (Rauigkeit, Relief) und der großräumigen Anströmung solange durchgeführt, bis sich näherungsweise stationäre Strömungsverhältnisse im Modellgebiet einstellen. Abhängig von der atmosphärischen Schichtung sowie Anströmrichtung und -geschwindigkeit sind zum Einstellen quasistationärer Verhältnisse im Modellgebiet häufig Simulationszeiträume von mehreren Stunden nötig. In die Berechnung der synthetischen Windstatistiken gehen jeweils halbstündig gemittelte Windfelder zum Ende des Simulationszeitraums ein. Die Clusterdaten unterscheiden sich für jedes Teilgebiet, da die Antriebsdaten variieren. Durch Interpolation der Antriebsdaten, die auf einem globalen 2,5°-Gitter vorliegen (**Kap. 2.3.1**), wird dabei für jedes Teilgebiet der charakteristische Antriebssatz (geostrophischer Wind und Temperaturgradient) ermittelt. Oberhalb der Grenzschicht (ca. 1500 m) bis zum Modelloberrand wird dabei der potentielle Temperaturgradient der Standardatmosphäre (0.35 K/100m) angesetzt.

Die nächtlichen Kaltluftwindssysteme werden in den synthetischen Windstatistiken durch eine beschränkte Anzahl instationärer, thermodynamischer Modellrechnungen berücksichtigt. Hierzu werden je Teilgebiet eine Modellrechnung ohne einen großräumigen Wind und zwölf Rechnungen mit einem schwachen großräumigen Wind aus den Richtungen 0°, 30°, 60° bis 330° durchgeführt. Alle Rechnungen werden für einen 1. August um 18⁰⁰ WOZ unter Annahme einer bis 1800 m Höhe durchmischten (neutralen) Grenzschicht und einer darüber liegenden Standardatmosphäre gestartet und über 12 Stunden Simulationszeit durchgeführt.

2.6 Die Berechnung synthetischer Windstatistiken

Die synthetischen Windstatistiken werden aus den dynamischen und thermodynamischen Modellrechnungen nach dem bereits erwähnten **modifizierten statistisch-dynamischen Ansatz** (Kap. 2.2) wie folgt abgeleitet.

Ist die für das jeweils betrachtete Cluster aus den stationären Modellläufen berechnete Windgeschwindigkeit am Modellgitterpunkt in $z \approx 10$ m über Grund (Anemometerhöhe) größer als 1.5 m/s, so geht diese Windgeschwindigkeit und Windrichtung, gewichtet mit der relativen Clusterhäufigkeit, in die synthetische Statistik ein. Bei einer Windgeschwindigkeit ≤ 1.5 m/s wird davon ausgegangen, dass sich in 30 % des Tages (7 bis 8 Stunden) ein lokales Kaltluftabflusssystem ausbilden kann. Entsprechend diesem Prozentsatz wird der mit dem stationären Modellauf berechnete Wind durch die Ergebnisse der thermodynamischen Rechnungen ersetzt. Die Ersetzung erfolgt jeweils zur Hälfte durch das Ergebnis der Rechnung ohne großräumigen Wind und durch die Rechnung, deren großräumige Windrichtung (mit 1 m/s) der großräumigen Windrichtung des gerade betrachteten Clusters entspricht.

Jede der 133 Modellrechnungen resultiert an einem bodennahen Gitterpunkt in genau einer Windrichtung und Windgeschwindigkeit mit der Auftrittshäufigkeit des dazugehörigen Antriebsclusters. Bei der Berechnung der bodennahen Windstatistiken an jedem Gitterpunkt bleiben je nach Wahl der Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsklassen (bei bspw. 10°-Klassen und 9 Geschwindigkeitsklassen nach TA Luft) an einigen Gitterpunkten einige Klassen unbesetzt. Im Gegensatz zum Modell kommt es dagegen in der Natur auch unter dynamisch dominierten atmosphärischen Verhältnissen und einer großskalig stationären Anströmsituation bodennah zu kleinen Variationen im Windfeld. Deshalb werden die synthetisch gewonnenen Statistiken in einem zweiten Schritt mit Hilfe einer gleitenden Mittelwertbildung über die Windrichtungssektoren geglättet:

$$f_i = \frac{1}{4} \cdot f_{i-1} + \frac{1}{2} \cdot f_i + \frac{1}{4} \cdot f_{i+1} \quad (\text{F.01})$$

Darin bezeichnet f_i die Häufigkeit innerhalb des Richtungssektors i . Anschließend erfolgt eine Glättung der Häufigkeiten über eine so genannte 2-parametrische Weibullverteilung, die sich durch den Formparameter k und den Skalierungsparameter A vollständig beschreiben lässt:

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (\text{F.02})$$

Darin ist v die Windgeschwindigkeit. Die Summenhäufigkeit aller Windgeschwindigkeiten unterhalb einer Geschwindigkeit v lässt sich zu

$$F_v = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (\text{F.03})$$

berechnen. Die beiden beschreibenden Parameter k und A werden aus den diskret vorliegenden Werten der synthetischen Statistiken mit Hilfe des numerischen „Brent“-

Lösungsverfahrens (18) abgeleitet. Anschließend werden die Häufigkeiten innerhalb der Windgeschwindigkeitsklassen aus der analytischen Weibullverteilung neu berechnet. Die Bestimmung der Weibullparameter und Neuberechnung der Häufigkeitsverteilung erfolgt separat für jeden Richtungssektor.

2.7 Erweiterung auf synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken

In diesem Kapitel wird die Verfahrenserweiterung dargestellt, mit der aus synthetischen Windstatistiken synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken berechnet werden, wie sie bspw. bei Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft Anhang 3, Abs. 8 benötigt werden. Die Entwicklung dieses so genannten Cluster-Zeitreeihen-Verfahrens ist in (3) ausführlich beschrieben. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass es im Gegensatz bspw. zum Kolb-Verfahren völlig ohne lokal oder regional gemessene Informationen auskommt. Die flächendeckende Berechnung räumlich hoch auflösender synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken erfolgt auf Basis sogenannter Clusterzeitserien, die aus den Modellantriebs- und Ergebnisdaten der synthetischen Windstatistiken sowie weiteren klimatologischen Daten erstellt werden. Das Prinzip ist in **Abbildung 9** dargestellt.

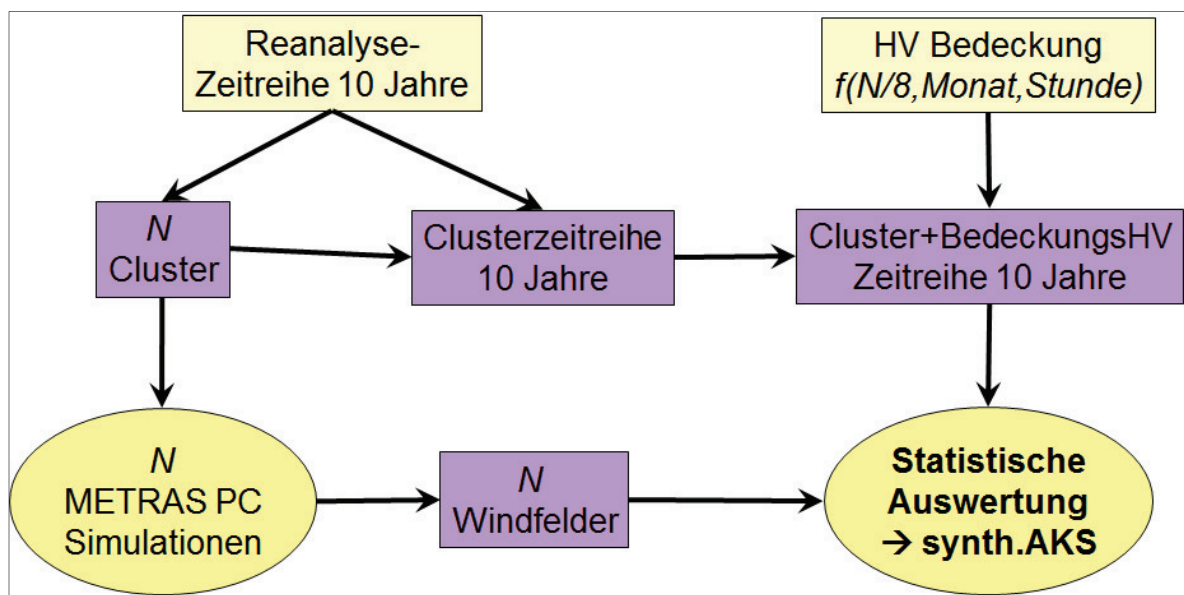


Abbildung 9: Prinzipskizze zum Berechnungsverfahren synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken

Zehnjährige Zeitreihen der Reanalysedaten zu Höhenwind und atmosphärischer Schichtung werden zu insgesamt 120 Clustern zusammengefasst. Die einzelnen Cluster dienen als Antrieb für die Berechnungen der bodennahen Windfelder mit METRAS. Umgekehrt kann nach einmal erfolgter Festlegung der Cluster für jeden Datenpunkt eine Zeitreihe berechnet werden, welches einem bestimmten bodennahen Windfeld verknüpft ist. Das „Cluster-Zeitreeihen-Verfahren“ beruht also auf der Idee, dass in der Kombination von Modellergebnissen und deren Antriebsdaten alle notwendigen Informationen zur Berechnung einer synthetischen

Ausbreitungsklassenstatistik zur Verfügung stehen.

Um die synthetische Windstatistik auf eine Ausbreitungsklassenstatistik zu erweitern, wird die AK-Klasse benötigt. Eine Ausbreitungsklasse lässt sich nach VDI 3782 Blatt 1 (6) bestimmen, wenn neben Datum, Uhrzeit und Windgeschwindigkeit am Standort (für den die Statistik bestimmt wird) auch der Bedeckungsgrad bekannt ist. Dieser liegt in der geforderten räumlichen und zeitlichen Auflösung nicht vor. Allerdings stellen sich im langjährigen Mittel in Deutschland, abgesehen von extremen Lagen, die mittleren Bedeckungsgrade als Funktion von Tages- und Jahreszeit relativ homogen dar und weisen typische U-förmige Verteilungen auf, wie sie in **Abbildung 10** am Beispiel Hamburg und München gezeigt werden. Somit ist nicht der aktuelle Bedeckungsgrad in der Cluster-Zeitreihe enthalten. Stattdessen kann zu jedem Zeitpunkt der Reihe eine für den aktuellen Monat und die aktuelle Tageszeit im klimatologischen Mittel gültige Häufigkeitsverteilung vorgegeben werden.

Aus der langjährigen Zeitreihe von Cluster und Bedeckungshäufigkeitsverteilung kann nun für jeden Punkt in dem 500m-Raster der Modellrechnungen eine synthetische AKS berechnet werden. Als Eingangsdaten benötigt werden alle Ergebnisse der Modellrechnungen, die Cluster-Definitionen, die Zeitreihen der Reanalysedaten und eine dreidimensionale Matrix der Häufigkeiten von Bedeckungsgraden. Der Berechnungsablauf, der für jedes Cluster durchzuführen ist, ist im Folgenden in einzelnen Schritten erläutert.

1. Die Zeitserie wird nach allen Zeitpunkten durchsucht, zu denen das aktuelle Cluster auftritt.
2. Die gefundenen Zeitpunkte werden anhand der Clusternummer um die am betrachteten Rasterpunkt in 10 m Höhe berechnete Windrichtung und -geschwindigkeit ergänzt. Die nach TA Luft zugehörige Richtungs- und Geschwindigkeitsklasse wird bestimmt.
3. Aus Zeitpunkt und Windgeschwindigkeit wird die zu jedem Bedeckungsgrad zwischen 0/8 und 8/8 gehörige Ausbreitungsklasse festgelegt.
4. Mit Hilfe von Schritt 3 kann die Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade in eine Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungsklassen umgerechnet werden.
5. Die Häufigkeitsverteilung der Ausbreitungsklassen werden über alle Zeitpunkte aufsummiert, zu denen das aktuelle Cluster auftritt. Die daraus resultierende Häufigkeitsverteilung wird in der Summe auf 1 normiert und mit der langjährigen Auftrittshäufigkeit des aktuellen Clusters gewichtet.
6. Als Zwischenergebnis liegt damit der Beitrag des aktuellen Clusters zu allen Ausbreitungsklassen innerhalb der zugehörigen Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsklasse vor.
7. Dieser Prozess wird für alle Cluster durchlaufen und führt nach Wichtung mit den Clusterhäufigkeiten zu einer synthetischen Ausbreitungsklassenstatistik am Gitterpunkt.

Mit Schritt 7 ist die Berechnung einer dreidimensionalen synthetischen AKS für den betrachteten Punkt des 500-m-Rasters abgeschlossen. Die so gewonnene Ausbreitungsklassenstatistik wird noch einem Filterverfahren unterzogen. Dabei erfolgt eine Filterung der Häufigkeiten über die Windrichtungssektoren mit einem Drei-Punkt-Filter und eine Weibull-Glättung über die Windgeschwindigkeitsklassen.

Der große Vorteil des Cluster-Zeitreihen-Verfahrens gegenüber den anderen erwähnten Verfahren liegt darin, dass es unabhängig von einer regional gemessenen AKS ist. An Stelle der gemessenen AKS wird zwar eine dreidimensionale Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade benötigt, hierfür eignet sich jedoch praktisch jede Häufigkeitsverteilung eines nicht zu exponierten Standortes in Mitteleuropa. Vergleichsrechnungen mit den in **Abbildung 10** gezeigten Häufigkeitsverteilungen der Bedeckungsgrade für Hamburg und München haben gezeigt, dass sich die Wahl der Häufigkeitsverteilung nur äußerst geringfügig auf die resultierenden synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken auswirken. Dadurch ist das Verfahren praktisch unabhängig von Messdaten.

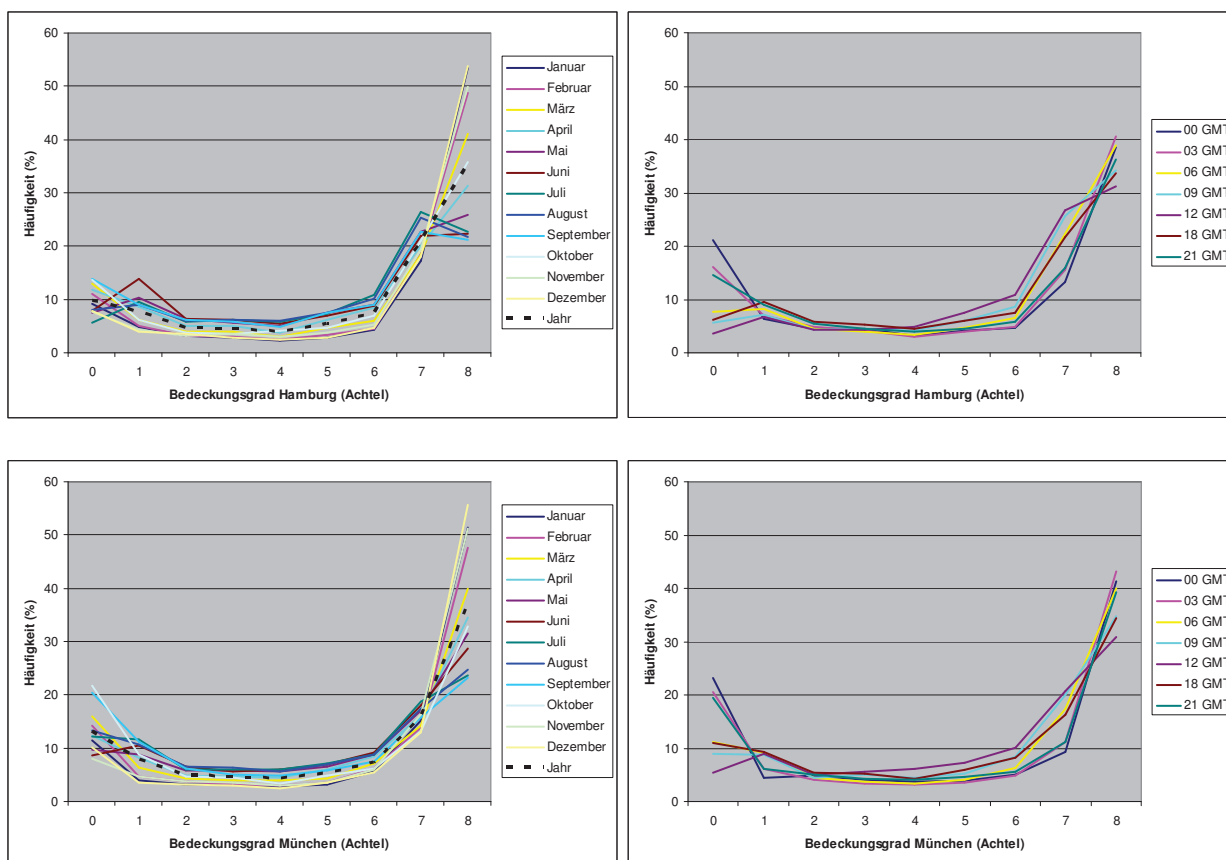


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Bedeckungsgrade im Jahresverlauf (links) und Tagesverlauf (rechts) für Hamburg oben (nach (18)) und München unten (nach (19)).

3 AKS für Baden-Württemberg / Datenlieferung

Die Lieferung an die LUBW Baden-Württemberg für den behördeninternen Gebrauch umfasst synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken in einer räumlichen Auflösung von 500 m für die gesamte Fläche von Baden-Württemberg auf Basis von Modellsimulationen mit dem mesoskaligen prognostischen Modell METRAS PC.

Die Gesamtfläche des Bundeslandes Baden-Württemberg beträgt knapp 36.000 km².

Die Lieferung deckt die gesamte Landesfläche ab.

3.1 Angaben zu den Daten

- Bei den gelieferten synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken handelt es sich um die Berechnungsversion 2.05(a).
- Der den Berechnungen zugrunde liegende Antriebszeitraum umfasst die Jahre 2001 bis 2010.
- Die Ortsangabe erfolgt in Gauß-Krüger-Koordinaten (DHDN/PD), auf den 3. Meridianstreifen bezogen.
- Die Koordinatenangaben beziehen sich auf den Mittelpunkt einer METRAS-Gitterbox, so dass die Statistiken als repräsentativ für ein Volumenmittel über +/- 250 m horizontal um die angegebene Koordinate und bis ca. 20 m über Grund anzusehen sind. In jedem berechneten Teilgebiet ist das METRAS-Raster an den Hauptschnittpunkten des Gauß-Krüger-Netzes ausgerichtet. Dennoch können die Koordinaten der synthetischen AKS hiervon abweichen. Geringe Differenzen von wenigen Metern beruhen auf der Akkumulation kleiner Fehler bei Mehrfachtransformationen zwischen verschiedenen Projektionssystemen der Topographieeingangsdaten und dem kartesischen METRAS-Raster. Größere Abweichungen treten nur dort auf, wo Teilgebiete auf einen anderen Meridianstreifen bezogen gerechnet und die Koordinaten erst anschließend in den 3. Meridianstreifen umgerechnet wurden.
- Die synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken enthalten Tabellen der Anemometerhöhen für die Rauigkeitsklassen nach TA Luft

3.2 Angaben zu den Steckbriefen im Internet

In **Abbildung 11** ist als Beispiel ein Steckbrief für eine synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistik, wie er im Internet frei zugänglich ist, dargestellt.

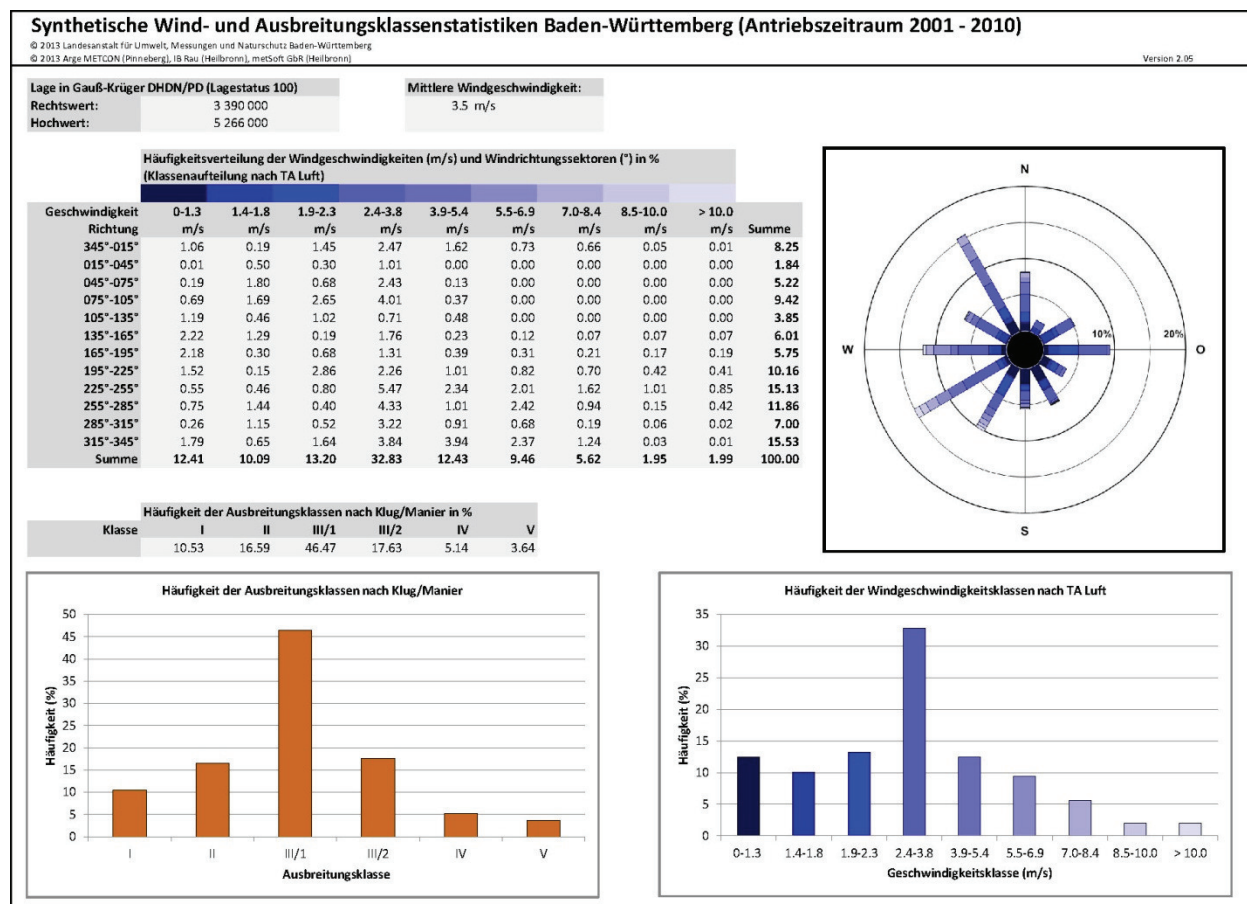


Abbildung 11: Beispiel eines Steckbriefes

Die Lage der jeweiligen Wind- und Ausbreitungsklassenstatistik wird oben links in Gauß-Krüger Koordinaten angegeben. Der Steckbrief enthält in tabellarischer und grafischer Form (in Form einer Windrose) die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten nach TA Luft in Windrichtungssektoren mit 30°-Schritten. Des Weiteren sind die Häufigkeitsverteilungen der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier und der TA Luft Geschwindigkeitsklassen aufgeführt.

Teil 2: Anwendungen

4 Einführung

Bei der Erzeugung von synthetischen Windstatistiken (synWS) oder synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken (synAKS) stellt sich die Frage nach der Übereinstimmung mit auf Messungen basierenden Windstatistiken oder Ausbreitungsklassenstatistiken.

Der Vergleich bzw. die Bewertung der Unterschiede zwischen synthetischen und gemessenen Windstatistiken (also die Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit) gestaltet sich dabei als schwierig, was im Wesentlichen auf die unterschiedliche räumliche Repräsentativität bzw. auf die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Mess- und Berechnungsverfahren zurückzuführen ist. Zudem gibt es keine objektiven Maßzahlen, die für eine Bewertung von Unterschieden in den Häufigkeitsverteilungen von Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsklassen herangezogen werden könnten. Trotzdem ist eine Gegenüberstellung notwendig, um die Güte synthetisch erstellter Windstatistiken zu dokumentieren. Im Vorfeld eines Vergleichs ist es wichtig, das Verständnis dafür zu schaffen, wie sich gemessene und berechnete Windstatistiken unterscheiden.

Noch komplizierter als der Vergleich zwischen gemessenen und synthetischen Windstatistiken ist der direkte Nachweis einer ausreichend guten Übereinstimmung zwischen gemessenen und synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ausbreitungsklasse als dritte Dimension historisch bedingt keine Messgröße ist, sondern aus mehreren Parametern, unter anderem dem visuell geschätzten Bedeckungsgrad, abgeleitet wird. Daher können auf Modellrechnungen basierende synAKS nur durch einen Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsklassen für die einzelnen Ausbreitungsklassen mit den entsprechenden Verteilungen der Windmessungen verglichen werden. Da allerdings Ausbreitungsklassenstatistiken überwiegend für Ausbreitungsrechnungen verwendet werden, ist es nicht unbedingt notwendig, dass eine synthetische AKS bzgl. der Verteilung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit für die einzelnen AK-Klassen jedes Detail einer gemessenen AKS wiedergibt. Allerdings kann gefordert werden, dass eine synthetische AKS bei Ausbreitungsrechnungen zu vergleichbaren Ergebnissen wie eine gemessene AKS führen sollte. Eine Möglichkeit zur Überprüfung stellt somit ein Vergleich von Immissionsberechnungen nach TA Luft auf Basis gemessener und synthetischer AKS dar.

Der Teil 2 „Anwendungen“ befasst sich mit diesen angesprochenen Themenkreisen.

In **Kapitel 5** werden die grundsätzlichen Unterschiede zwischen einer synthetischen und einer gemessenen Windstatistik / AKS dargestellt.

In **Kapitel 6** werden die Ergebnisse eines Vergleichs zwischen gemessenen und synthetischen AKS für Stationen in Baden-Württemberg zur Dokumentation der Güte von synthetischen AKS vorgestellt. Die Ergebnisse sind in einer Veröffentlichung (21) dokumentiert.

Die den synthetischen Wind- bzw. Ausbreitungsklassenstatistiken zu Grunde liegenden

Berechnungen basieren auf einem Raster von 500 x 500 m² und sind somit für Flächengrößen repräsentativ, wie sie in der Praxis am häufigsten benötigt werden. Gelegentlich kann gewünscht sein, kleinräumigere topographische Effekte aufzulösen, beispielsweise ein enges Tal oder einen scharfen Berggrat. **Kapitel 7** zeigt an zwei Beispielen aus dem bayerischen Raum, wie durch ein feineres Rechenraster solche Effekte prinzipiell ebenfalls aufgelöst werden können. Es wird exemplarisch aufgezeigt, dass eine mangelnde Übereinstimmung zwischen Messdaten und synthetischen Daten meist auf eine unterschiedliche räumliche Repräsentativität zurückzuführen ist. Durch eine Anpassung des Repräsentativitätsbereichs einer synWS oder synAKS an den einer gemessenen WS oder AKS kann die Übereinstimmung deutlich verbessert werden.

In **Kapitel 8** werden die Erkenntnisse aus den Kapiteln 4 bis 6 in Form von konkreten Anwenderhinweisen zusammengefasst.

5 Wie unterscheiden sich synthetische Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken von gemessenen?

Anhand der in Teil 1 der Dokumentation erläuterten Grundlagen des Berechnungsverfahrens wird deutlich, dass sich die synthetischen Windstatistiken in wesentlichen Merkmalen von gemessenen Windstatistiken und den daraus abgeleiteten Ausbreitungsklassenstatistiken unterscheiden. Die Unterscheidungsmerkmale sind Raumbezug, Höhenbezug und horizontale Repräsentativität.

Hinweis: *Die in diesem Kapitel erläuterten möglichen Unterschiede zwischen synWS/AKS und gemessenen WS/AKS gelten für Windstatistiken und Ausbreitungsklassenstatistiken gleichermaßen. In diesem Kapitel wird aus diesem Grund von synthetischen und gemessenen Statistiken gesprochen.*

5.1 Raumbezug

Gemessene Statistiken stammen immer aus Punktmessungen. Streng genommen gelten sie exakt nur für diesen Punkt. Sehr viele Messstationen befinden sich im Bereich städtischer Bebauung. Dort variieren die Windverhältnisse lokal stark. Bereits in einigen Dekametern Entfernung von einer Windmessstation können bereits völlig andere Bedingungen vorherrschen. Selbst in den Fällen, in denen ein direkter Einfluss benachbarter Gebäude auf die Windverhältnisse an der Messstation ausgeschlossen werden kann, reduziert die umgebende Bebauung insgesamt die Strömungsgeschwindigkeit im bodennahen Bereich.

Die synthetischen Statistiken stammen im Gegensatz dazu aus Modellrechnungen und sind deshalb Volumenmittelwerte über Gittervolumen, die in allen Modellrechnungen einheitlich $500 \times 500 \times 20 \text{ m}^3$ für die unterste Schicht betragen. Das Modell berücksichtigt den Reibungseinfluss der Bebauung insgesamt über ein bebauungsspezifisches z_0 (Rauigkeitslänge) und spiegelt damit die Verhältnisse oberhalb der Nullpunktverschiebung wieder.

Theoretisch müssten die synthetischen Statistiken mit dem Mittel über eine große Anzahl räumlich gleichmäßig verteilter Messungen innerhalb des Gitterzellenbereichs verglichen werden. Eine einzige Messstation kann ggf. von – hinsichtlich der Gittergröße – subskaligen Effekten beeinflusst sein, die sich in den synthetisch gewonnenen Statistiken nicht wiederfinden. Von der Tendenz her können daher Messungen an typischen Stadtstationen, die innerhalb einer mittleren Bebauungshöhe vorgenommen werden, systematisch niedrigere Windgeschwindigkeiten und gegebenenfalls durch Bebauungseinfluss modifizierte Windrichtungen aufweisen.

5.2 Höhenbezug

Windmessungen sollen standardmäßig in einer Höhe von 10 m über Grund vorgenommen werden. Je nach der Höhe typischer Rauigkeitselemente in der Umgebung des Messortes (z. B. Grasbewuchs, Getreidefeld, Büsche, Bäume, Gebäude) befindet sich der Messstandort in unterschiedlicher Höhe oberhalb oder auch innerhalb der Rauigkeitselemente. Gemessene Statistiken gelten daher (häufig) nur innerhalb von Rauigkeitsstrukturen.

In den Modellrechnungen mit METRAS PC sind die Modellflächen bezüglich einer Höhe oberhalb der mittleren Rauigkeitslänge definiert. Das bedeutet, dass die synthetischen Statistiken für eine Höhe von etwa 10 m oberhalb der mittleren Rauigkeit gültig sind. Innerhalb eines dicht bebauten oder bewachsenen Gebietes kann eine synthetische Statistik deshalb als charakteristisch für die Verhältnisse oberhalb der so genannten Verdrängungshöhe interpretiert werden.

5.3 Horizontale Repräsentativität

Der Repräsentativitätsbereich von Messungen ist variabel und abhängig von der Standortumgebung. Dies veranschaulicht beispielhaft die **Abbildung 12** (links). Die Pfeile zeigen einen fiktiven Messstandort innerhalb der intensiven Bebauung (östlich) sowie einen Messstandort außerhalb des Stadtgebietes (westlich). Die horizontale Repräsentativität der Messungen innerhalb der städtischen Bebauung ist sehr stark eingeschränkt und beträgt ggf. nur einige Meter. Bei geeignet freier Lage des Messstandortes im außerstädtischen Bereich kann dagegen der Repräsentativitätsradius deutlich größer angesetzt werden.

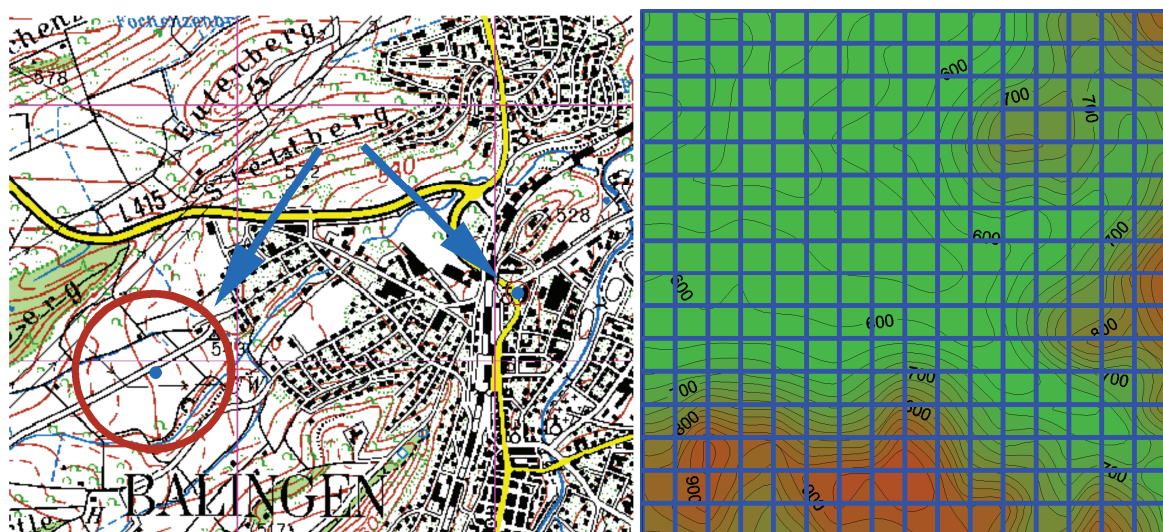


Abbildung 12: Vom Standort abhängige horizontale Repräsentativität von Messungen (links) und einheitliche Repräsentativität synthetischer Windstatistiken auf Modellgitterflächen von 500 m Kantenlänge (rechts).

Die synthetischen Statistiken weisen im Gegensatz dazu einen **konstanten Repräsentativitätsbereich** auf, der sich nach der Größe der Gitterflächen im Modell, hier

500 x 500 m², richtet. Sie spiegeln die Einflüsse eines geglätteten Geländereiefs wider, in dem Geländehöhen und Landnutzungen über Flächen von jeweils 500x500 m² gemittelt sind. Einflüsse kleinerer Geländestrukturen (z.B. ein 300 m breites Tal) sind daher nicht (oder nur geringfügig) in den synthetischen Statistiken enthalten.

5.4 Mögliche Fehlerquellen

Gemessene Statistiken enthalten Fehler, die auf Geräte-Messfehler im eigentlichen Sinne, aber auch auf die Aufstellung und Justierung (Bsp. Einnordung) und auf Wartungsmängel zurückzuführen sind. Ein ungeeignet gewählter Messstandort zählt nicht zu diesen Fehlerquellen.

Bei den synthetischen Statistiken zählen dagegen die mangelhafte Auflösung von Eingangsdaten (Meteorologie, Topographie) sowie die eingeschränkte Modellphysik und deren Realisierung zu den Hauptfehlerquellen.

5.5 Fazit

Die wesentlichen Unterschiede zwischen gemessenen und synthetischen Statistiken sind in **Tabelle 1** noch einmal zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 1: Unterschiedliche Merkmale gemessener und synthetischer Statistiken

	gemessene Statistik	synthetische Statistik
Raumbezug	Punktmessung	Volumenmittel
Gültigkeitshöhe	teilweise innerhalb Rauigkeit	über mittlerer Rauigkeit
horizontale Repräsentativität	abhängig von Standortumgebung	konstant 500 x 500 m ²
Fehlerquellen (nicht quantifizierbar)	<ul style="list-style-type: none"> - Gerätefehler - Aufstellung, Justierung - Wartung - Störelemente (Bebauung, Bewuchs) 	<ul style="list-style-type: none"> - Eingangsdaten (Meteorologie, Topographie) - Modellphysik und -realisierung

Diese grundsätzlichen Unterschiede können auch in den beiden folgenden Merksätzen formuliert werden.

Im Unterschied zu gemessenen Statistiken gilt für synthetische Statistiken:

1. Synthetische Statistiken repräsentieren die mittleren Windverhältnisse für Untersuchungsgebiete typischer Größe.
2. Synthetische Statistiken sind frei von lokalen mikroskaligen Einflüssen.

Aufgrund dieser Eigenschaften sind synthetische Statistiken sehr gut für Immissionsprognosen geeignet, bei denen ein Antrieb benötigt wird, der frei von lokalen Einflüssen (bspw. Topographie oder Gebäude) ist, aber die großräumigen topographischen Einflüsse auf

Windrichtung und Windgeschwindigkeit gut wiedergibt.

Synthetische Statistiken liefern qualitativ hochwertige und repräsentative Winddaten in all den Fällen, in denen die umgebende Topographie die Windverhältnisse deutlich beeinflusst, aber keine entsprechenden Messungen vorliegen. Ohne synthetische Winddaten ist man auf die Übertragung von entfernt gemessenen Daten auf den gewünschten Standort angewiesen. Bei den gängigen Übertragungsverfahren müssen dabei Annahmen für die zu erwartenden charakteristischen Windverhältnisse am gewünschten Standort getroffen werden (Formulierung so genannter „Erwartungswerte“ für die Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilung).

Darüber hinaus repräsentieren synthetische Daten häufig das gesamte Gebiet, für das eine Ausbreitungsrechnung durchgeführt wird, besser als eine Punktmessung mit oft unbekanntem Repräsentativitätsbereich und möglichen lokalen Einflüssen.

6 Vergleich gemessener und synthetischer AKS

6.1 Einführung

In **Kapitel 2.7** dieser Dokumentation wurde die Berechnung von synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken (synAKS) vorgestellt, das ohne Übertragung von einem Messort auskommt und nur auf Modelldaten beruht. Wie bereits in der Einführung zu Teil 2 dieser Dokumentation (Kapitel 4) angesprochen, setzt die Verwendung von synthetisch gewonnenen AKS in Immissionsprognosen voraus, dass deren Qualität und Eignung für diesen Zweck grundsätzlich nachgewiesen ist. Dabei wurde auch darauf hingewiesen, dass ein direkter Nachweis einer ausreichend guten Übereinstimmung zwischen synthetischen und gemessenen AKS kaum zu führen ist. Allerdings kann gefordert werden, dass gemessene und synthetische AKS bei einer Ausbreitungsrechnung zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Im Zuge der Entwicklung der synAKS für das Land Baden-Württemberg wurden Immissionsprognosen nach TA Luft auf Basis von gemessenen und synthetischen AKS durchgeführt und miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in (3) und (21) dokumentiert. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Studien, die zur Nachvollziehbarkeit dieses Vergleichs dienen und die Qualität der synAKS bestätigen, sind im Folgenden zusammengefasst.

6.2 Allgemeine Anforderungen an die Qualität synthetischer AKS

In der Praxis bieten sich häufig mehrere Alternativen in der Auswahl meteorologischer Daten für die Ausbreitungsrechnung. So können beispielsweise Daten für verschiedene Bezugszeiträume wahlweise als AKTerm (Ausbreitungsklassenzeitreihe) oder AKS vorliegen. Häufig werden mit Hilfe einer Qualifizierten Prüfung der Repräsentativität (QPR) die Daten von einem entfernt gelegenen Messort auf den Standort übertragen. Vergleicht man die Ergebnisse von Immissionsprognosen auf Basis solch unterschiedlich ausgewählter, aber fachlich jeweils angemessener AKTerm bzw. AKS, so zeigt sich eine Bandbreite in den berechneten Immissionswerten. Aus diesen Überlegungen ergibt sich nachfolgende allgemein formulierte Anforderung an die Qualität einer synthetischen AKS:

Eine synthetische Ausbreitungsklassenstatistik darf im Vergleich zur Verwendung einer am Standort repräsentativ gemessenen Statistik nur zu Differenzen in den Immissionskenngrößen innerhalb einer Bandbreite führen, wie sie auch bei Verwendung anderer gemessener und aus fachlicher Sicht geeigneter Statistiken auftritt.

Vor einer genaueren Definition dieser Anforderung muss also festgestellt werden, welche Bandbreite in den Ergebnissen von Ausbreitungsrechnungen bei Verwendung unterschiedlicher meteorologischer Eingangsdaten typischerweise auftreten kann. Die Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen dazu sind in den folgenden Kapiteln 6.3.1 bis 6.3.3 zusammengestellt, bevor in Kapitel 6.3.4 die Anforderung an die Qualität formuliert wird.

6.3 Bandbreite berechneter Immissionswerte bei Verwendung unterschiedlicher meteorologischer Messdaten

Anhand einer Reihe von Messstationen und Standorten in Baden-Württemberg wurde exemplarisch untersucht, wie sich die Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen meteorologischen Eingangsdaten für einen Standort auf die Ergebnisse einer Immissionsprognose nach TA Luft auswirken kann. Jede der dabei verwendeten meteorologischen Ausbreitungsklassenstatistiken war für den jeweiligen Standort grundsätzlich geeignet.

Alle Ausbreitungsrechnungen wurden mit dem Modell AUSTAL2000 jeweils für eine 10 m und eine 50 m hohe Quelle mit einer Einheitsemission und den vorgeschriebenen Standardeinstellungen durchgeführt. Die Rauigkeitslängen z_0 wurden in den Rechnungen immer auf die nach TA Luft gemäß der Quellhöhe gültigen Beurteilungsgebiete bezogen. Soweit für die AKS bzw. AKTerm keine Tabellen der Anemometerhöhen für die Rauigkeitsklassen nach TA Luft vorlagen, wurden diese auf Basis der Stationsbeschreibungen, der mittleren Rauigkeiten um die Stationen sowie dem vom DWD beschriebenen Verfahren (22) berechnet.

Berechnet und diskutiert wurden die Jahresmittelwerte (JM) sowie die maximalen Stundenmittel mit 18 Überschreitungen (S18). Die Auswertung weiterer Kenngrößen und der räumlichen Immissionsverteilungen führte zu keinen wesentlich anderen Schlussfolgerungen.

Untersucht wurden drei Punkte:

- Unterschiede zwischen Rechnungen auf Basis einer auf Messungen basierender Zeitreihe (AKTerm) einerseits und einer ebenfalls auf Messungen basierender Ausbreitungsklassenstatistik (AKS) andererseits,
- der Einfluss zeitlicher und räumlicher Variabilität gemessener AKS,
- die Auswirkung der räumlichen Übertragung (QPR).

6.3.1 Unterschiede zwischen Rechnungen mit AKTerm oder AKS

Für diesen ersten Punkt wurden Berechnungen für je eine AKS für das Jahr 2002 und 2006 mit der entsprechenden AKTerm für dieselben Jahre für den Standort Karlsruhe durchgeführt. Für die beiden untersuchten Jahre wurden vergleichbare Ergebnisse erzielt mit maximaler Abweichung von 7% bei den Kurzzeitwerten und 2% bei den Jahresmittelwerten.

6.3.2 Einfluss zeitlicher und räumlicher Variabilität gemessener AKS

Für den zweiten Punkt wurde anhand meteorologischer Statistiken für die Standorte Stuttgart-Flughafen und Karlsruhe der Einfluss von zeitlicher und räumlicher Variabilität meteorologischer Messungen auf die berechneten Immissionskenngrößen exemplarisch untersucht.

Für den Flughafen Stuttgart diente eine Immissionsprognose auf Basis der AKS für den Zeitraum 1996-2004 als Referenz. Vergleichsrechnungen wurden auf Basis der AKS 1981-1990 und 1985-1995 durchgeführt. Für die beiden letztgenannten Zeiträume erfolgten die Messungen an unterschiedlichen Standorten auf dem Flughafengelände, so dass hier neben der zeitlichen auch die räumliche Variabilität in der direkten Umgebung eines topografisch homogenen Messstandortes untersucht werden konnte. Tatsächlich ist mit Verlegung der Station um ca. 300 m eine Verschiebung der Hauptwindrichtung um 20° bis 30° eingetreten.

Am Standort Karlsruhe wurde als Referenz eine Rechnung mit der AKS 1980-1990 definiert. Die Vergleichsrechnungen basieren auf den einjährigen AKS der Jahre 2002 und 2006. Auch an diesem Standort hat es im Jahr 1997 eine Verschiebung des Messortes in die unmittelbare Nachbarschaft gegeben, so dass sich neben den unterschiedlichen Bezugszeiträumen auch eine räumliche Variabilität auswirken kann.

Am Stuttgarter Flughafen führt der unterschiedliche Zeitbezug verbunden mit der Stationsverschiebung zu Differenzen in den Immissionskenngößen von bis zu 18 % im Jahresmittel und bis zu 14 % in den Kurzzeitwerten S18. Die Quellhöhe ist dabei von untergeordneter Bedeutung. Bei Karlsruhe liegen die Differenzen je nach Quellhöhe zwischen 23 % und 60 % (JM) bzw. zwischen etwa 19 % und knapp 100 % (S18).

6.3.3 Auswirkung räumlicher Übertragung (QPR)

Da in aller Regel für den Standort einer Immissionsprognose keine repräsentativen meteorologischen Messungen vorliegen, müssen Daten von einem entfernt liegenden Messort übertragen werden. Welche Auswirkungen auf die berechneten Immissionskenngößen die Verwendung übertragener Daten statt am Standort gemessener Daten haben kann, wurde anhand zweier Paare von Standorten abgeschätzt. Zwischen den AKS 1980-1990 für Karlsruhe und Söllingen (Entfernung 36 km, ebenes Gelände) besteht bei den maßgebenden meteorologischen Parametern Windrichtung, Windgeschwindigkeit und AK-Klasse eine sehr gute Übereinstimmung. Auch die Stationen Laupheim und Memmingen zeigen im gleichen Zeitraum sehr ähnliche Häufigkeitsverteilungen der Wind- und Ausbreitungsklassen. Eine hypothetische Übertragung der Daten eines Standortes auf den jeweils anderen wäre bei beiden Paaren aus fachlicher Sicht gerechtfertigt. Aus der Erfahrung heraus muss davon ausgegangen werden, dass in der gutachtlichen Praxis eher deutlich größere Abweichungen zwischen übertragenen Daten und den tatsächlichen Verhältnissen am Standort vorkommen können.

Als Referenz werden die Rechnungen mit Daten vom jeweiligen Standort herangezogen, als Vergleich dienen Rechnungen mit den „übertragenen“ Daten. Selbst bei dem hinsichtlich einer Datenübertragung ausgezeichnet geeigneten Standortpaar Karlsruhe und Söllingen treten bei einer Immissionsprognose mit Daten des jeweils anderen Ortes Differenzen im Jahresmittel von

bis zu 22 % und bei den Kurzzeitwerten S18 bis zu 18 % auf. Bei dem Standortpaar Laupheim / Memmingen, das hinsichtlich Qualität der Datenübertragung in der gutachtlichen Praxis eher dem Regelfall entsprechen dürfte, liegen die maximalen Differenzen sogar bei 33 % (JM) und 22 % (S18).

6.3.4 Konkret formulierte Anforderungen an die Qualität von synAKS

Anhand der exemplarischen Untersuchungsergebnisse aus den vorstehenden Kapiteln 6.3.1 bis 6.3.3 lässt sich festhalten, dass seitens der meteorologischen Eingangsdaten vor allem zwei Faktoren zu einer gewissen Bandbreite in den berechneten Immissionswerten führen:

- Zum einen resultieren kürzere Mess- bzw. Mittelungszeiträume (Ein-Jahresstatistiken) tendenziell in höheren Immissionswerten, wofür vor allem schmalere Windrichtungsverteilungen ursächlich sind.
- Zum anderen muss bei der Übertragung meteorologischer Daten von anderen Messorten auf den Standort mit deutlichen Differenzen gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen am Standort gerechnet werden, wodurch die Immissionswerte erheblich nach oben oder unten abweichen können.

Im Vergleich zu diesen beiden Faktoren ist sowohl der Bezugszeitraum der meteorologischen Daten als auch die Wahl des Rechenverfahrens (AKTerm oder AKS) von untergeordneter Bedeutung. Aus diesen Ergebnissen lassen sich hinsichtlich der Qualitätsanforderungen an synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken folgende Ansprüche ableiten.

Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken weisen eine mit aus Messdaten abgeleiteten AKS vergleichbare oder bessere Qualität auf, wenn sich die mit ihnen berechneten

- Jahresmittelwerte (JM) innerhalb einer Bandbreite von +/- 33 %
- Kurzzeitwerte (S18) innerhalb von +/- 66 %

um die mit einer auf Messungen basierenden AKS berechneten Werte bewegen.

6.4 Ergebnisse der Vergleichsrechnungen

Nachdem die Anforderungen an die Güte synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken über die Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen, die bei Verwendung von AKS, die auf Messungen basieren, definiert wurden, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse von AUSTAL2000-Vergleichsrechnungen vorgestellt.

Die AUSTAL2000-Vergleichsrechnungen auf Basis von gemessenen und synthetisch gewonnenen AKS wurden für insgesamt zehn Standorte in Baden-Württemberg durchgeführt. Die Bezugszeiträume von Messung und synthetischen Statistiken stimmten an allen Stationen jeweils überein. Ausgewertet wurden wieder das Jahresmittel (JM) sowie die Kurzzeitwerte S18 für die 10 m (**Abbildung 13**) und die 50 m hohe Quelle (**Abbildung 14**). In beiden Abbildungen

sind neben den relativen Immissionskennwerten die nach Kapitel 6.3.4 zulässigen Bandbreiten von +/- 33 % (JM) bzw. +/- 66 % (S18) eingetragen. Als Referenz dient immer die Rechnung mit der auf gemessenen Daten basierenden AKS.

Abgesehen von zwei Ausnahmen liegen die mit den synthetischen AKS berechneten Immissionswerte alle innerhalb der vorgegebenen Bandbreiten um diejenigen Immissionswerte, die auf Basis der gemessenen AKS bestimmt wurden. Die Abweichungen liegen bei dem Jahresmittel betragsmäßig zwischen 4 % (Freudenstadt, 10 m und 50 m Quelle) und 31 % (Stuttgart 10 m Quelle) und bei dem Kurzzeitwert S18 zwischen 0 % (Laupheim, 50 m Quelle) und 51 % (Memmingen, 10 m Quelle).

Ausnahmen bilden nur die Stationen Stötten und Söllingen. Bei Stötten werden die Jahresmittelwerte und der S18-Wert für die niedrigere Quelle etwas mehr überschätzt als nach der festgelegten Bandbreite zulässig. Die Überschätzung der Immissionswerte korrespondiert mit einer Unterschätzung des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit (gemessen: 4,4 m/s, synthetisch: 3,4 m/s). Als wahrscheinlichste Ursache dieser Differenzen ist die Lage der Messstation zu nennen, die sich auf einer isoliert gelegenen Kuppe befindet, die in den Modellrechnungen bei 500 m Gitterweite nur näherungsweise aufgelöst werden kann. Das so genannte „Speed-up“ des Windes über der Kuppe ist deshalb in den Modellrechnungen schwächer ausgeprägt, repräsentiert die mittleren Verhältnisse in der Kuppenumgebung aber besser als die direkt auf dem Gipfel erhobenen Daten (siehe hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 7).

An der Station Söllingen treten in den Jahresmittelwerten Abweichungen von bis zu 178 % auf, während die Kurzzeitwerte innerhalb der zulässigen Bandbreite liegen. Die mittleren Windgeschwindigkeiten zwischen Messung und synthetischer Statistik sind mit 3.0 bzw. 3.1 m/s nahezu identisch und auch die Windrichtungsverteilungen zeigen gleiche Charakteristiken. Allerdings sind in der synthetischen Statistik die Windrichtungen sehr viel stärker auf schmale SSW- und NNE-Sektoren konzentriert. Damit wird auch die mittlere Immissionsfahne schmaler berechnet bei gleichzeitig höheren Konzentrationen. Dieser Effekt entspricht prinzipiell dem Effekt, der schon bei dem Vergleich kürzerer mit längeren Messzeiträumen festgestellt wurde. Möglicherweise wird die Kanalisierung der Strömung im Rheintal durch die synthetischen Statistiken etwas überschätzt, da lokale Einflüsse auf Windmessungen durch Bebauung und Bewuchs nicht vollständig wiedergegeben werden.

An acht von zehn Stationen wird somit das in Kapitel 6.3.4 festgelegte Kriterium für eine gute Qualität der synthetischen AKS eingehalten. An einer der beiden verbleibenden Stationen scheinen Messung und synthetische Statistik markant andere Repräsentativitätsbereiche aufzuweisen (Stötten) und nur an einer der zehn Stationen kann das geforderte Qualitätskriterium von der synthetischen AKS nicht erfüllt werden (Söllingen).

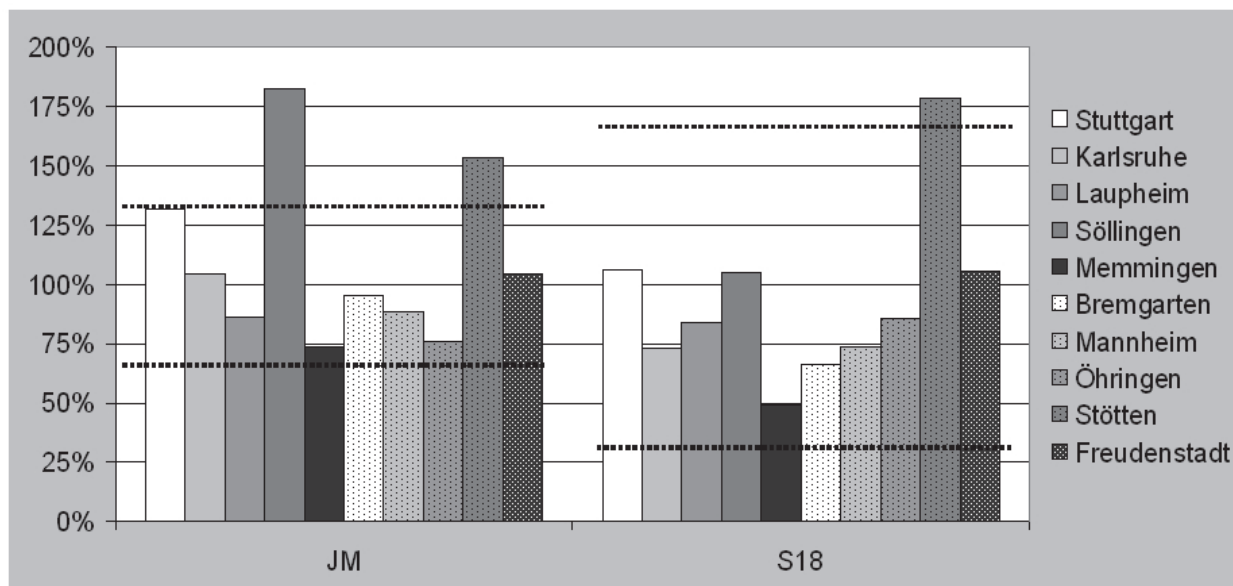


Abbildung 13: Relative Immissionskennwerte Jahresmittel (JM) und maximales Stundenmittel mit 18 Überschreitungen (S18), berechnet an zehn Stationen in Baden-Württemberg für Quellhöhen von 10 m

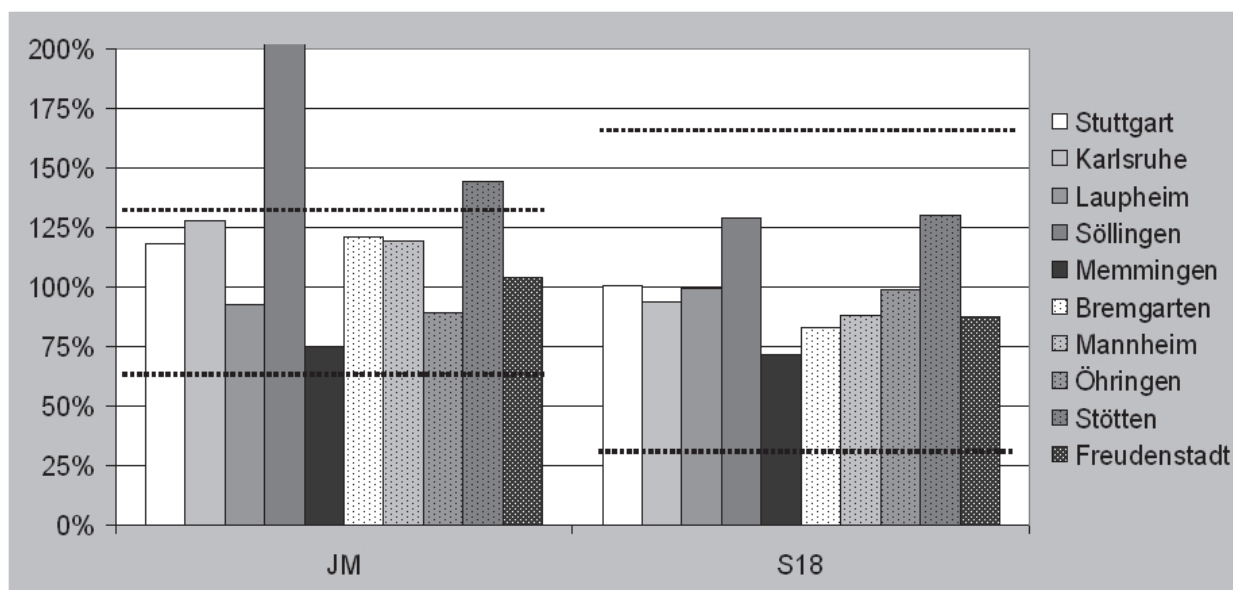


Abbildung 14: Relative Immissionskennwerte Jahresmittel (JM) und maximales Stundenmittel mit 18 Überschreitungen (S18), berechnet an zehn Stationen in Baden-Württemberg für Quellhöhen von 50 m

6.5 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen zum Vergleich zwischen gemessenen und synthetischen AKS belegen, dass die synthetisch gewonnenen AKS grundsätzlich für die Durchführung von Immissionsprognosen nach TA Luft und GIRL geeignet sind. Im Vergleich zu Rechnungen auf Basis von vor Ort gemessenen AKS bzw. auf Basis von nach weitgehend objektiven Kriterien an einen Standort übertragenen gemessenen AKS muss bei Verwendung der synthetischen AKS in den berechneten Immissionskenngrößen nur mit solchen Unsicherheiten gerechnet werden, wie sie typischerweise bei der Verwendung unterschiedlicher, nach bisherigen Kriterien aber objektiv gut geeigneter, auf Messungen basierender Ausbreitungsstatistiken auftreten.

Für das Verfahren synAKS spricht weiter, dass mit Ausnahme von Freudenstadt und Stötten acht der in Kapitel 6.4 für den Vergleich herangezogener Messstationen in topographisch stärker strukturierter Umgebung liegen, in der sich die Wind- und Ausbreitungsverhältnisse schon auf kleinem Raum ganz erheblich ändern können. Falls in topographisch strukturiertem Gelände an einem Standort keine Messdaten vorliegen und eine QPR durchgeführt wird, wird es häufig nur möglich sein, eine näherungsweise geeignete Messstation im regionalen Umfeld zu finden, die die Wind- und Ausbreitungsverhältnisse am gewünschten Standort realistisch wiedergibt. Unter solchen Bedingungen werden die in einem 500 m-Raster vorliegenden synthetischen Statistiken die realen Windverhältnisse am Standort hinsichtlich Geschwindigkeitsniveau und Richtungsmaxima und Minima eher besser abbilden als gemessene, übertragene Daten. Insofern stellen die in Kapitel 6.3.4 dargelegten möglichen Abweichungen bei einer qualifizierten Übertragung gemessener Daten die untere Schranke dar; in Realität muss hier teilweise mit deutlich höheren Abweichungen gerechnet werden.

7 Bedeutung des Repräsentativitätsbereichs synthetischer Daten für die Vergleichbarkeit mit Messungen

Hinweis: Die in diesem Kapitel behandelte Thematik gilt für Windstatistiken und Ausbreitungsklassenstatistiken gleichermaßen. In diesem Kapitel wird aus diesem Grund von synthetischen und gemessenen Statistiken gesprochen.

Im Zuge von Vergleichen, die deutschlandweit zwischen Messungen und synthetischen Statistiken durchgeführt wurden, wurde immer wieder festgestellt, dass eine teilweise deutlich schlechtere Übereinstimmung synthetischer Statistiken mit Messungen an Bergstationen bzw. Messstationen in ausgeprägter Kuppenlage erzielt wurde. Dies war Anlass für eine Sonderuntersuchung. Dafür wurden für ein kleines Teilgebiet in den bayerischen Alpen, in denen dieses Phänomen verständlicherweise häufiger auftritt, synthetische Statistiken in einer Auflösung von 150 m neu berechnet und mit den synthetischen Daten in 500 m Auflösung sowie den Messungen verglichen. Die Ergebnisse werden in diese Dokumentation der Vollständigkeit halber mit aufgenommen und können selbstverständlich sinngemäß auf Messstandorte in Mittelgebirgslagen und im Alpenvorland in Baden-Württemberg übertragen werden. Nachfolgend wird der Einfluss der Auflösung am Beispiel zweier Stationen erläutert.

7.1 Station Wendelstein (DWD)

Die Station liegt auf der Kuppe des Wendelsteins (**Abbildung 15**). Gemessen wird eine Windgeschwindigkeit von 7,1 m/s im Jahresmittel bei überwiegend westlichen Winden.

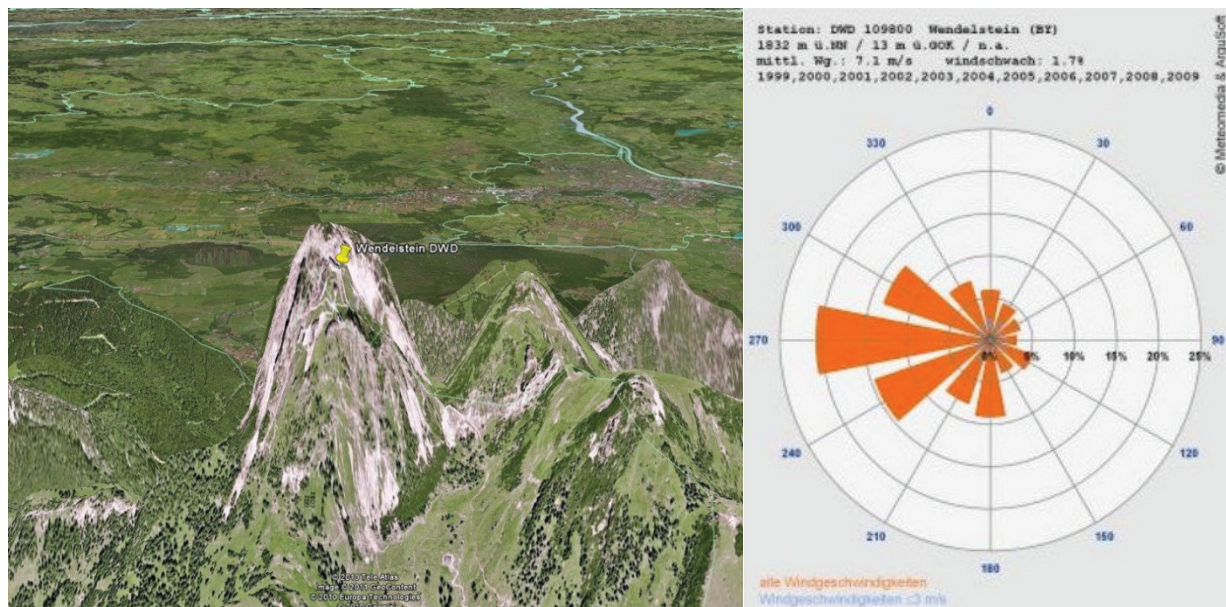


Abbildung 15: Darstellung des Standorts der DWD Station Wendelstein mit gemessener Windrose

Die synthetischen Windrosen in 500 m Auflösung zeigen gut die Umströmung des Wendelstein-Massivs (**Abbildung 16**). Die Windgeschwindigkeiten liegen mit ca. 2 m/s weit unterhalb der Messung auf dem Gipfel. Die der Station nächstgelegene Rose weist ein Hauptmaximum aus

Süd sowie eine relativ gleichmäßige Verteilung anderer Windrichtungen auf.

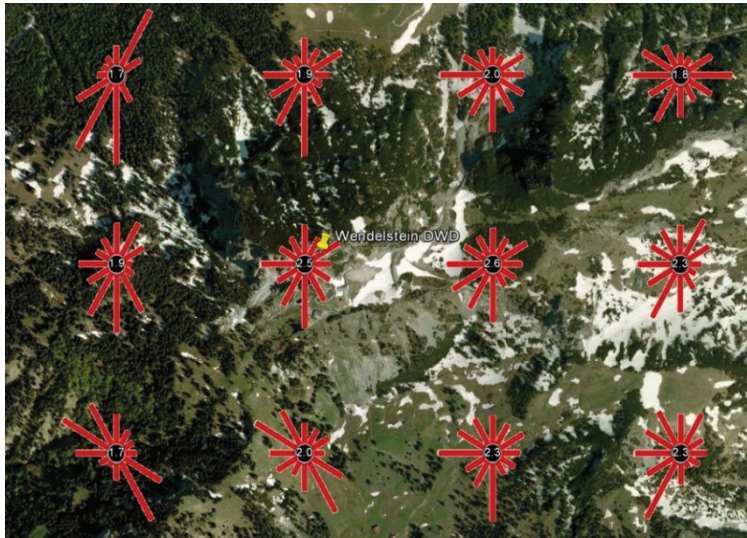


Abbildung 16: Synthetische Windrosen in 500 m Auflösung im Bereich des Wendelstein-Massivs

Werden die synthetischen Windrosen auf einem 150 m Raster berechnet, so tritt die Umströmung des Wendelsteins noch deutlicher hervor (**Abbildung 17**). Die Hauptwindrichtung auf dem Gipfel dreht auf westliche Richtungen und nähert sich der gemessenen Verteilung recht gut an. Vor allem aber steigt die Windgeschwindigkeit im Jahresmittel auf nun 5,1 m/s an. Das ist mehr als eine Verdoppelung gegenüber der Geschwindigkeit, die auf dem 500m Raster bestimmt wurde.

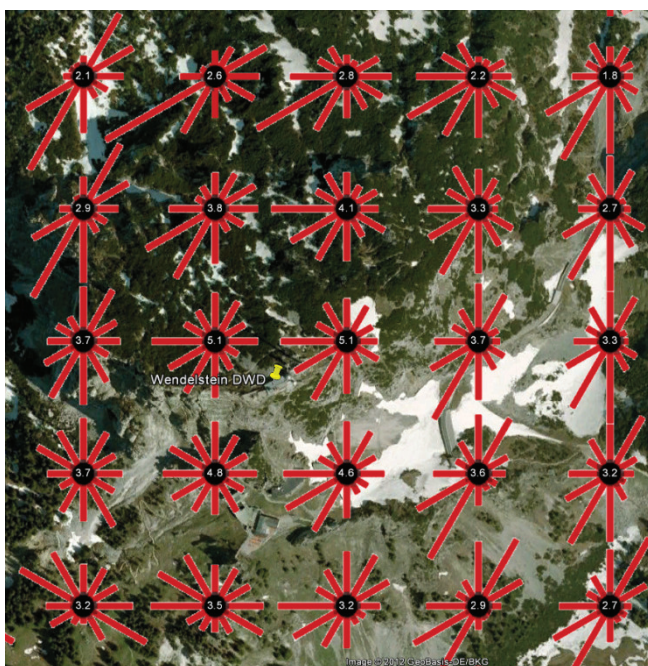


Abbildung 17: Synthetische Windrosen in 150 m Auflösung im Bereich des Wendelstein-Massivs

Es kann deshalb erwartet werden, dass mit einer weiteren Verfeinerung der Gitterauflösung sich die synthetisch ermittelte Windrichtungsverteilung und Windgeschwindigkeit noch weiter der Verteilung der Messung annähert. Andererseits lässt sich aus den Ergebnissen schließen,

dass die Messung auf dem Wendelstein bestenfalls für einen Umkreis von deutlich weniger als 75 m um die Station repräsentativ ist.

7.2 Station Spitzingsattel/Schliersee (Meteo Media)

Die Station liegt in Sattellage zwischen hohen Bergzügen im Westen und Osten (**Abbildung 18**). Gemessen wird eine Windgeschwindigkeit von 3,1 m/s im Jahresmittel. Das Maximum der Windrichtungen liegt bei SSW, ein sekundäres Maximum bei N.

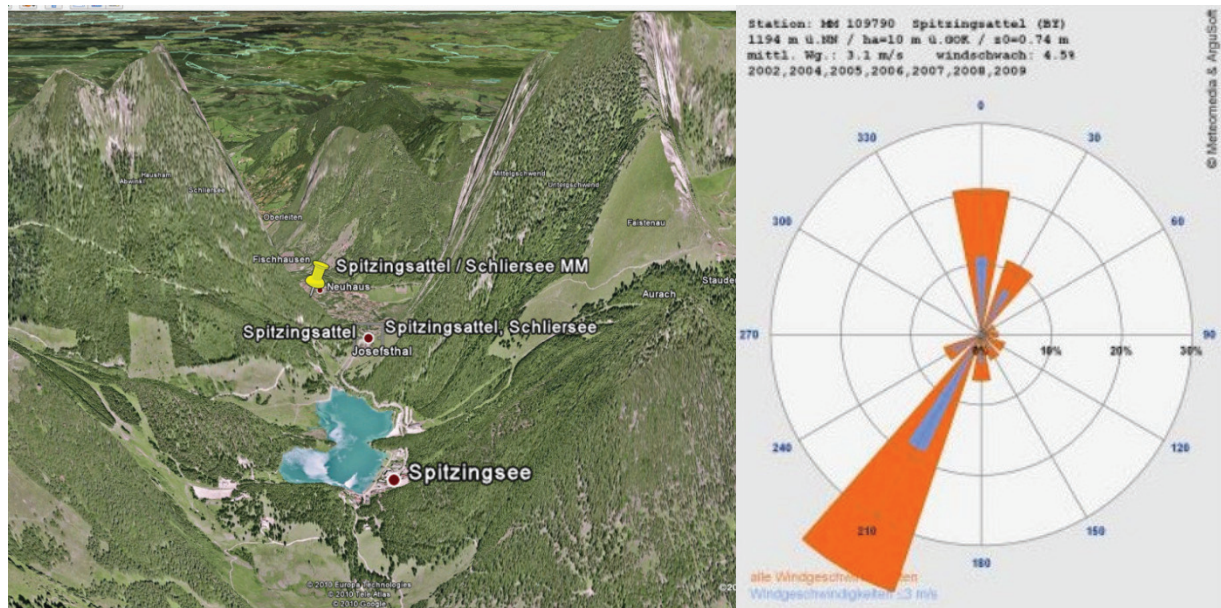


Abbildung 18: Darstellung des Standorts der Meteo Media-Station Spitzingsattel/Schliersee mit gemessener Windrose

Bei einer Auflösung von 500 m zeigt die synthetische Windrose eine N-S-Kanalisation, allerdings mit Schwerpunkt auf SSE statt SSW bei einer Windgeschwindigkeit von 2,1 m/s (**Abbildung 19**).

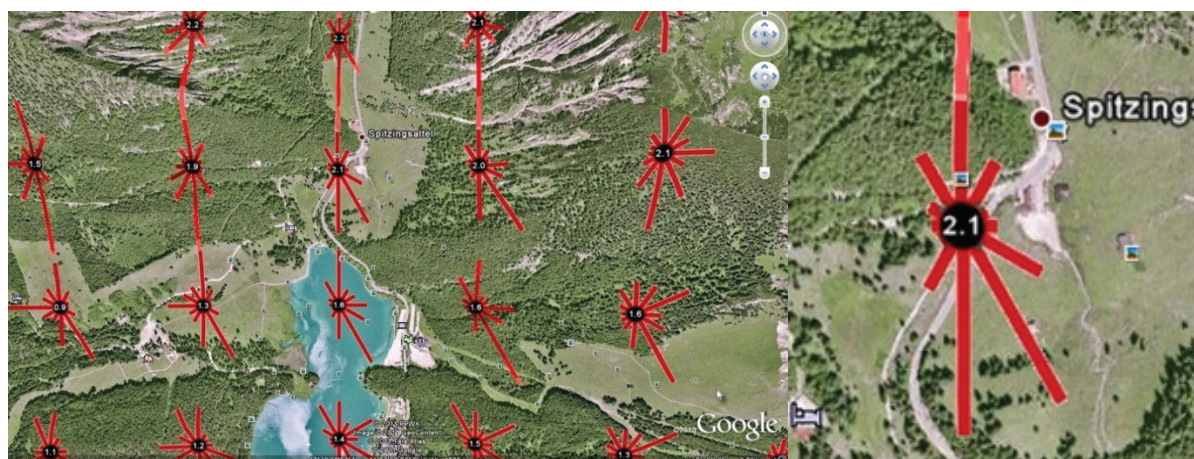


Abbildung 19: Synthetische Windrosen in 500 m Auflösung im Bereich Spitzingsattel/Schliersee

Wird die Auflösung auf 150 m reduziert (**Abbildung 20**), so steigt das Jahresmittel der

Windgeschwindigkeit auf 3,3 m/s und liegt somit geringfügig über dem gemessenen Wert. Die Hauptwindrichtung liegt jetzt wie bei der Messung bei SSW. Lediglich der S-Wind wird noch etwas überschätzt.

Auch hier kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Messung einen Repräsentativitätsradius von weniger als 75 m aufweist.

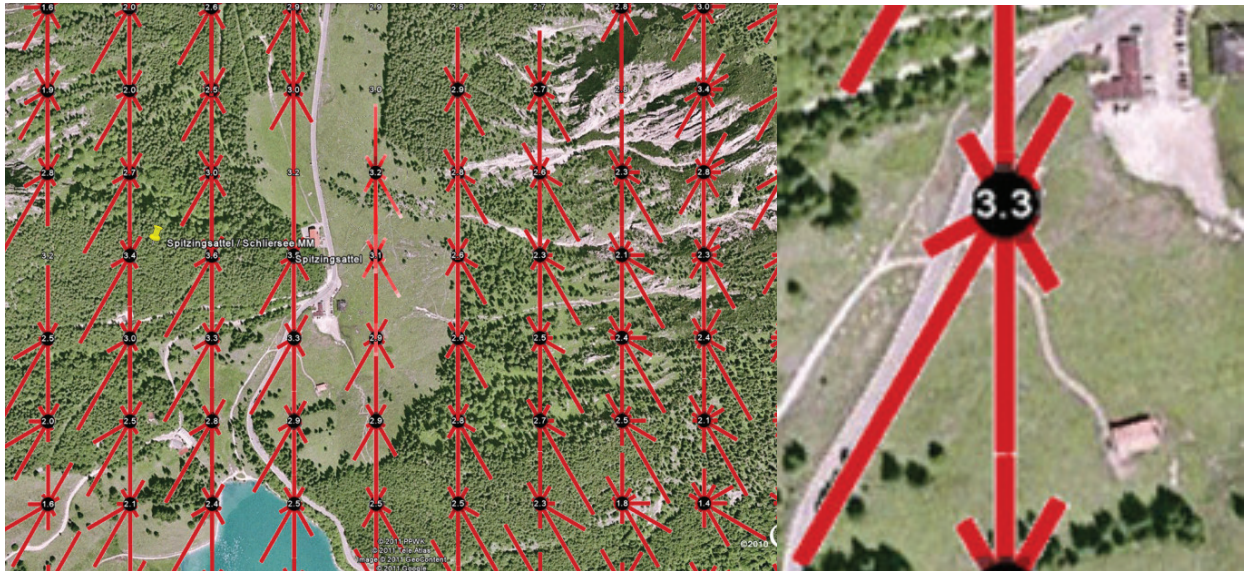


Abbildung 20: Synthetische Windrosen in 150 m Auflösung im Bereich Spitzingsattel/Schliersee

7.3 Fazit

Diese beiden Beispiele belegen in eindrucksvoller Weise, dass

- so genannte „frei gelegene“ Messstationen in topographisch strukturiertem Gelände Repräsentativitätsradien von nur wenigen Dekametern aufweisen können,
- sich die Qualität synthetischer Daten mit einem festen Repräsentativitätsbereich von $500 \times 500 \text{ m}^2$ nicht aus dem Vergleich mit Messstationen deutlich anderer Repräsentativitätsbereiche ableiten lässt und
- mit zunehmender räumlicher Auflösung synthetische Daten auch solche Messungen wiedergeben können, die nur lokal repräsentativ sind.

Die gezeigten Beispiele legen außerdem die Vermutung nahe, dass in den Karten des Deutschen Wetterdienstes zum Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund auf Basis des Statistischen Windfeldmodells (23) die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Höhe über NN erheblich überschätzt wird. Da in den Bergen hauptsächlich die Daten von Gipfelstationen in die Karten einfließen, ist die Höhenabhängigkeit vermutlich vor allem lokalen „Speed-up“-Effekten geschuldet.

8 Konkrete Anwenderhinweise zum Umgang mit synthetischen Statistiken

Hinweis: Die Anwenderhinweise in diesem Kapitel gelten für Windstatistiken und Ausbreitungsklassenstatistiken gleichermaßen. In diesem Kapitel wird aus diesem Grund von synthetischen und gemessenen Statistiken gesprochen.

Die Hinweise, die in diesem Kapitel gegeben werden, basieren auf den Erfahrungen, die die Arge in den letzten Jahren bei der Arbeit mit den synthetischen Statistiken gewonnen hat. Des Weiteren werden konkret Punkte angesprochen, die häufig von Anwendern gefragt werden und die den Umgang mit den synthetischen Statistiken in der Praxis erleichtern. Teilweise wurden einzelne Problemkreise schon in den vorstehenden Kapiteln diskutiert. Der Vollständigkeit halber werden diese Themen in diesem Kapitel, auch wenn es dadurch zu einer Redundanz kommt, noch einmal mit aufgenommen. Die einzelnen Problemkreise sind in vier Unterbereiche in den Kapiteln 8.1 bis 8.4 zusammengefasst.

8.1 Horizontale Repräsentativität, Höhen- und Raumbezug

8.1.1 Wann kann eine synthetische Statistik in welchem Umkreis angewendet werden und wann nicht?

Grundsätzlich sollte bedacht werden, dass eine synthetische Statistik, wie bereits mehrfach angesprochen, ein Flächenmittel über $500 \times 500 \text{ m}^2$ darstellt und somit nie genau für die Punktkoordinate gilt, die angegeben ist.

Für Ausbreitungsrechnungen, bspw. nach TA Luft, bei denen der eigentlichen Ausbreitungsrechnung keine Windfeldberechnung vorgeschaltet ist, sind die Statistiken deshalb für typische Untersuchungsgebiete mit Durchmessern zwischen rund 100 m und 1 km sehr gut geeignet. Bei relativ homogener Topographie, welche entsprechend homogene Windverhältnisse erwarten lässt, ist auch die Anwendung auf größere Untersuchungsgebiete möglich.

Soll nur eine sehr kleinräumige Ausbreitung betrachtet werden (typischerweise einige Dekameter), ist vor dem Hintergrund der topographischen Karte zu beurteilen, ob möglicherweise kleinräumige topographische Effekte zu lokal anderen Windverhältnissen führen können. Dies kann beispielsweise dann gegeben sein, wenn der Standort in einem engen Tal liegt, das von den Modellrechnungen nicht aufgelöst werden kann ($< 500 \text{ m}$ Breite). Für eine räumliche Auflösung von 500 m, für die die synthetischen Statistiken repräsentativ sind, zählen derart enge Täler, genauso übrigens wie einzelne Bauwerke oder Baumgruppen, zu lokalen Effekten, deren eng begrenzte Wirkung mit dem aktuell landesweit in Baden-Württemberg zur Verfügung stehenden Datensatz nicht berücksichtigt werden kann.

In diesen Fällen sollte gutachtlicher Rat dazu eingeholt werden, ob die Statistik am Standort für das kleinräumige betrachtete Untersuchungsgebiet als repräsentativ eingeschätzt werden kann, ob ggf. eine nahe gelegene Statistik die Verhältnisse am lokal topographisch geprägten Standort besser wiedergibt oder ob keine geeignete synthetische Statistik empfohlen werden kann.

Fazit: *Bei der Beurteilung der Eignung einer synthetischen Statistik für einen Standort ist unbedingt zu prüfen, ob für die gegebene Topographie die nach unten beschränkte Auflösung (500 x 500 m²) ausreichend ist.*

8.1.2 Die mittlere Windgeschwindigkeit ist im Vergleich zu einer städtischen Messstation zu hoch

Die Messhöhe städtischer Messstationen liegt praktisch immer innerhalb der mittleren Bebauungshöhe der Umgebung. Die Bebauung hat einen insgesamt abbremsenden Einfluss auf die Windgeschwindigkeit, so dass die mittlere Windgeschwindigkeit innerhalb städtischer Bebauung gegenüber dem Freiland reduziert ist. Allerdings ist bei innerstädtischen Messstationen sehr schwer zu beurteilen, ob die Station nur die abbremsende Wirkung der erhöhten Rauigkeit "spürt" oder ob ggf. Einzelbauwerke die abbremsende Wirkung verstärken.

Die synthetischen Statistiken berücksichtigen den abbremsenden Effekt der Bebauung über die Rauigkeit, gelten aber streng genommen für eine Höhe von etwa 10 m oberhalb der Verdrängungshöhe und repräsentieren damit also einen typischen Überdachwind. Aus diesen Gründen sind die mittleren Windgeschwindigkeiten einer synthetischen Statistik über einem Stadtgebiet meist höher als sie in der Stadt gemessen werden. Als Antrieb für mikroskalige Modelle, bei denen die Bebauung explizit aufgelöst wird, sind die synthetischen Statistiken vor diesem Hintergrund sehr gut geeignet. Bei der korrekten Arbeit mit diesen Modellen muss um das Untersuchungsgebiet ein so genannter "Bebauungskragen" gelegt werden, der die Aufgabe hat, das ungestörte Eingangsprofil am Modellrand an die Rauigkeit der Stadtbebauung anzupassen. Insofern wird bis zum Erreichen des Untersuchungsgebietes bei einem Antrieb mit einer synthetischen Statistik das mittlere Geschwindigkeitsniveau auf ein realistisches Maß reduziert.

Fazit: *Die synthetischen Statistiken geben über höheren Hindernissen (Wald, Bebauung) die mittleren Verhältnisse oberhalb der sich innerhalb des Waldes bzw. der Bebauung ausbildenden Verdrängungshöhe wieder. Sie eignen sich aus diesem Grund besonders für den Antrieb mikroskaliger Modelle, die die Hindernisse explizit auflösen.*

Vertiefende Erläuterung

Die synthetischen Windstatistiken beruhen auf Modellrechnungen mit einer limitierten räumlichen Auflösung (**Abbildung 6** in Teil 1). Subskalige Strömungshindernisse wie Vegetation oder Gebäude werden im Modell über die Konzepte von Rauigkeitslänge und Prandtl Schicht in ihrer Wirkung auf die Strömung berücksichtigt. Nach diesen Konzepten stellt sich über einer Fläche dicht stehender Einzelhindernisse (Gras, Getreidefeld, usw.) ein vertikales Windprofil ein, das in einer Höhe über Grund, die der Rauigkeitslänge entspricht, auf null zurückgeht. Darüber nimmt die Windgeschwindigkeit logarithmisch mit der Höhe zu, wobei das exakte Profil auch noch von der Temperaturschichtung abhängig ist. Bei höheren Hindernissen (Wald, Bebauung) ist die Rauigkeitslänge nicht auf den Boden, sondern auf eine gewisse Höhe über Grund, die so genannte Verdrängungshöhe zu beziehen. Die Strömung hebt in solchen Gebieten praktisch vom Boden ab und innerhalb der Hindernisstrukturen bilden sich spezifische Strömungsverhältnisse aus, die mit den üblichen Profilansätzen nicht zu beschreiben sind. Dies betrifft speziell Waldgebiete (Strömung innerhalb des Stamm- und Kronenbereichs) und städtische Bebauung (Strömung zwischen Gebäuden). Da in den Modellrechnungen die Verdrängungshöhe weder explizit (z. B. in Form spezieller Parametrisierungen) noch implizit (z. B. als Zuschlag zur Geländehöhe) berücksichtigt wird, sind die für 10 m über Grund berechneten synthetischen Windstatistiken eher als repräsentativ für eine Höhe von ca. 10 m oberhalb der Verdrängungshöhe zu interpretieren. Verdrängungshöhen liegen typischerweise in der Größenordnung von 2/3 der mittleren Hindernishöhe.

In den meisten Fällen und für die meisten Anwendungen können die Statistiken über rauem Gelände (Bebauung, Wald) als auf den Überdachwind (oder „Überwaldwind“) bezogen verstanden werden. Gerade im städtischen Bereich sind sie deshalb besonders gut für den Antrieb eines mikroskaligen Modells zur Berechnung von Strömung und Ausbreitung innerhalb der Bebauung geeignet.

8.1.3 Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind in Kuppenlagen zu gering

Dieser Fall kann vor allem dann eintreten, wenn eine Bergkuppe isoliert liegt, baumlos ist und einen geringen Durchmesser aufweist. Dann kann die Bergkuppe von den Modellrechnungen nicht oder nur unzureichend aufgelöst werden. Die synthetische Statistik repräsentiert ein größeres Umgebungsgebiet, an dem die Bergkuppe nur einen geringen Flächenanteil hat und somit "modelltechnisch" höhenmäßig reduziert wird. Der typische „Speed-up“-Effekt, der sich über der Bergkuppe einstellt, wird somit nicht aufgelöst. Dieser Punkt ist ausführlich in dem vorangegangenen Kapitel 7 diskutiert worden.

Fazit: Bei ausgeprägten Bergkuppen, die räumlich begrenzt sind und durch das zu Grunde liegende Rechengitter von $500 \times 500 \text{ m}^2$ „fallen“, werden durch die

synthetischen Statistiken zu niedrige mittlere Windgeschwindigkeiten prognostiziert. Dies könnte nur durch ein deutlich engeres Rechenraster verbessert werden.

8.2 Was beinhalten synthetische Statistiken alles?

8.2.1 Sind in den synthetischen Statistiken Kaltlufteinflüsse enthalten?

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben fließen in die Ermittlung von synWS/synAKS auch Kaltluftberechnungen mit ein. Insofern enthalten synthetische Statistiken bereits die Effekte nächtlicher Kaltluftabflüsse.

Bei einfachen Fragestellungen, bei denen die Topographie im Untersuchungsgebiet näherungsweise homogen ist (eindeutige Hang- oder Talsituation), der Emittent und der Immissionsort im Untersuchungsgebiet liegen, eine Ausbreitungsrechnung ohne Windfeldmodellierung (**s. Kap. 8.1.1**) in Frage kommt und der Kaltluftabfluss eindeutig vom Quell- zum Zielort gerichtet ist, ist die Berücksichtigung der Kaltluft über die synthetische Statistik in den meisten Fällen ausreichend. Bei komplexen topographischen Systemen mit Kaltluftabflüssen, die zeitlich und räumlich stark im Laufe einer Kaltluftnacht variieren, sind in aller Regel Windfeldberechnungen gekoppelt mit speziellen Kaltluftberechnungen für die typischen Kaltluftzeiten notwendig. In diesem Fall sind die Informationen der synthetischen Statistiken für den Modellantrieb bzw. die Auswahl dynamischer bzw. thermodynamischer Windfelder nicht ausreichend.

8.2.2 Können die synthetischen Statistiken auch für Ausbreitungsrechnungen in Waldgebieten verwendet werden?

In **Kapitel 8.1.2** wurde erläutert, dass die synthetischen Statistiken die Verhältnisse oberhalb einer mittleren Hindernishöhe repräsentieren. Wenn eine Ausbreitungsrechnung für ein Untersuchungsgebiet mit größeren Waldflächen über typische Entfernungen von einigen hundert Metern oder mehr erfolgen soll, sind die synthetischen Statistiken hierfür gut geeignet.

Geht es dagegen um die Ausbreitung aus einer niedrigen Quelle (unterhalb des Kronenbereichs) über geringe Distanzen (typisch einige zehn bis hundert Meter), dann können die Windstatistiken nicht verwendet werden. Derartige Fragestellungen mit stark lokalem Charakter lassen sich ohnehin mit keiner Standard-Immissionsprognose bspw. nach TA Luft oder GIRL bearbeiten, da die Windverhältnisse innerhalb von Waldgebieten mit keinen einfachen theoretischen Annahmen oder Modellansätzen beschrieben werden können.

8.2.3 Können die synthetischen Statistiken auch für eine City mit Hochhäusern verwendet werden?

Die im Modell implementierte Rauigkeitslänge innerstädtischer Bebauung entspricht eher kleinen bis mittleren Städten, nicht aber den höher bebauten Citylagen. Andererseits bildet sich über Städten eine interne Grenzschicht aus (**Abbildung 21**) die näherungsweise auf der Verdrängungshöhe „aufsetzt“. Diese ist über Citylagen deutlich höher als in Stadtrandbereichen. Die Rauigkeitslänge muss dagegen nicht im selben Maße zunehmen.

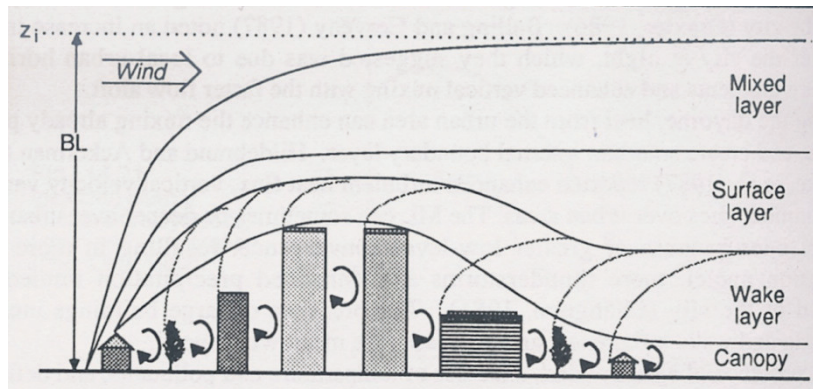


Abbildung 21: Aufbau von Grenzschichten in innerstädtischen Bereichen (23)

Da die synthetischen Statistiken auf eine mittlere Höhe oberhalb der Verdrängungshöhe bezogen sind, können sie grundsätzlich auch für Innenstadtbereiche verwendet werden. In Citylagen von Großstädten muss aber damit gerechnet werden, dass Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Windgeschwindigkeitsniveau „über Dach“ und dem der Statistik möglich sind.

8.3 Zukünftige Entwicklungen

8.3.1 Gibt es bald auch synthetische Statistiken in noch besserer Auflösung?

Bei vielen Anwendungsfällen, in denen Windstatistiken oder Ausbreitungsklassenstatistiken benötigt werden, geht es um Untersuchungsgebiete mit einer Ausdehnung in einer Größenordnung, die etwa dem Repräsentativitätsbereich der synthetischen Statistiken von $500 \times 500 \text{ m}^2$ entspricht. Eine feinere räumliche Auflösung der Statistiken würde für derartige Anwendungen keinen Qualitätsgewinn bringen, sondern vielmehr die Modellierung einzelner topographischer Strukturen (Baumgruppen, Häuser) erforderlich machen. Für räumlich höher auflösende Statistiken besteht jedoch ein Bedarf in Gebieten mit kleinskalig ausgeprägter Topographie, wie sie bspw. in einzelnen engen Tälern oder Talsystemen sowie im Nahbereich von Gebirgszügen wie in den Mittelgebirgslagen und im Alpenvorland, anzutreffen ist. Synthetische Statistiken auf einem feiner aufgelösten Raster gibt es derzeit noch nicht flächendeckend. Allerdings ist für die Zukunft zu überlegen, ob es für Teilgebiete Deutschlands sinnvoll sein könnte, Berechnungen auf einem feineren Raster durchzuführen (siehe Beispiel in **Kap. 7**).

8.3.2 Das Klima ändert sich! Ist das in den synthetischen Statistiken berücksichtigt?

Infolge der inzwischen als gesichert geltenden anthropogenen Auswirkungen auf das globale Klima waren in der jüngsten Vergangenheit Änderungen im lokalen Windklima beobachtet worden bzw. sind auch zukünftig zu erwarten.

Als Eingangsdaten in die synthetischen Statistiken für Baden-Württemberg sind Zeitserien der Analysedaten für den zehnjährigen Zeitraum 2001 bis 2010 eingegangen. Die synthetischen Statistiken repräsentieren somit das Klima für diesen aktuellen 10-Jahres-Zeitraum.

Die natürlichen Schwankungen im Windklima zwischen unterschiedlichen 10-Jahres-Zeiträumen sind relativ gering, wie Untersuchungen für Baden-Württemberg gezeigt haben, aber durchaus erkennbar. Eine Aktualisierung der synthetischen Statistiken in regelmäßigem Turnus auf einen möglichst aktuellen 10-Jahres-Zeitraum ist sinnvoll. Diese Umrechnung erfordert keine neue Modellrechnungen, sondern ist auf Basis einer erneuten statistischen Auswertung aller Modellrechnungen für den jeweils aktuellen Zeitraum möglich.

8.3.3 Die Flächennutzung ändert sich; wie kann das in den synthetischen Statistiken berücksichtigt werden?

Änderungen in der Flächennutzung (bspw. Ausweitung von Siedlungsgebieten und Gewerbeflächen, Wälder) können auf einer Zeitskala von mehreren Jahren solche Flächenausdehnungen erreichen, dass über eine Änderung der Landnutzungs- und der Rauigkeitsklassen lokal signifikante Änderungen im Windklima auftreten. Solche Änderungen könnten nur durch Wiederholung aller Modellrechnungen des betroffenen Gebietes erfasst werden.

8.3.4 Gibt es auch Statistiken für größere Höhen, z.B. 40 m über Grund?

Der LUBW wurden für die gesamte Landesfläche synthetische Statistiken für eine Höhe von 10 m geliefert. Dies ist in aller Regel die Bezugshöhe für Standard-Immissionsprognosen nach TA Luft und GIRL. In den Berechnungsverfahren nach TA Luft wird ein Windprofil mit der Höhe beschrieben. Auch für Immissionsberechnungen außerhalb des Regelungsbereiches der TA Luft (dies gilt überwiegend für Nahfelduntersuchungen bei niedrigen Quellen) sind die für 10 m Höhe ermittelten synthetischen Statistiken ausreichend.

Bei komplexen Geländebeziehungen ist es möglich, dass die charakteristischen Windverhältnisse in größeren Höhen und somit auch das Ausbreitungsverhalten mit den bodennahen Statistiken nur noch unzureichend beschrieben werden. Für diese Fälle empfiehlt sich die Einholung einer gutachtlichen Stellungnahme. Grundsätzlich ist es möglich, die berechneten Windverhältnisse auch für größere Höhen auszuwerten.

8.4 Akzeptanz der synAKS für Ausbreitungsrechnungen – Erfahrungen

8.4.1 Können synAKS für jede Anwendung gleichermaßen verwendet werden?

Für alle synthetischen Statistiken, die nach **Kapitel 8.1** anwendbar sind, bestehen keine grundsätzlichen Einschränkungen hinsichtlich bestimmter Anwendungen. Bevorzugt sind sie für Immissionsprognosen nach TA Luft und GIRL erzeugt worden. Sie können jedoch ebenso auch für einfache Abschätzungen bei Nachbarschaftsbeschwerden oder für mikroskalige Ausbreitungsrechnungen wie für klimatische Fragestellungen, beispielsweise in der Städte- und Raumplanung, verwendet werden.

Bei Immissionsprognosen nach TA Luft und Anwendung eines diagnostischen oder prognostischen Windfeldmodells ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Anemometerposition so gewählt wird, dass der meteorologische Antrieb der Ausbreitungsrechnungen aus weitgehend freier Lage erfolgt. Dies kann bspw. bedeuten, dass die synthetische Statistik nicht für die Koordinaten des Anlagenstandortes selbst, falls dort kleinräumige Beeinflussungen durch Topographie oder Bebauung gegeben sind, sondern für einen Ort mit eher freier Anströmung, z.B. auf einer nahe gelegenen Kuppenlage innerhalb des Rechengebietes, gewählt wird.

In analoger Weise ist auch bei der Übertragung einer gemessenen Statistik auf einen Standort zu verfahren.

Die Wahl einer synthetischen Ausbreitungsklassenstatistik und des zugehörigen Anemometerstandortes bei Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft sollte nicht losgelöst von der Art der Ausbreitungsrechnung (ohne oder mit Windfeldmodell, Gebietsgröße) betrachtet werden. Wichtige Erläuterungen hierzu gibt die Richtlinie VDI 3783 Blatt 13 im Abschnitt 4.7.1 (25) und den zugehörigen Erläuterungen des Anhangs. Es gilt der Grundsatz, dass die synAKS „alle relevanten Prozesse enthalten muss, die nicht durch eine Windfeldmodellierung erfasst werden und umgekehrt“.

8.4.2 Grundsätzlicher Umgang bei Verwendung von meteorologischen Daten

Grundsätzlich ist bei der Auswahl einer gemessenen oder einer berechneten Statistik mit derselben Sorgfalt vorzugehen. Liegt eine Messung direkt am Standort einer Anlage (bei einer Immissionsprognose) oder für ein Untersuchungsgebiet (bspw. bei einer klimatologischen Einschätzung) vor, ist zu prüfen, ob die Messung sachgerecht nach Stand der Technik erfolgte. Dabei ist insbesondere zu prüfen, ob die Messung lokal (durch ausgeprägte Hindernisse) gestört ist oder aber für das Beurteilungsgebiet der jeweiligen Fragestellung repräsentativ ist. Dies ist insbesondere bei typischen innerstädtischen Messstationen erforderlich.

Bei einer Übertragung von Messungen von einem Messstandort auf einen Anlagenstandort ist

das Übertragungsverfahren kritisch zu prüfen. Hier können die in einem 500 m-Raster vorliegenden synthetischen Statistiken eine wertvolle Hilfe sein. Des Weiteren sollte der gemessenen Statistik ein möglichst langer Messzeitraum (10 Jahre) zu Grunde liegen.

Auch bei der Verwendung einer synthetischen Statistik ist vorab sorgfältig zu prüfen, ob das Untersuchungsgebiet mit Quellort und Immissionsort kleinräumig topographisch geprägt ist. Falls dies der Fall ist und die Dimensionen der topographischen Diskontinuitäten deutlich geringer sind als das den Berechnungen zu Grunde liegende Rechenraster, werden typische Windverteilungen ggf. nicht richtig wieder gegeben. Das ist z.B. bei engen Tälern mit Talquerschnitten deutlich unter 500 m der Fall. Bei kleinräumig ausgeprägten Bergkuppen, die durch das Berechnungsraster "fallen", unterschätzen die synthetischen Statistiken häufig das Geschwindigkeitsniveau.

Falls in solchen Fällen mit der Ausbreitung vorgeschalteten Windfeldmodellen gearbeitet wird und diese Windfeldmodelle in der Lage sind, die kleinräumige Hindernis- bzw. Topographiestruktur aufzulösen, lässt sich meist in der näheren Umgebung eine synthetische Statistik finden, die die großräumigeren Verhältnisse gut wiedergibt und als Antrieb für die Windfeldmodelle geeignet ist.

Die synthetischen Statistiken werden immer für einen 10-jährigen Antriebszeitraum erzeugt und sind damit zeitlich repräsentativ.

9 Literatur

1. **TA Luft**, 2002. *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz, technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24.07.2002*. s.l. : Gemeinsames Ministerialblatt, Nr. 25-29 S. 511 ff.: Hrsg.: Bundesminister des Inneren, 2002.
2. **Kolb, H.** Vergleich verschiedener Methoden der Übertragung von Statistiken der Ausbreitungsverhältnisse in orographisch modifiziertem Gelände. Arch. Met. Geophys. Bioklim. 24 (1975), S. 57-68.
3. **Bigalke, K.** Berechnung von Ausbreitungsklassenstatistiken auf Basis der synthetischen Windstatistiken für Baden-Württemberg, im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. 2007.
4. **LAI - Länderausschuss für Immissionsschutz.** GIRL (Geruchsimmissionsrichtlinie). [Hrsg.] Version 01/2009 Vorschriftensammlung der Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg. *Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen*. [Richtlinie]. 29. 02 2008.
5. **Frank, H.-P. und Landberg, L.** Modelling the wind climate of Ireland. Boundary-Layer Meteorol., 85, 359-377. 1997.
6. **VDI-Fachbereich Umweltmeteorologie.** [Hrsg.] Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. *VDI-Richtlinie 3782, Blatt 1 - Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Gauß'sches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngößen*. August 2009.
7. **Kanamitsu, M. et al.** *NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2)*. November 2002. Bul. of the Atmos. Met. Soc. 1631-1643.
8. **European Environmental Agency.** *CORINE Land Cover Data 2000*. 2009.
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-100-m-version-12-2009>.
9. **metSoft Gbr.** *GlobDEM50 - Deutschland, Digitales Höhenmodell*. Heilbronn : s.n., 2006.
10. **Schatzmann, M., et al., et al.** *Entwicklung einer allgemein verfügbaren PC-Version des mesoskaligen Modells METRAS*. [Bericht an das Umweltbundesamt, FuE Projekt 104 04 354]. 1998.
11. **Schlünzen, K.H. und Bigalke, K.** [Hrsg.] Meteorologisches Institut der Universität Hamburg. *METRAS PC, Version 1.0 Benutzerhandbuch*. 1998.
12. **Schlünzen, K.H.** *Das mesoskalige Transport- und Strömungsmodell METRAS - Grundlagen, Validierung, Anwendung*. [Hamburger Geophysikalische Einzelschriften, A88]. 1988.
13. **Dierer, S.** *Die Validierung des mesoskaligen Transport- und Strömungsmodells METRAS*. [Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg]. 1997.
14. **Schlünzen, K.H.** *Validierung hochauflösender Regionalmodelle*. [Ber. Zentr. Meeres- und Klimaforschung HH, A23]. 1996.
15. **Lüpkes, C. und Schlünzen, K.H.** *Modelling the arctic convective boundary-layer with different turbulence parameterizations*. [Boundary-Layer Meteorol., 79, 107-130]. 1996.
16. **Schlünzen, K.H.** *Numerical study on the inland penetration of sea breeze fronts at a coastline with tidally flooded mudflats*. [Beitrag Phys. Atmosph., 63 (3/4), 243-256]. 1990.
17. **Walz, U.** *Bewertung eines mesoskaligen Modells für die Simulation arktischer Kaltluftausbrüche anhand von Flugzeugmessungen*. [Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg]. 1997.
18. **Press, W.H., et al., et al.** *Numerical Recipes in FORTRAN 77; Vol. 1*. [Cambridge University Press]. 2001.

19. **Cappel, A. und Kalb, M.** *Das Klima von Hamburg - Berichte des Deutschen Wetterdienstes.* [Nr. 141]. 1976.
20. **Schäfer, P.J.** *Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland.* [Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 159]. München : s.n., 1982.
21. **K.Bigalke, D. Ahrens, M.Rau.** Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken zur Verwendung in Immissionsprognosen. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft.* 68. Jahrgang (2008).
22. **Deutscher Wetterdienst (DWD).** *Bestimmung der in AUSTAL 2000 anzugebenden Anemometerhöhe.* [Internetveröffentlichung unter http://www.austal2000.de/data/2006-02-07/Bestimmung_ha_e2005.pdf]. 2005.
23. **Deutscher Wetterdienst (DWD).** *Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund - Berechnungen mit dem statistischen Windfeldmodell für den Zeitraum 1981-2000.* 2004.
24. **Stull, R.B.** *An introduction to boundary layer meteorology.* [Kluwer Academic Publisher, Dordrecht]. 1988.
25. **VDI-Fachbereich Umweltmeteorologie.** [Hrsg.] Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. *VDI-Richtlinie 3783, Blatt 13 - Umweltmeteorologie - Qualitätssicherung in der Immissionsprognose - Anlagenbezogener Immissionsschutz - Ausbreitungsrechnung gemäß TA Luft.* Januar 2010.