



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Vergleich verschiedener Verfahren zur Langfristextrapolation von Windmessdaten

Bachelorarbeit

Im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

Christoph Bloch



Hamburg

Am 15. 08. 2017

Erstprüfer: Herr Prof. Dr. Heiner Kühle (HAW Hamburg)

Zweitprüfer: Herr Herbert Schwartz (anemos-jacob GmbH)

HAW Hamburg

Fakultät Life Sciences

Ulmenliet 20

21033 Hamburg

anemos-jacob GmbH

Oldershausener

Hauptstrasse 22

21436 Oldershausen

WKN AG

Haus der Zukunftsenergien

Otto-Hahn-Straße 12-16

25813 Husum

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
1. Tabellenverzeichnis.....	III
2. Abbildungsverzeichnis.....	IV
3. Zusammenfassung.....	1
4. Einleitung.....	2
5. Grundlagen.....	4
5.1 Verwendete Verfahren.....	4
5.1.1. Lineare Regressionen.....	4
5.1.1.1 Lineare Regression mit y-Achsenabschnitt.....	4
5.1.1.2 Lineare Regression durch den Ursprung.....	5
5.1.2 MCP.....	6
5.1.3 MDP.....	8
5.2 Root-Mean-Square-Error (RMSE).....	10
5.3 Standorte.....	11
5.3.1 Frankreich.....	11
5.3.2 Italien.....	13
5.3.3 Polen.....	15
6. Methodik.....	17
6.1 Vorgehen.....	17
6.1.1 Messungen.....	18
6.1.2 Referenzdaten.....	19
6.1.2.1 MERRA.....	20
6.1.2.2 conWX.....	20
6.1.2.2 Wetterstationen.....	21
6.2 Datengrundlage.....	21
6.2.1 Allgemein.....	21
6.2.2 Frankreich.....	22

6.2.3 Italien	29
6.2.4 Polen	39
7. Ergebnisse	49
7.1 Frankreich	50
7.1.1 MERRA	50
7.1.2 conWX	52
7.1.3 Wetterstation	54
7.2 Italien	57
7.2.1 MERRA	57
7.2.2 conWX	58
7.2.3 Zweite Messung	60
7.3 Polen	61
7.3.1 MERRA	61
7.3.2 conWX	63
7.3.3 Wetterstation	65
7.4 Gesamtzeitraum	67
7.5 RMSE	69
8. Diskussion	72
9. Fazit	80
10. Literaturverzeichnis	81
10.1 Internetquellen	81

Anhang

Eigenständigkeitserklärung

Erklärung zur Ausleihe der Arbeit in den Bestand der Bibliothek

1. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Verfügbarkeit der Daten im gesamten Analysezeitraum in Frankreich.	S. 25
Tabelle 2	Mittlere Windgeschwindigkeiten im gesamten Analysezeitraum in Frankreich.	S. 29
Tabelle 3	Verfügbarkeiten der Daten im gesamten Analysezeitraum in Italien.	S. 32
Tabelle 4	Mittlere Windgeschwindigkeiten für den gesamten Analysezeitraum Italien.	S. 39
Tabelle 5	Verfügbarkeiten der Daten im gesamten Analysezeitraum.	S. 42
Tabelle 6	Mittlere Windgeschwindigkeiten im gesamten Analysezeitraum Polen.	S. 48

2. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 AG ENERGIEBILANZEN E.V. zitiert nach
BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE
(2017): Bruttostromerzeugung in Deutschland 2016. Berlin. **S. 2**
- Abb. 2 Graphische Darstellung der Grundlage des MDP Verfahrens. **S. 9**
- Abb. 3 GOOGLE EARTH (Hrsg.) (2015): Standort Frankreich. Ohne Ort
[14.08.2017]. **S. 11**
- Abb. 4 POSTELS, M. (ANEMOS-JACOB GMBH) (2017): Orographie am
Standort Frankreich. Oldershausen (basierend auf Daten von:
JARVIS A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA (2008):
Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for
Tropical Agriculture (CIAT), erreichbar unter
<http://srtm.csi.cgiar.org>. [04.07.2017]. **S. 12**
- Abb. 5 GOOGLE EARTH (Hrsg.) (2016): Standort Italien. Ohne Ort
[14.08.2017] **S. 13**
- Abb. 6 POSTELS, M. (ANEMOS-JACOB GMBH) (2017): Orographie am
Standort Italien. Oldershausen (basierend auf Daten von: JARVIS
A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA (2008): Hole-filled
seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical
Agriculture (CIAT), erreichbar unter <http://srtm.csi.cgiar.org>.
[04.07.2017]. **S. 14**
- Abb. 7 GOOGLE EARTH (Hrsg.) (2017): Standort Polen. Ohne Ort
[14.08.2017] **S. 15**
- Abb. 8 POSTELS, M. (ANEMOS-JACOB GMBH) (2017): Orographie am
Standort Polen. Oldershausen (basierend auf Daten von: JARVIS
A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA (2008): Hole-filled
seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical
Agriculture (CIAT), erreichbar unter <http://srtm.csi.cgiar.org>.
[04.07.2017]. **S. 16**
- Abb. 9 Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Frankreich
mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz. **S. 23**

Abb. 10	Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Frankreich mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.	S. 23
Abb. 11	Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Frankreich mit Wetterstationsdaten als Referenz.	S. 24
Abb. 12	Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Frankreich mit Wetterstationsdaten als Referenz.	S. 24
Abb. 13	Windrosen für Messung und Referenz in Frankreich mit MERRA-Daten als Referenz über den gesamten Messzeitraum.	S. 26
Abb. 14	Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit conWX-Daten als Referenz.	S. 26
Abb. 15	Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit Wetterstationsdaten als Referenz.	S. 27
Abb. 16	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit MERRA-Daten als Referenz.	S. 28
Abb. 17	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit conWX-Daten als Referenz.	S. 28
Abb. 18	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit Wetterstationsdaten als Referenz.	S. 29
Abb. 19	Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Italien mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.	S. 30
Abb. 20	Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Italien mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.	S. 31
Abb. 21	Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Italien mit Daten der zweiten Messung als Referenz.	S. 32
Abb. 22	Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Italien mit Daten der zweiten Messung als Referenz.	S. 32
Abb. 23	Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit MERRA-Daten als Referenz.	S. 34
Abb. 24	Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit conWX-Daten als Referenz.	S. 35
Abb. 25	Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit Daten der zweiten Messung als Referenz	S. 35

Abb. 26	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit MERRA-Daten als Referenz.	S. 38
Abb. 27	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit conWX-Daten als Referenz.	S. 38
Abb. 28	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit der zweiten Messung als Referenz.	S. 39
Abb. 29	Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Polen mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.	S. 40
Abb. 30	Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Polen mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.	S. 40
Abb. 31	Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Polen mit Wetterstationsdaten als Referenz.	S. 42
Abb. 32	Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Polen mit Wetterstationsdaten als Referenz.	S. 42
Abb. 33	Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit MERRA-Daten als Referenz.	S. 44
Abb. 34	Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit conWX-Daten als Referenz.	S. 44
Abb. 35	Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit Wetterstationsdaten als Referenz.	S. 45
Abb. 36	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit MERRA-Daten als Referenz.	S. 47
Abb. 37	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit conWX-Daten als Referenz.	S. 47
Abb. 38	Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit Wetterstationsdaten als Referenz.	S. 48
Abb. 39	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Frankreich inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 51

Abb. 40	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Frankreich exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 52
Abb. 41	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Frankreich inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 53
Abb. 42	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Frankreich exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 54
Abb. 43	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Wetterstationsdatensatz des Standortes Frankreich inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 56
Abb. 44	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Wetterstationsdatensatz des Standortes Frankreich exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 56
Abb. 45	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Italien exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 58
Abb. 46	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Italien exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 59
Abb. 47	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Datensatz der zweiten Messung des Standortes Italien exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 61
Abb. 48	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Polen exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 63

Abb. 49	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Polen exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 65
Abb. 50	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Wetterstationsdatensatz des Standortes Polen exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. 67
Abb. 51	Residuen Gesamtzeitraum für alle Standorte und Referenzen.	S. 68
Abb. 52	RMSE der Residuen als Maß für die Streuung um null.	S. 69

Sofern keine Quellangabe ausgewiesen ist, handelt es sich um eigene Darstellungen.

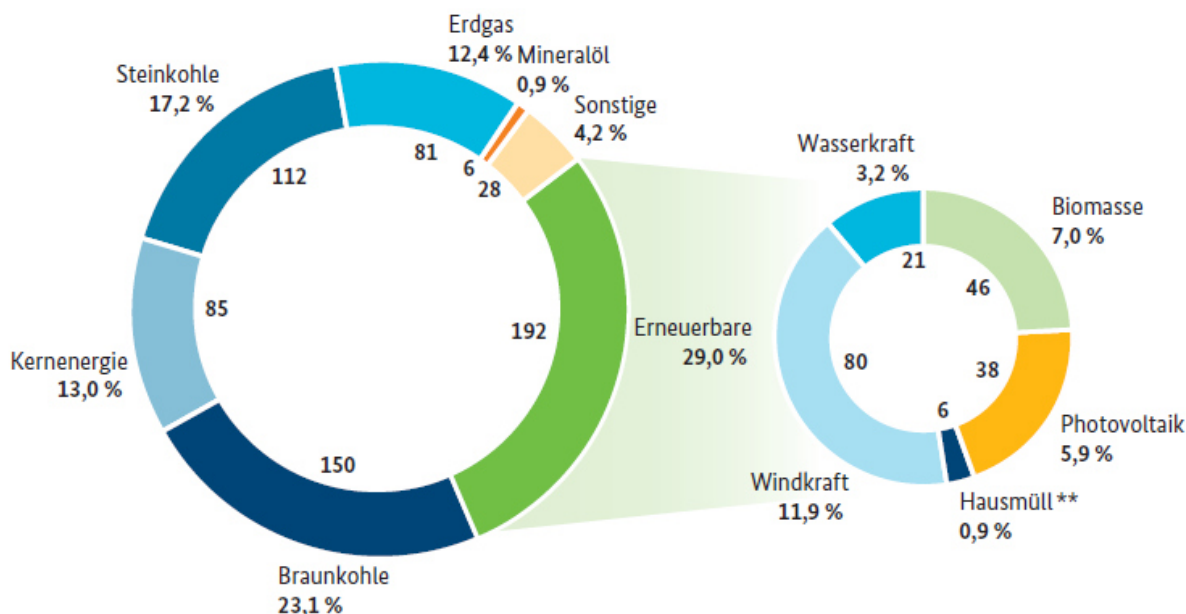
3. Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit findet ein Vergleich von verschiedenen Verfahren zur Langfristextrapolation von Windmessdaten statt. Dazu gehören ein MDP, MCP und lineare Regressionen sowohl mit y-Achsenabschnitt als auch durch den Ursprung gezwungen (die linearen Regressionen werden jeweils auf Basis verschiedener Mittelungsintervalle der Ausgangsdaten durchgeführt). Für den Vergleich der Verfahren stehen drei langjährig laufende Mastmessungen zur Verfügung, die in Kombination mit Referenzdaten (MERRA, conWX, Wetterstationen bzw. eine weitere Messung) als Datengrundlage für die Verfahren dienen. Es wird auf Basis von einem Jahr Messung und Referenzdaten, die über den gesamten Zeitraum der Mastmessung gehen, ein langfristig zu erwartender, mittlerer Wind bestimmt. Für eine Messung von neun Jahren ergeben sich also neun Prognosen. Eine Bewertung der Verfahren wird im Wesentlichen über den Root-Mean-Square-Error (RMSE) dieser Prognosen vorgenommen. Er ist ein Maß für die Streuung der Abweichung dieser Prognosen vom Erwartungswert (Mittelwert der Messung über den gesamten Analysezeitraum) um Null. Es zeigt sich, dass MDP und MCP die geringsten Streuungen aufweisen, die linearen Regressionen durch den Ursprung die höchsten (insbesondere auf Basis von Stundenmitteln). Die linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt liegen zwischen den linearen Regressionen durch den Ursprung und MDP sowie MCP.

4. Einleitung

Der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung in Deutschland nimmt immer weiter zu. Aktuell stellen die Erneuerbaren Energien mit 29,0 % den größten Anteil an der Gesamtbruttostromerzeugung in Deutschland. Sie liegen damit um 5,9 % vor der Braunkohle, welche den zweitgrößten Anteil aufweist. Die größte Bedeutung innerhalb der erneuerbaren Energien kommt in Deutschland der Windkraft zu. Sie stellt, basierend auf vorläufigen Zahlen (Stand März 2017), im Jahr 2016 einen Anteil von 11,9 % an der Bruttostromerzeugung in Deutschland und damit den mit Abstand größten Anteil im Bereich der erneuerbaren Energien (vgl. Abb. 1).

Bruttostromerzeugung in Deutschland 2016 in TWh*
Insgesamt 648,4



Geothermie aufgrund der geringen Menge in Photovoltaik (PV)
*vorläufig, **regenerativer Anteil
Quelle: AG Energiebilanzen, Stand: März 2017

Abb. 1: Bruttostromerzeugung in Deutschland 2016. [AG Energiebilanzen, 2017]

Damit die Windkraft einen solch großen Anteil an den erneuerbaren Energien stellen kann, waren, und sind auch in Zukunft, eine Vielzahl von kommerziellen Windkraftprojekten nötig. Für diese Windkraftprojekte werden verschiedene Untersuchungen durchgeführt um in erster Linie die Rentabilität zu prüfen. Dazu gehören unter anderem Wind- und Ertragsgutachten, welche dazu dienen eine Einschätzung abzugeben, wie die langfristigen Windverhältnisse an einem bestimmten Standort sein werden und mit welchem Ertrag der Windenergieanlagen langfristig zu rechnen ist. Diese Informationen sind vor allem aus wirtschaftlicher Sicht sowie für die Planung der Finanzierung der jeweiligen Projekte wichtig und spielen somit eine große Rolle. Mit der Langfristextrapolation widmet sich diese Arbeit einem Aspekt solcher Untersuchungen. Es ist heutzutage üblich, dass eine Windmessung an einem geplanten Standort nicht länger als 12 Monate durchgeführt wird. Eine solch kurze Messung kann aber kein genaues Bild für die langfristig am Standort herrschenden Windverhältnisse geben. Es ist also notwendig einen Weg zu finden, wie mit Hilfe der kurzen Messung am geplanten Standort eine verlässlichere Aussage über die langfristigen Windverhältnisse erreicht werden kann. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die mit Hilfe mehrjähriger Referenzdaten (üblicherweise Wetterstationen oder Reanalysedaten) solch verlässliche Aussage treffen sollen. Es gibt allerdings keinen Konsens zu den Vor- und Nachteilen dieser Methoden bzw. wie zuverlässig diese Methoden arbeiten. Mit der Frage der Zuverlässigkeit beschäftigt sich diese Arbeit. Zu diesem Zweck werden drei verschiedene Basismethoden ausgewählt, mit denen Berechnungen auf Grund gleicher Datenbasis durchgeführt werden. Es handelt sich dabei um eine einfache lineare Regression (sowohl mit freiem y-Achsenabschnitt als auch durch den Nullpunkt gezwungen), die jeweils auf Basis verschiedener Mittelungsintervalle der Ausgangsdaten durchgeführt werden (Stunden-, Tages-, und Monatsmittel), sowie ein measure-correlate-predict (MCP) und ein measure-distribute-predict (MDP) Verfahren, welche beide nur auf Basis von Stundenmitteln durchgeführt werden. Die Berechnungen werden jeweils für einen Standort in Frankreich, Italien und Polen durchgeführt.

5. Grundlagen

5.1 Verwendete Verfahren

5.1.1. Lineare Regressionen

Die beiden nachfolgend beschriebenen linearen Regressionen werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit als zwei voneinander verschiedene Verfahren betrachtet. Sie werden jeweils in mehreren Variationen durchgeführt, welche sich im Mittelungsintervall der zugrundeliegenden Daten unterscheiden.

5.1.1.1 Lineare Regression mit y-Achsenabschnitt

Die lineare Regression ist eine Möglichkeit innerhalb der Regressionsanalyse mit deren Hilfe eine Variable durch eine andere Variable beschrieben werden kann. Häufig wird von einer unabhängigen und einer abhängigen Variablen gesprochen. In diesem Fall wird die abhängige Variable mit Hilfe der unabhängigen Variable erklärt. Bei der linearen Regression passiert dies durch einen linearen Zusammenhang, welcher mit Hilfe der Regressionsgeraden ausgedrückt wird. Die Formel für die lineare Regressionsgerade lautet:

$$f(x) = a + b \cdot x \quad (1)$$

Mit:

x = unabhängige Variable

b = Steigung

a = y-Achsenabschnitt

[Burkschat et al., 2012: 320]

Die Berechnungen für diese Arbeit wurden mit Hilfe des Programms Microsoft Excel® durchgeführt. Mit Hilfe der Excelfunktionen STEIGUNG und ACHSENABSCHNITT werden die Werte für b und a (vgl. Formel 1) bestimmt. Um zu prüfen, wie aussagekräftig der erhaltene lineare Zusammenhang wirklich ist, wird das Bestimmtheitsmaß herangezogen. Dies geschieht in diesem Fall durch die Excelfunktion BESTIMMTHEITSMASS, welche die Korrelation der miteinander verglichenen Daten beschreibt.

Hierbei gilt, dass sich die Gesamtstreuung durch die berechnete Regressionsgerade umso genauer beschreiben lässt, desto näher der Wert des Bestimmtheitsmaßes an Eins liegt. Lässt sich die gesamte Streuung durch das Regressionsmodell erklären, ist der Wert des Bestimmtheitsmaßes gleich Eins. Lässt sich die Streuung nicht durch die Regressionsgerade erklären, ist das Bestimmtheitsmaß gleich Null. Konkret heißt das, wenn alle Beobachtungswerte auf dem Graphen der Regressionsfunktion liegen, nimmt das Bestimmtheitsmaß den Wert Eins und den Wert Null an, wenn die Regressionsgerade konstant ist. [vgl. Burkschat et al., 2012: 329]

Die lineare Regression mit y-Achsenabschnitt wird in drei verschiedenen Variationen betrachtet. Diese unterscheiden sich in den ihnen zugrundeliegenden Daten. So wurden die Berechnungen jeweils auf Basis von Stunden-, Tages- und Monatsmitteln durchgeführt

5.1.1.2 Lineare Regression durch den Ursprung

Die lineare Regression durch den Ursprung ist ein Spezialfall der linearen Regression. In diesem Fall wird die Regressionsgerade durch den Ursprung also den Punkt U(0,0) gezwungen. Daraus ergibt sich, dass der y-Achsenabschnitt gleich Null ist und somit folgende Formel gilt:

$$f(x) = b \cdot x \quad (2)$$

Der Wert für b wird durch den folgenden Zusammenhang beschrieben:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3)$$

Mit:

y = abhängige Variable

Auch in diesem Fall muss geprüft werden, ob ein linearer Zusammenhang besteht. Hierzu wird wieder das Bestimmtheitsmaß B_{xy} verwendet (häufig wird dieses auch als r^2 bezeichnet).

$$B_{xy} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (4)$$

[Burkschat et al., 2012: 330]

Auch in diesem Fall werden jeweils Stunden-, Tages- und Monatsmittel als den Berechnungen zugrundeliegende Daten verwendet.

5.1.2 MCP

Im Bereich der MCP Methoden gibt es verschiedene Ansätze, welche gewählt werden können. Im Allgemeinen gehen aber alle MCP Methoden von einer idealisierten Grundannahme aus. Es wird angenommen, dass für jeden Windrichtungssektor des Referenzstandortes eine Referenzwindgeschwindigkeit mit einer eindeutig bestimmten Windgeschwindigkeit am Messstandort übereinstimmt. [vgl. Schwartz, 2016: 11]

Die gebräuchlichsten Ansätze für MCP Verfahren sind nach Windrichtungssektoren durchgeführte lineare Regressionen. Weitere Ansätze basieren auf Matrizen, auf einer Herangehensweise über Windindizes oder auf Weibullverteilung. Dies sind Ansätze, die so z. B. in dem Programm WindPRO® implementiert sind. [vgl.

Thøgersen et al., ohne Jahr] Es gibt aber auch Ansätze, welche einen wesentlich größeren Bedarf an Computerrechenleistung benötigen und sich neuronaler Netze bedienen, wodurch genauere Ergebnisse erreicht werden sollen [vgl. FGW, 2014: 19].

Das in dieser Arbeit verwendete MCP Verfahren ist ein eher einfach umzusetzendes für welches keine hohe Computerleistung benötigt wird. Bei dem gewählten Vorgehen werden die Windmessdaten anhand der Windrichtung der Referenzdaten in Windrichtungsklassen eingeteilt werden. Die Klassenbreite beträgt 30°, so dass sich am Ende 12 Bins von 0° (bzw. 360°) bis 330° ergeben, für welche die Regressionsparameter Steigung und Achsenabschnitt bestimmt werden (vgl. Formel 1). Durch diese Parameter und der mittleren Windgeschwindigkeit der Referenzdaten im jeweiligen Sektor wird dann der langfristig in diesem Sektor erwartete Wind berechnet. Mit Hilfe der Häufigkeit des Auftretens einer Windrichtung und damit ihres Auftretens in einem der 12 Sektoren, in Verbindung mit der gesamten Anzahl der zur Verfügung stehenden Windrichtungsinformationen, jeweils über den gesamten Zeitraum der Referenzdaten, wird dann ein gewichteter Mittelwert der Langfristwerte gebildet, welcher den allgemeinen Langfristwert darstellt. In Formel 5 ist das ganze zusammengefasst:

$$v_{lang} = \sum_{i=1}^{12} (b_i \cdot \bar{v}_{Ref} + a_i) \cdot \frac{n_{Gesamt}}{n_i} \quad (5)$$

Mit:

n_{Gesamt} = Anzahl der Referenzdaten über den gesamten Analysezeitraum

n_i = Anzahl der Referenzdaten im jeweiligen Windrichtungssektor

5.1.3 MDP

Das MDP Verfahren geht im Gegensatz zum MCP Verfahren nicht davon aus, dass zu jeder Kombination von Windgeschwindigkeit und Windrichtung der Referenzdaten eine genau bestimmte Windgeschwindigkeit am Messstandort vorliegt. Vielmehr wird beim MDP Verfahren davon ausgegangen, dass für jede Windrichtungs-Windgeschwindigkeits-Kombination am Referenzstandort mehrere verschiedene Kombinationen am Messstandort vorliegen. Diese verschiedenen Kombinationen sollen so beibehalten werden, wie sie vorliegen und in keiner Weise reduziert oder vereinfacht werden, indem zum Beispiel Mittelwerte gebildet werden oder andere Vereinfachungen vorgenommen werden. [vgl. Schwartz, 2016: 11]

Im Wesentlichen bedeutet dies, dass beim MDP Verfahren für jede Möglichkeit der Kombination von Windgeschwindigkeit und Windrichtung der Referenzdaten eine Matrix mit Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Messstandort eingeführt wird. Dazu wird die Windgeschwindigkeit am Referenzstandort in 1 m/s Klassen betrachtet und die Windrichtung in 30° Klassen. Jede dieser Matrizen wird dann mit einem Gewichtungsfaktor multipliziert. Dieser Gewichtungsfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis der Häufigkeit des Auftretens der jeweiligen Situation, welche die Matrix bedingt, während der gleichzeitig laufenden Messperiode zwischen Referenzstandort und Messstandort und der Häufigkeit des Auftretens dieser Situation während der Langzeitmessung der Referenzdaten. Durch aufsummieren der gewichteten Matrizen wird eine langfristige Häufigkeitsverteilung am zu untersuchenden Standort erreicht. [vgl. Schwartz, 2016: 11f.]

In Abb. 2 ist die Grundlage des MDP Verfahrens graphisch dargestellt. Im oberen Teil ist die Hauptmatrix, welche sich nach den Daten für Windgeschwindigkeit und Windrichtung der Referenzdaten bildet. Für jede Kombination von Windrichtungsklasse und Windgeschwindigkeitsklasse ergibt sich eine eigene Matrix der Daten am Messstandort ($M_{i,j}$). Diese Matrix bildet sich jeweils aufgrund der vorherrschenden Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Messstandort so, dass sich für jede Kombination von Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsklasse eine Anzahl der Werte ergibt, welche sich in dieser Klassenkombination befinden. Im unteren Teil von Abb. 2 ist beispielhaft die Matrix $M_{330,5}$ genauer dargestellt, welche

die Anzahl der auftretenden Werte ($N_{i,j}$) jeder Kombination von Windrichtung und Windgeschwindigkeit aufzeigt. Diese Werte werden dann mit einem Gewichtungsfaktor versehen, woraus sich dann in Kombination mit den anderen jeweils gewichteten Matrizen ($M_{i,j}$) eine langfristig zu erwartende Häufigkeitsverteilung und eine langfristig zu erwartende Windrose für den untersuchten Standort ergibt.

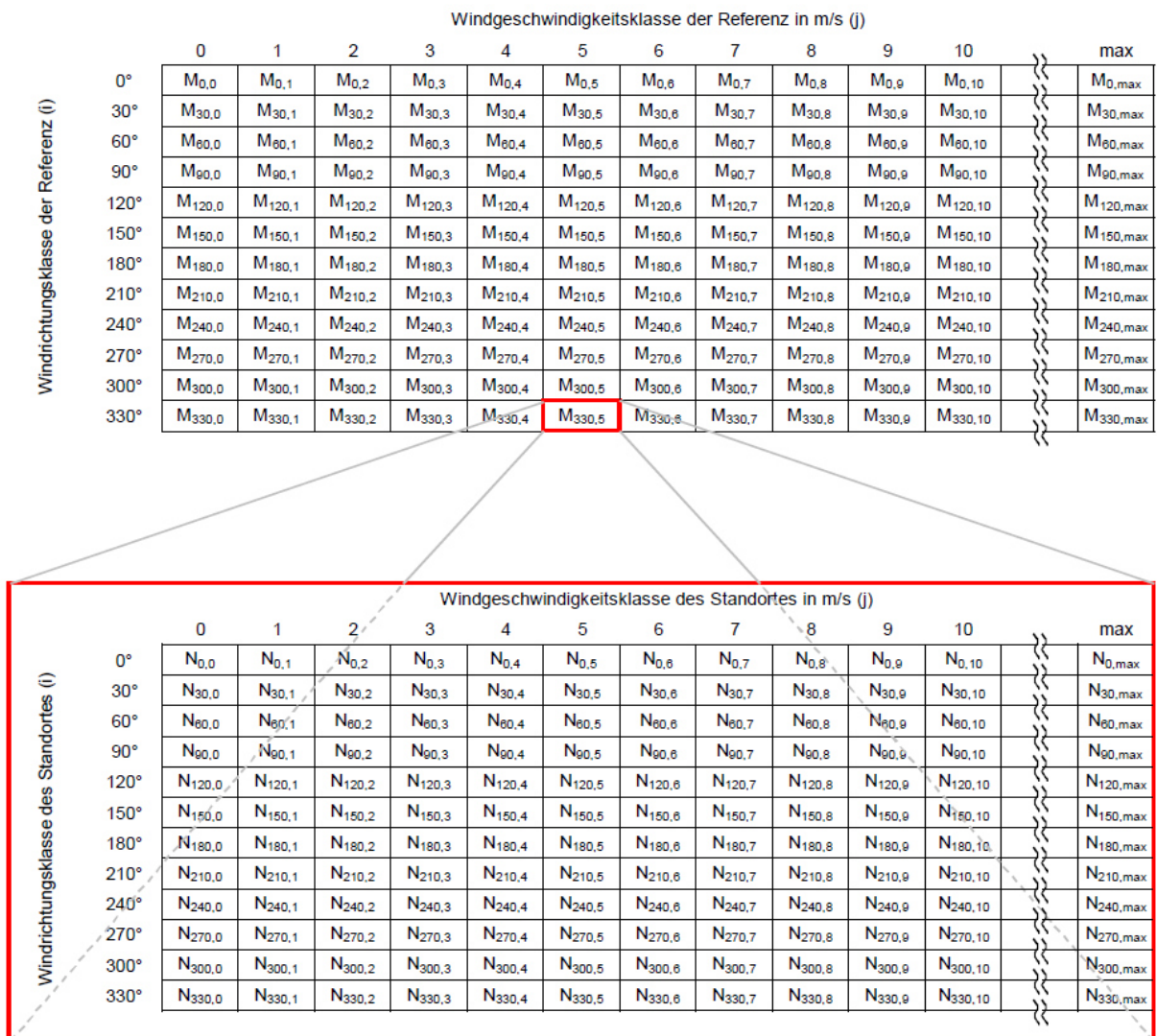


Abb. 2: Graphische Darstellung der Grundlage des MDP Verfahrens.

5.2 Root-Mean-Square-Error (RMSE)

Im Gegensatz zur Standardabweichung gibt der RMSE nicht die mittlere Schwankung um den Mittelwert der betrachteten Daten wieder, sondern die mittlere Schwankung um einen bestimmten Wert. Für die Berechnung findet Formel 6 Anwendung:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_{fi} - z_{oi})^2}{N}} \quad (6)$$

Mit:

z_f = vorhergesagter Wert

z_o = beobachteter Wert

N = Anzahl der betrachteten Werte

[Barnstone, 1992: 700]

In diesem Fall wird der RMSE der Residuen (z_f), also der Abweichungen der berechneten Langfristwerte der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert, als Maß für die Streuung dieser Werte um Null (z_o) gebildet. So kann eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Prognose der einzelnen Verfahren getroffen werden. Umso weniger die Streuung der Residuen im Mittel um Null schwankt, desto weniger weichen die Prognosen vom Erwartungswert ab und desto zuverlässiger ist das untersuchte Verfahren.

5.3 Standorte

5.3.1 Frankreich

Die nähere Umgebung des Messmaststandortes (Ausschnittsweise in Abb. 3 dargestellt) ist vor allem durch landwirtschaftliche Nutzflächen geprägt. Es gibt jedoch in der näheren Umgebung auch vereinzelte Waldstücke. Ein kleineres Waldstück von weniger als 2 ha Fläche befindet sich in ca. 600 m westlicher Richtung. In ca. 1,5 km Entfernung in nördlicher Richtung gibt es größere Waldstücke mit mehr als 10 ha Fläche. Die größten Waldstücke in der näheren Umgebung befinden sich im Westen. Diese liegen in einer Entfernung von etwa 2,5 bis 3 km Entfernung. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um zwei Waldstücke mit einer Fläche von jeweils etwa 19 ha.

In einem Umkreis von etwa 5 km Radius befinden sich zahlreiche kleinere Siedlungen (vgl. Abb. 3). Die dem Standort am nächsten gelegenen Siedlungen befinden sich westlich bzw. nordwestlich des Standortes in etwas mehr als 1 km Entfernung sowie in ca. 1,5 km südlicher Richtung, 2,5 km östlicher Richtung und mehr als 2 km nordöstlicher Richtung.

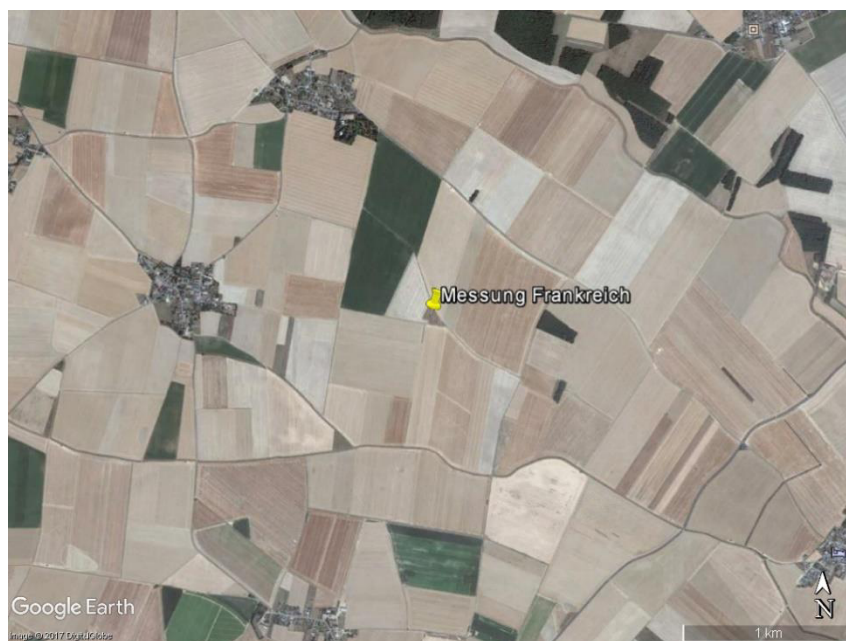


Abb. 3: Standort Frankreich. [Google Earth, 2015]

Der Messmast befindet sich in einer Höhe von ca. 147 m über Normalnull. Wird eine größere Entfernung (ca. 20 km) betrachtet, so nimmt die Geländehöhe von Westen nach Osten hin ab. Im Westen von ca. 250 m Höhe auf Höhen um die 125 m im Osten. Im Westen gibt es größere Schwankungen in der Geländehöhe als am Standort selbst oder im Osten (vgl. Abb. 4).

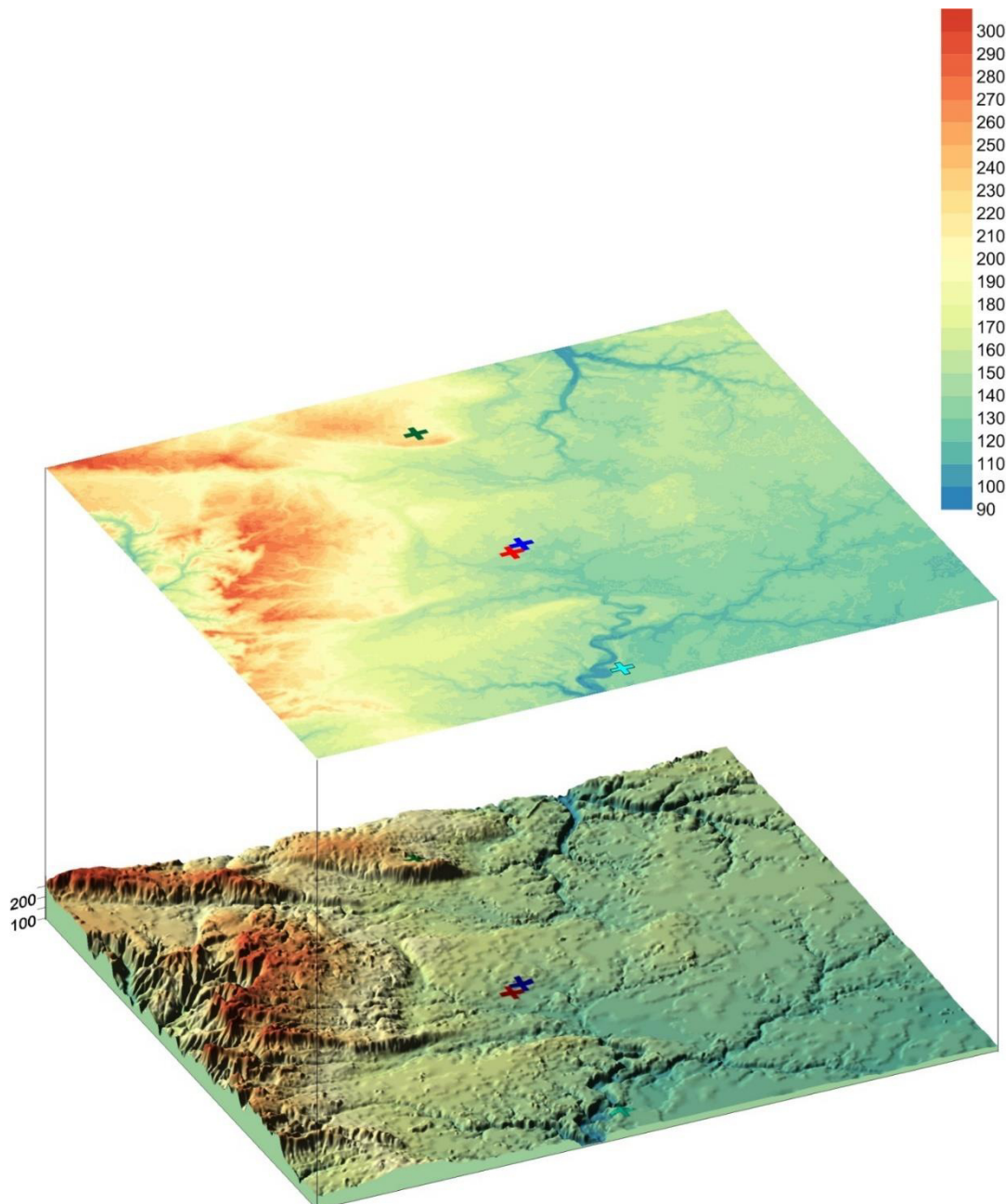


Abb. 4: Orographie am Standort Frankreich. [Postels, 2017]
Das rote Kreuz gibt die Position des Messmastes an, die Position des verwendeten conWX-Datenpunktes ist durch das blaue Kreuz, der Datenpunkt der MERRA-Daten durch das grüne Kreuz und die Wetterstation durch das türkise Kreuz gekennzeichnet.

5.3.2 Italien

Die nähere Umgebung des Messmaststandortes (auszugsweise in Abb. 5 dargestellt) ist stark durch landwirtschaftliche Nutzung geprägt. Es gibt in einem Umkreis von etwa 5 km keine größeren, dichten Waldstücke. Es liegt aber in direkter Nähe, insbesondere in nördlicher Richtung, lockere Baumbepflanzung in Form von Plantagen vor. Diese Art der Bepflanzung beginnt in nördlicher Richtung schon in etwa 400 m Entfernung vom Messmast und geht bis zu einer Entfernung von etwa 2 km. In etwas mehr als 3 km wird diese Bepflanzung fortgesetzt. In südwestlicher Richtung gibt es zwischen 200 m und etwa 1 km ähnliche Bepflanzungen, die aber weniger stark ausgeprägt sind. In mehr als 2 km östlicher bis südöstlicher Richtung gibt es eine sehr lockere Baumreihe entlang einer Straße.

In einem Umkreis von 5 km gibt es keine größeren Dörfer lediglich Ansammlungen von wenigen Gebäuden an einem Ort, welche zu den Plantagen gehören oder sonstige Höfe bilden (zu erkennen in Abb. 5). Der dem Standort am nächst gelegene Gebäudekomplex dieser Art liegt in etwa 500 m Entfernung in südwestlicher Richtung. Die größte Ansammlung von Gebäuden befindet sich in ca. 2 km Entfernung südlicher Richtung. In etwas weniger als 2 km östlicher Richtung ist ein Solarfeld.

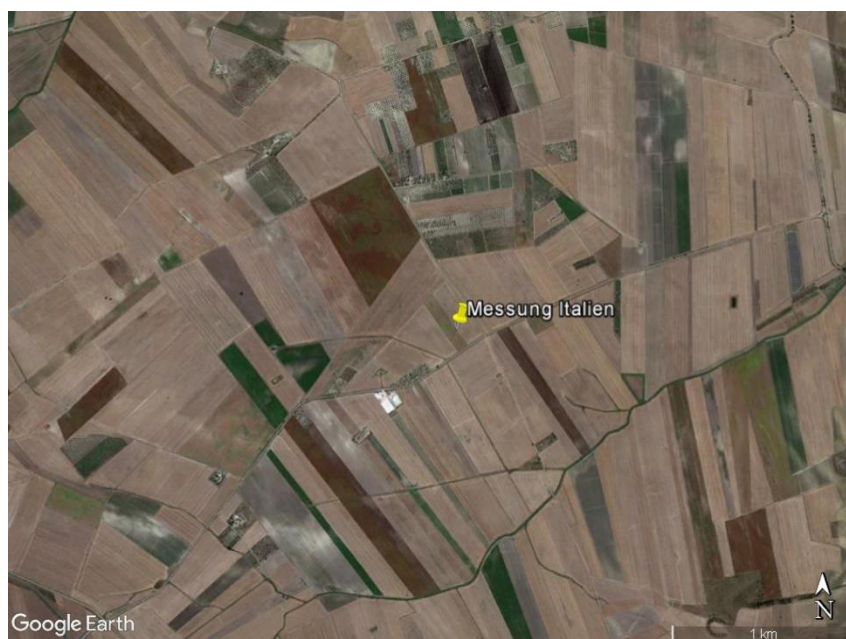


Abb. 5: Standort Italien. [Google Earth, 2016]

Der Messmast liegt auf einer Höhe von 146 m über Normalnull. In etwa 5 km westlicher Richtung beginnt eine Bergkette, die in 10 km Entfernung schon eine Höhe zwischen 450 m und 600 m aufweist. Im Osten gibt es ebenfalls eine Bergkette, die etwa 25 km entfernt ist. Diese Bergkette weist einen steileren Anstieg auf als die im Westen und erreicht dabei ähnliche Höhen (vgl. Abb. 6). Insgesamt ist die östliche Bergkette nicht so groß, wie die westliche. In ca. 37 km nördlicher Richtung liegt das Adriatische Meer.

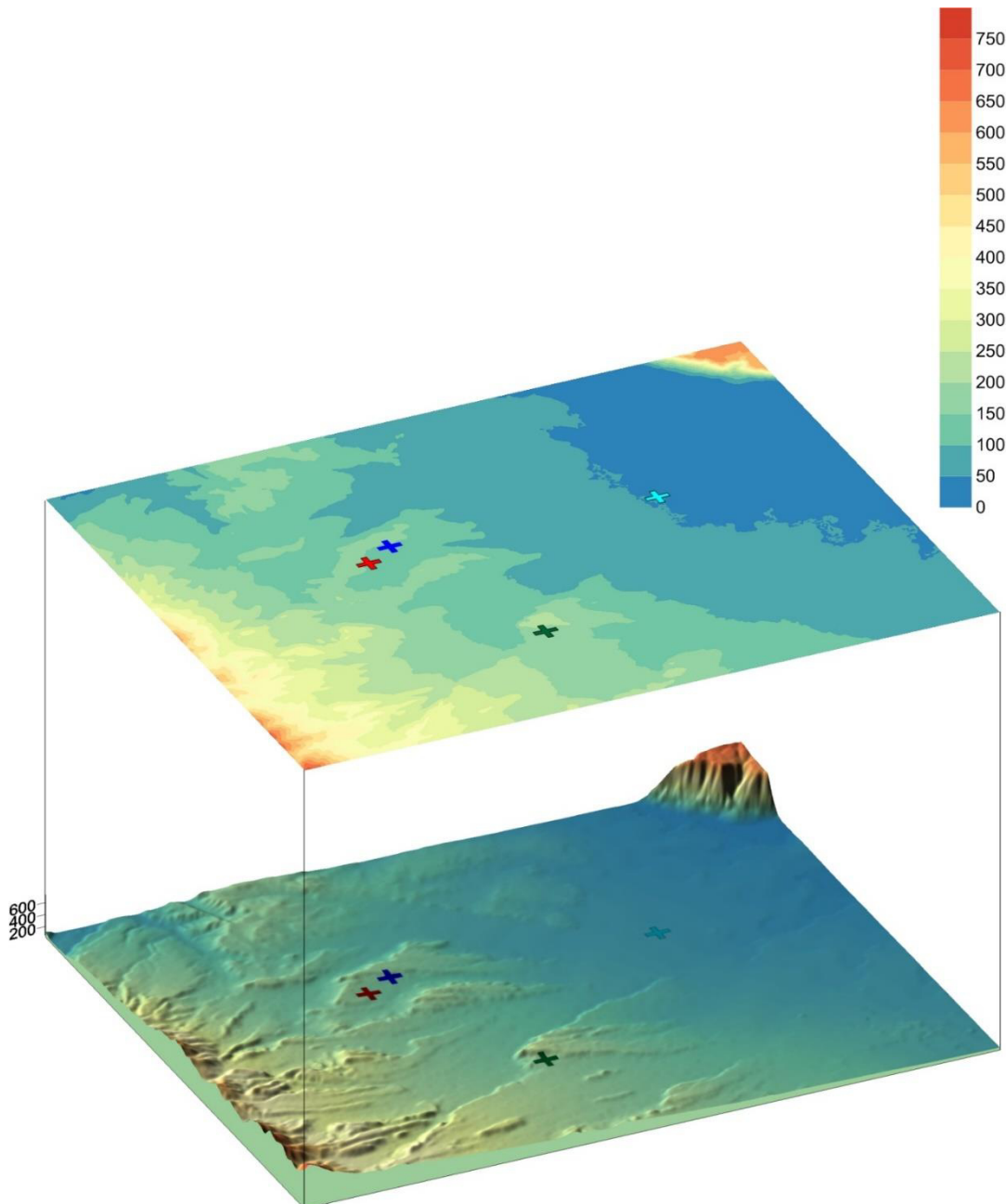


Abb. 6: Orographie am Standort Italien. [Postels, 2017]
Das rote Kreuz gibt die Position des Messmastes an, die Position des verwendeten conWX-Datenpunktes ist durch das blaue Kreuz, der Datenpunkt der MERRA-Daten durch das grüne Kreuz und die Wetterstation durch das türkise Kreuz gekennzeichnet.

5.3.3 Polen

Die in direkter Nähe zum Messstandort gelegene Fläche wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt (Auszugsweise in Abb. 7 dargestellt). Es gibt in einem Umkreis von 5 km keine größeren Waldstücke. Es gibt jedoch einige Baumreihen besonders in ca. 1 km östlicher Richtung und 500 m südlicher Richtung.

In einem Umkreis von 5 km kommen mehrere Ortschaften vor. Die dem Standort am dichtesten gelegene ist in ca. 1,5 km Entfernung nördlicher Richtung (vgl. Abb. 7). Es sind auch einige betrieblich genutzte Flächen vorhanden, auf denen größere Gebäude stehen. Diese befinden sich in ca. 1 km nordnordöstlicher Richtung und ca. 2 km südliche Richtung.



Abb. 7: Standort Polen. [Google Earth, 2017]

Der Messmast befindet sich in einer Höhe von ca. 56 m über Normalnull. Nördlich der Messmastposition ist das Gelände niedriger gelegen als an der Messmastposition direkt. Diese Fläche ist deutlich abgetrennt von der Fläche auf welcher der Messmast steht und beginnt schon in kurzer Entfernung zur Messmastposition. In nordöstlicher Richtung gibt es eine Erhöhung welche sich deutlich von dem flachen Areal abhebt. Die Fläche auf welcher der Messmast selbst

steht, nimmt in südliche, insbesondere südöstliche, Richtung an Höhe zu (vgl. Abb. 8).

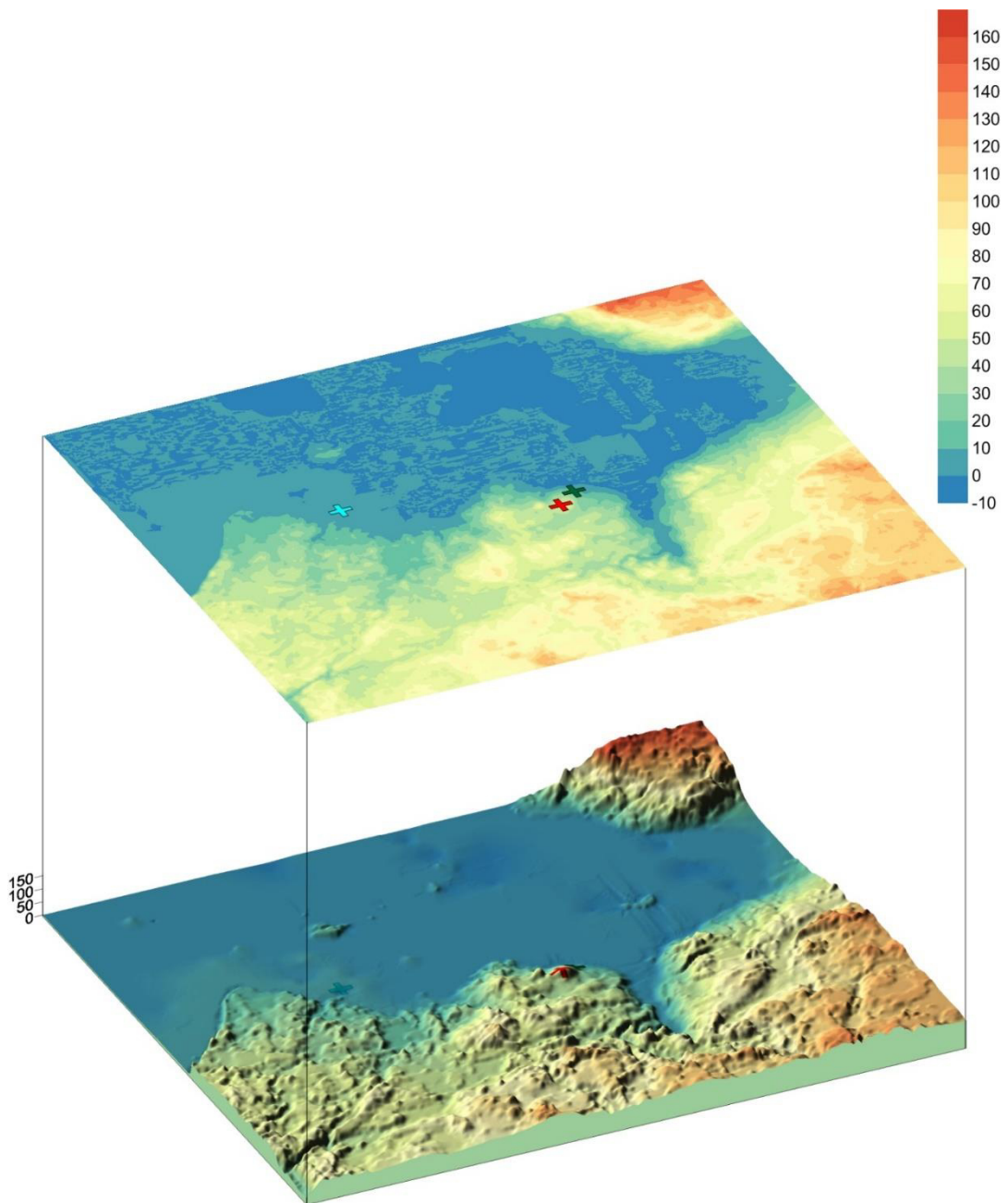


Abb. 8: Orographie am Standort Polen. [Postels, 2017]
Das rote Kreuz gibt die Position des Messmastes an, die Position des verwendeten conWX-Datenpunktes ist durch das blaue Kreuz (in diesem Fall ist die Position identisch mit der der Messung), der Datenpunkt der MERRA-Daten durch das grüne Kreuz und die Wetterstation durch das türkise Kreuz gekennzeichnet.

6. Methodik

Für die Durchführung dieser Arbeit wurden von der WKN AG Daten von mehrjährigen Mastmessungen an oben genannten Standorten zur Verfügung gestellt. Diese bilden die grundlegende Basis dieser Untersuchung. Als Referenzdaten wurden für jede dieser Messungen MERRA-, conWX- und Wetterstationsdaten verwendet. Eine Ausnahme gibt es für den Standort in Italien. An diesem Standort wurde statt der Wetterstation eine zweite Messung aus der Nähe der Hauptmessung als Referenz verwendet. Diese Daten werden im Folgenden näher dargestellt und das Vorgehen erläutert.

6.1 Vorgehen

Sind die Daten nach Kapitel 6.1.1 und 6.1.2 ausgewählt und vorbereitet worden, können die eigentlichen Berechnungen durchgeführt werden. Dazu wird immer ein Abschnitt von der Dauer eines Jahres, sowohl von der Messung als auch von der Referenz, genutzt, um eine Beziehung zwischen diesen beiden Datensätzen herzustellen. Hierzu ist es wichtig, dass dieser ausgewählte 1-Jahresabschnitt von Messung und Referenz gleichzeitig verläuft. Die in dieser Arbeit untersuchten Verfahren unterscheiden sich voneinander darin, wie ein Zusammenhang der Daten zueinander ermittelt wird. Diese ermittelte Beziehung wird dann auf den gesamten Referenzzeitraum übertragen, um die langfristig zu erwartende, mittlere Windgeschwindigkeit zu erhalten. Dies wird mit jedem 1-Jahresabschnitt von Messung und Referenz wiederholt. Bei einer Messung von z. B. neun Jahren Dauer, für welche über den gleichen Zeitraum Referenzdaten zur Verfügung stehen, ergeben sich somit neun Langfristwerte. Dadurch dass in dieser Untersuchung langjährige Messungen an den Standorten, für welche der Langfristwert auf Basis eines Jahres der Messung ermittelt werden soll, zur Verfügung stehen, ist der zu ermittelnde Langfristwert bekannt. Dieser ergibt sich aus dem Mittelwert der jeweiligen Messung über den gesamten Messzeitraum. Da dieser Mittelwert sich aus einer langfristigen Messung ergibt, ist er als der wahre, zu erwartende Langfristwert zu betrachten. Da die zukünftig herrschenden Windgeschwindigkeiten nicht bekannt

sind, ist der wirklich wahre Langfristwert nicht bekannt. Der Mittelwert einer langjährigen Messung ist aber hinreichend genau um ihn als „wahr“ zu betrachten. Durch die Abweichung der berechneten Langfristwerte zu diesem Erwartungswert kann dann eine absolute Einschätzung der Berechnungsverfahren vorgenommen werden, indem geprüft wird, inwieweit die Abweichungen der berechneten Langfristwerte vom Erwartungswert (Residuen) um Null schwanken. Das Vorgehen wird für jeden Standort mit drei verschiedenen Referenzdaten (MERRA, conWX und einer Wetterstation bzw. zweiten Messung) durchgeführt. Daraus ergibt sich, dass es drei verschiedene Datensätze (jeweils bestehend aus Messdaten und den Daten einer Referenz) für jeden Standort gibt, die betrachtet werden (im Fall der MERRA-Daten und conWX-Daten werden diese im Folgenden als MERRA-Datensatz, bzw. ConWX-Datensatz bezeichnet).

6.1.1 Messungen

Da das grundsätzliche Vorgehen bei allen Messungen gleich ist, werden die Besonderheiten der einzelnen Methoden zunächst vernachlässigt und erst im Kapitel 6.2 Datengrundlage berücksichtigt. Der erste Schritt bei der Analyse aller Messungen ist es eine Messhöhe auszuwählen, welche dann als Berechnungsgrundlage dient. Die in dieser Arbeit untersuchten Methoden finden vor allem Anwendung in der Windenergiebranche, etwa bei der Planung neuer Windparks. Heutzutage ist es keine Seltenheit, dass Windkraftanlagen Nabenhöhen von jenseits der 130 m erreichen. Aus diesem Grund wird in der Regel die höchste zur Verfügung stehende Messhöhe ausgewählt, da in der gängigen Praxis nach Möglichkeit auf Höhe der Nabenhöhe gerechnet wird. Von diesem Vorgehen wird abgewichen, wenn eine niedrigere Messhöhe eine bessere Verfügbarkeit aufweist, welche ein aussagekräftigeres Ergebnis verspricht.

Nach Auswahl der Messhöhe muss noch der zu untersuchende Zeitraum festgelegt werden. Um saisonale Schwankungen mit zu berücksichtigen, ist es notwendig immer volle Jahre zu untersuchen. Aus diesem Grund wird bei jeder Messung darauf geachtet möglichst viele zusammenhängende, vollständige Jahre auszuwählen.

Der nächste Schritt ist dann die Filterung der Daten. Die hier verwendete Filtermethode ist die optische Filterung mit Hilfe des Programmes WindDataSuite®. Dabei werden die Daten graphisch dargestellt und Ausreißer oder Fehlwerte, wie beispielsweise durch Vereisung, können so detektiert und aus der Zeitreihe entfernt werden. Es kann bei Zeitreihen vorkommen, dass es innerhalb dieser Fehler gibt, etwa dass ein Zeitstempel doppelt vorkommt, oder auch gar nicht. Auch in diesem Fall wurde die WindDataSuite® zur Korrektur verwendet um mit deren Hilfe eine durchgehende, konsistente, Zeitreihe zu erhalten. Bei doppelt vorkommenden Zeitstempeln wurden überzählige gelöscht und bei fehlenden wurde der entsprechende Zeitstempel ohne Daten eingefügt.

Aufgrund dessen, dass die Referenzdatensätze in der Regel in stündlicher Auflösung vorliegen, die Messungen aber in einer Auflösung von 10 Minuten, müssen die Datensätze noch aneinander angepasst werden. Dies geschieht indem die 10-Minuten Daten zu stündlichen Mittelwerten zusammengefasst werden, solange mindestens drei 10-Minuten Werte für eine Stunde vorliegen. Da die linearen Regressionen sowohl auf Basis von Stunden-, als auch Tages- und Monatsmitteln betrachtet werden, wird auch eine Mittelung der Messdaten auf diese Intervalle vorgenommen.

6.1.2 Referenzdaten

Im Zuge dieser Arbeit werden für jeden Standort drei verschiedene Referenzdatensätze betrachtet. Dazu gehören jeweils ein MERRA, ein conWX und ein Datensatz, welcher entweder eine Wetterstation oder eine weitere Messung als Grundlage hat. Mit den Referenzdaten wird in gleicher Weise verfahren, wie mit den aus der Mastmessung stammenden Daten. So ergibt sich eine Zeitreihe mit Stundenmitteln (bei MERRA-, conWX- und Wetterstationsdaten liegen diese direkt vor), eine mit Tagesmitteln und eine Zeitreihe mit Monatsmitteln. Dies ist notwendig, damit für den Verlauf der folgenden Berechnungen die Möglichkeit besteht Datenreihen mit konsistenten, gleichen Zeitschritten zu erhalten, so dass für einen Zeitpunkt die Daten am Referenzstandort und am Messstandort verglichen werden können. Um wirklich exakt gleiche Zeiträume zur Verfügung stehen zu haben,

werden in der Analyse nur Zeitpunkte verwendet, an denen sowohl für die Mastmessung als auch für die Referenzmessung alle Daten, also sowohl Windgeschwindigkeit und Windrichtung, vorliegen. Wenn beispielsweise eine Messung von sieben Jahren vorliegt, in welcher aber, anders als bei den Referenzdaten, ein Monat fehlt, würde das Ergebnis der Langfristextrapolation ein anderes Ergebnis liefern, als von der Messung (durch deren Mittelwert der Windgeschwindigkeit über den gesamten Analysezeitraum) vorgegeben. Das liegt daran, dass bei der Berechnung der fehlende Monat trotzdem berücksichtigt wird, da er bei den Referenzdaten vorhanden ist.

6.1.2.1 MERRA

MERRA (Era-Retrospective Analysis for Research and Applications) Daten sind Reanalysedaten, die von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) bereitgestellt werden. Sie sind seit 1979 verfügbar und haben eine räumliche Auflösung von $0,5^\circ \times 0,67^\circ$ [vgl. Rienecker et al., 2011: 3625ff.] sowie eine stündliche zeitliche Auflösung. Diese Daten stammen aus einer Höhe von 50 m über Grund.

6.1.2.2 conWX

Die conWX-Daten sind ein Datensatz welcher in Kooperation von EMD und conWX berechnet wird. Die Datengrundlage bilden ERA-Interim-Daten vom ECMWF. Die Daten haben eine räumliche Auflösung von $0,03^\circ \times 0,03^\circ$ und wie die MERRA-Daten eine stündliche zeitliche Auflösung. Die Zeitspanne umfasst 20 Jahre und wird mit ca. 3 Monaten zeitlichem Versatz aktualisiert, je nach Verfügbarkeit der ERA-Interim Daten. Die conWX-Daten sind in Höhen von 10, 25, 50, 75, 100, 150 und 200 m über Grund verfügbar. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen aus einer Höhe von 100 m. [vgl. EMD, ohne Jahr]

6.1.2.2 Wetterstationen

Die Daten der Wetterstationen stammen von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Über diese Behörde der USA sind Wetterstationsdaten von Wetterstationen, welche über den gesamten Globus verteilt sind, kostenfrei zu erhalten [vgl. NOAA, 2015]. Nicht enthalten sind in diesem Fall Informationen über die Messhöhe über Grund oder auch weitere Informationen, wie z. B. Gerätehistorie und Wechsel in der Messhöhe.

6.2 Datengrundlage

In den Kapiteln 6.2.1 bis 6. wird die Datengrundlage auf Basis von stündlichen Werten für die Daten der Messung und der verschiedenen Referenzdaten dargestellt.

6.2.1 Allgemein

In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Charakteristika der Daten für Messstandort und Referenz dargestellt. Zu diesen Charakteristiken zählen Verfügbarkeiten, Windrosen, Häufigkeitsverteilungen und die mittlere Windgeschwindigkeit. Im Fall der Verfügbarkeiten wird auch dargestellt, wie sich diese Verfügbarkeiten auf den Tag (Tagesverfügbarkeit (nach Uhrzeit)) und auf die Monate (Monatsverfügbarkeiten) verteilen. Dadurch kann zum Beispiel festgestellt werden, ob tagsüber mehr Daten vorhanden sind als nachts oder in einer bestimmten Jahreszeit mehr als in einer anderen. Diese Charakteristika unterscheiden sich von Referenzbetrachtung zu Referenzbetrachtung. Da die Verfügbarkeit der Messung und der Referenz immer gleich ist (vgl. Kapitel 6.1.2) wird hier, anders als bei den anderen Charakteristika, auf eine Darstellung, getrennt nach Messung und Referenz, verzichtet. Auch werden die Verfügbarkeiten von MERRA- und conWX-Datensatz in einer Grafik zusammengefasst. Das begründet sich darin, dass die Verfügbarkeit dieser Referenzdaten bei 100 % liegt und sich die Verfügbarkeit der verwendeten Datensätze in diesen Fällen somit nur durch die

Verfügbarkeit der Messung ergibt. Sie ist somit für MERRA- und conWX-Datensatz gleich. Auch sind in diesen beiden Fällen demensprechend die Windrose und Häufigkeitsverteilung der Messdaten gleich. Um aber Unterschiede zwischen dem Standort und der Referenz besser erkennen zu können, werden auch für diese beiden Referenzen Windrose und Häufigkeitsverteilung, im direkten Vergleich zwischen Messung und Referenz, jeweils in getrennten Abbildungen dargestellt. Die in diesem Kapitel dargestellten Abbildungen und Werte beziehen sich immer auf die stündlichen Daten über den gesamten Analysezeitraum.

6.2.2 Frankreich

Der im Zusammenhang mit der Messung in Frankreich betrachtete Zeitraum umfasst insgesamt neun Jahre. Dieser geht vom 22.10.2006 10:00 bis zum 22.10.2015 09:00. Die Messhöhe der verwendeten Messdaten beträgt 73,5 m.

Die folgenden Abbildungen 9 bis 12 zeigen die Tagesverfügbarkeiten, also die Verfügbarkeit der Daten über den gesamten Messzeitraum zu einer bestimmten Uhrzeit und die Monatsverfügbarkeiten, also die Verfügbarkeit der Daten in einem bestimmten Monat über den gesamten Messzeitraum. Es ist zu sehen, dass die Verfügbarkeit der Datensätze basierend auf MERRA- und conWX-Daten mit 88,05 % gleich niedrig ist (vgl. Tabelle 1). Wie oben beschrieben liegt das daran, dass sich durch die 100 % Verfügbarkeit der Referenzdaten die Verfügbarkeit nur aus den Messdaten ergibt. Daraus folgt, dass sich die Verfügbarkeiten bei diesen beiden Datensätzen gleich verteilen. Wird die Tagesverfügbarkeiten betrachtet (Abb. 9) zeigt sich, dass die Daten gleichmäßig verteilt fehlen. So befindet sich die Verfügbarkeit zu jeder Uhrzeit gleichmäßig unterhalb der 90 % Marke. Bei den Monatsverfügbarkeiten allerdings fehlen die Daten nicht gleichmäßig verteilt (vgl. Abb. 10). Es ist zu sehen, dass vor allem in den Monaten April bis Juli eine Verfügbarkeit von jeweils über 99 % vorliegt. In den restlichen Monaten liegt die Verfügbarkeit der Daten bei unter 90 % und zum großen Teil nur bei 80 % oder sogar darunter.

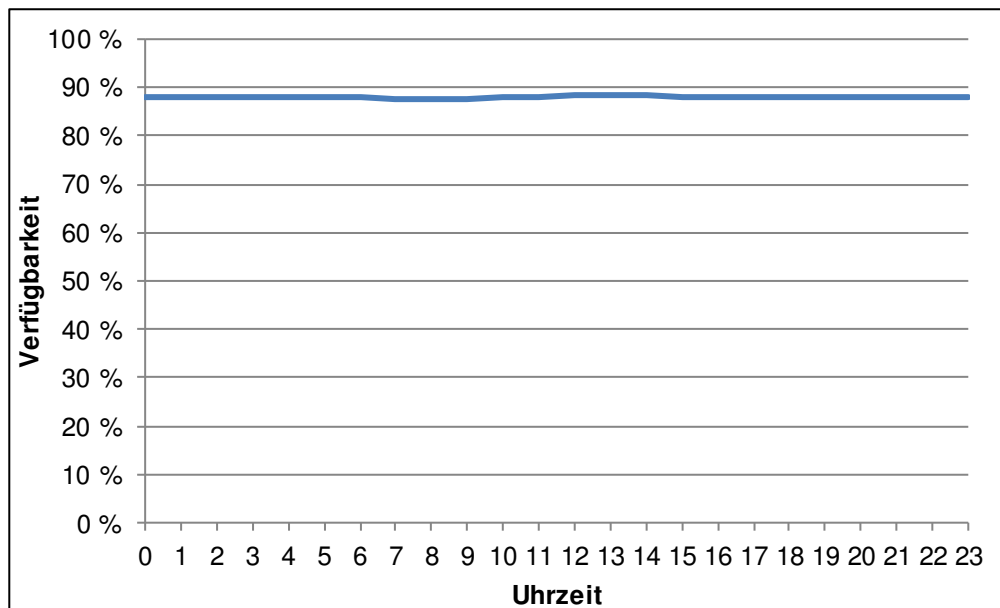


Abb. 9: Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Frankreich mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.

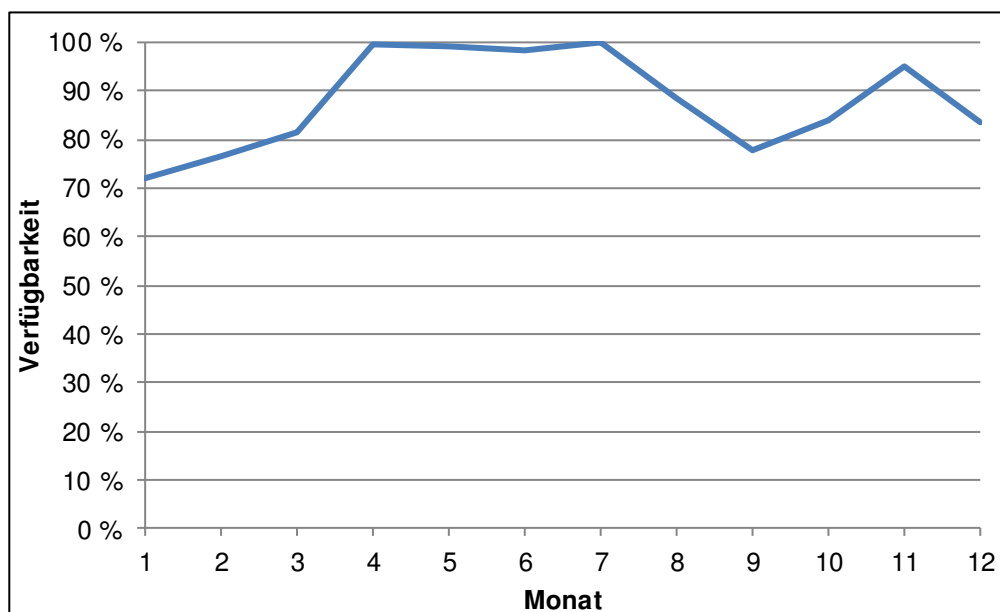


Abb. 10: Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Frankreich mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.

Im Fall des Datensatzes mit der Wetterstation als Referenz ist das, insbesondere bei der Verfügbarkeit nach Uhrzeit (Abb. 11), anders. Werden diese betrachtet, ist der leichte Trend zu erkennen, dass in der Zeit zwischen 21 und 8 Uhr die Verfügbarkeiten geringer sind als am Tag. Generell liegen die Verfügbarkeiten

zwischen knapp 80 % und 85 %, was für den Gesamtzeitraum eine Verfügbarkeit der Daten von 82,02 % ausmacht. Bei den Monatsverfügbarkeiten (Abb. 12) ist dann wieder ein ähnliches Bild zu erkennen, wie bei den auf MERRA- und conWX-Daten basierenden Datensätzen, allerdings mit dem Unterschied, dass die Verfügbarkeiten insgesamt niedriger sind.

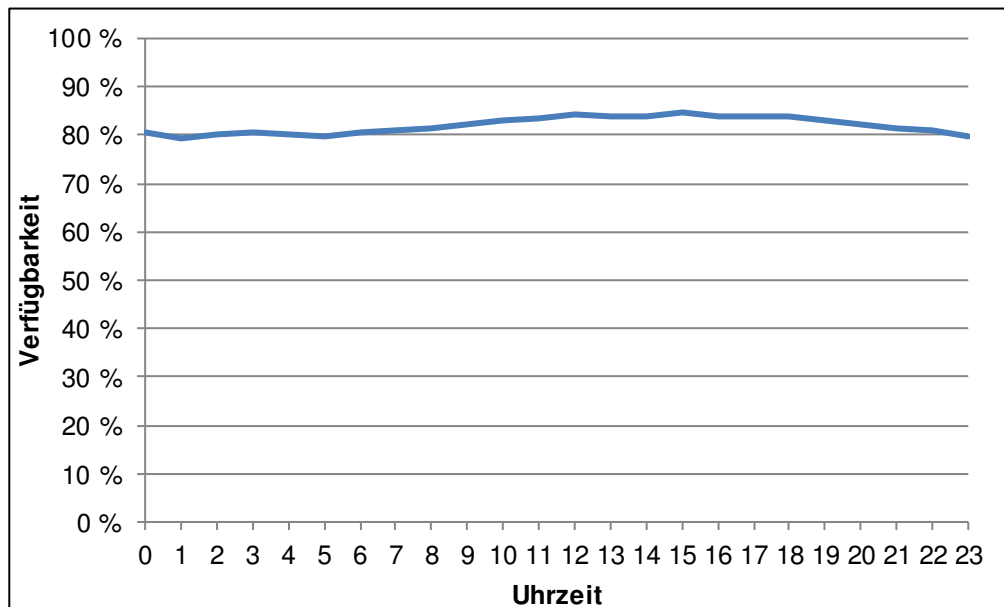


Abb. 11: Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Frankreich mit Wetterstationsdaten als Referenz.

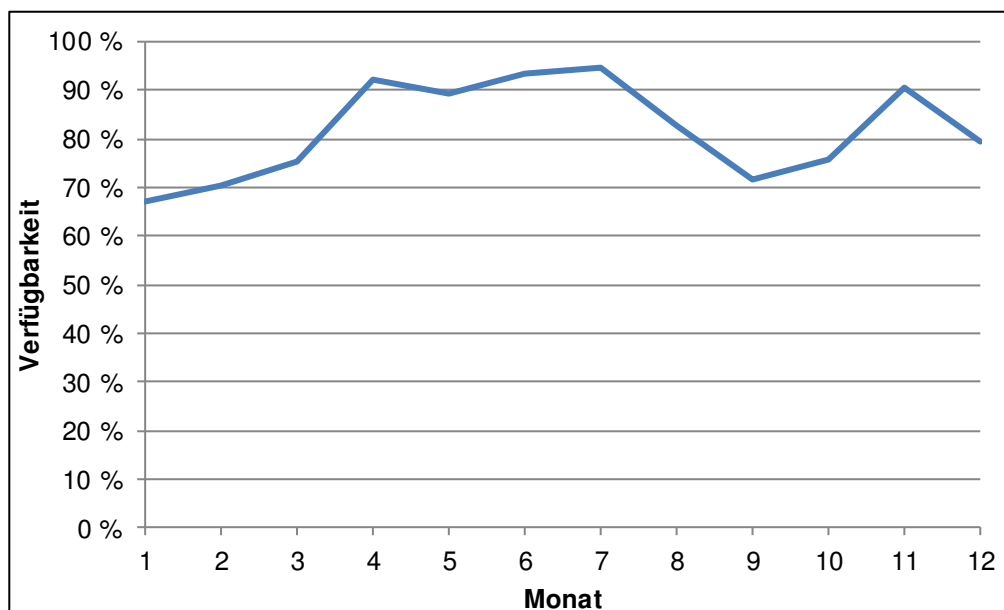


Abb. 12: Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Frankreich mit Wetterstationsdaten als Referenz.

Tabelle 1: Verfügbarkeit der Daten im gesamten Analysezeitraum in Frankreich.

	MERRA	conWX	Wetterstation
Verfügbarkeit (%)	88,05	88,05	82,02

Die vorherrschende Windrichtung am Standort in Frankreich ist 240°, also Westsüdwest. Dies ist in allen drei Datensätzen zu sehen (vgl. Abb. 13 bis 15). Am wenigsten Wind kommt aus nordwestlicher und südöstlicher Richtung. Dies ist auch bei den Windrosen der Referenzdaten zu erkennen. Hier gibt es aber einige Unterschiede zu der jeweiligen Windrose des Messstandortes. In Abb. 13 sind die Windrose für den Messstandort und die MERRA-Daten dargestellt. Zu sehen ist, dass es zwischen Messstandort und MERRA-Daten leichte Abweichungen gibt. So ist der 300°-Sektor bei den MERRA-Daten deutlich ausgeprägter, als bei den Daten vom Messstandort. Die Sektoren 0° und 30° hingegen treten dabei deutlich seltener bei den MERRA-Daten auf als am Messstandort.

In Abb. 14 sind die Windrosen des Messstandortes und des conWX-Datensatzes abgebildet. Diese passen sehr gut zusammen und es gibt kaum Abweichungen zueinander. Nur der 0°-Sektor ist bei den Daten des Messstandortes ausgeprägter, als bei den conWX-Daten.

Abb.15 zeigt die Windrosen, welche zum dritten Referenzdatensatz gehören, der Wetterstation. In diesem Fall sind die größten Abweichungen zu erkennen. Der Wind weht hier an der Wetterstation in erster Linie aus dem 210°-Sektor und am Messstandort aus dem 240°-Sektor, also etwas westlicher. Umgekehrt zum Fall der MERRA- und conWX- Daten kommt nun am Referenzstandort mehr Wind aus nördlicher bzw. nordnordöstlicher Richtung, genauer dem 0°-Sektor und 30°-Sektor, als am Standort der Messung.

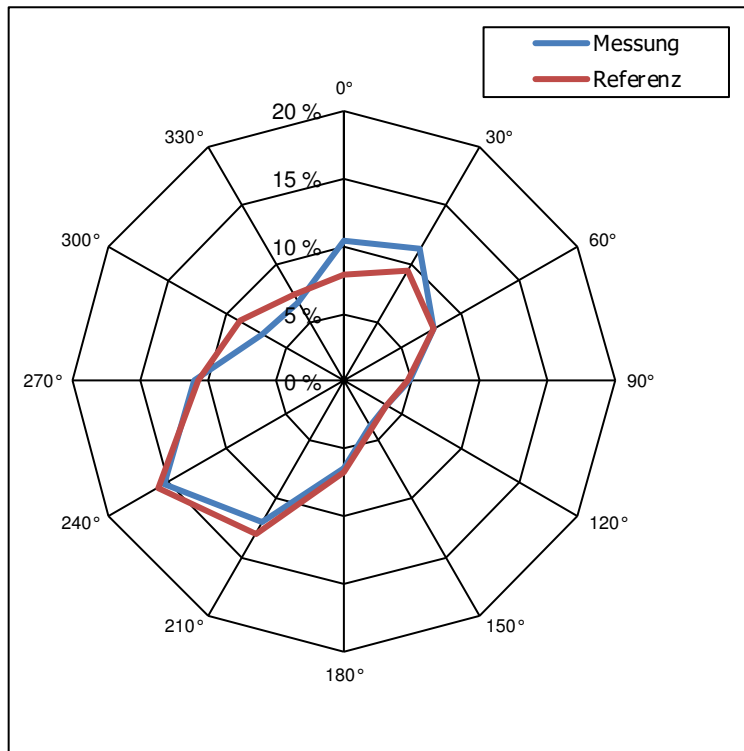


Abb. 13: Windrosen für Messung und Referenz in Frankreich mit MERRA-Daten als Referenz über den gesamten Messzeitraum.

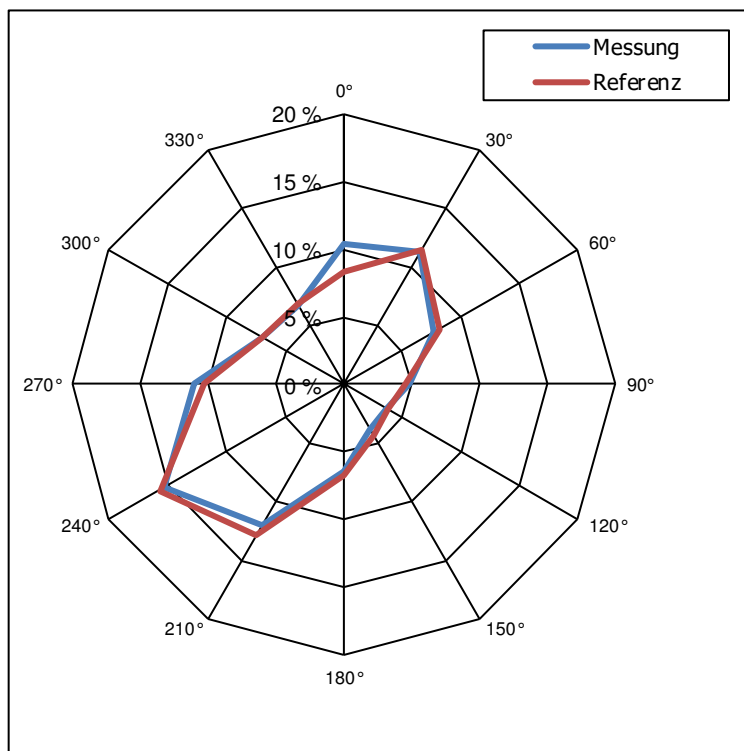


Abb. 14: Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit conWX-Daten als Referenz.

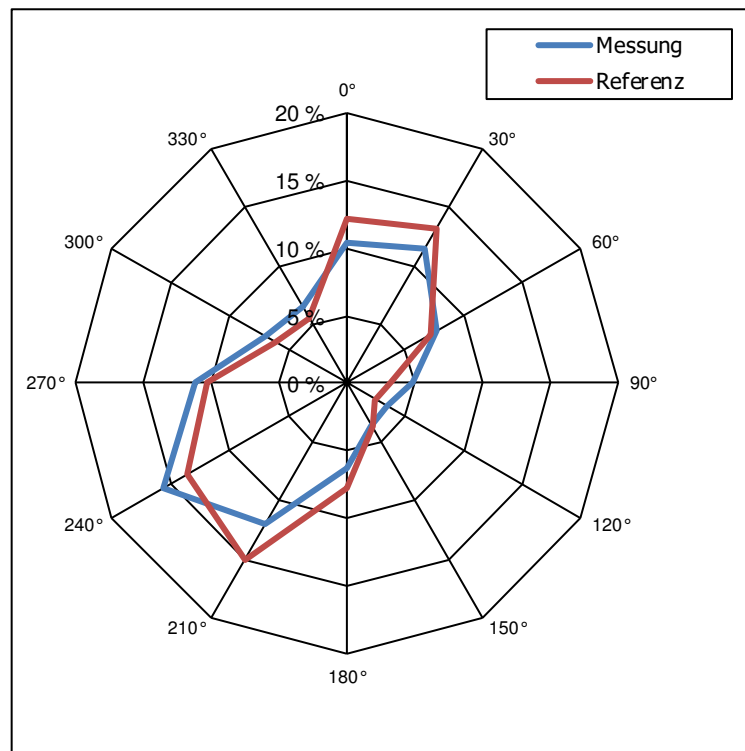


Abb. 15: Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit Wetterstationsdaten als Referenz.

Die Häufigkeitsverteilungen zeigen in Klassen von 1 m/s auf, wie häufig eine Klasse im Vergleich zu den anderen Klassen im Messzeitraum auftrat. Die Häufigkeitsverteilungen am Messstandort für den MERRA- und conWX-Datensatz sind gleich (vgl. Abb. 16 und 17). Ebenfalls sind in diesen Abbildungen die Häufigkeitsverteilungen für die jeweiligen Referenzdaten aufgetragen. Hier sind deutliche Unterschiede zueinander, aber auch zu der Häufigkeitsverteilung am Messstandort zu erkennen. So ist in Abb. 16 für die MERRA-Daten zu sehen, dass sich die Häufigkeitsverteilung für die MERRA-Daten im Gegensatz zu den Messstandortdaten in Richtung niedrigerer Windgeschwindigkeiten verschiebt. Das genaue Gegenteil ist jedoch bei den conWX-Daten (Abb. 17) der Fall. Hier verschiebt sich die Häufigkeitsverteilung der Referenzdaten deutlich in Richtung höherer Windgeschwindigkeiten. Dies spiegelt sich dann auch in der mittleren Windgeschwindigkeit wieder. Während die mittlere Windgeschwindigkeit der conWX-Daten über der mittleren Windgeschwindigkeit der Messung liegt, ist die der MERRA-Daten geringer (vgl. Tabelle 2). Die deutlichste Abweichung zwischen der Häufigkeitsverteilung von Messstandort und Referenz ist im Fall der Wetterstation,

dargestellt in Abb. 18, zu erkennen. Hier gibt es eine noch wesentlich deutlichere Verschiebung der Häufigkeitsverteilung am Referenzstandort zu den Klassen mit niedriger Windgeschwindigkeit als bei den MERRA-Daten. Auffällig ist auch ein Knick in der Häufigkeitsverteilung bei der Windgeschwindigkeitsklasse um 2,5 m/s. Die mittlere Windgeschwindigkeit ist mit 4,11 m/s nochmal mehr als 2 m/s geringer als die mittlere Windgeschwindigkeit der MERRA-Daten.

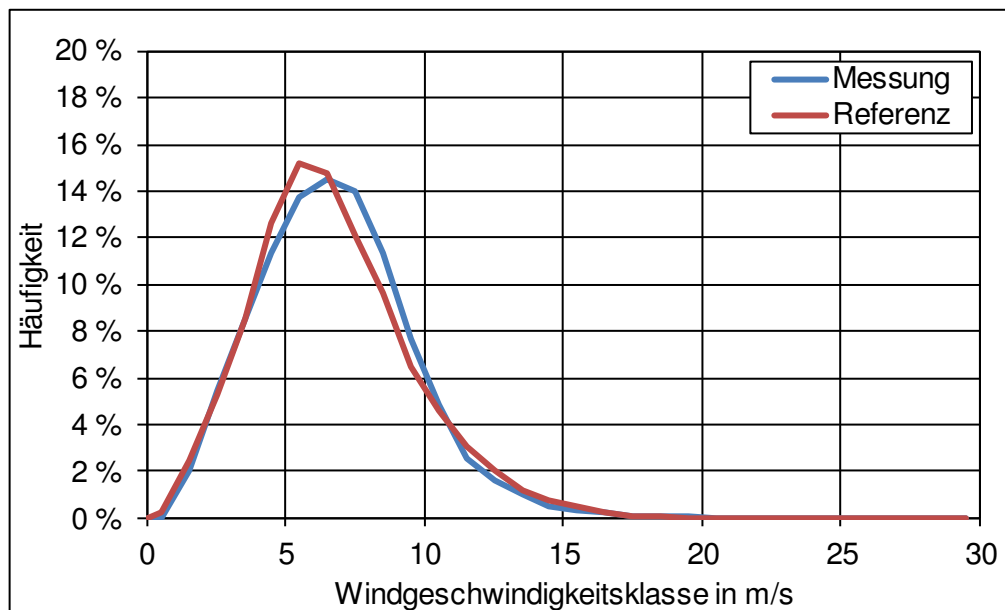


Abb. 16: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit MERRA-Daten als Referenz.

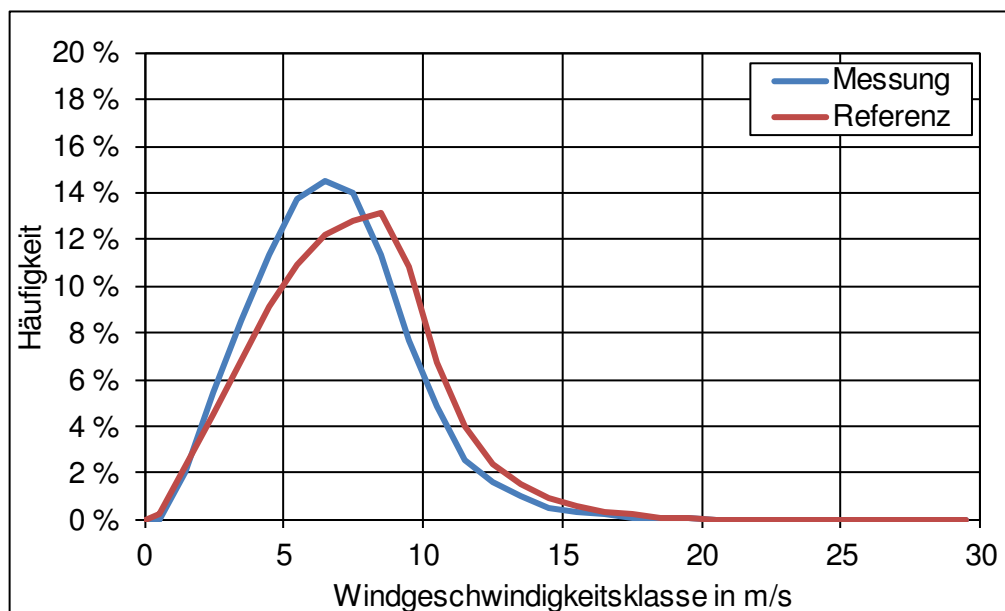


Abb. 17: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit conWX-Daten als Referenz.

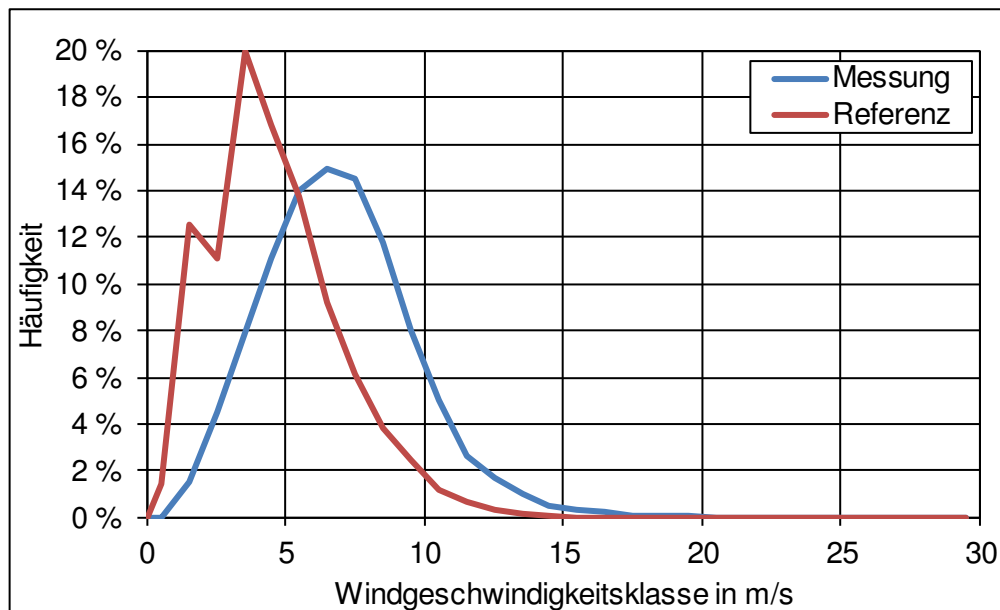


Abb. 18: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Frankreich mit Wetterstationsdaten als Referenz.

Tabelle 2: Mittlere Windgeschwindigkeiten im gesamten Analysezeitraum in Frankreich.

	MERRA	conWX	Wetterstation
\bar{v} Messung (m/s)	6,26	6,26	6,39
\bar{v} Referenz (m/s)	6,19	6,85	4,11

6.2.3 Italien

Der für den Messstandort Italien betrachtete Gesamtzeitraum umfasst den 01.04.2009 00:00 bis zum 31.03.2015 23:50. Der Messzeitraum umfasst somit insgesamt sechs Jahre. Die dabei verwendeten Messdaten stammen aus einer Messhöhe von 50,7 m.

Beim Messstandort Italien gibt es die Besonderheit, dass durch die schlechte Datenlage der dortigen Wetterstationen als dritte Referenz neben MERRA und conWX keine Wetterstation betrachtet wird. Statt der Wetterstation wird eine weitere Messung, welche über den gleichen Zeitraum in räumlicher Nähe, ca. 16 km Entfernung, durchgeführt worden ist, herangezogen.

Die Messung in Italien hat eine sehr hohe Verfügbarkeit von 99,99 %. Dies spiegelt sich auch in den folgenden Abbildungen wieder. In diesen Abbildungen werden sowohl die Tagesverfügbarkeiten (Abb. 19), als auch die Monatsverfügbarkeiten (Abb. 20) für die Datensätze mit MERRA- und conWX-Daten als Referenz dargestellt. Aus der hohen Verfügbarkeit der Messdaten und der 100 % Verfügbarkeit der MERRA- und conWX-Daten folgt, dass für die Datensätze, welche zur Berechnung genutzt werden, auch eine sehr hohe Verfügbarkeit von 99,99 % gilt (vgl. Tabelle 3). In den Abbildungen 19 und 20 ist zu sehen, dass sich im Fall der MERRA- und conWX-Daten als Referenz diese hohe Verfügbarkeit der Daten gleichmäßig auf den Tages- und Monatsverlauf verteilt.

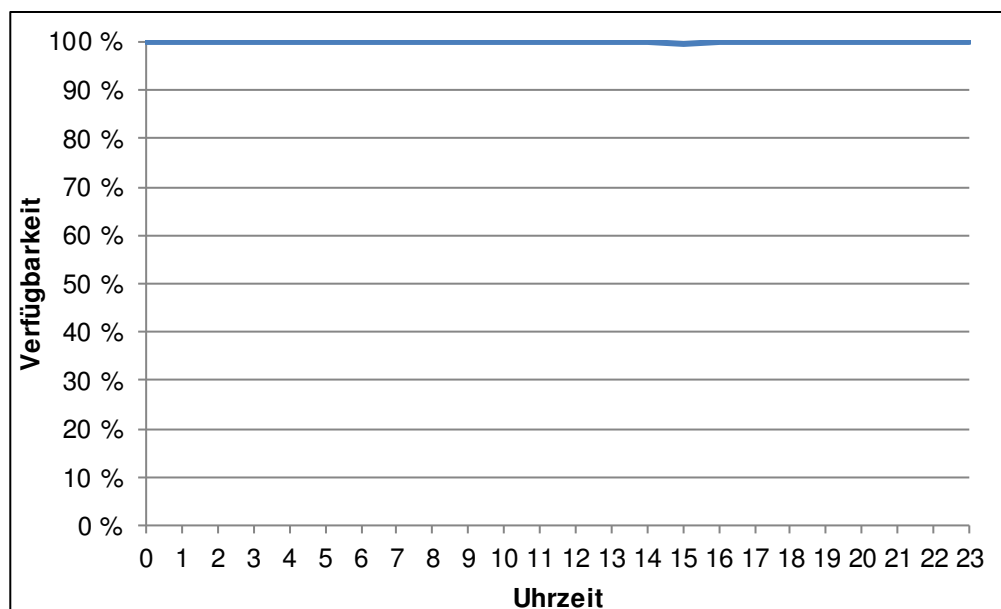


Abb. 19: Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Italien mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.

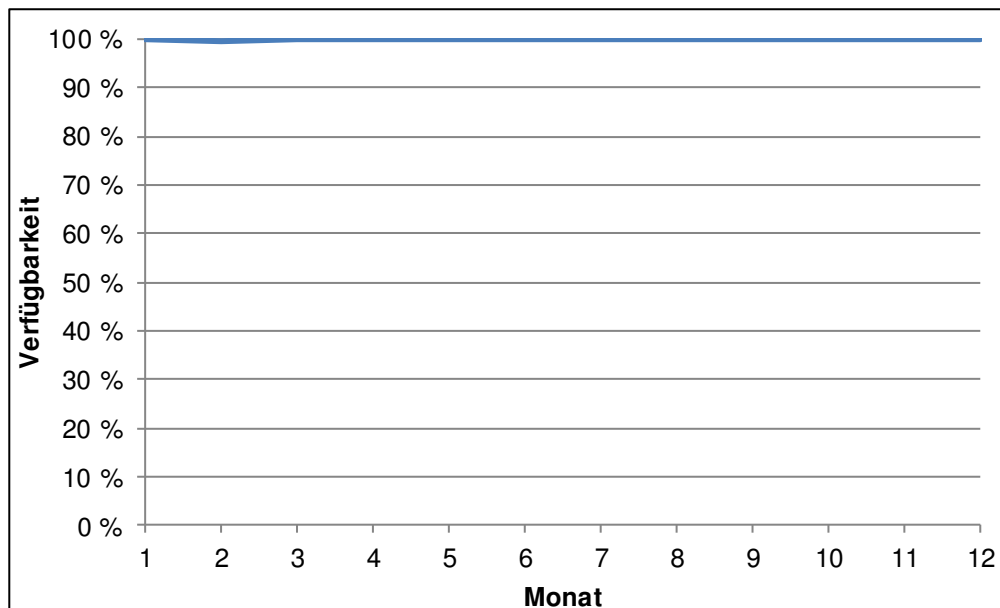


Abb. 20 : Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Italien mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.

In Abb. 21 und 22 sind die Tages- und Monatsverfügbarkeiten für die zweite Messung als Referenz aufgezeigt. Anders als die MERRA- und conWX-Daten hat die zweite Messung keine 100 % Verfügbarkeit, sondern 99,81 %. Kumuliert hat dann der Gesamtdatensatz für die zweite Messung als Referenz ebenfalls eine sehr hohe Verfügbarkeit von 99,81 % (vgl. Tabelle 3). In Abb. 21 ist die Tagesverfügbarkeit für diesen Datensatz aufgezeigt. Hier verhält es sich genauso, wie bei den Datensätzen der beiden anderen Referenzen indem auch hier die Verfügbarkeiten gleichmäßig über den Tag verteilt sind. Anders sieht es bei Abb. 22 aus, in welcher die Monatsverfügbarkeiten dargestellt sind. Auch hier sind die Verfügbarkeiten sehr hoch, allerdings gibt es einen Monat, welcher im Vergleich mit den anderen auffällt. Dies ist der Januar, in welchem die Verfügbarkeit der Daten über den Gesamtzeitraum betrachtet niedriger ist, als in den darauffolgenden Monaten. Allerdings liegt die Verfügbarkeit auch im Januar immer noch bei über 98 % und ist damit hoch.

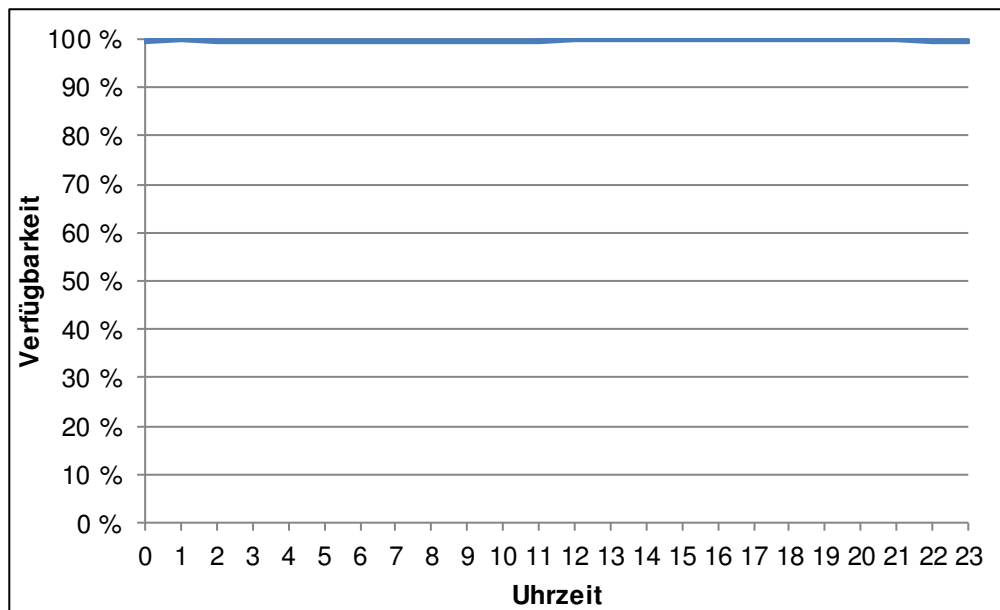


Abb. 21: Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Italien mit Daten der zweiten Messung als Referenz.

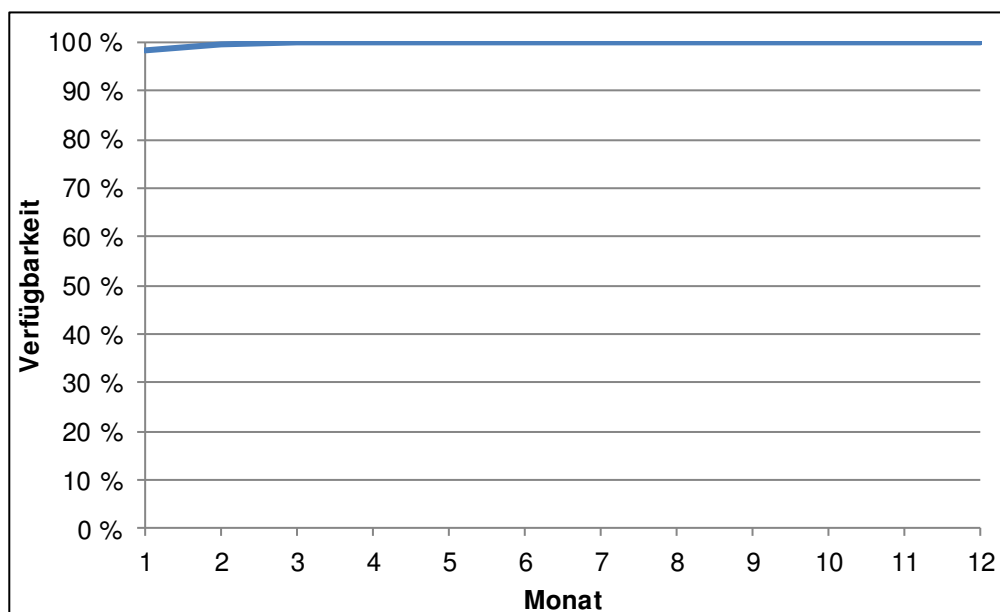


Abb. 22: Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Italien mit Daten der zweiten Messung als Referenz.

Tabelle 3: Verfügbarkeiten der Daten im gesamten Analysezeitraum in Italien.

	MERRA	conWX	zweite Messung
Verfügbarkeit (%)	99,99	99,99	99,81

In den Abbildungen 23 bis 25 sind die Windrosen für die einzelnen Datensätze je nach Referenz abgebildet. Durch die, wie oben beschrieben, hohe Verfügbarkeit der Daten ist bei den einzelnen Windrosen zu sehen, dass sich die Windrosen der Messposition für die einzelnen Datensätze nicht sichtbar unterscheiden. Es liegt also in jedem Fall für die Messposition eine vorherrschende Windrichtung aus dem 300°-Sektor vor, mit einem kleineren südöstlichen Anteil. Die Windrosen für die einzelnen Referenzpositionen unterscheiden sich dagegen deutlich.

In Abb. 23 sind die Windrosen für den MERRA Referenzdatensatz dargestellt. Es gibt deutliche Unterschiede zwischen der Windrose der Messposition und der Windrose der Referenzposition. Die vorherrschende Windrichtung der MERRA-Daten ist der 240°-Sektor. Im Gegensatz zum 300°-Sektor der Messposition kommt der Wind also südlicher. Allerdings ist die Ausprägung einer Hauptwindrichtung bzw. eines Hauptwindrichtungssektors nicht so deutlich, wie bei den Daten der Messung. Während bei den Messdaten eine deutliche Tendenz zu erkennen ist, dass der Wind aus Nordwesten kommt und die anderen Windrichtungen vergleichsweise schwach sind, ist bei den MERRA-Daten der Hauptwindrichtungssektor bei 240°. Es gibt aber auch eine Tendenz zu Wind aus nördlicher Richtung aus dem 0°-Sektor.

In Abb. 24 sind die Windrosen für den conWX Referenzdatensatz abgebildet. Im Gegensatz zu der Windrose an der Messposition, an welcher der 300°-Sektor der Hauptwindrichtungssektor ist, tritt dieser Sektor an der conWX-Position mit einer Häufigkeit von 10 % im Gegensatz zu den 24 % der Messposition nur sehr schwach auf. Zu sehen ist, dass sich die Windrose für die conWX-Daten von der für die Messposition unterscheidet, indem sie um 30° Richtung Norden verschoben scheint. Ist die vorherrschende Windrichtung an der Messposition, wie bei den MERRA-Daten, noch der 300°-Sektor, so ist es bei den conWX-Daten der 330°-Sektor. Zu beobachten ist noch, dass die conWX-Daten einen Peak im 240°-Sektor aufweisen, welchen es so deutlich ausgeprägt in der Windrose der Messposition nicht gibt.

In Abb. 25 sind die Windrosen für den Datensatz mit der zweiten Messung als Referenz aufgezeigt. Wie bei den conWX-Daten ist auch in diesem Fall der Hauptwindrichtungssektor der 330°-Sektor, allerdings ist auch der 300°-Sektor stark ausgeprägt (zweitstärkster Sektor), welcher an der Messposition wieder der Hauptwindrichtungssektor ist. Der am zweitstärksten an der Messposition vertretene

Windrichtungssektor ist der 330°-Sektor. Daraus folgt, dass die beiden Sektoren, die am häufigsten auftreten, an beiden Positionen dieselben, nebeneinanderliegenden Sektoren sind, bloß in ihrer Rangfolge getauscht. Dabei treten diese beiden Sektoren in Summe an der Referenzposition noch häufiger auf als an der Messposition. Dies lässt sich damit erklären, dass sich der Wind an der Messposition in den Sektoren 120° bis 210° in etwa gleichmäßig verteilt. Diese gleichmäßige, in ihrer Stärke ähnliche, Verteilung gibt es an der Referenzposition nicht. Hier gibt es jedoch einen deutlich stärker vertretenen 120°-Sektor im Vergleich zu den übrigen Sektoren.

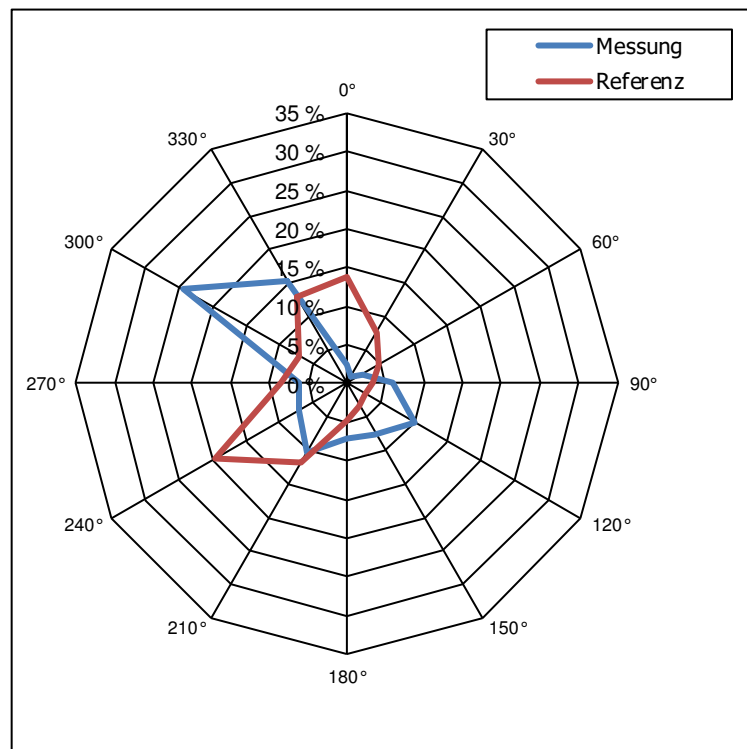


Abb. 23: Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit MERRA-Daten als Referenz.

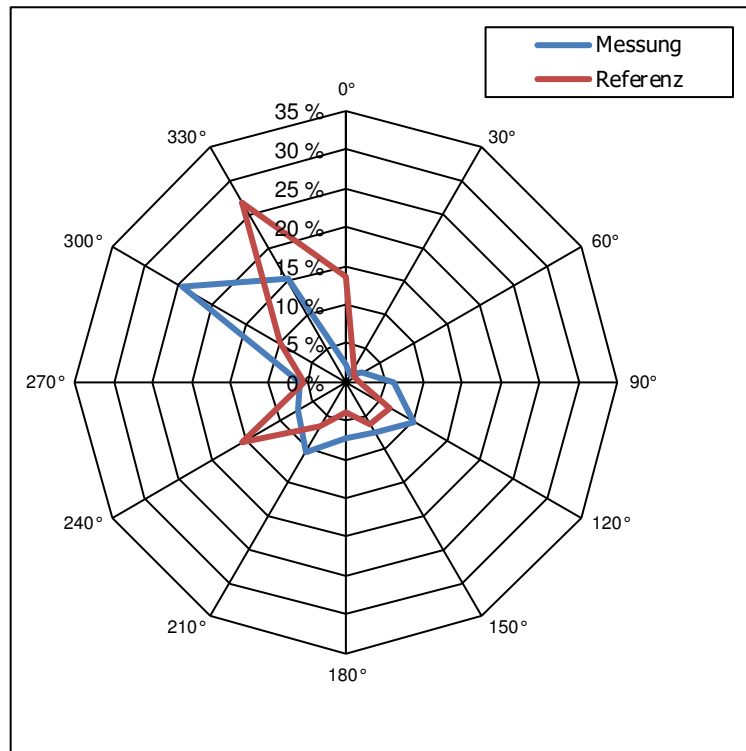


Abb. 24: Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit conWX-Daten als Referenz.

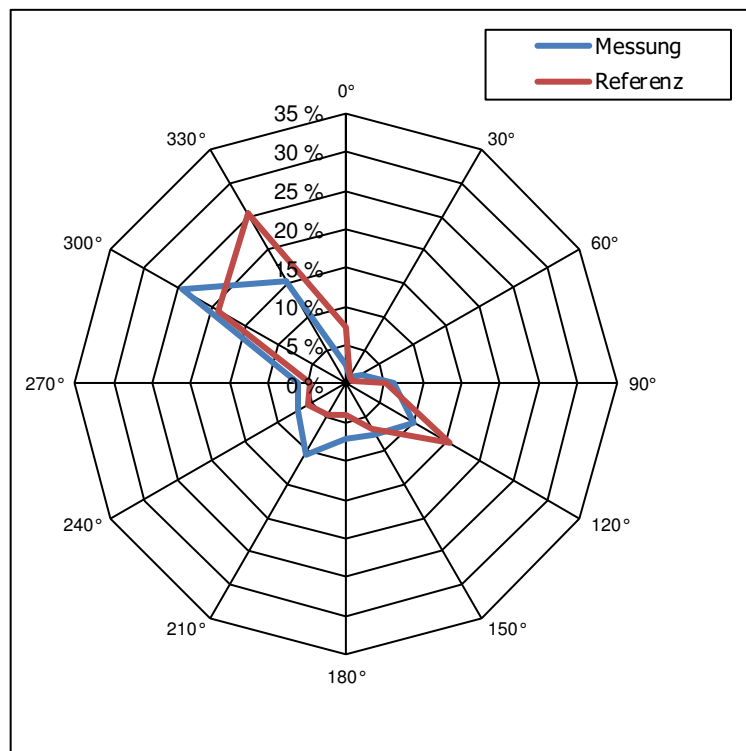


Abb. 25: Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit Daten der zweiten Messung als Referenz

In den Abbildungen 26 bis 28 sind die Häufigkeitsverteilungen für die einzelnen Datensätze abgebildet. Auch hier ist in den Abbildungen zu erkennen, dass durch die hohe Verfügbarkeit der Daten, vor allem der Referenzdaten, sich die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten an der Messposition im Vergleich der einzelnen Datensätze der verschiedenen Referenzen nicht erkennbar unterscheidet. In Abb. 26 sind die Häufigkeitsverteilungen für den MERRA-Datensatz dargestellt. Es fällt auf, dass die MERRA-Daten eine deutlich zu niedrigeren Windgeschwindigkeiten tendierende Häufigkeitsverteilung aufweisen, als die Messdaten. So ist die an der MERRA-Position am häufigsten auftretende Klasse, die Klasse um 4,5 m/s und an der Messposition die Klasse um 5,5 m/s. Zusätzlich dazu, dass die am häufigsten auftretende Klasse an der Referenzposition eine niedrigere ist als an der Messposition, ist diese niedrige Klasse an der Messposition zusätzlich noch deutlich weniger stark ausgeprägt, als an der Referenzposition. Während an der Messposition nur ca. 12 % der gemessenen Werte in dieser niedrigen Klasse vertreten sind, sind es an der Referenzposition ca. 16 %. Ab der 8,5 m/s Klasse ist die Messposition stärker vertreten als die Referenzposition. In den Klassen bis 3,5 m/s liegen die Werte beider Positionen nahe beieinander. Die Messposition ist teilweise stärker vertreten, als die Referenzposition. Insgesamt sind aber die höheren Windklassen an der Messposition stärker vertreten als an der Referenzposition und umgekehrt die niedrigeren Windklassen an der Referenzposition stärker vertreten, als an der Messposition. Das spiegelt sich dann auch in der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit an diesen beiden Positionen über den betrachteten Gesamtzeitraum für den Standort Italien wieder. So liegt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit an der Messposition bei 3,35 m/s und an der Referenzposition bei 4,93 m/s (vgl. Tabelle 4).

Ein anderes Bild zeigt sich bei den Häufigkeitsverteilungen des Datensatzes mit conWX-Daten als Referenz, dargestellt in Abb. 27. In diesem Fall sind die Maxima der Häufigkeitsverteilungen nicht so deutlich unterschiedlich ausgeprägt, wie beim Datensatz mit den MERRA-Daten als Referenz. Jedoch gibt es auch hier deutliche Unterschiede in den Verteilungen. Bis zu einer Windgeschwindigkeitsklasse von 5,5 m/s sind die Klassen an der Referenzposition stärker vertreten als an der Messposition. Danach ist es genau umgekehrt. Mit Ausnahme der Klassen um 5,5 m/s und 6,5 m/s, in welchen Referenzposition und Messposition in etwa gleich stark

vertreten sind, tendieren die conWX-Daten zu höheren und die Daten der Messung zu niedrigeren Windgeschwindigkeiten. Das spiegelt sich auch in den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten wider. Die Häufigkeitsverteilungen für die Messposition sind für den MERRA-Datensatz und den conWX-Datensatz gleich. Daraus folgt, dass auch die durchschnittliche Windgeschwindigkeit für die Messposition in diesen beiden Fällen die gleiche bleibt vgl. Tabelle 4. An der Referenzposition ergibt sich eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit, die mit 6,10 m/s deutlich über der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit an der Messposition mit 3,35 m/s liegt (vgl. Tabelle 4).

Ein ähnliches Bild zeigt sich in Abb. 28 in welcher die Häufigkeitsverteilung für den Datensatz aufgezeigt werden, für welchen die zweite Messung als Referenz gilt. Auch hier sind die niedrigeren Windgeschwindigkeitsklassen bis 5,5 m/s am Messstandort weniger stark vertreten als an der Referenzposition. Ebenfalls sind ab der 5,5 m/s Klasse die höheren Klassen an der Referenzposition stärker vertreten. Allerdings ergibt sich hier kein so deutliches Bild wie im Falle der conWX-Daten. Dieses nicht so eindeutige Bild spiegelt sich auch in den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten an beiden Positionen wider, indem diese nahe beieinander liegen. An der Messposition ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit wieder ähnlich, wie bei den beiden anderen Referenzdatensätzen, was an der hohen Verfügbarkeit der Referenzdaten liegt. So ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit am Messstandort wieder bei 3,35 m/s und am Referenzstandort bei 3,65 m/s (vgl. Tabelle 4). In den niedrigen Windgeschwindigkeitsklassen zeigt sich eine „Delle“ bei der Häufigkeitsverteilung der Referenzdaten, welche bei den Messdaten nicht vorhanden ist.

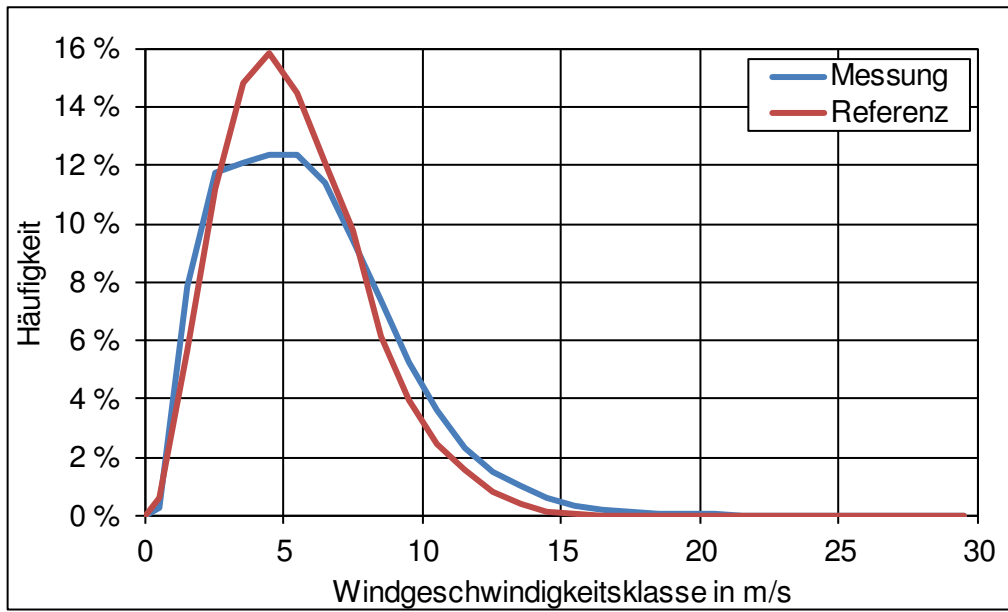


Abb. 26: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit MERRA-Daten als Referenz.

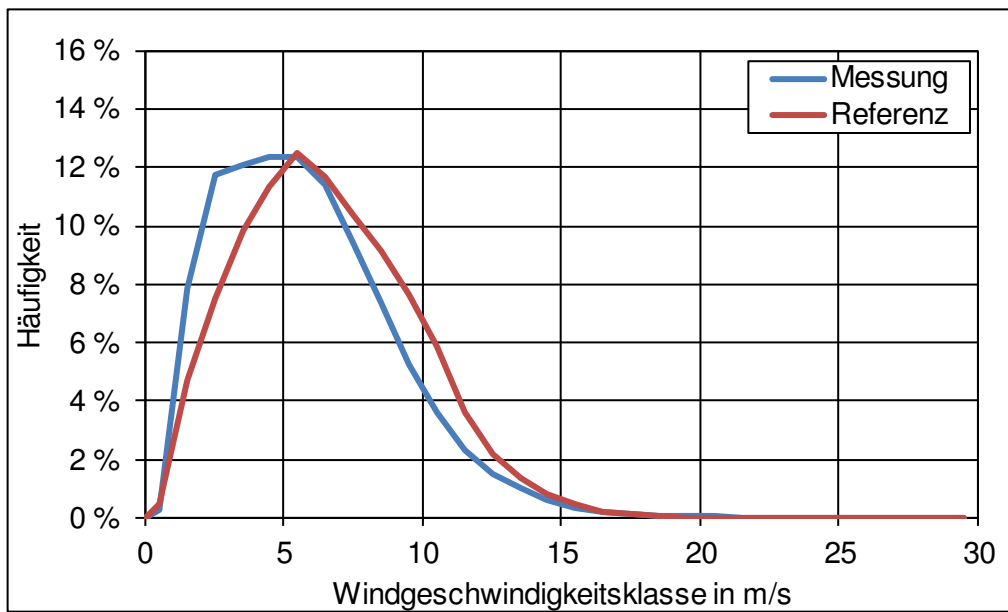


Abb. 27: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit conWX-Daten als Referenz.

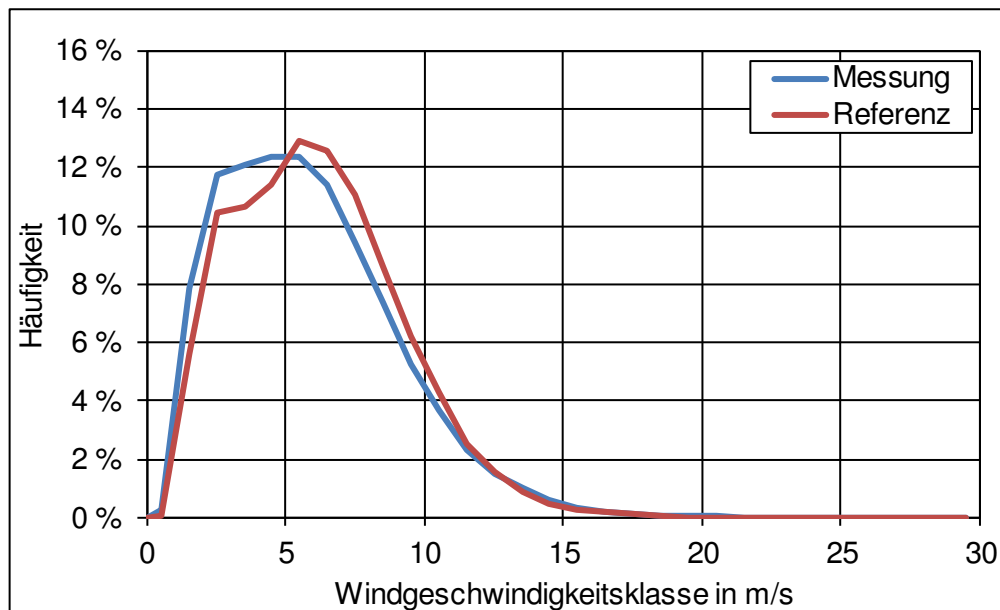


Abb. 28: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Italien mit der zweiten Messung als Referenz.

Tabelle 4: Mittlere Windgeschwindigkeiten für den gesamten Analysezeitraum Italien.

	MERRA	conWX	zweite Messung
\bar{v} Messung (m/s)	5,35	5,35	5,35
\bar{v} Referenz (m/s)	4,93	6,10	5,65

6.2.4 Polen

Der Analysezeitraum für den untersuchten Standort in Polen umfasst den 05.11.2007 00:00 bis 04.11.2015 23:00. Es ergibt sich ein Analysezeitraum von acht Jahren. Verwendet wurden Daten eines Messmastes aus einer Messhöhe von 102,2 m.

In den Abbildungen 29 und 32 sind die Verfügbarkeiten für die drei Datensätze dargestellt. Unterschieden wird nach Tagesverfügbarkeiten und Monatsverfügbarkeiten. Die Verfügbarkeiten für den MERRA-Datensatz und den conWX-Datensatz sind dabei zusammen in Abb. 29 bzw. Abb. 30 dargestellt. So ist in Abb. 29, welche die Tagesverfügbarkeiten der auf MERRA- und conWX-Daten basierenden Datensätze wiedergibt, zu erkennen, dass in beiden Fällen die Verfügbarkeit über den ganzen Tag hinweg in etwa gleich verteilt ist. Ein anderes Bild zeigt sich in der Abbildung 30. In dieser Abbildung sind die

Monatsverfügbarkeiten der beiden Referenzdatensätze MERRA und conWX aufgezeigt. Es ist zu sehen, dass im Zeitraum Juli bis Januar eine mit minimal 97 % recht hohe Datenverfügbarkeit vorliegt. Im Zeitraum Februar bis Mai liegt die Datenverfügbarkeit bei ungefähr 92 %, also deutlich unter den minimal 97 % während des Zeitraumes Juli bis Januar. Es ergibt sich eine hohe Gesamtverfügbarkeit der Daten mit 97,07 % (vgl. Tabelle 5).

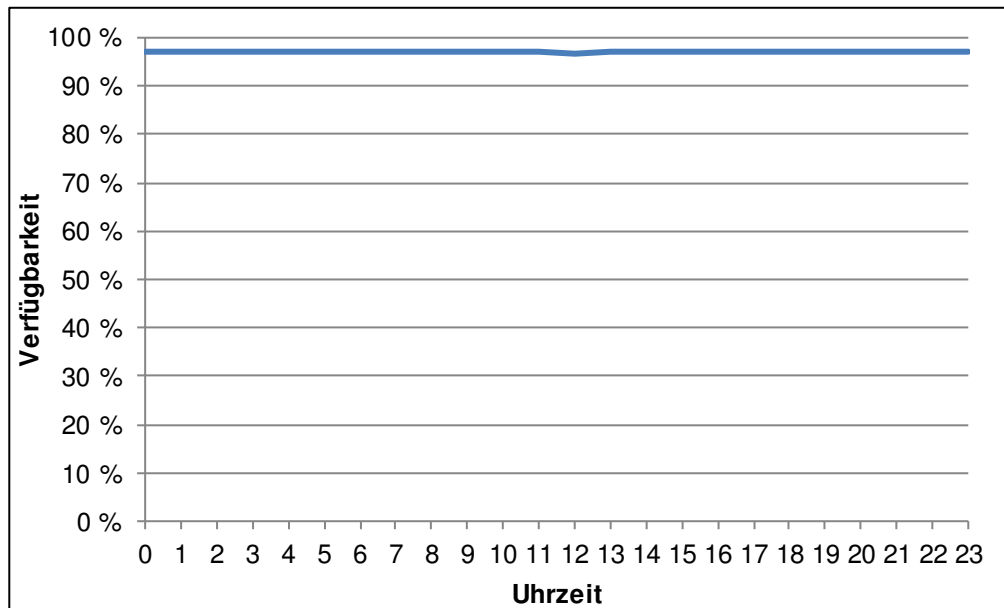


Abb. 29: Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Polen mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.

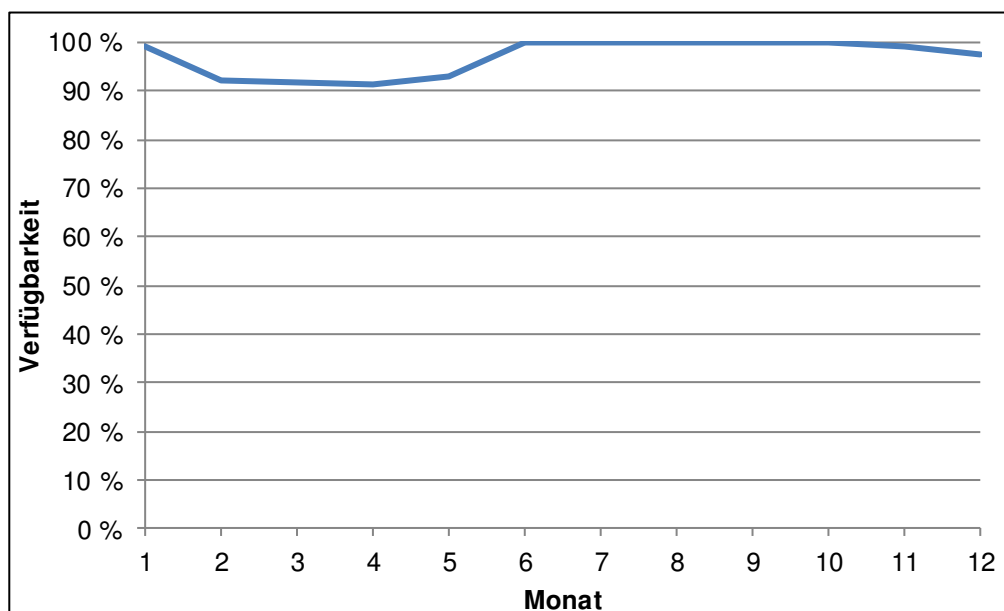


Abb. 30: Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Polen mit MERRA- bzw. conWX-Daten als Referenz.

In den Abbildungen 31 und 32 zeigt sich ein anderes Bild. Es ist zu erkennen, dass die Verfügbarkeit beim Datensatz mit der Wetterstation als Referenz deutlich geringer ist als etwa bei den beiden MERRA- und conWX-Datensätzen. Des Weiteren gibt es auch Unterschiede was die in Abb. 31 dargestellte Tagesverfügbarkeit der Daten angeht. So liegt die Verfügbarkeit der Daten tagsüber (zwischen 7 Uhr und 19 Uhr) bei über 80 % und nachts (20 Uhr bis 6 Uhr) bei unter 80 %. In beiden Fällen ist die Verfügbarkeit also sehr gering. Auch in Abb. 32 kann deutlich die niedrigere Gesamtverfügbarkeit des Referenzdatensatzes der Wetterstation im Vergleich mit den beiden MERRA- und conWX-Datensätzen erkannt werden. Während beim Wetterstationsdatensatz die Monatsverfügbarkeit in keinem Monat über 90 % steigt, so sinkt sie beim Betrachten der anderen beiden Referenzdatensätzen nie unter die 90 %. Somit ist auch die geringere Verfügbarkeit der Messdaten in den Monaten Februar bis Mai im Gegensatz zu den zwei Datensätzen der MERRA- und conWX-Daten nur noch schwach zu erkennen. Vielmehr sieht der Trend dieses Referenzdatensatzes so aus, dass es nach einem Tiefpunkt im Februar bis zum Januar eine nahezu ständig steigende Datenverfügbarkeit gibt. Also ist auch hier am Anfang des Jahres (mit Ausnahme des Januars) die Datenverfügbarkeit geringer als am Ende, jedoch ist dieses Phänomen im Fall des Wetterstationsdatensatzes nicht so ausgeprägt, wie bei den beiden anderen Datensätzen. Für den gesamten Analysezeitraum ergibt sich eine sehr niedrige Verfügbarkeit von 79,91 % (vgl. Tabelle 5).

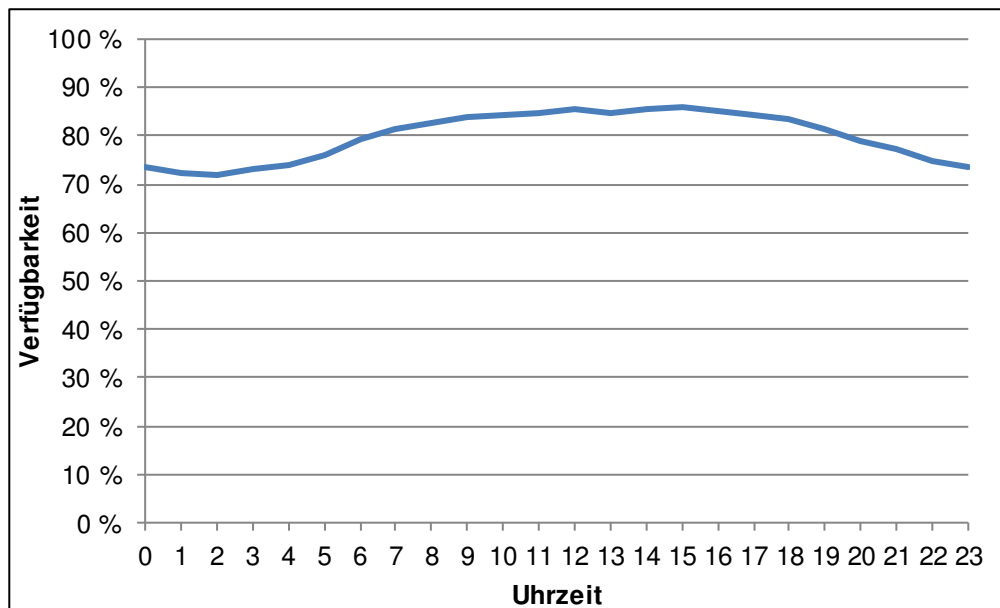


Abb. 31: Verfügbarkeit der Daten nach Uhrzeit für den Standort Polen mit Wetterstationsdaten als Referenz.

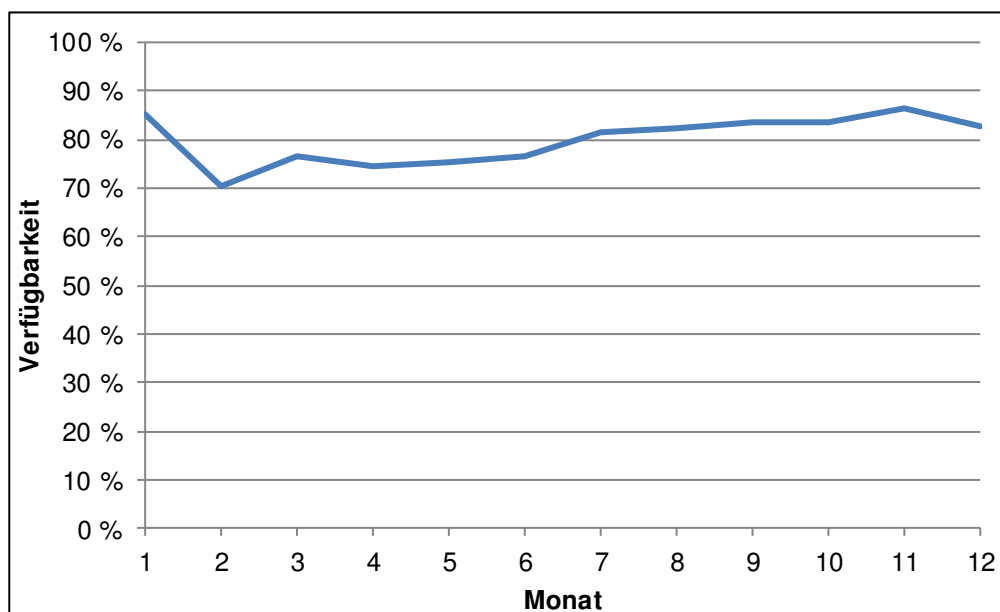


Abb. 32: Verfügbarkeit der Daten nach Monat für den Standort Polen mit Wetterstationsdaten als Referenz.

Tabelle 5: Verfügbarkeiten der Daten im gesamten Analysezeitraum.

	MERRA	conWX	Wetterstation
Verfügbarkeit (%)	97,07	97,07	79,91

In den Abb. 33 bis 35 sind die Windrosen für die Messposition und die Referenzposition der einzelnen Datensätze abgebildet. Zu erkennen ist, dass in keinem Fall ein Sektor als deutlicher Hauptwindrichtungssektor hervorsteht. Vielmehr gibt es die allgemeine Hauptwindrichtung Südwesten. Kleine Unterschiede gibt es aber in der Häufigkeit der einzelnen Windrichtungsklassen. Dies gilt vor allem für die Referenzstandorte zur Messposition und untereinander. Die Windrosen für die Messposition unterscheiden sich dagegen kaum voneinander. Dies gilt auch für den Datensatz, welchem die Wetterstation als Referenz zu Grunde liegt, trotz der geringen Datenverfügbarkeit dieses Datensatzes von unter 80 %.

In Abb. 33 sind die Windrosen für den Datensatz der MERRA-Daten als Referenz dargestellt. Während an der Messposition die Windrichtungssektoren mit südwestlicher Ausrichtung am stärksten vertreten sind, verschiebt sich dies an der Referenzposition in westliche Richtung, so dass der 270°-Sektor der am häufigsten auftretende Sektor ist, ohne jedoch einen herausragenden Peak zu bilden. Generell ist an der Messposition der südwestliche Teil der Windrose stärker ausgeprägt als an der Referenzposition und an der Referenzposition eher der westliche bis nordwestliche Teil (270°-Sektor und 300°-Sektor).

Über alle Standorte und Datensätze hinweg zeigt sich das stimmigste Bild zwischen der Windrose der Messposition und der Referenzposition in Abb. 34. In dieser Abbildung sind die Windrosen für den conWX-Datensatz als Referenz abgebildet, welche sich bis auf marginale Unterschiede nicht voneinander unterscheiden.

Auch in Abb. 35, in welcher die Windrosen für die Wetterstation als Referenz aufgezeigt werden, gibt es nur wenige Unterschiede. So ist auch hier die vorherrschende Windrichtung der Südwesten. Allerdings ist dies an der Referenzposition noch ausgeprägter, als an der Messposition dies macht den Hauptunterschied aus. Die anderen Unterschiede in der Sektorenhäufigkeit sind gering.

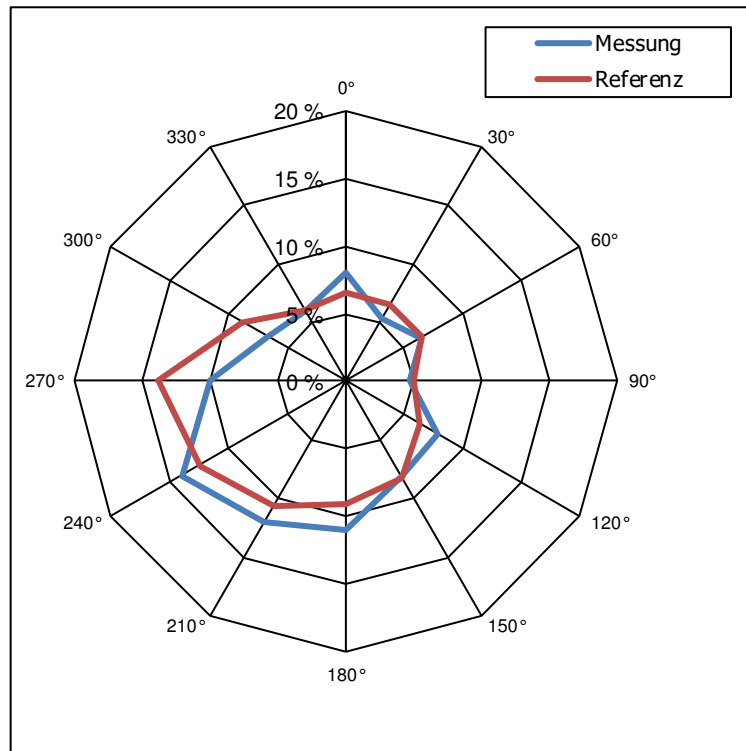


Abb. 33: Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit MERRA-Daten als Referenz.

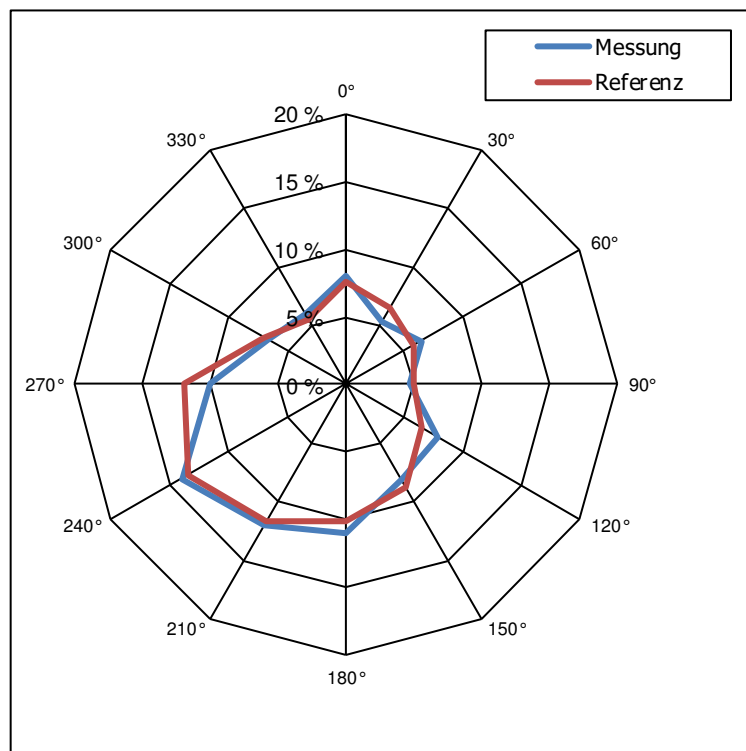


Abb. 34: Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit conWX-Daten als Referenz.

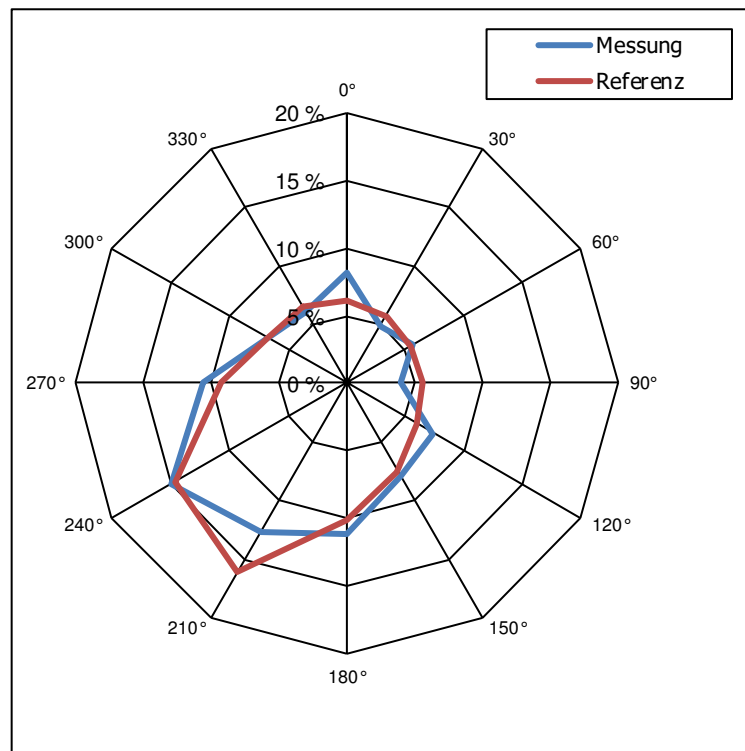


Abb. 35: Windrosen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit Wetterstationsdaten als Referenz.

In den Abbildungen 36 bis 38 sind die Häufigkeitsverteilungen für den Standort Polen dargestellt. Im Einzelnen werden in Abb. 36 die Häufigkeitsverteilungen für den an die MERRA-Daten angepassten Datensatz abgebildet. Deutlich zu erkennen ist, dass im Falle der Referenzdaten eine erkennbare Verschiebung der Häufigkeitsverteilung hin zu niedrigeren Windgeschwindigkeiten auftritt. So treten die Windgeschwindigkeitsklassen bis 8,5 m/s in den MERRA-Daten häufiger auf als in den Messdaten und die Windgeschwindigkeitsklassen ab 9 m/s bei den Messdaten häufiger als bei den MERRA-Daten. Zu sehen ist, dass die Häufigkeitsverteilung der MERRA-Daten einen deutlich steileren Verlauf, mit einem deutlichen Maximum bei 15,5 % in der Klasse um 6,5 m/s, im Gegensatz zu der Häufigkeitsverteilung der Messdaten, nimmt. Deren Verlauf ist im Vergleich flacher und hat aus diesem Grund auch kein so ausgeprägtes Maximum. Das Maximum im Fall der Messdaten liegt bei den Windgeschwindigkeitsklassen 6,5 m/s und 7,5 m/s, welche jeweils bei ca. 11,5 % Häufigkeit liegen. Daraus dass die Klassen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten eher in den MERRA-Daten vertreten sind und die Klassen mit höheren Windgeschwindigkeiten eher bei den Messdaten, ergibt sich, dass die mittlere

Windgeschwindigkeit im Analysezeitraum mit 7,31 m/s an der Messposition höher liegt als an der Referenzposition mit 6,39 m/s (vgl. Tabelle 6).

In Abb. 37 sind die Häufigkeitsverteilungen für den conWX-Datensatz dargestellt. Die Häufigkeitsverteilung für die Messposition ist dieselbe wie im Fall des MERRA-Datensatzes. Die Häufigkeitsverteilung der conWX-Daten nimmt einen wesentlich flacheren Verlauf als die der MERRA-Daten und ist somit den Messdaten ähnlicher. Auch in diesem Fall sind in den Referenzdaten die niedrigeren Klassen und in den Messdaten die höheren Windgeschwindigkeitsklassen stärker vertreten. Dies ist aber nicht so ausgeprägt, wie im Fall der MERRA-Daten. Somit liegen auch die mittleren Windgeschwindigkeiten des Analysezeitraums näher beieinander. Da die Häufigkeitsverteilung an der Messposition unverändert ist, bleibt auch die mittlere Windgeschwindigkeit mit 7,31 m/s gleich. Die conWX-Daten haben mit 7,04 m/s eine höhere mittlere Windgeschwindigkeit als die MERRA-Daten (vgl. Tabelle 6).

Vom Verlauf her wieder ähnlich zu den beiden anderen Referenzen, vor allem den MERRA-Daten, ist auch die Wetterstation (Abb. 38). Allerdings sind hier die Unterschiede am deutlichsten ausgeprägt. Es gibt wieder ein deutlich vermehrtes Auftreten der Klassen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten bis 6,5 m/s in den Daten der Wetterstation und auch in den höheren Klassen bei den Messdaten. Hinzu kommt ein deutliches Maximum in den Klassen 2,5 m/s und 3,5 m/s, welche mit 19,4 und 19,8 % Häufigkeit auftreten, was in Summe 39,2 % ergibt, womit ein großer Teil der Daten in diesen beiden Klassen zu finden ist. Die Häufigkeitsverteilung an der Messposition ähnelt der Häufigkeitsverteilung im Falle der beiden MERRA- und conWX-Datensätze vom Verlauf her. Jedoch treten im Vergleich die höheren Windgeschwindigkeitsklassen jetzt häufiger auf. Dies hat zur Folge, dass die mittlere Windgeschwindigkeit an der Messposition nun mit 7,70 m/s (vgl. Tabelle 6) höher liegt als im Falle der auf MERRA- und conWX-Daten basierenden Datensätze. Entgegengesetzt liegt die mittlere Windgeschwindigkeit an der Wetterstation mit 3,87 m/s (vgl. Tabelle 6) deutlich unter der der conWX-Daten und der MERRA-Daten und noch deutlicher unter der der Messposition.

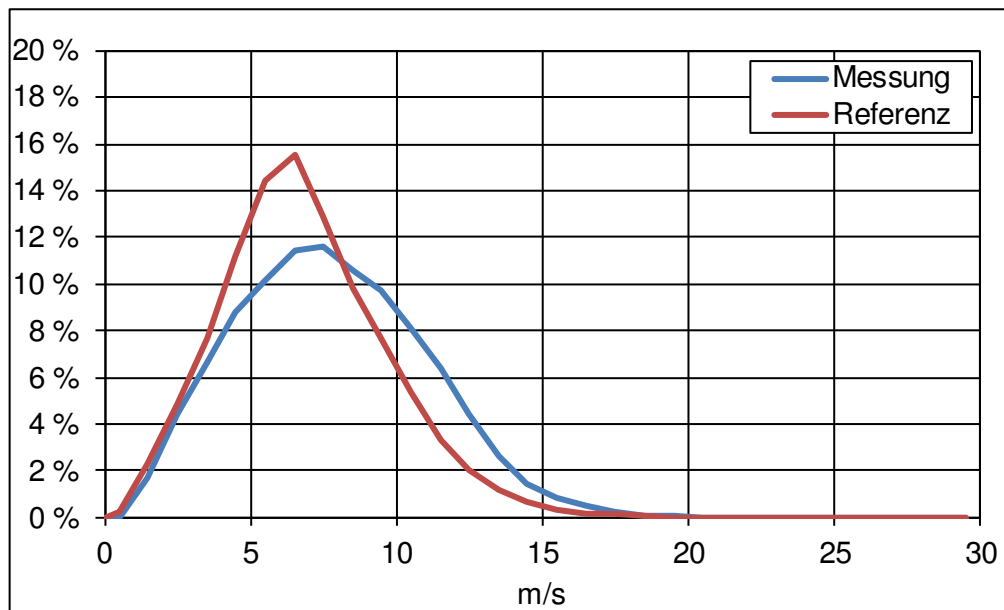


Abb. 36: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit MERRA-Daten als Referenz.

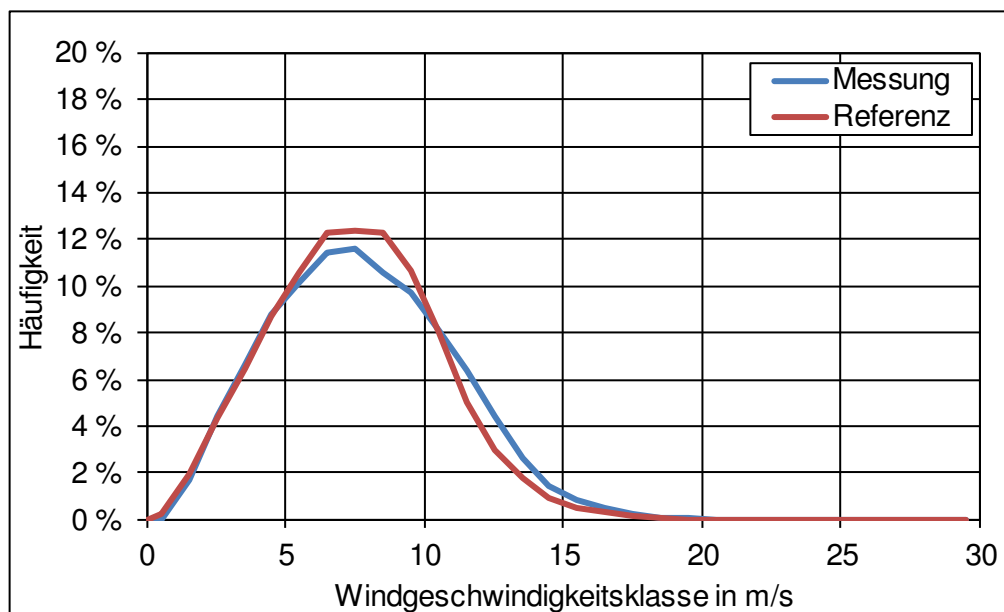


Abb. 37: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit conWX-Daten als Referenz.

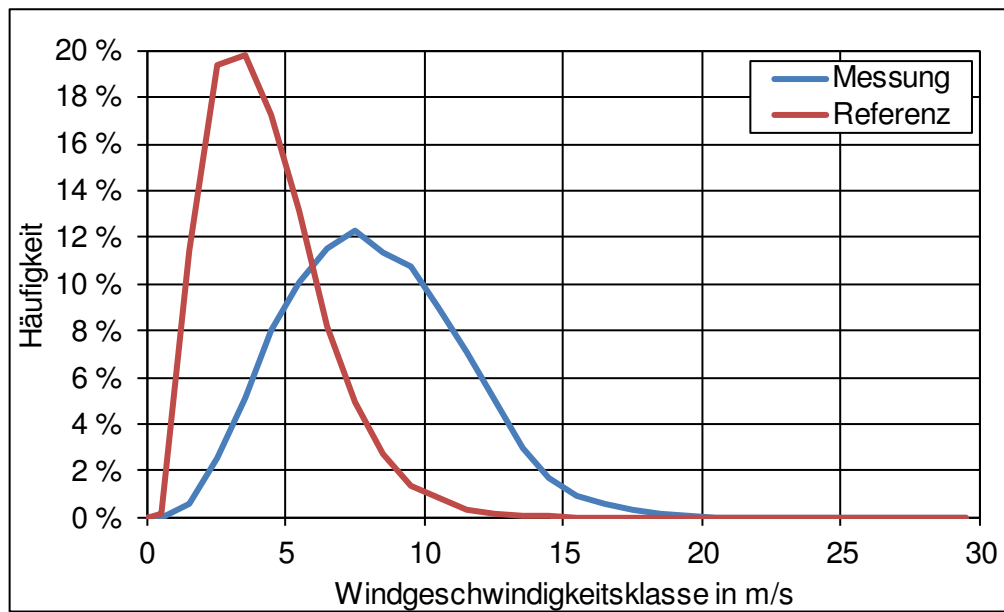


Abb. 38: Häufigkeitsverteilungen für Messung und Referenz für den Standort Polen mit Wetterstationsdaten als Referenz.

Tabelle 6: Mittlere Windgeschwindigkeiten im gesamten Analysezeitraum Polen.

	MERRA	conWX	Wetterstation
\bar{v} Messung (m/s)	7,31	7,31	7,70
\bar{v} Referenz (m/s)	6,39	7,04	3,87

7. Ergebnisse

Als Ergebnisse werden in diesem Kapitel die Residuen, also die Abweichungen der berechneten Langfristwerte vom Erwartungswert, betrachtet. Die Residuen für die linearen Regressionen durch den Ursprung sind zu einem sehr großen Anteil deutlich größer, als die der anderen Verfahren und deren Varianten. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden in Kapitel 7.1 Frankreich die Ergebnisse für jeden Datensatz in zwei Versionen dargestellt. Die erste Version beinhaltet noch die Residuen der durchgeführten linearen Regressionen durch den Ursprung. In der zweiten Version wurden diese Residuen entfernt, wodurch die Abweichungen der anderen verwendeten Berechnungsverfahren vom Erwartungswert besser miteinander verglichen werden können. In den Kapiteln 7.2 Italien und 7.3 Polen wird dann ganz auf die Darstellung der Residuen der linearen Regressionen durch den Ursprung verzichtet sowie auch auf die weitere Beschreibung deren Residuen (diese werden im Anhang in Kapitel A1.1 und A1.2 dargestellt und beschrieben). Jede der Abbildungen im Kapitel 7.1 bis 7.3 ist gleich aufgebaut. Aus diesem Grund wird der Aufbau der Grafiken hier einmal allgemein erläutert, damit im Folgenden darauf verzichtet werden kann. In jeder Grafik sind die Residuen der, mit den verschiedenen Verfahren errechneten, langfristigen Windgeschwindigkeiten auf Basis der einzelnen 1-Jahresabschnitte zum Erwartungswert in m/s abgebildet. Der Erwartungswert ist dabei die mittlere Windgeschwindigkeit der gefilterten, aber nicht an die einzelnen Referenzdatensätze angepassten, 10-Minuten Daten des Messmastes. Ist der errechnete Langfristwert höher als der Erwartungswert, so ergibt sich eine positive, ist er niedriger eine negative Abweichung. Weitere abgebildete Werte in den Grafiken sind der Mittelwert, dieser stellt den Mittelwert der Residuen der einzelnen 1-Jahresabschnitte dar, und die Standardabweichung der Langfristwerte der einzelnen 1-Jahresabschnitte (das Ergebnis der Betrachtung auf Basis des Gesamtzeitraums von Messung und Referenz fließt nicht in die Standardabweichung ein). Wenn im Folgenden von Stundenmittel, Tagesmitteln oder Monatsmitteln geschrieben wird, so sind damit immer, soweit nicht anders erkennbar, die linearen Regressionen durch den Ursprung oder mit y-Achsenabschnitt gemeint, die jeweils auf Basis von Stundenmitteln, Tagesmitteln und Monatsmitteln durchgeführt worden sind und nicht die Mittelung an sich.

7.1 Frankreich

7.1.1 MERRA

In den folgenden Abbildungen 39 und 40 sind die Residuen der verwendeten Verfahren für den an die MERRA-Daten als verwendete Referenz angepassten Datensatz beschrieben. Wie einleitend erläutert unterscheiden diese beiden Grafiken sich nur darin, dass in Abb. 39 noch die Ergebnisse der linearen Regression durch den Ursprung dargestellt werden, welche in Abb. 40 weggelassen werden. Schon im Fall der MERRA-Daten als Referenz ist zu erkennen, dass die linearen Regressionen durch den Ursprung sowohl für Stundenmittel, Tagesmittel und Monatsmittel als Berechnungsgrundlage in den meisten Fällen stark von den Ergebnissen der anderen Verfahren abweicht. Aus diesem Grund werden diese Ergebnisse bei Betrachtung der Residuen auch nicht weiter berücksichtigt. Das Hauptaugenmerk liegt also auf Abb. 40 welche im Folgenden näher beschrieben wird.

Bei Betrachtung des Mittelwertes fällt auf, dass vor allem die Monatsmittel von Null abweichen. Die anderen Mittelwerte der Residuen liegen alle nahe an Null. Die Standardabweichungen der einzelnen Verfahren bewegen sich in einem Bereich von 0,05 m/s im Fall des MDP bis 0,11 m/s im Fall der Monatsmittel. Zu erkennen ist auch, dass die Standardabweichung bei den linearen Regressionen mit größer werdendem Mittelungsintervall der zugrundeliegenden Daten ansteigt. Der Abschnitt 2013/14 fällt innerhalb der einzelnen 1-Jahresabschnitte auf. In diesem Abschnitt gehen die Abweichungen von -0,03 m/s beim MDP bis zu -0,26 m/s im Fall der Monatsmittel, was im Fall des MERRA-Datensatzes die größte Abweichung aller Verfahren und deren Variationen darstellt. Alle Prognosen der Verfahren und deren Variationen sind in diesem Abschnitt geringer als der Erwartungswert. Wie in vielen 1-Jahresabschnitten liegen die Stundenmittel und Tagesmittel nahe beieinander und die Monatsmittel unterscheiden sich zum Teil deutlich von diesen beiden Variationen der linearen Regression. Die beiden Verfahren MDP und MCP liegen immer gleichzeitig über oder unter dem Erwartungswert, es gibt aber durchaus Jahresabschnitte in denen diese beiden Verfahren in der gleichen Richtung neben

dem Erwartungswert liegen, sämtliche lineare Regressionen aber eine entgegengesetzte Einschätzung des langfristigen Windes abgeben (vgl. 2009/10 oder 2011/12). Die linearen Regressionen auf Grundlage unterschiedlicher Mittelungsintervalle der Ausgangsdaten weisen zum Teil, wie oben beschrieben, starke Unterschiede zueinander auf. Dabei tendieren sie nicht immer in dieselbe Richtung, wie z.B. im Abschnitt 2012/13. Während die Stundenmittel und Tagessmittel eine zu hohe Prognose des langfristigen Windes abgeben, geben die Monatsmittel eine zu niedrige ab.

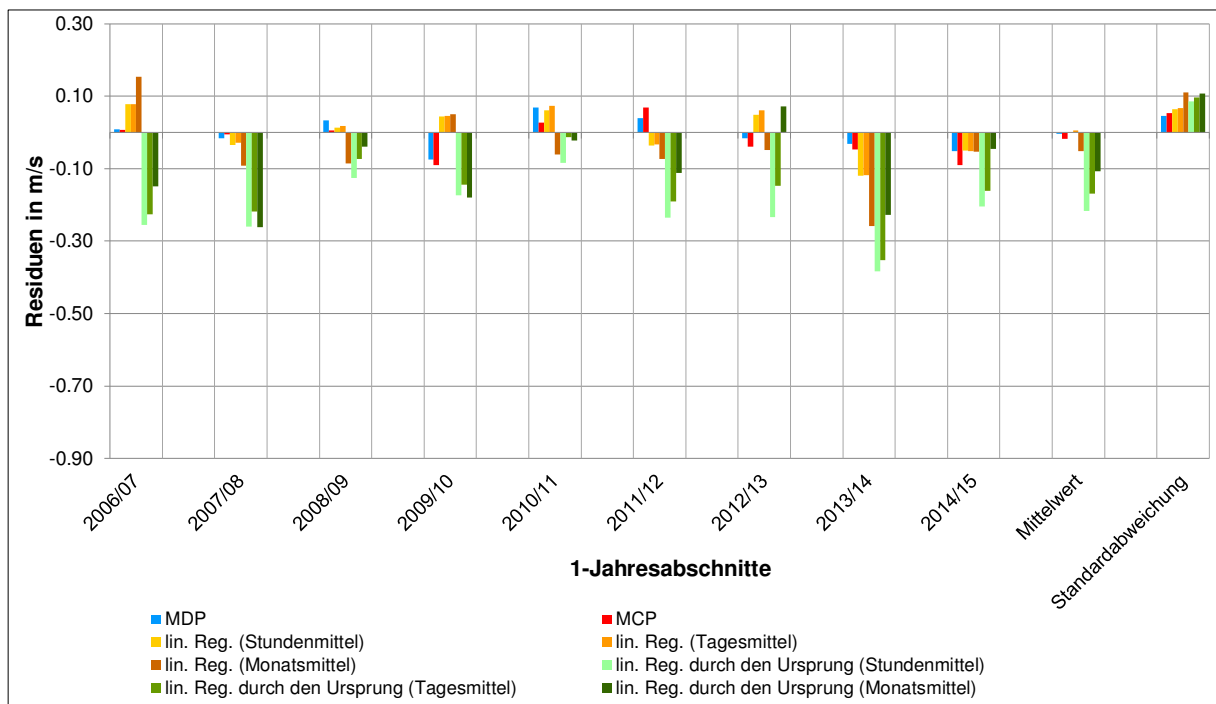


Abb. 39: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Frankreich inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

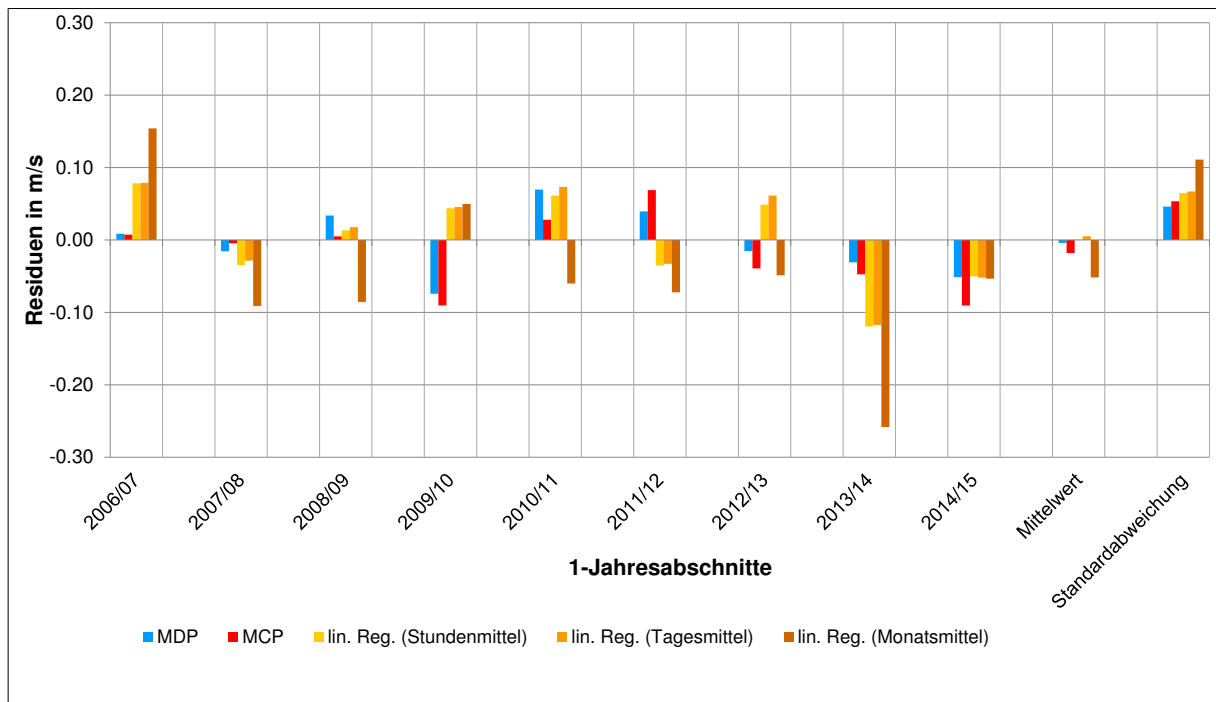


Abb. 40: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Frankreich exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.1.2 conWX

In Abb. 41 sind die Residuen der einzelnen Verfahren für den conWX-Datensatz inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung aufgezeigt. Im Fall des Mittelwertes aller Residuen der einzelnen 1-Jahresabschnitte ist besonders deutlich zu erkennen wie viel stärker die linearen Regressionen durch den Ursprung im Vergleich zu den anderen Methoden und deren Variationen vom Erwartungswert abweichen. So liegen die verschiedenen Variationen der linearen Regression durch den Ursprung in einem Bereich von $-0,17$ m/s bis $-0,07$ m/s und stellen damit dicht gefolgt von den Monatsmitteln der linearen Regression mit y-Achsenabschnitt die höchsten Residuen. Das MDP weist mit $-0,02$ m/s danach die größte Abweichung auf und liegt damit deutlich näher an Null.

In Abb. 42 sind die Abweichungen der berechneten Langfristwerte wieder ohne die linearen Regressionen durch den Ursprung aufgezeigt. Im Mittelwert liegen, bis auf die Monatsmittel, alle Verfahren nahe bei 0 m/s. Am besten liegen die Tagesmittel, in etwa gleichauf mit den Stundenmitteln, gefolgt von MCP und MDP. Die Tagesmittel

ist die einzige Berechnungsvariante deren prognostizierten Langfristwerte den langfristigen Wind im Mittel zu hoch einschätzen wobei die Abweichung von null nur sehr gering ist (unter 0,002 m/s). Die Standardabweichung der berechneten Ergebnisse liegt im Bereich von 0,07 m/s im Fall des MCP bis 0,12 m/s bei den Monatsmitteln. Wieder liegen die Stunden und Tagesmittel nahe beieinander und die Monatsmittel weichen stark ab. Wie beim MERRA-Datensatz ist auch hier wieder der 1-Jahresabschnitt 2013/14 derjenige mit den größten Abweichungen zum Erwartungswert. Auch hier fallen die Monatsmittel auf und haben mit -0,28 m/s die größte Abweichung vom Erwartungswert. Im Vergleich zum MERRA-Datensatz ist zu erkennen, dass es nicht mehr so viele Fälle gibt, in denen es innerhalb eines 1-Jahresabschnittes Verfahren oder Variationen von Verfahren gibt, welche zu hohe und gleichzeitig welche, die zu niedrige Prognosen des langfristigen Windes abgeben. Die Monatsmittel, welche sonst in den meisten Fällen am weitesten vom Erwartungswert abweichen, haben mit 2008/09 und 2010/11 zwei 1-Jahresabschnitte in denen sie deutlich besser abschneiden als die anderen Verfahren. Insbesondere im Zeitraum 2010/11, in welchem sie nur geringfügig vom Erwartungswert abweichen.

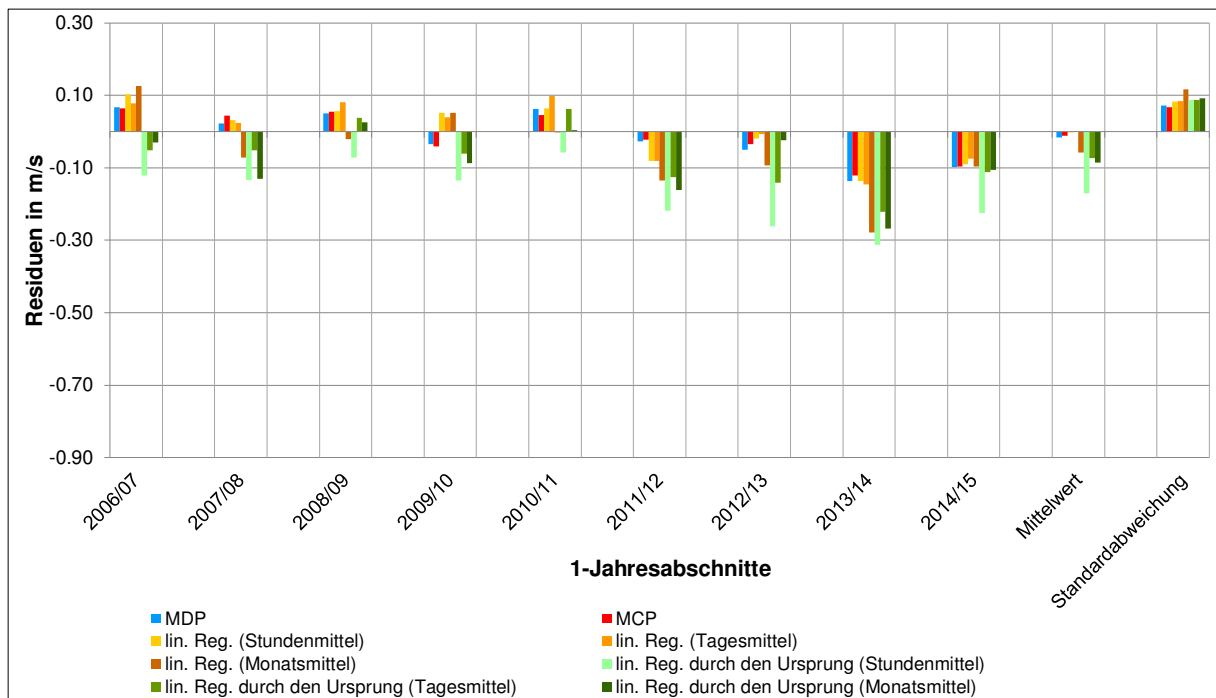


Abb. 41: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Frankreich inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

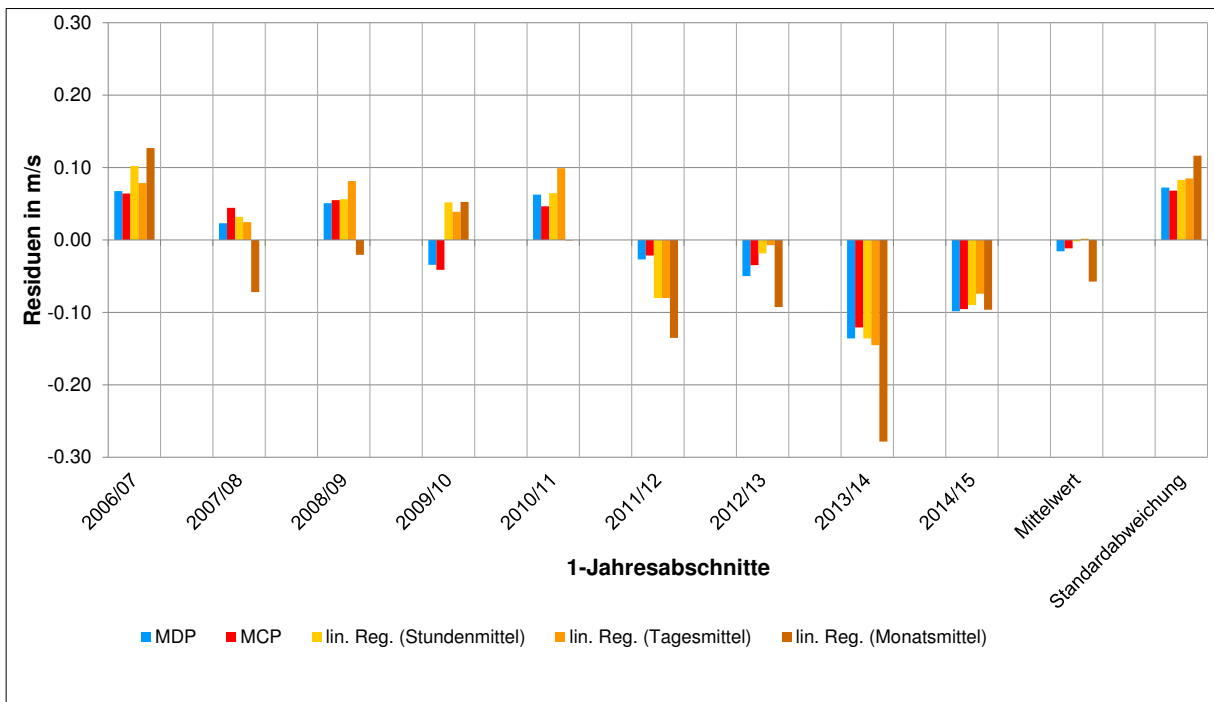


Abb. 42: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Frankreich exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.1.3 Wetterstation

In Abb. 43 sind die Residuen der einzelnen Verfahren für den Datensatz mit der Wetterstation als Referenz, inklusive der Abweichungen für die linearen Regressionen durch den Ursprung, dargestellt. In diesem Fall werden die Abweichungen der linearen Regressionen durch den Ursprung am deutlichsten. Während die anderen Verfahren den langfristigen Wind, bis auf in den Abschnitten 2006/07 und 2007/08, immer zu hoch prognostizieren, liegen vor allem die Stunden- und Tagesmittel der linearen Regression durch den Ursprung immer unter dem Erwartungswert. Die Stundenmittel weisen dabei immer die größten Abweichungen auf. Das gilt insbesondere im Abschnitt 2006/07, in welchem sie die größte Abweichung aller Berechnungen mit -0,85 m/s aufweisen. Zugleich ist das in diesem Fall auch die größte Abweichung aller Verfahren und Variationen der Verfahren über alle 1-Jahresabschnitte hinweg. Die Tagesmittel liegen bei diesen Regressionsverfahren häufig noch am dichtesten am Erwartungswert mit Ausnahme der ersten beiden 1-Jahresabschnitte. Im Gegensatz zu den Tagesmitteln und Stundenmitteln liegen die Monatsmittel nur in den ersten beiden Abschnitten unter

dem Erwartungswert, so wie die meisten anderen Verfahren und deren Variationen auch, danach liegen sie wie diese jeweils über dem Erwartungswert. Die linearen Regressionen durch den Ursprung weisen auch bei der Standardabweichung wieder die größten Werte auf. Diese befinden sich in einem Bereich zwischen 0,17 m/s und 0,25 m/s. Auffällig ist wieder, insbesondere bei den linearen Regressionen durch den Ursprung, der Anstieg der Standardabweichung mit größer werdendem Mittelungsintervall der Basisdaten.

In Abb. 44 wurden die Abweichungen der linearen Regressionen durch den Ursprung wieder entfernt. Wie schon erwähnt ist auffällig, dass, bis auf in den ersten beiden 1-Jahresabschnitten, alle Verfahren und deren Variationen durchweg den langfristigen Wind zu hoch prognostizieren. Auch sind die Abweichungen in diesem Fall noch deutlich größer als im Fall der beiden MERRA- und der conWX-Datensätze. Während bei diesen beiden Referenzen die Mittelwerte der Abweichungen, bis auf wenige Ausnahmen, alle nahe an 0 m/s liegen, liegen hier alle Verfahren, bis auf die lineare Regression auf Basis von Tagesmitteln, im Mittel um mehr als 0,10 m/s neben dem Erwartungswert. Die Tagesmittel sind, mit im Mittel 0,07 m/s, am dichtesten am Erwartungswert. Die Standardabweichungen befinden sich in einem Bereich von 0,06 m/s bis 0,13 m/s und sind damit ähnlich wie bei den zwei MERRA- und conWX-Datensätzen. Die geringste Standardabweichung weist das MDP auf, welches 2007/08 als einziges Verfahren den langfristigen Wind zu hoch prognostiziert, während alle anderen Verfahren, und deren Variationen, in diesem Zeitraum unter dem Erwartungswert liegen. Auch im Abschnitt 2006/07 prognostiziert das MDP den langfristigen Wind deutlich zu hoch, ähnlich wie die Stundenmittel, welche diesen auch zu hoch prognostizieren. In diesen beiden Fällen ist das MCP am dichtesten am Erwartungswert. In den anderen 1-Jahresabschnitten liegt häufig das MDP am dichtesten am Erwartungswert. Wie auch bei den beiden auf MERRA- und conWX-Daten basierenden Datensätzen ist wieder Abschnitt 2013/14 der Abschnitt mit den größten Abweichungen. So befinden sich hier die Ergebnisse der Berechnungen in einem Bereich von 0,20 m/s bis 0,29 m/s neben dem Erwartungswert, wobei die Tagesmittel die geringsten Residuen aufweisen.



Abb. 43: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Wetterstationsdatensatz des Standortes Frankreich inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

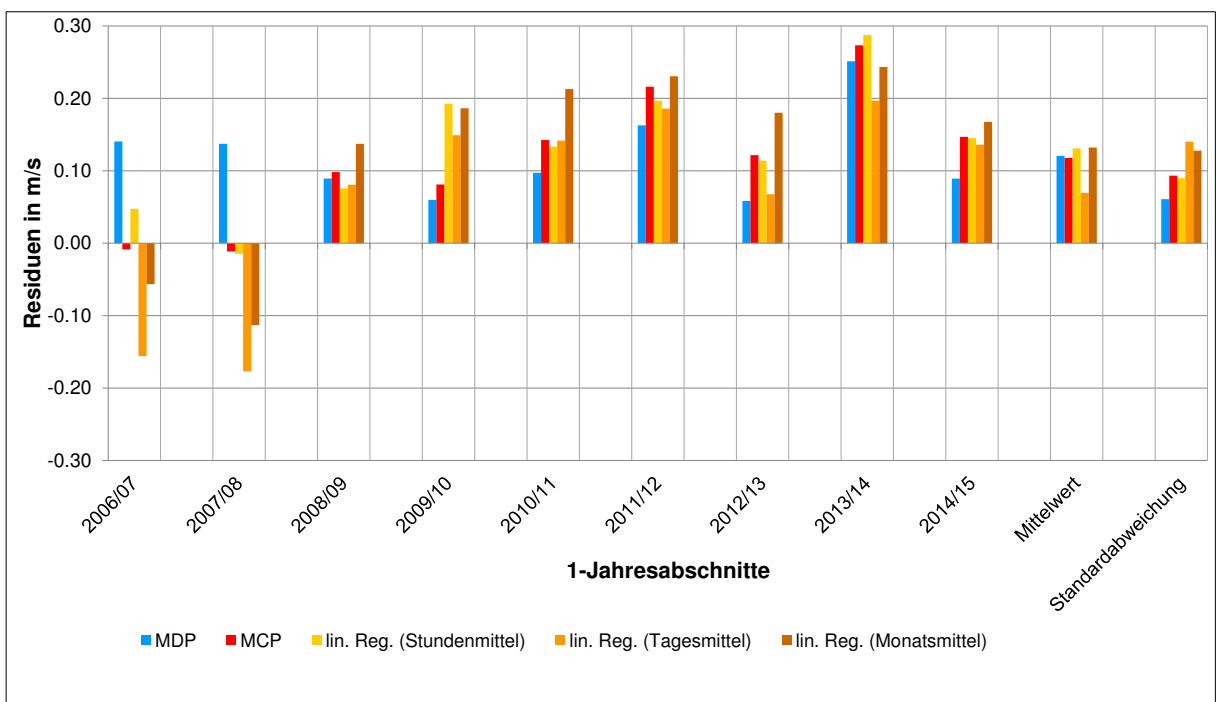


Abb. 44: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Wetterstationsdatensatz des Standortes Frankreich exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.2 Italien

7.2.1 MERRA

In der Abb. 45 sind die Residuen der berechneten langfristigen Windgeschwindigkeiten, wie oben beschrieben, ohne die Abweichungen der linearen Regressionen durch den Ursprung (Anhang Kapitel A1.1.1) für den MERRA-Datensatz dargestellt. Im Mittelwert weisen alle Verfahren und deren Variationen nur sehr geringe Abweichungen vom Erwartungswert auf. So liegt hier das MDP als Verfahren mit der im Mittel größten Abweichung bei 0,03 m/s. Alle anderen Verfahren und deren Variationen weisen dagegen noch sehr viel geringere Abweichungen von 0 m/s auf, welche erst in der dritten bzw. vierten Nachkommastelle signifikant werden. Bei Betrachtung der Standardabweichungen der berechneten Ergebnisse aller 1-Jahresabschnitte ist zu erkennen, dass das MDP und MCP nahe beieinanderliegen. So verhält sich das auch bei den linearen Regressionen, die allerdings mit 0,19 m/s eine größere Standardabweichung aufweisen als MDP und MCP mit jeweils 0,13 m/s. Der 1-Jahresabschnitt mit den größten Abweichungen vom Erwartungswert ist der Abschnitt 2011/12. Dies gilt zumindest für die linearen Regressionen, welche in allen drei Variationen, bei mehr als 0,30 m/s Abweichung, nahe beieinanderliegen. Das MDP (0,11 m/s) und das MCP (0,06 m/s) liegen hier deutlich besser. Ein umgekehrtes Bild zeigt sich im Abschnitt 2012/13. Hier sind MDP und MCP mit 0,18 m/s bzw. 0,19 m/s nahe beieinander, jedoch deutlich schlechter als die linearen Regressionen, die auch alle nahe beieinander, bei knapp unter 0,10 m/s Abweichung, liegen. Auffällig ist der Abschnitt 2009/10 in welchem alle berechneten langfristigen Windgeschwindigkeiten der verschiedenen Berechnungsvarianten geringer als der Erwartungswert sind. Alle weisen eine Abweichung vom Erwartungswert von etwa -0,22 m/s auf. Generell gibt es im Unterschied zum Standort im Frankreich deutlich weniger Fälle, in denen es innerhalb eines 1-Jahresabschnittes Langfristwerte gibt, welche über dem Erwartungswert und gleichzeitig welche die unter dem Erwartungswert liegen.

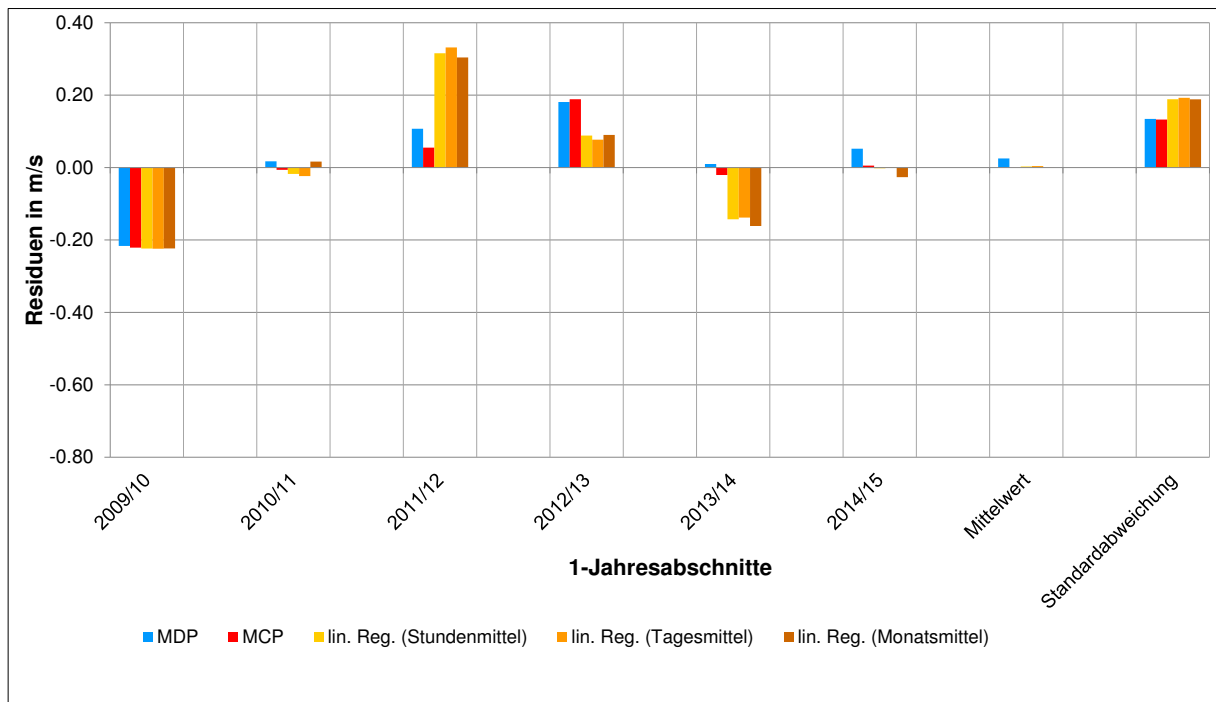


Abb. 45: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Italien exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.2.2 conWX

Die Residuen der Berechnungen für den conWX-Datensatz ohne die linearen Regressionen durch den Ursprung (Anhang Kapitel A1.1.2) sind in Abb. 46 dargestellt. Hier liegen alle Verfahren beim Mittelwert der Residuen, mit einer maximalen Abweichung von 0,01 m/s im Fall der Monatsmittel, sehr nahe am Erwartungswert. Generell sind die Abweichungen im Fall des conWX-Datensatzes geringer als im Fall des MERRA-Datensatzes. Dies gilt gleichzeitig auch für die Standardabweichung. Im Fall des conWX-Datensatzes liegen diese in einem Bereich von 0,09 m/s bis 0,13 m/s. Wieder sind dabei MDP und MCP nahe beieinander und dabei besser als die linearen Regressionen, die aber auch dicht beieinanderliegen. Auch hier ist der 1-Jahresabschnitt 2011/12 derjenige, der die größten Abweichungen vom Erwartungswert aufweist, wobei es erneut große Unterschiede zwischen MDP und MCP sowie den linearen Regressionen gibt. Die Residuen der linearen Regressionen ähneln sich wieder, jedoch weisen sowohl MDP als auch MCP deutlich niedrigere Abweichungen vom Erwartungswert auf als die linearen Regressionen. Entgegengesetzt zum MERRA-Datensatz liegt in diesem Fall das

MDP (0,06 m/s) besser als das MCP (0,08 m/s). Wie beim MERRA-Datensatz zeigt sich 2012/13 wieder ein umgekehrtes Bild in welchem die beiden Verfahren MDP und MCP wieder ähnlich liegen, aber schlechter als die drei linearen Regressionen. Während beim MERRA-Datensatz 2013/14 MDP und MCP noch sehr nahe an 0 m/s liegen, so weichen sie beim conWX-Datensatz mit knapp weniger als 0,10 m/s stärker vom Erwartungswert ab. Innerhalb des conWX-Datensatzes gibt es keinen 1-Jahresabschnitt in welchem deutlich wird, dass es Verfahren oder Variationen von Verfahren gibt, deren Prognose über und gleichzeitig welche, deren Prognose unter dem Erwartungswert liegt. Der einzige Abschnitt in welchem dies ansatzweise der Fall ist, ist 2010/11. In diesem liegen die berechneten langfristigen Winde aller Verfahren und deren Varianten über dem Erwartungswert, bis auf das MDP, welches den langfristigen Wind zu niedrig berechnet. Allerdings liegt in diesem Fall die Abweichung des MDP vom Erwartungswert nahezu bei 0 m/s (Abweichung von 0 m/s erst in der fünften Nachkommastelle).

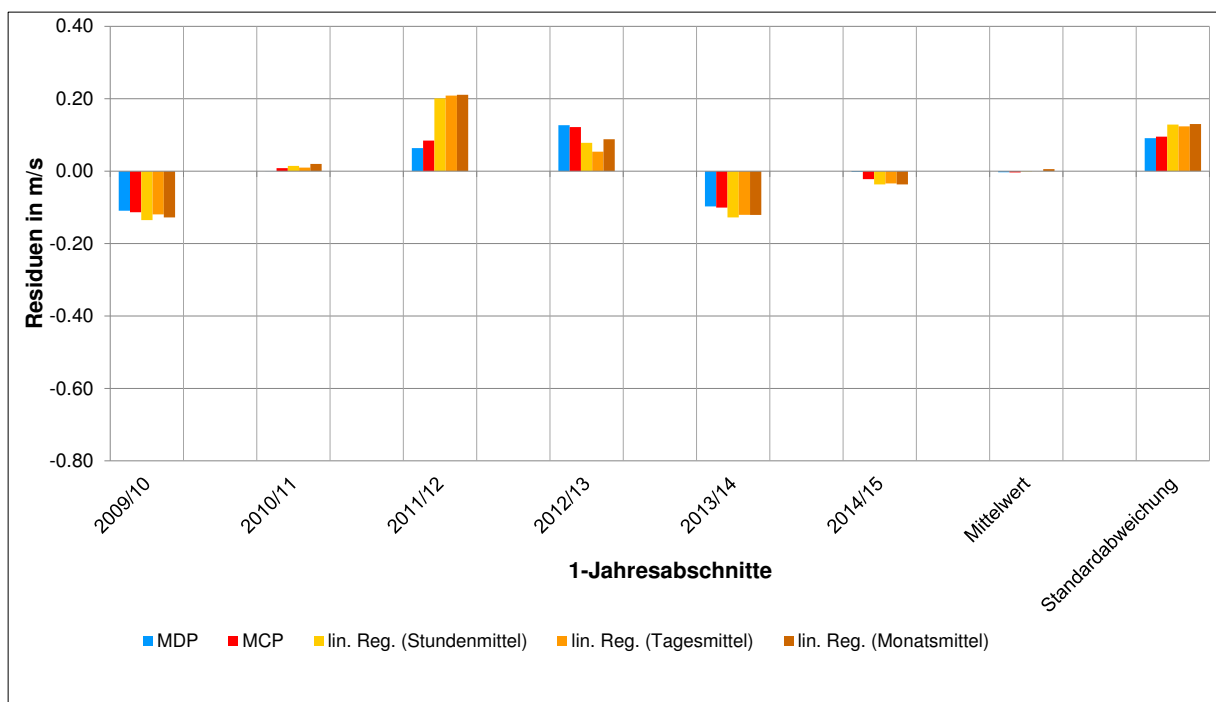


Abb. 46: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Italien exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.2.3 Zweite Messung

In Abb. 47 sind die Residuen der einzelnen Verfahren und deren Variationen für den Datensatz der zweiten Messung als Referenz ohne die linearen Regressionen durch den Ursprung (Anhang Kapitel A1.1.3) dargestellt. Im Mittelwert der Abweichungen liegen alle Verfahren sehr nahe an 0 m/s. Die größte Abweichung weist die lineare Regression auf Basis von Monatsmitteln mit 0,01 m/s auf. Die Standardabweichungen unterscheiden sich im Vergleich zu den beiden anderen Referenzdatensätzen. So gibt es nicht mehr den Unterschied zwischen MDP und MCP sowie den linearen Regressionen. Im Fall des Datensatzes der zweiten Messung als Referenz sind die Standardabweichungen in allen Fällen in etwa gleich groß. Die einzige, die etwas abweicht, ist die der Stundenmittel. Insgesamt bewegen sich die Standardabweichungen in einem Bereich von 0,08 m/s bis 0,10 m/s. Damit sind sie die geringsten für den Standort Italien. Insgesamt befinden sich die maximalen Residuen der einzelnen 1-Jahresabschnitte in einem Bereich von -0,12 m/s bis 0,15 m/s. Auch dies ist die geringste Spannweite der Abweichungen für den Standort Italien. In den einzelnen 1-Jahresabschnitten gibt es aber einige Unterschiede zu den zwei MERRA- und conWX-Datensätzen. Zwar ist wieder der Abschnitt 2011/12 derjenige, welcher die größten Abweichungen zum Erwartungswert aufweist, jedoch unterscheidet er sich in diesem Fall insoweit von den anderen beiden Referenzen, dass es nicht mehr den deutlichen Unterschied zwischen den linearen Regressionen sowie MDP und MCP gibt. Die einzelnen Verfahren und deren Variationen bewegen sich in einem Bereich von 0,09 m/s bis 0,14 m/s und weisen damit nicht nur die geringste Spannweite für diesen 1-Jahresabschnitt im Vergleich mit den Datensätzen, denen die MERRA-Daten bzw. conWX-Daten zugrunde liegen, auf, sondern die Abweichung für das MDP ist jetzt der Abweichung der linearen Regressionen deutlich ähnlicher als der Abweichung des MCP, welches die geringste Abweichung vom Erwartungswert aufweist. Auch der Abschnitt 2012/13 unterscheidet sich von demselben Abschnitt der beiden MERRA- und conWX-Datensätze. Während in diesen beiden Fällen eine deutliche Trennung zwischen den linearen Regressionen und MDP sowie MCP vorlag, mit den niedrigeren Abweichungen bei den linearen Regressionen, so gibt es diese Trennung der Verfahren nicht mehr. MDP und MCP sind zwar immer noch sehr nahe

beieinander, allerdings liegen die linearen Regressionen jetzt nicht mehr dicht beieinander. Es gibt unter ihnen deutliche Unterschiede, wobei die Abweichung vom Erwartungswert geringer wird mit größer werdendem Mittelungsintervall. Auffällig ist in diesem Fall auch der Abschnitt 2014/15 in dem die linearen Regressionen nur sehr geringe Residuen aufweisen aber sowohl MDP und MCP den langfristigen Wind zu hoch prognostizieren.

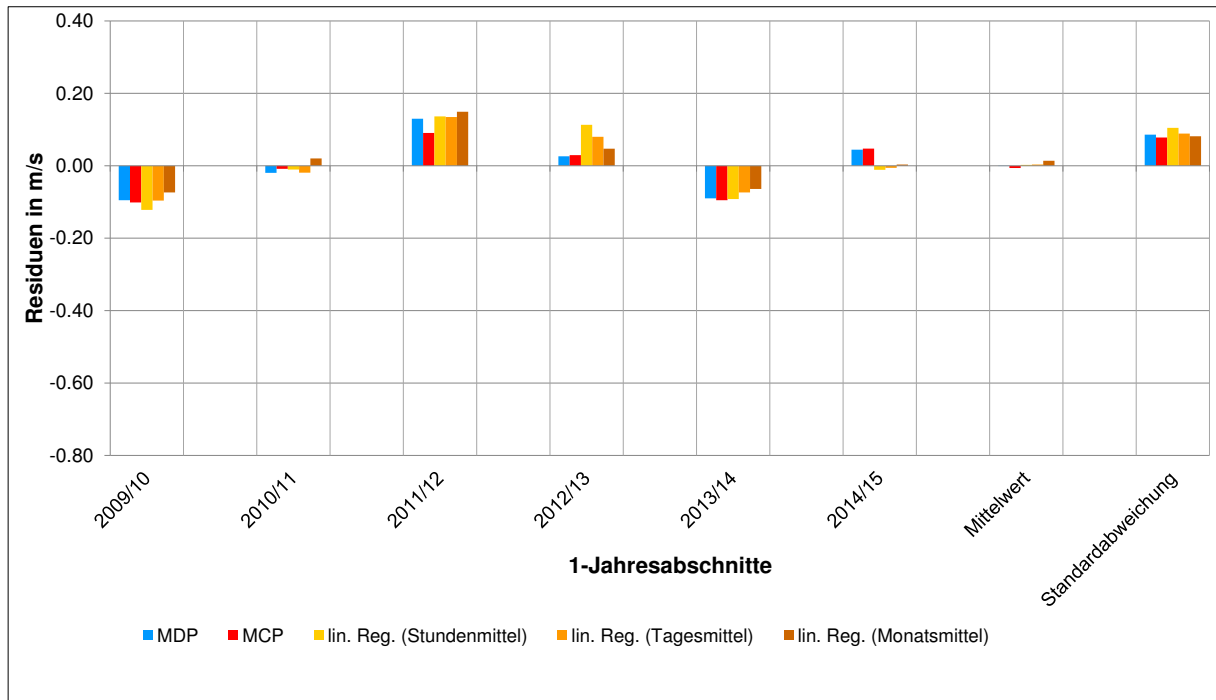


Abb. 47: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Datensatz der zweiten Messung des Standortes Italien exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.3 Polen

7.3.1 MERRA

In Abb. 48 sind die Residuen der einzelnen 1-Jahresabschnitte für den MERRA-Datensatz am Standort Polen mit Mittelwert und Standardabweichung aller verwendeten Verfahren und deren Variationen aufgezeigt. Nicht abgebildet sind die linearen Regressionen durch den Ursprung (Anhang Kapitel A1.2.1). Im Mittelwert der Residuen der einzelnen 1-Jahresabschnitte ist, ähnlich wie am Standort Italien,

zu erkennen, dass alle Verfahren und deren Variationen dicht an 0 m/s liegen. Die Spannweite der mittleren Abweichungen geht von 0,01 m/s bis -0,03 m/s und ist damit nicht weit gestreut. Die Standardabweichungen liegen in einer Spannweite von 0,03 m/s (MDP) bis 0,07 m/s (Monatsmittel) und sind damit die geringsten aller Standorte und Referenzgrundlagen. Wieder ist zu erkennen, dass MDP und MCP mit 0,03 m/s bzw. 0,04 m/s recht dicht beieinanderliegen und sich deutlich von den linearen Regressionen unterscheiden, welche mit Werten zwischen 0,06 m/s und 0,07 m/s wiederum dicht beieinanderliegen. Auch die Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte befinden sich alle in einem, im Vergleich mit den anderen Standorten, recht kleinem Bereich von -0,11 m/s (Monatsmittel im Zeitraum 2012/13) bis 0,12 m/s (Stundenmittel im Zeitraum 2011/12). Wieder sind es also die linearen Regressionen, welche die größten Abweichungen vom Erwartungswert aufweisen. Wie am Standort Italien gibt es auch hier wieder wenige Fälle, in denen es Prognosen gibt, welche den langfristigen Wind zu hoch und gleichzeitig welche, die ihn zu niedrig prognostizieren. Wenn dies passiert, passiert dies in Jahren, die generell eine gute Prognose mit maximal 0,05 m/s Abweichung vom Erwartungswert aufweisen. Wie oben erwähnt ist 2011//12 der Zeitraum, welcher die maximale Abweichung aufweist. Diese stammt von der linearen Regression auf Basis von Stundenmitteln. Die linearen Regressionen liegen in diesem 1-Jahresabschnitt wieder nahe beieinander, wobei die Residuen mit größer werdendem Mittelungsintervall aber geringer werden. Am besten liegt hier das MCP mit einer Abweichung von 0,003 m/s gefolgt vom MDP mit 0,04 m/s.

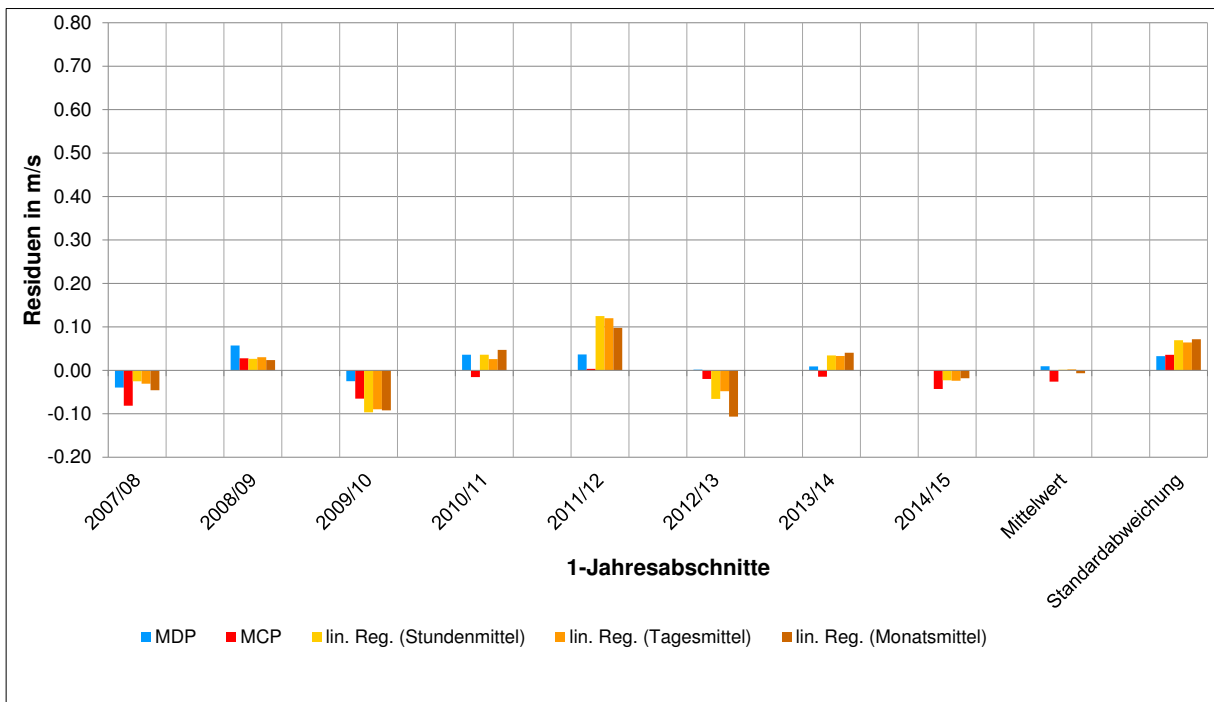


Abb. 48: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Polen exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.3.2 conWX

Abb. 49 zeigt die Residuen der berechneten langfristigen Windgeschwindigkeiten für den conWX-Datensatz ohne die linearen Regressionen durch den Ursprung (Anhang Kapitel A1.2.2). Die mittlere Abweichung jedes Verfahrens, bzw. deren Variationen, liegt in einem sehr kleinen Bereich von 0,01 m/s (MDP) bis -0,004 m/s (Monatsmittel). Die Standardabweichungen der berechneten Langfristwerte hingegen sind größer als im Fall des MERRA-Datensatzes. Sie liegen in einem Bereich von 0,05 m/s im Fall des MCP und 0,10 m/s bei den Stundenmitteln. Wieder liegen MDP und MCP mit 0,06 m/s und 0,05 m/s Standardabweichung nahe beieinander, während die linearen Regressionen mit 0,08 m/s bis 0,10 m/s höhere Standardabweichungen aufweisen. Bei den linearen Regressionen ist erkennbar, dass die Standardabweichung mit größer werdendem Mittelungsintervall abnimmt. Die maximalen Abweichungen der einzelnen Verfahren liegen in einem Bereich von -0,15 m/s im Fall der Stundenmittel im Zeitraum 2009/10, bis 0,13 m/s im Fall der Stundenmittel im Zeitraum 2011/12. Ähnlich wie beim MERRA-Datensatz sind im Zeitraum 2011/12 die linearen Regressionen deutlich schlechter als MDP und MCP.

Die Residuen werden mit größer werdendem Mittelungsintervall der zugrundeliegenden Daten geringer. Der Unterschied ist, dass im Fall des conWX-Datensatzes MDP und MCP deutlich näher beieinanderliegen als beim MERRA-Datensatz. Dort weicht das MDP noch mit 0,04 m/s etwas stärker vom Erwartungswert ab als das MCP. Im Fall des conWX-Datensatzes aber weisen nun sowohl MDP als auch MCP Residuen auf, die erst in der dritten Nachkommastelle von 0 m/s abweichen. Auffällig ist auch die große Ähnlichkeit der Abweichungen aller Verfahren und deren Variationen in den Zeiträumen 2009/10 und 2012/13. Auch hier weisen sowohl MDP als auch MCP deutlich geringerer Abweichungen vom Erwartungswert auf als die linearen Regressionen. Deren Residuen werden mit größer werdendem Mittelungsintervall der Basisdaten wieder geringer. Wieder gibt es nur wenige Fälle, in denen es gleichzeitig Verfahren oder Variationen von Verfahren, gibt, deren Berechnungsergebnisse des langfristigen Windes unterhalb und welche, deren Berechnungsergebnisse im gleichem Zeitraum oberhalb des Erwartungswertes sind. Der Zeitraum 2013/14 sticht hier hervor, da in diesem Fall sowohl die Prognose des MDP als auch des MCP zu hoch ausfällt, gleichzeitig die der linearen Regressionen zu niedrig. Die Spannweite der Residuen ist mit -0,04 m/s (Monatsmittel) bis 0,03 m/s (MDP) in diesem Fall nicht besonders groß.

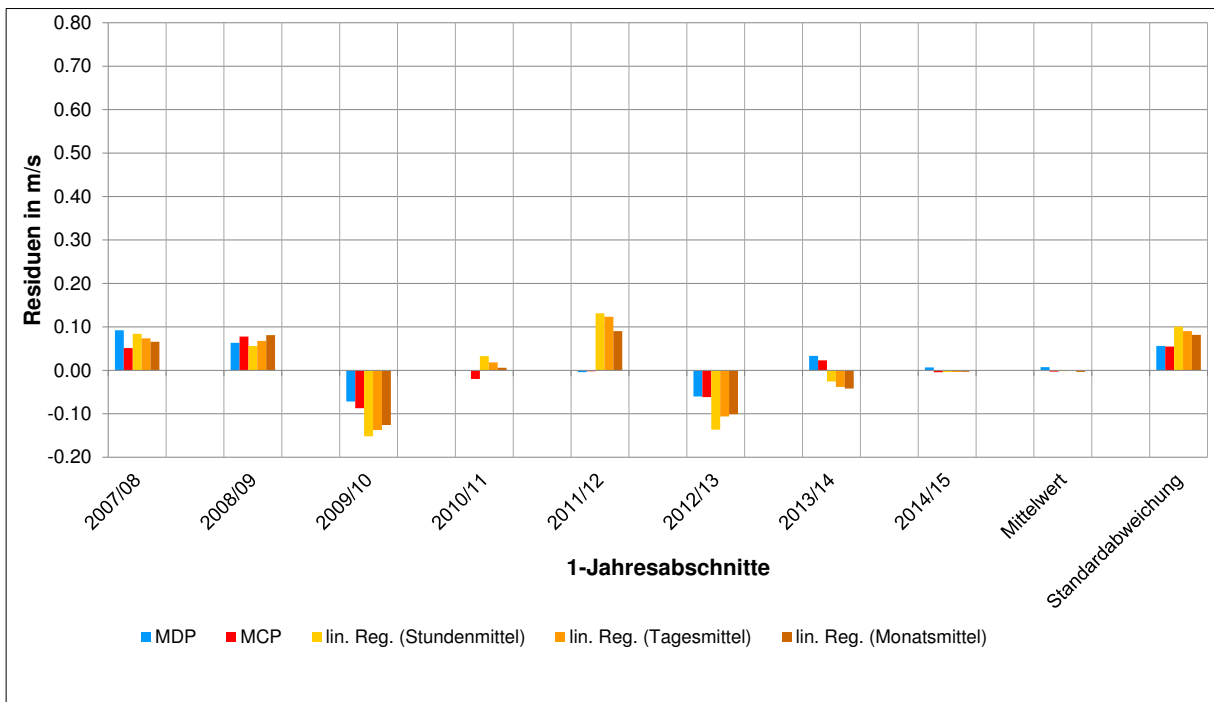


Abb. 49: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Polen exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.3.3 Wetterstation

In Abb. 50 sind die Residuen der berechneten langfristigen Windgeschwindigkeiten aller Verfahren und deren Variationen, ohne die linearen Regressionen durch den Ursprung (Anhang Kapitel A1.2.3), für den Wetterstationsdatensatz aufgetragen. Es ist ein deutlicher Unterschied zu den auf MERRA- und den conWX-Daten basierenden Datensätzen (Abb. 48 und 49) zu erkennen. Alle Ergebnisse der Verfahren und deren Variationen befinden sich oberhalb des Erwartungswertes und das zum großen Teil sehr deutlich. Während die Tagesmittel im Mittel um 0,28 m/s vom Erwartungswert abweichen, weichen MDP und MCP im Mittel schon um 0,39 m/s ab, die Stundenmittel um 0,40 m/s und die Monatsmittel mit 0,46 m/s am stärksten. Somit sind die mittleren Abweichungen der errechneten langfristigen Windgeschwindigkeit im Vergleich aller Standorte und Referenzen in diesem Fall am größten. Dies zieht sich auch beim Betrachten der Standardabweichungen weiter durch. Die Standardabweichungen liegen in einem Bereich von 0,16 m/s (Tagesmittel und MCP) bis 0,20 m/s im Fall der Stundenmittel. Damit liegen die Standardabweichungen ebenfalls auf dem höchsten Niveau aller betrachteten

Standardabweichungen. Im Fall der Standardabweichungen gibt es aber nicht mehr den deutlichen Unterschied zwischen den Abweichungen der Tagesmittel und sämtlichen anderen Berechnungsvarianten. Diese liegen relativ gleichmäßig in der genannten Spannweite verteilt. Dieser zum Teil sehr deutliche Unterschied zwischen den Tagesmitteln und den anderen Verfahren und deren Variationen zeigt sich aber in jedem 1-Jahresabschnitt. In jedem dieser Zeiträume weisen die Tagesmittel die geringste Abweichung zum Erwartungswert auf und das häufig mit deutlichem Abstand zu den Residuen der weiteren Berechnungen. Insgesamt weisen die Abweichungen aller Verfahren eine Spannweite von 0,11 m/s (Tagesmittel im Zeitraum 2014/15) bis 0,72 m/s (Monatsmittel im Zeitraum 2013/14) auf. Der Zeitraum 2009/10 fällt besonders auf, da es in diesem Fall eine deutliche Abweichung der Monatsmittel vom Erwartungswert gibt. Während alle Verfahren und deren Variationen in einem Bereich von 0,13 m/s bis 0,20 m/s liegen, weisen die Monatsmittel in diesem Zeitraum mit 0,52 m/s eine deutlich größere Abweichung vom Erwartungswert auf. Der Zeitraum mit den größten Abweichungen ist der Zeitraum 2013/14 mit Abweichungen von 0,58 m/s (Tagesmittel) bis 0,72 m/s (Monatsmittel). Auch in diesem Fall liegen die Tagesmittel also besser als die anderen Verfahren, bzw. deren Variationen, deren Spannweite von 0,62 m/s (MCP) bis 0,72 m/s geht. Im Fall des MERRA- und conWX-Datensatzes war der Zeitraum 2013/14 noch einer mit den geringsten Abweichungen vom Erwartungswert.

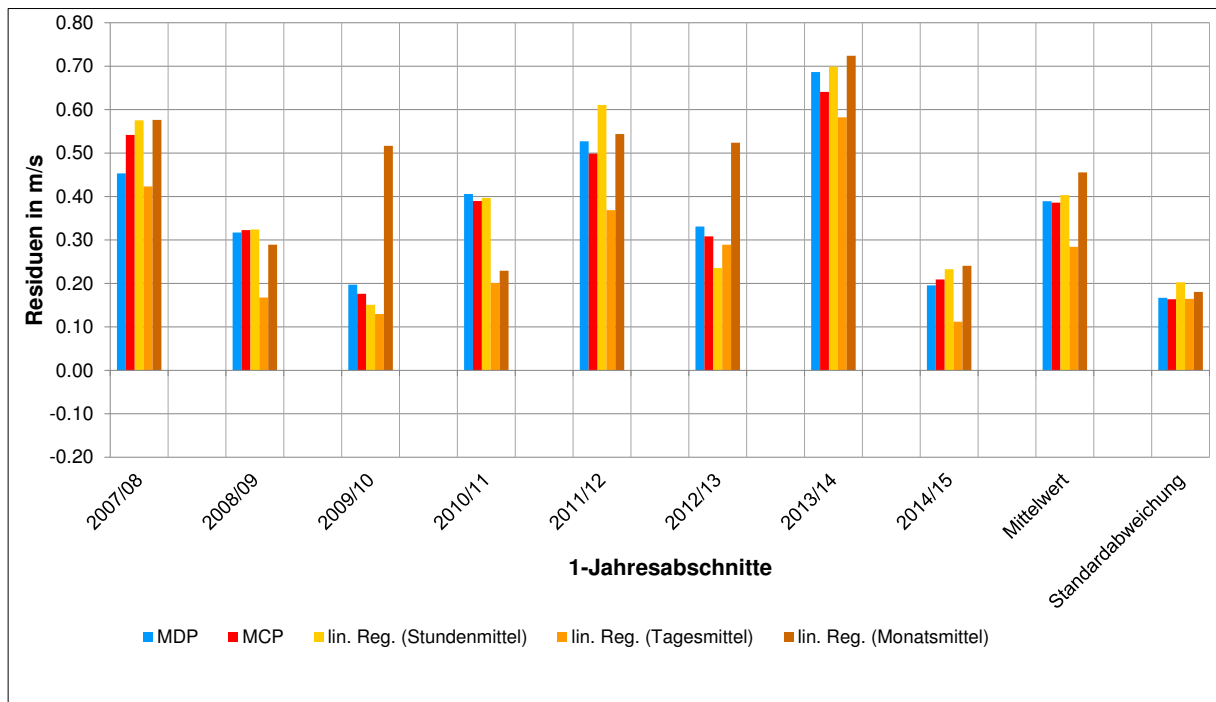


Abb. 50: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Wetterstationsdatensatz des Standortes Polen exklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

7.4 Gesamtzeitraum

In diesem Kapitel werden die Abweichungen der einzelnen Methoden vom Erwartungswert, wenn sowohl Messung als auch Referenz über den gesamten zur Verfügung stehenden Zeitraum genutzt werden um einen Zusammenhang dieser Daten zu finden, betrachtet. In diesem Fall werden also alle zur Verfügung stehenden Daten als Berechnungsgrundlage genutzt. Dies führt dazu, dass die Abweichung vom Erwartungswert Null sein muss, solange die Methoden in sich konsistent arbeiten. Hier gibt es wieder vor allem bei den linearen Regressionen durch den Ursprung deutliche Abweichungen (vgl. Abb. 51). Die anderen Berechnungsverfahren, inklusive der verschiedenen linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt, weisen, mit Ausnahme der Wetterstationen in Frankreich und Polen, vergleichsweise geringe Abweichungen auf. In diesen Fällen ist auffällig, dass insbesondere MDP, MCP und die linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt (vor allem die Stundenmittel), bei Betrachtung des Gesamtzeitraumes der Wetterstation in Polen (vgl. Abb. 51), in etwa gleich weit von Null abweichen. Das gilt auch für die Wetterstation in Frankreich, auch wenn die Abweichungen in diesem Fall geringer

sind als im Fall der Wetterstation in Polen. Die folgenden Aussagen beziehen sich daher nur auf die MERRA- und conWX-Datensätze. Über alle Standorte und Referenzen hinweg liegen sowohl MDP als auch die lineare Regression mit y-Achsenabschnitt auf Basis von Stundenmitteln immer bei einer Abweichung zwischen 0 m/s und 0,001 m/s. Das MCP weicht einmal um -0,01 m/s (Frankreich-MERRA) und einmal um -0,03 m/s (Polen-MERRA) ab. Die lineare Regression mit y-Achsenabschnitt auf Grundlage von Tagesmitteln bewegt sich in einem Bereich von maximal 0 m/s bis 0,002 m/s. Deutlichere Unterschiede gibt es bei der linearen Regression über Monatsmittel, die vor allem in Frankreich mit -0,06 m/s neben dem Erwartungswert liegt, ansonsten aber keine großen Residuen aufweist.

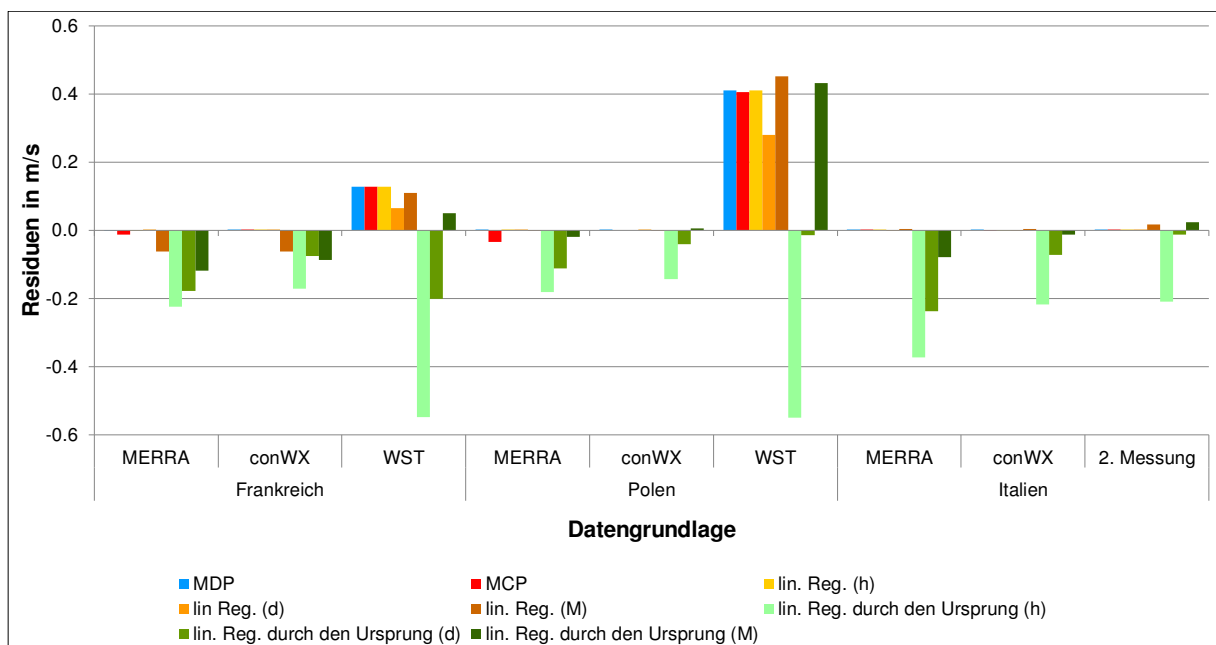


Abb. 51: Residuen Gesamtzeitraum für alle Standorte und Referenzen.

7.5 RMSE

Auf die Ergebnisse der Berechnungen des RMSE, die in Abb. 52 dargestellt sind, soll im Folgenden näher eingegangen werden.

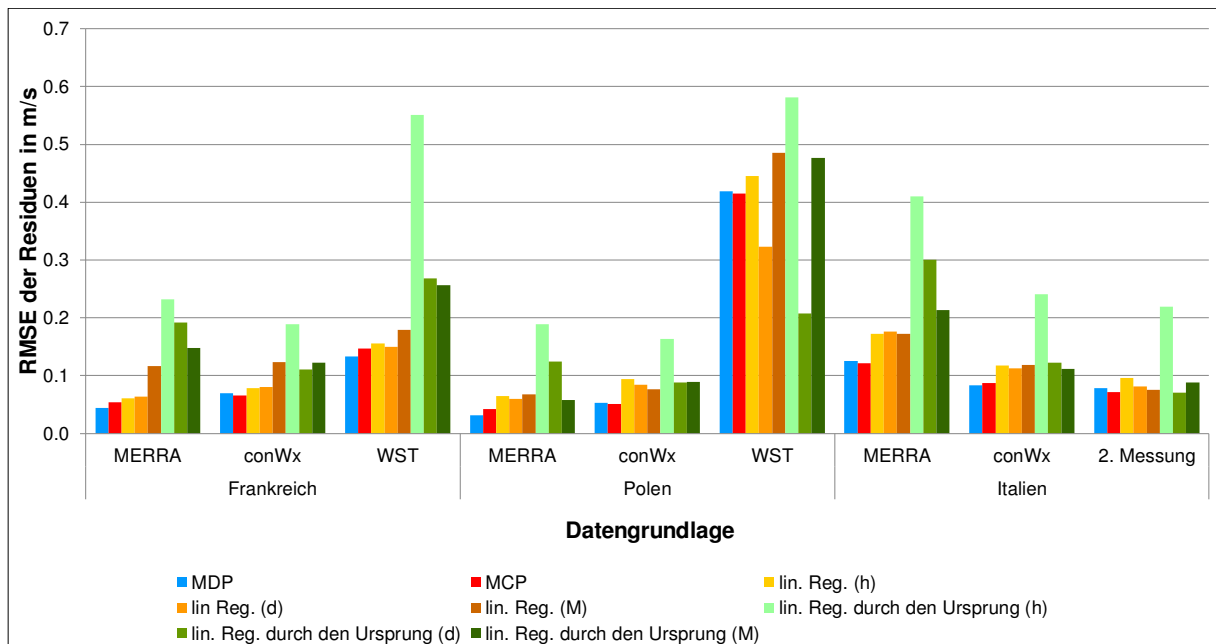


Abb. 52: RMSE der Residuen als Maß für die Streuung um null.

Wie zu Beginn von Kapitel 7 schon erwähnt, weisen die linearen Regressionen durch den Ursprung häufig so starke Abweichungen vom Erwartungswert auf, dass sie aus Gründen der Übersichtlichkeit in der grafischen Darstellung der Residuen nicht weiter berücksichtigt worden sind. Dieser Eindruck bestätigt sich auch in der Darstellung des RMSE (Abb. 52). Dort werden die linearen Regressionen durch den Ursprung in verschiedenen Grüntönen dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass von allen verwendeten Berechnungsvarianten die lineare Regression durch den Ursprung mit Stundenmitteln die Variante ist, welche die größten Streuungen um den Nullpunkt aufweist. Generell ist es so, dass der RMSE bei den linearen Regressionen durch den Ursprung mit größer werdendem Mittelungsintervall der Grunddaten häufig kleiner wird. So weisen bei Betrachtung der linearen Regression durch den Ursprung die Monatsmittel häufig den geringsten RMSE und damit die geringste Streuung, innerhalb dieser Form der linearen Regression, um den Nullpunkt auf. Im Regelfall

weisen die linearen Regressionen durch den Ursprung jedoch einen höheren RMSE auf, als die linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt. Bei Betrachtung der beiden linearen Regressionsvarianten mit den jeweils gleichen Mittelungsintervallen der zu Grunde liegenden Daten, ist der deutlichste Unterschied bei den Stundenmitteln zu sehen. Schon dadurch bedingt, dass die lineare Regression durch den Ursprung auf Basis von Stundenmitteln die Prognosen mit den durchgängig höchsten RMSE aufweisen, liegt der RMSE der linearen Regression mit y-Achsenabschnitt auf Basis von Stundenmitteln in jeden Fall niedriger als der RMSE der linearen Regression durch den Ursprung. Auch bei den linearen Regressionen mit Tagesmitteln ist zu erkennen, dass die lineare Regression durch den Ursprung einen höheren RMSE und damit eine größere Streuung um Null aufweist. Ausnahmen in diesem Fall sind die Wetterstation in Polen und die zweite Messung in Italien. So deutlich ist das bei den Monatsmitteln nicht. Hier gibt es mehrere Fälle, in denen die lineare Regression durch den Ursprung einen geringeren RMSE als die lineare Regression mit y-Achsenabschnitt aufweist und umgekehrt. Jedoch ist es so, dass, wenn die lineare Regression durch den Ursprung eine geringe Schwankung der Residuen aufweist, sich diese in einem geringeren Maße von der linearen Regression mit y-Achsenabschnitt unterscheidet als umgekehrt.

Die Standort-Referenz-Kombination, welche die größte Streuung um Null aufweist, ist die Kombination der Messung in Polen mit der dort verwendeten Wetterstation. Auffällig ist hier, dass es zwei lineare Regressionsvariationen gibt, welche mit Abstand den geringsten RMSE aufweisen. Hierbei handelt es sich um die beiden linearen Regressionen auf Basis von Tagesmitteln. Die lineare Regression durch den Ursprung liegt in diesem Fall nochmal besser als die lineare Regression mit y-Achsenabschnitt.

Wie in dem oben beschriebenen Fall liegen die Tagesmittel allgemein im Vergleich der linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt auf einem eher geringen RMSE Level. In Bezug auf diese Streuung um den Nullpunkt gibt es, bis auf den beschriebenen Ausnahmefall, in welchem die Tagesmittel die deutlich geringste Streuung um Null aufweisen, keine großen Unterschiede zwischen den Stunden- und den Tagesmitteln. Häufig weisen die Tagesmittel sogar einen niedrigeren RMSE auf als die Stundenmittel.

Die linearen Regressionen durch den Ursprung zeigen, bei allgemeiner Betrachtung des RMSE, ein deutlich inhomogeneres Bild als die linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt. Während der RMSE der linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt insbesondere in Italien und Polen (mit Ausnahme der Wetterstation als Referenz in Polen) nahe beieinanderliegt und in Frankreich nur die Monatsmittel etwas stärker abweichen, zeigen sich bei den linearen Regressionen durch den Ursprung deutlich größere Unterschiede.

Die beiden Verfahren MDP und MCP weisen die geringsten RMSE auf. Insbesondere in Italien und in Polen liegen die beiden Verfahren in Bezug auf den RMSE sehr nahe beieinander. Etwas deutlichere Abweichungen der Verfahren gibt es in Frankreich und beim MERRA-Datensatz in Polen. Werden diese etwas genauer betrachtet ist zu erkennen, dass, wenn das MDP einen geringeren RMSE aufweist, dieser weitaus geringer ist, als im umgekehrten Fall, wenn das MCP einen geringeren RMSE aufweist.

8. Diskussion

Bei Betrachtung der Abbildungen 39 bis 50 ist zu erkennen, dass es kein Verfahren oder eine Variation der Verfahren gibt, welches in jedem Fall das beste Ergebnis liefert. Gibt es eine Berechnungsvariante, welche in einem 1-Jahresabschnitt die geringste Abweichung vom Erwartungswert aufweist, so kann es sein, dass diese Variante im nächsten 1-Jahresabschnitt die größte Abweichung aufweist. Ein Beispiel für so einen Fall ist in Abb. 49 zu finden. Während in dem 1-Jahresabschnitt 2013/14 das MDP noch die geringste Abweichung vom Erwartungswert aufweist, so weist es im Abschnitt 2014/15 die größte Abweichung auf. Es gibt also schon in den Berechnungen für einen Standort mit einem Referenzdatensatz, Unterschiede in den einzelnen 1-Jahresabschnitten darin, welches Verfahren, bzw. welche Variation des Verfahren, das Ergebnis liefert, das die geringsten Abweichungen zum Erwartungswert aufweist. Dies zieht sich über alle Standorte und Referenzen hinweg. Bei Betrachtung der Standardabweichung kann nur eine Aussage getroffen werden inwieweit die Residuen um ihren Mittelwert schwanken, aber nicht über deren Größe. Dies zeigt sich z. B. in Abb. 50, in der die Standardabweichung der linearen Regression auf Basis von Tagesmitteln ungefähr so groß ist, wie die von MDP und MCP, jedoch in jedem 1-Jahresabschnitt geringere Residuen aufweist. Um eine Einschätzung zu erhalten, welches der Verfahren am zuverlässigsten funktioniert, wurde also der RMSE betrachtet (vgl. Kapitel 7.5). Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der RMSE Berechnungen Bezug genommen.

Die linearen Regressionen durch den Ursprung weisen häufig einen sehr großen RMSE auf und schwanken damit stark um Null. Diese Variante der linearen Regression geht allgemein davon aus, dass, wenn an dem für die Berechnung verwendeten Referenzstandort die Windgeschwindigkeit 0 m/s beträgt, diese zum gleichen Zeitpunkt auch am Standort der Messung vorherrscht. Diese Annahme stimmt jedoch nicht. Schon durch die Entfernung von Messposition und Referenzposition zueinander gibt es diverse Einflüsse, wie beispielsweise Geländeeffekte oder meteorologische Einflüsse, die zu unterschiedlichen, am jeweiligen Standort vorherrschenden, Windbedingungen führen. Da der RMSE der Residuen der linearen Regressionen durch den Ursprung im Fall der MERRA-

Datensätze (bei getrennter Betrachtung von Stunden-, Tages-, und Monatsmitteln) in fast allen untersuchten Fällen größer ist als der der conWX-Datensätze, scheinen diese Einflüsse bei den conWX-Daten als Referenz weniger auszumachen als bei den MERRA-Daten. Dafür spricht, dass durch das kleinere Raster der conWX-Daten (vgl. Kapitel 6.1.2.1 und 6.1.2.2) die Bedingungen am Standort besser wiedergegeben werden als durch das gröbere Raster der MERRA-Daten, da weniger geographische Merkmale auf die Daten Einfluss nehmen als bei einem größeren Raster.

Die insgesamt höchsten RMSE treten im Fall der Wetterstation in Polen auf. Dort verhält es sich so, dass hier nur eine sehr geringe Datenverfügbarkeit vorliegt. Diese Daten fehlen nicht gleichmäßig verteilt, sondern überwiegend im Zeitraum zwischen 20 Uhr und 6 Uhr. So liegt die Datenverfügbarkeit in der Zeitspanne zwischen 20 Uhr und 6 Uhr bei unter 80 % und Tagsüber bei über 80 %, geht aber nie über 86 % hinaus (vgl. Abb. 31). Hinzu kommt, dass zu Beginn der Aufzeichnungen die Windgeschwindigkeiten in ganzen Metern pro Sekunde erfolgt sind, sich dies jedoch geändert hat. Durch diese Änderung kam eine Nachkommastelle hinzu, welche aber alles andere als gleichmäßig verteilt ist. So tritt zum Beispiel die eins als mit Abstand häufigste Nachkommastelle auf. Dies hat zumindest Einfluss auf das MDP, da dieses die Windgeschwindigkeit in 1 m/s breite Klassen unterteilt unter der Annahme, dass die Nachkommastellen gleichmäßig verteilt sind. Die hier vorliegende ungleichmäßige Verteilung der Nachkommastellen kann also dazu führen, dass einzelne Klassen zu stark oder zu schwach gewichtet werden. Somit ergibt sich für die Berechnungen des MDP ein anderer Mittelwert dieser Referenzdaten als durch die Daten selbst (das MDP rechnet mit 3,78 m/s, der eigentliche Mittelwert der Daten ist aber 3,87 m/s). Würde als Erwartungswert nicht der Mittelwert der 10-Minuten Daten der Messung genommen werden, sondern der Mittelwert der an die Wetterstation angepassten Daten, mit denen die Berechnung durchgeführt worden ist, so würden die Tagesmittel einen höheren RMSE aufweisen als die meisten anderen Berechnungsvarianten. Nur die linearen Regressionen durch den Ursprung auf Basis von Stundenmitteln und Tagesmitteln würden einen größeren RMSE aufweisen als die lineare Regression mit y-Achsenabschnitt auf Basis von Tagesmitteln und das obwohl die Tagesmittel die beste Korrelation der verschiedenen Mittelungsintervalle zwischen Referenz und Messung aufweisen.

Dass die verschiedenen linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt in Bezug auf den RMSE deutlich näher beieinander liegen als die linearen Regressionen durch den Ursprung deutet darauf hin, dass die linearen Regressionen durch den Ursprung sensibler auf die ihnen zugrundeliegenden Daten reagieren als die linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt.

Im Regelfall liegen die RMSE des MDP und MCP nahe beieinander. Anders als beim MCP gibt es beim MDP aber Fälle, in denen das MDP einen erkennbar geringeren RMSE aufweist als das MCP. Liegt das MCP geringer als das MDP, so ist dies stets nur knapp. Diese Tatsache spricht dafür, dass mit dem MDP eine zuverlässigere Aussage bezüglich des langfristig zu erwarteten Windes getroffen werden kann als mit dem MCP. In fünf der neun untersuchten Fälle weist das MCP zwar einen geringeren RMSE auf als das MDP, jedoch ist der RMSE im besten Fall nur 0,007 m/s geringer. Das MDP liegt im besten Fall mit 0,013 m/s unter dem MCP, also deutlich besser als im umgekehrten Fall. Das Ziel dieser beiden Verfahren ist es einen genaueren Zusammenhang zwischen Messposition und Referenzposition herzustellen, als das durch eine reine lineare Regression möglich ist. Während bei den linearen Regressionen die vorherrschende Windrichtung nicht weiter betrachtet wird, so spielt diese sowohl beim MDP als auch beim MCP eine wichtige Rolle. Das MCP geht davon aus, dass es für jede Kombination von Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Referenzstandort eine Windgeschwindigkeit am Messstandort gibt (vgl. Kapitel 5.1.2). Aus diesem Grund werden die Daten nach der Windrichtung am Referenzstandort in Sektoren eingeteilt und für jeden Sektor eine eigene lineare Regression mit y-Achsenabschnitt durchgeführt. Es ergibt sich also für jeden einzelnen Sektor ein Langfristwert, welcher, je nach der Häufigkeit des Auftretens der Windrichtung in diesem Sektor, im Vergleich zu den anderen Sektoren gewichtet wird. Auf diese Weise werden die vorherrschenden Windbedingungen besser abgebildet, als durch eine einfache lineare Regression, da hier der Hauptwindrichtungssektor stärker gewichtet wird als ein Sektor, der nur selten auftritt. Dies ist wichtig, da die vorherrschende Windgeschwindigkeit an einem Standort auch von der Windrichtung abhängt und sich die somit erhaltenen sektoral erwarteten, langfristigen Windgeschwindigkeiten um mehrere ganze m/s unterscheiden können. Das MDP geht in der Hinsicht noch einen Schritt weiter als das MCP. Hier wird nicht nur die Windrichtung am Referenzstandort betrachtet, sondern auch die

Windrichtung am Messstandort. Es wird also davon ausgegangen, dass für jede Kombination von Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Referenzstandort mehrere verschiedene Kombinationen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Messstandort vorliegen können, welche in verschiedene Matrizen aufgeteilt werden (vgl. Kapitel 5.1.3). Es werden also mehrere, voneinander verschiedene, vorkommende Situationen betrachtet als beim MCP. Diese Matrizen werden dann gewichtet und aufsummiert. Auf diese Weise ergibt sich eine langfristige Häufigkeitsverteilung am Standort aus der dann die langfristig zu erwartende Windgeschwindigkeit folgt.

Neben der Betrachtung des RMSE wurde noch eine weitere Betrachtung durchgeführt um die generelle Eignung der einzelnen Verfahren und deren Variationen festzustellen. Dabei handelt es sich um die Betrachtung für den Fall, dass sowohl für die Messdaten als auch für die Referenzdaten der gesamte Analysezeitraum dazu genutzt wird einen Zusammenhang der Daten zu erstellen, wie es sonst mit den 1-Jahresabschnitten der Fall ist. Die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 7.4 dargestellt. Die auch bei dieser Betrachtung auffällig großen Abweichungen vom Erwartungswert im Fall der linearen Regressionen durch den Ursprung sprechen dafür, dass diese nicht für den in dieser Arbeit untersuchten Anwendungsbereich geeignet sind. Die großen Abweichungen aller Berechnungen bei den Wetterstationen, insbesondere in Polen, sind dadurch zu erklären, dass die Referenzen hier eine geringe Verfügbarkeit hatten, so dass sich das auf die Daten der Messung insofern ausgewirkt hat, dass die Verfügbarkeit der Messdaten in Zusammenhang mit der Wetterstation als Referenz deutlich geringer ist als bei den Messdaten an sich. Die somit geringere Verfügbarkeit der Messdaten führt dazu, dass der Mittelwert der Messung über alle zur Verfügung stehenden Daten geringer ist, als der Mittelwert der Messdaten, wenn nur die Daten, welche in diesem Fall in die Berechnung eingeflossen sind, betrachtet werden. Dadurch wird auch erklärt, warum alle Verfahren und deren Variationen (bis auf die linearen Regressionen durch den Ursprung) durchweg den langfristigen Wind in diesem Fall zu hoch prognostizieren (vgl. Abb. 50), aber mit Ausnahme der linearen Regression mit y-Achsenabschnitt trotzdem nahe beieinander liegen. Die Abweichungen bei allen Verfahren inklusive deren Variationen, außer den linearen Regressionen durch den Ursprung, sind so gering, dass sie nicht auf Fehler innerhalb der

Berechnungsmethode zurückzuführen, sondern in den zugrundeliegenden Daten zu suchen sind. So wurden bei den Monatsmitteln Monate mit geringen Verfügbarkeiten gelöscht, wodurch, ähnlich wie bei den Wetterstationen, sich die Datenlage der Messung geändert hat. Durch die, in den meisten Fällen, großen Residuen der linearen Regressionen durch den Ursprung ergibt sich wieder, dass die linearen Regressionen durch den Ursprung für den hier betrachteten Zweck nicht geeignet sind.

Wie gut die einzelnen Methoden funktionieren, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu zählen unter anderem die Datenqualität der Messung und der Referenzdaten sowie die Standortbeschaffenheit. Umso komplexer ein Standort ist, desto schwieriger ist es, insbesondere für die einfachen linearen Regressionen, eine gute Prognose zu erzeugen, da die Unterschiede zwischen dem Standort der Referenz und dem Standort der Messung mit zunehmender Komplexität größer und ein Zusammenhang der Daten immer geringer wird. Für einen solchen Fall sind Methoden wie das MCP und vor allem das MDP besser geeignet, da sie mehr Faktoren berücksichtigen als die einfachen linearen Regressionen. Worauf aber auch die aufwendigeren Methoden keinen Einfluss haben, ist die Qualität der Daten, insbesondere der Datenverfügbarkeit. In den in dieser Arbeit untersuchten Fällen ist diese vor allem am Standort Frankreich und bei der Wetterstation in Polen problematisch, da in diesen Fällen die Datenverfügbarkeit bei unter 90 % liegt, in Polen sogar unter 80 % (vgl. Tabelle 1 und 5). Diese Daten wurden in dieser Arbeit dennoch verwendet, da es nicht darum geht eine möglichst genaue Prognose der langfristigen Windverhältnisse zu erreichen, sondern die Methoden miteinander zu vergleichen. Da alle Methoden mit der jeweils gleichen Datengrundlage durchgerechnet worden sind, ist von dem Standpunkt auszugehen, dass auch der Einfluss fehlender Daten auf alle Methoden gleich ist. In Italien hat sich die zweite Messung als die Referenz erwiesen, bei der sich die geringsten Streuungen der Ergebnisse um den Nullpunkt ergeben. Dies ist der Fall obwohl die zweite Messung die am weitesten vom eigentlichen Messstandort entfernte Referenz ist, was dafür spricht, dass die Datenqualität, die bei einer Mastmessung im Regelfall relativ hoch ist, ein wichtiger Einflussfaktor ist. Dass die RMSE im Fall der beiden Wetterstationsdatensätze in Frankreich und Polen deutlich größer sind als bei den anderen Referenzen am Standort liegt an der im Vergleich zu den MERRA- und

conWX-Datensätzen niedrigeren Verfügbarkeit der Daten und Qualität (z. B. sind bei der Wetterstation in Polen die Angaben zu Beginn nur in ganzen m/s Schritten erfolgt und als Nachkommastellen angegeben wurden, zeigte sich dass diese sehr ungleichmäßig verteilt sind). Durch die Anpassung der Daten auf gleiche Zeiträume stehen bei niedriger Verfügbarkeit der Referenzdaten auch weniger Daten am Messstandort zur Verfügung. Der Erwartungswert jedoch bildet sich für jede Referenz an einem Standort dadurch gleich, dass der Erwartungswert der Mittelwert aller vorhandenen 10-Minuten Daten der Messung ist. Würde für jede Referenz ein eigener Erwartungswert, aus den jeweils für den Datensatz zur Verfügung stehenden Messdaten, gebildet, so würden die Schwankungen geringer werden. Dies wurde in diesem Fall aber nicht gemacht, da der Mittelwert aller im Gesamtzeitraum vorhanden 10-Minuten Daten der Wert ist, der dem real langfristig zu erwartenden Wind am wahrscheinlichsten nahekommt. Ein weiterer Punkt ist, dass es fraglich ist welchen Einfluss die Korrelation der Daten auf die Berechnungen im Endeffekt hat. Eine hohe Korrelation der Daten bedeutet, dass es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Daten gibt. Dies sollte bedeuten, dass mit einer höheren Korrelation auch geringere Abweichungen der Ergebnisse vom Erwartungswert zu erreichen sind. Es gibt aber immer wieder Fälle in denen dies nicht der Fall ist. Ein Beispiel für einen solchen Fall findet sich am Standort Italien beim MERRA-Datensatz (Abb. 45). Bei Betrachtung der Abweichungen für die Abschnitte 2009/10, 2011/12 und 2013/14 fällt auf, dass es zwischen den Abschnitten 2009/10 und 2013/14 deutliche Unterschiede gibt. Im Abschnitt 2009/10 sind die Abweichungen vom Erwartungswert erkennbar größer als im Abschnitt 2013/14. Dies gilt insbesondere für das MDP und MCP. In beiden Abschnitten liegt eine Korrelation von 0,33 (über die Stundenmittel gebildet) vor und eine Datenverfügbarkeit von 99,99 %. Der Abschnitt 2011/12 hat im Vergleich der drei Abschnitte insbesondere bei den linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt die größten Abweichungen. Sowohl MDP und MCP weichen zwar nicht so stark ab, wie 2009/10 aber deutlich stärker als 2013/14 und das obwohl die Korrelation in diesem Fall mit 0,41 die beste aller 1-Jahresabschnitte, in Bezug auf den MERRA-Datensatz, am Standort ist. Zusätzlich liegt mit 99,94 % auch eine hohe Verfügbarkeit vor. Die beste Korrelation über alle Standorte und Referenzen hinweg beträgt für einen einzelnen 1-Jahresabschnitt 0,77. Daraus ergibt sich, dass die Korrelationen zwischen Messdaten und Referenzdaten generell sehr schlecht sind. Dadurch fällt ein

Vergleich mit Berechnungsergebnissen basierend auf hohen Korrelationen weg, was eine Einschätzung des tatsächlichen Einflusses der Korrelation auf die Berechnungen schwierig bis unmöglich macht. Es gibt bei zwei Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit Auffälligkeiten. Dazu gehört zum Einen die Häufigkeitsverteilung der Wetterstation in Frankreich (vgl. Abb. 18) und zum Anderen die Häufigkeitsverteilung der zweiten Messung in Italien (vgl. Abb. 28). Woran diese Auffälligkeiten liegen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht endgültig geklärt werden. Mögliche Begründungen dafür wurden mit Herrn Schwartz persönlich besprochen und werden im Folgenden dargestellt. Besonders unerwartet ist die Häufigkeitsverteilung der Wetterstation in Frankreich. Dadurch, dass in beiden Fällen die Auffälligkeiten konsistent in jedem 1-Jahresabschnitt so auftreten, wie im dargestellten Gesamtzeitraum auch, spielen sie für die in dieser Arbeit durchgeführte Untersuchung keine große Rolle, da diese Häufigkeitsverteilungen für alle Verfahren und deren Variationen gelten. Die Häufigkeitsverteilung in Italien ist zwar auffällig, jedoch muss sie nicht zwingend falsch sein. Es gibt durchaus Situationen in denen eine solche Häufigkeitsverteilung, z. B. durch Kaltluftabflüsse oder ähnliche Phänomene, vorkommen kann. Für die Wetterstation in Frankreich gibt es auf den ersten Blick keine Erklärung. Es kommt bei Wetterstationsdaten häufig vor, dass die Daten bearbeitet werden (etwa verschiedene Umrechnungen der Einheiten verbunden mit Rundungen der Messwerte oder ähnliches), sodass die Auffälligkeiten erklärt werden könnten.

Neben der zuverlässigsten Vorhersage des langfristig zu erwartenden Windes kann es noch andere Gründe geben sich für eines der hier betrachteten Verfahren zu entscheiden. So hat jedes Verfahren seine Vor- und Nachteile. Die linearen Regressionen in beiden untersuchten Varianten sind sehr einfach umzusetzen und erlauben eine langfristige Zeitreihe am Standort zu generieren. Dies geschieht aber nur auf Basis der Windgeschwindigkeiten. So gibt es keine Informationen über die langfristige Windrichtungsverteilung, da diese bei der linearen Regression nicht betrachtet wird. Beim MCP wird die am Standort vorherrschende Windrichtung auf den Messstandort übertragen und es wird eine Einteilung nach Windrichtungssektoren vorgenommen. Dieses Verfahren ist also aufwendiger als eine einfache lineare Regression, ermöglicht aber immer noch das Generieren einer langfristigen Zeitreihe. Eine Information über die langfristige Windrichtungsverteilung

wird aber auch bei diesem Verfahren nicht erreicht. Das MDP hebt sich am deutlichsten von den hier betrachteten Verfahren ab. Es betrachtet die vorherrschenden Bedingungen was Windrichtung und Windgeschwindigkeit angeht am genauesten. Dadurch, dass das MDP diese Bedingungen aber in mehrere Matrizen überführt, ist es nicht mehr möglich eine langfristige Zeitreihe am Standort zu generieren, da bei diesem Schritt die zeitliche Information verloren geht. Die Vorteile des MDP in dieser Hinsicht liegen vielmehr darin, dass direkt eine langfristige Häufigkeitsverteilung am Standort zu erhalten ist (bei den anderen Methoden kann über die Zeitreihe eine Häufigkeitsverteilung erstellt werden) und insbesondere darin, dass auch eine langfristig zu erwartende Windrose am Standort generiert werden kann. Dies ist mit den anderen Methoden nicht möglich.

9. Fazit

Aus den in dieser Arbeit durchgeführten Analysen der unterschiedlichen Verfahren und deren Variationen wird deutlich, dass die linearen Regressionen durch den Ursprung, unabhängig davon auf welcher Datenbasis (Stunden-, Tages-, oder Monatsmittel) diese durchgeführt worden sind, nicht dafür geeignet sind eine Einschätzung des mittleren, langfristig zu erwartenden, Windes abzugeben. Genügt eine grobe Einschätzung, so ist die lineare Regression mit y-Achsenabschnitt, insbesondere auf Basis von Stunden- oder Tagesmittel, durchaus ein Verfahren mit dem ausreichend gute Ergebnisse erzielt werden können. Ist das Ziel jedoch eine möglichst zuverlässige Aussage über den mittleren, langfristig zu erwartenden, Wind zu erhalten, so sollte das MDP oder das MCP Verfahren gewählt werden. Beide Verfahren liefern Ergebnisse deren Schwankungen der Residuen um Null sich nur sehr gering voneinander unterscheiden und zudem geringer sind als bei den anderen untersuchten Verfahren. Welches dieser beiden Verfahren zu wählen ist hängt dann insbesondere davon ab, welche Informationen im Endeffekt zusätzlich erlangt werden sollen. Ist es das Ziel am Ende eine langfristige Zeitreihe am Messstandort zu generieren, muss das MCP gewählt werden, da dieses beim MDP nicht möglich ist. Ist es aber das Ziel nach den Berechnungen direkt eine langfristige Häufigkeitsverteilung am Messstandort zu erhalten (beim MCP kann diese über die Zeitreihe generiert werden) und zusätzlich noch eine langfristig zu erwartende Windrose am Messstandort, so ist das MDP das Verfahren, welches gewählt werden muss. Das Generieren einer langfristigen Windrose ist mit dem MCP Verfahren nicht möglich.

10. Literaturverzeichnis

BURKSCHAT, MARCO, CRAMER, ERHARD, KAMPS, UDO (2012): Beschreibende Statistik. Grundlegende Methoden der Datenanalyse, 2. Auflage, Berlin (Springer-Verlag).

FÖRDERGESELLSCHAFT WINDENERGY UND ANDERE ERNEUERBARE ENERGIEN (FGW) (Hrsg.) (2014): Technische Richtlinien für Windenergieanlagen. Teil 6 Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen, Revision 9, Berlin.

RIENECKER, MICHELE M. et al. (2011): NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, in: Journal of Climate, Vol. 24, No. 14, S. 3624 – 3648.

10.1 Internetquellen

BARNSTON, ANTHONY G. (1992): Correspondence among the Correlation, RMSE, and Heidke Forecast Verification Measures; Refinement of the Heidke Score, Washington: DC (Climate Analysis Center, NMC/NWS/NOAA); abrufbar unter: <http://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Barnston,%20Anthony%20G.,%201992.pdf> [14.08.2017].

EMD International A/S (ohne Jahr): EMD CONWX MESO SCALE EUROPE, Aalborg; URL: http://www.emd.dk/files/windpro/DE_EMD_ConWx_Mesoscale%20Europe.pdf [14.08.2017].

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) [2015]: NNDC Climate Data Online; URL: <https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd> [14.08.2017].

SCHWARTZ, HERBERT (2016): The measure-distribute-predict (MDP) method, Oldershausen: abrufbar unter: http://www.anemos-jacob.de/download/MDP_17.11.2016_aj.pdf [14.08.2017].

THØGERSEN, MORTEN LYBECH, MOTTA, MAURIZIO, SØRENSEN, THOMAS (ohne Jahr): Measure-Correlate-Predict Methods: Case Studies and Software Implementation, Aalborg; URL: http://www.emd.dk/files/windpro/Thoegersen_MCP_EWEC_2007.pdf [14.08.2017].

Anhang

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	A I
1. Abbildungsverzeichnis.....	A II
A1 Lineare Regressionen durch den Ursprung	A 1
A1.1 Italien	A 1
A1.1.1 MERRA.....	A 1
A1.1.2 conWX.....	A 2
A1.1.3 Zweite Messung.....	A 3
A1.2 Polen	A 4
A1.2.1 MERRA.....	A 4
A1.2.2 conWX.....	A 6
A1.2.3 Wetterstation.....	A 7

1. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Italien inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung	S. A 2
Abb. 2	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Italien inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung	S. A 3
Abb. 3	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Datensatz der zweiten Messung des Standortes Italien inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung	S. A 4
Abb. 4	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Polen inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.	S. A 5
Abb. 5	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Polen inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung	S. A 6
Abb. 6	Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Wetterstationsdatensatz des Standortes Polen inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung	S. A 8

A1 Lineare Regressionen durch den Ursprung

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich im Wesentlichen mit den verschiedenen Variationen der linearen Regression durch den Ursprung. Wenn von Stunden-, Tages- oder Monatsmitteln die Rede ist, dann sind immer die jeweiligen Variationen der verschiedenen linearen Regressionen gemeint.

A1.1 Italien

A1.1.1 MERRA

In Abbildung #A1 sind die Residuen der berechneten Langfristwerte vom Erwartungswert inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung für den MERRA-Datensatz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die linearen Regressionen durch den Ursprung häufig erheblich schlechtere Ergebnisse aufweisen, als die anderen Verfahren und deren Variationen. Insbesondere fallen die Zeiträume 2010/11 und 2014/15 auf. Diese starken Abweichungen vom Erwartungswert finden sich ebenfalls bei der Betrachtung des Mittelwertes wieder. Die linearen Regressionen durch den Ursprung weisen auch hier die stärksten Abweichungen vom Erwartungswert auf, wobei diese Abweichungen mit größer werdendem Mittelungsintervall der Basisdaten geringer werden. Im Fall der Standardabweichungen ist kein großer Unterschied zwischen den verschiedenen linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt und denen, die durch den Ursprung gehen, zu erkennen. Sowohl MDP als auch MCP weisen eine zueinander ähnliche Standardabweichung auf, welche aber geringer ist als die der verschiedenen linearen Regressionen und deren Variationen. Es ist zu erkennen, dass die linearen Regressionen durch den Ursprung, bis auf im Zeitraum 2011/12, mit größer werdendem Mittelungsintervall der Basisdaten geringere Residuen aufweisen. Die lineare Regression durch den Ursprung auf Basis von Stundenmitteln weist in allen Fällen die größte Abweichung vom Erwartungswert auf. Auffällig ist dabei jedoch der Zeitraum 2011/12, in welchem das Gegenteil der Fall ist.

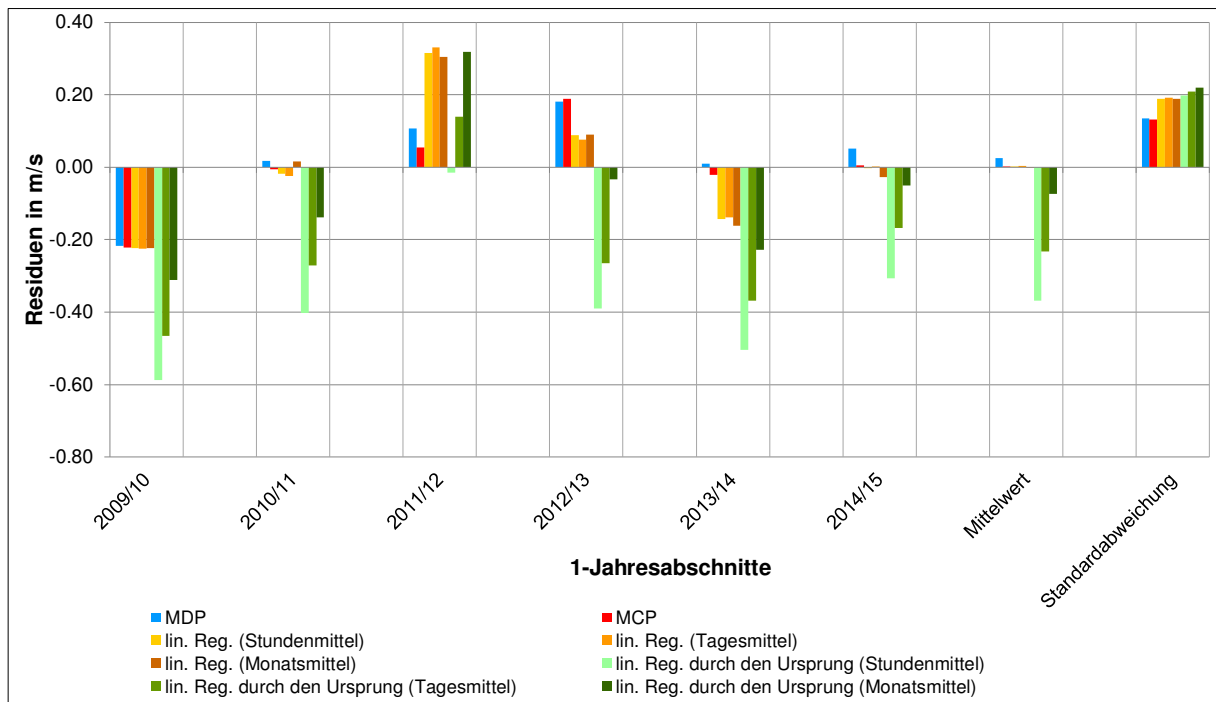


Abb. 1: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Italien inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

A1.1.2 conWX

In Abbildung #A2 sind die Residuen der berechneten Langfristwerte vom Erwartungswert inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung für den conWX-Datensatz dargestellt. In diesem Fall verhält es sich ähnlich wie bei dem MERRA-Datensatz. Der Hauptunterschied bei der Betrachtung der linearen Regressionen durch den Ursprung liegt darin, dass die Residuen generell geringer sind als im Fall des MERRA-Datensatzes.

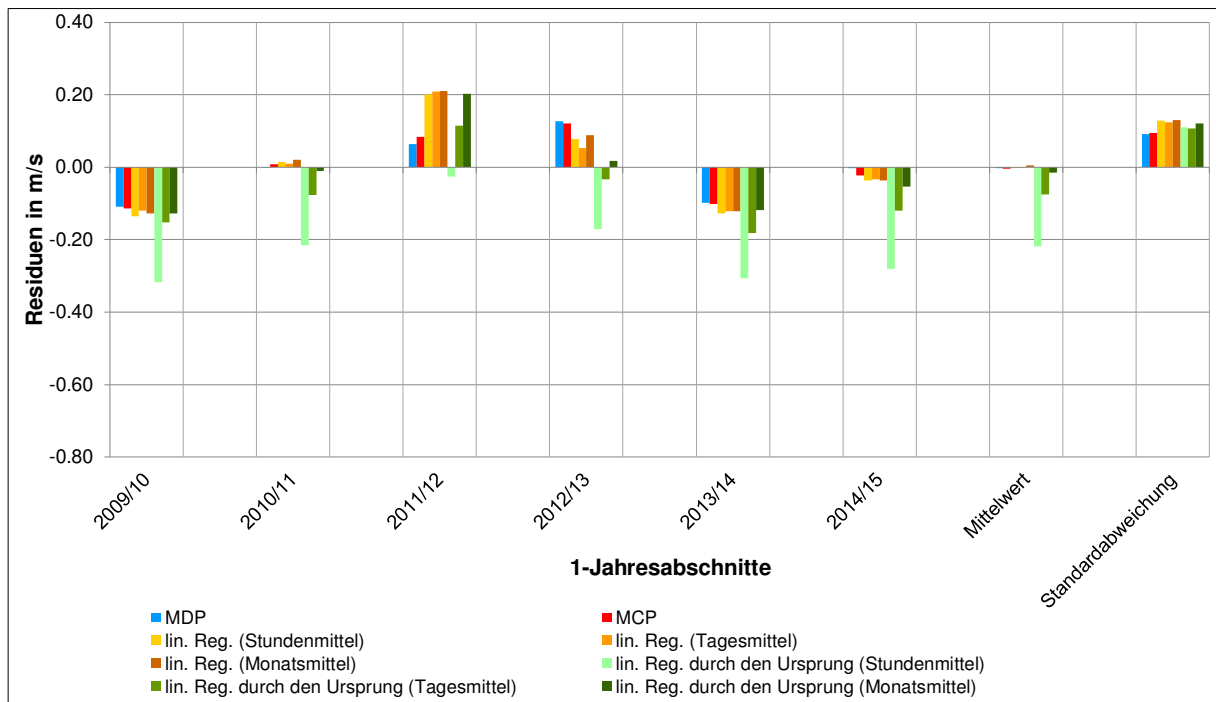


Abb. 2: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Italien inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

A1.1.3 Zweite Messung

In Abbildung #A3 sind die Residuen der berechneten Langfristwerte vom Erwartungswert inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung für den Datensatz der zweiten Messung als Referenz dargestellt. Bei Betrachtung des Mittelwertes ist zu erkennen, dass die Residuen der einzelnen Verfahren und deren Variationen im Mittel alle nahe an Null liegen. Dies gilt allerdings nicht für die lineare Regression durch den Ursprung auf Grundlage von Stundenmitteln. Diese weicht mit -0,21 m/s deutlich von Null ab. Bei Betrachtung der Standardabweichungen gibt es nun keine Vorteile mehr für das MDP oder das MCP. Die Verfahren und deren Variationen befinden sich alle in einem Bereich von 0,07 m/s bis 0,10 m/s und sind damit nicht breit gestreut. Die lineare Regression durch den Ursprung auf Basis von Stundenmitteln weist dabei die geringste Standardabweichung auf. Neben der geringsten Standardabweichung weist diese Variation der linearen Regression durch den Ursprung aber wieder in den meisten Fällen die absolut höchsten Residuen auf. Der Zeitraum 2011/12 ist der einzige in welchem dies nicht der Fall ist. Anders als bei Betrachtung der beiden MERRA- und conWX-Datensätze ist der deutliche Trend,

dass die Residuen mit größer werdendem Mittelungsintervall der Ausgangsdaten geringer werden, hier nicht mehr zu erkennen. Es gibt keine deutlichen Unterschiede der linearen Regressionen durch den Ursprung auf Basis von Tages- oder Monatsmitteln zu den anderen Verfahren und deren Variationen.

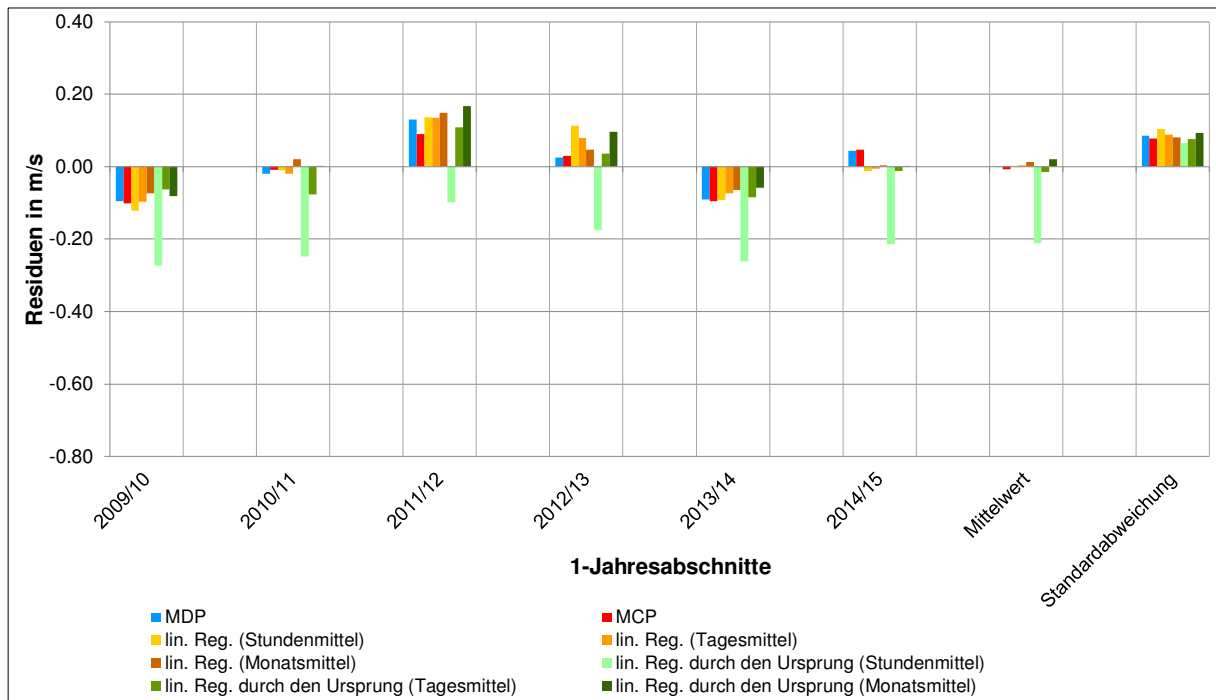


Abb. A3: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Datensatz der zweiten Messung des Standortes Italien inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

A1.2 Polen

A1.2.1 MERRA

In Abbildung A4# sind die Residuen der berechneten Langfristwerte vom Erwartungswert inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung für den MERRA-Datensatz dargestellt. Bei Betrachtung des Mittelwertes fällt auf, dass vor allem die lineare Regression durch den Ursprung auf Basis von Stunden- und Tagesmitteln stark von Null abweichen. Die Monatsmittel dieser Regressionsvariante weisen hingegen eine im Mittel geringe Abweichung vom Erwartungswert auf. Diese

ist vergleichbar mit den anderen Verfahren und deren Variationen. Im Fall der Standardabweichung befinden sich die linearen Regressionen durch den Ursprung in einem Bereich von 0,05 m/s bis 0,06 m/s und unterscheiden sich damit nicht stark voneinander. Eine geringfügig höhere Standardabweichung weisen die linearen Regressionen mit y-Achsenabschnitt auf. Diese liegen zwischen 0,06 m/s und 0,07 m/s. Mit 0,03 m/s im Fall des MDP und 0,04 m/s beim MCP liegen diese beiden Verfahren am besten. Wie bei den beiden MERRA- und conWX-Datensätzen am Standort Italien ist bei Betrachtung der einzelnen 1-Jahresabschnitte wieder der Trend zu erkennen, dass die Residuen der linearen Regressionen durch den Ursprung mit größer werdendem Mittelungsintervall der Basisdaten geringer werden. Mit Ausnahme des Zeitraums 2011/12 weist die lineare Regression durch den Ursprung auf Basis von Stundenmitteln wieder durchweg die größten Residuen auf. Insbesondere die durchgeführten Berechnungen auf Basis von Monatsmitteln dieser Regressionsvariante liegen in jedem 1-Jahresabschnitt vergleichbar zu den Residuen der anderen Verfahren.

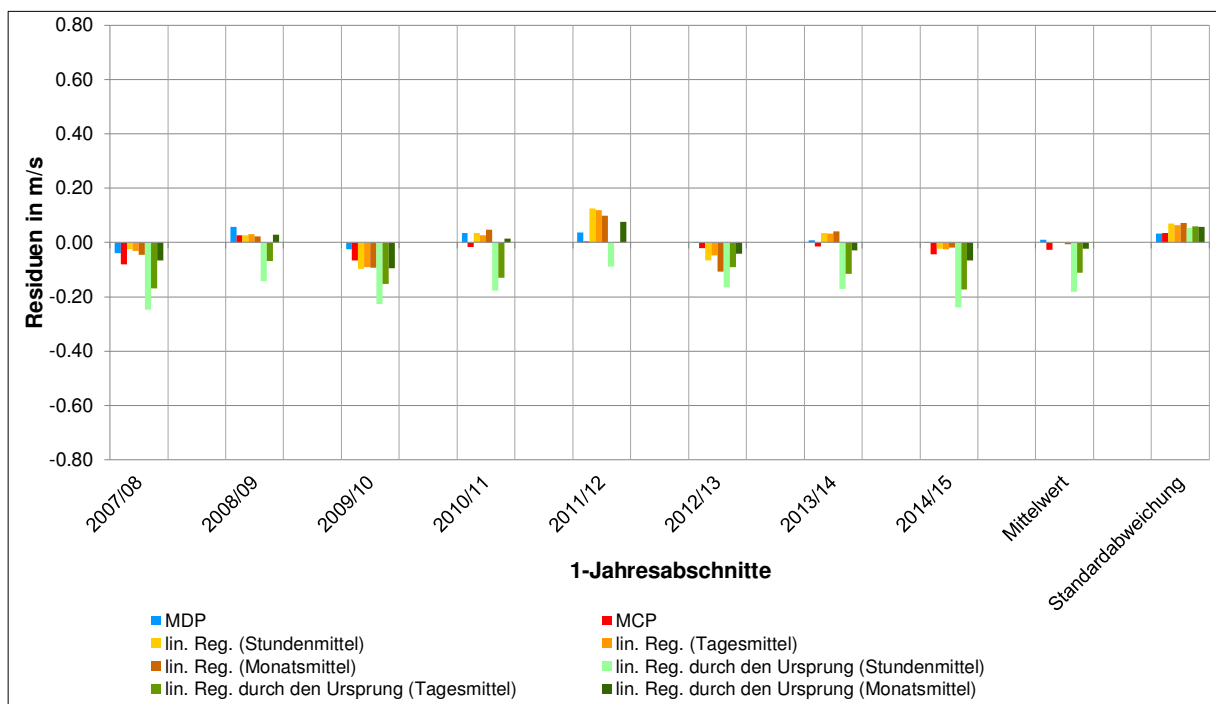


Abb. A4: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den MERRA-Datensatz des Standortes Polen inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

A1.2.2 conWX

In Abbildung A5# sind die Residuen der berechneten Langfristwerte vom Erwartungswert inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung für den conWX-Datensatz dargestellt. In Bezug auf die linearen Regressionen durch den Ursprung verhält es sich in diesem Fall ähnlich, wie beim MERRA-Datensatz. Wieder werden die Residuen häufig mit größer werdendem Mittelungsintervall der Basis Daten geringer und wieder weisen die Stundenmittel häufig die größten Abweichungen vom Erwartungswert eines 1-Jahresabschnittes auf. Dies ist jedoch nicht mehr so deutlich wie im Fall des MERRA-Datensatzes. Bei Betrachtung der Standardabweichung der Langfristwerte fällt auf, dass diese mit 0,05 m/s bis 0,10 m/s etwas größer sind als noch bei dem MERRA-Datensatz.

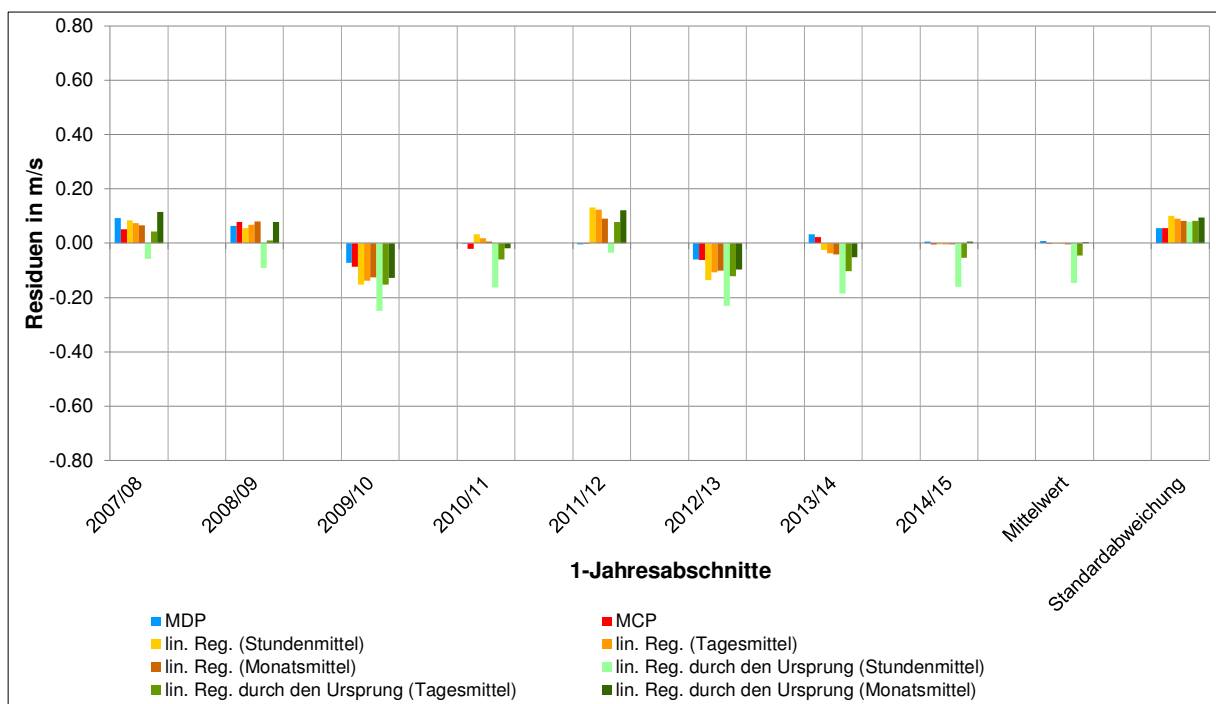


Abb. A5: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den conWX-Datensatz des Standortes Polen inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

A1.2.3 Wetterstation

In Abbildung A6# sind die Residuen der berechneten Langfristwerte vom Erwartungswert inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung für den MERRA-Datensatz dargestellt. Markant sind die in jedem 1-Jahresabschnitt großen Residuen. Bei Betrachtung des Mittelwertes fällt auf, dass die auf Stundenmitteln basierte lineare Regression durch den Ursprung wieder die Berechnungsvariante ist, welche zur größten Abweichung führt. Zudem wird in diesem Fall der langfristig zu erwartende Wind unterschätzt, während die anderen Verfahren und deren Variationen diesen deutlich überschätzen. Die lineare Regression durch den Ursprung auf Basis von Tagesmitteln ist die einzige Berechnungsvariante, die mit $-0,01$ m/s ebenfalls unter dem Erwartungswert liegt und deren Mittelwert der Residuen kaum von Null abweicht. Die Standardabweichungen bewegen sich in einem Bereich von $0,16$ m/s bis $0,23$ m/s und sind damit die im Vergleich mit den anderen beiden Referenzdatensätzen höchsten. In jedem 1-Jahresabschnitt unterschätzt die lineare Regression durch den Ursprung auf Basis von Stundenmitteln den langfristig zu erwartenden Wind, häufig zusammen mit den Tagesmitteln deren Abweichungen jedoch geringer sind (mit Ausnahme des Zeitraums 2013/14). Zudem sind die Residuen der linearen Regression durch den Ursprung auf Basis von Stundenmittel in den meisten 1-Jahresabschnitten die, die auch im Betrag am größten sind. Die anderen Verfahren und deren Variationen überschätzen den langfristig zu erwartenden Wind in jedem 1-Jahresabschnitt. In den vorherigen Abbildungen ist häufig zu erkennen, dass die Residuen der linearen Regressionen durch den Ursprung mit größer werdenden Mittelungsintervallen geringer werden. Dies ist hier nicht der Fall. Die kleinsten Residuen weist in den meisten Fällen die auf Tagesmitteln basierte lineare Regression durch den Ursprung auf.

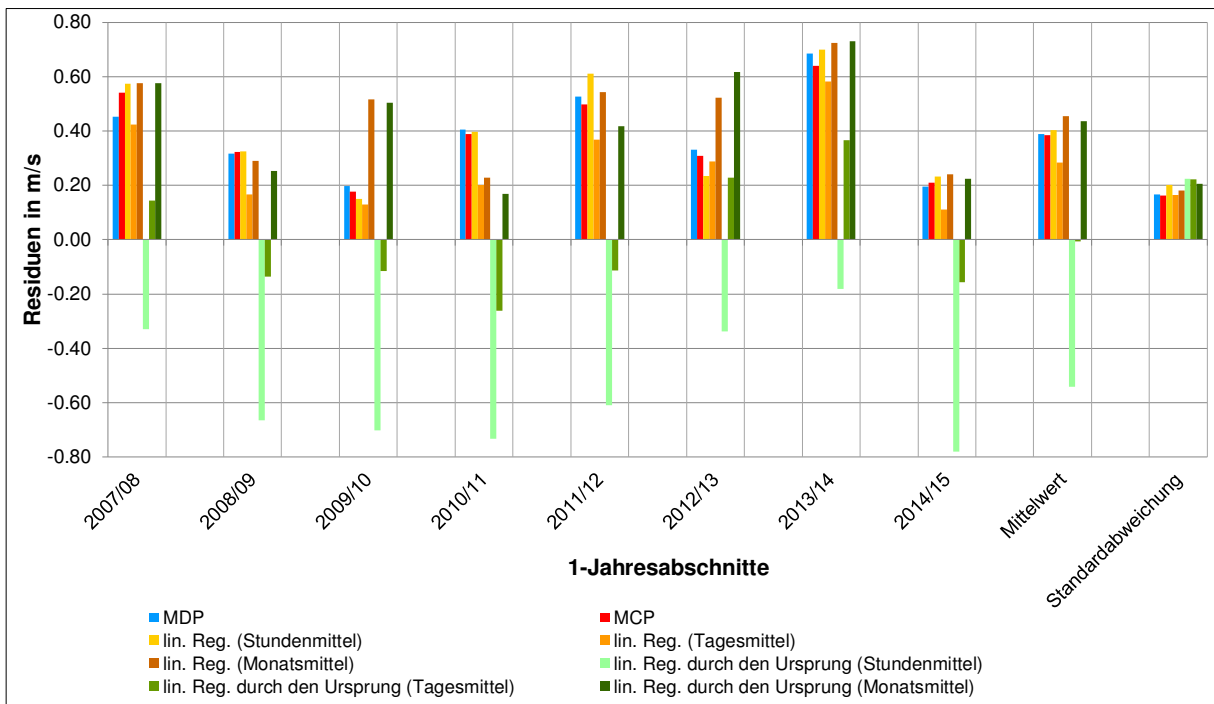


Abb. A6: Abweichungen der einzelnen 1-Jahresabschnitte vom Erwartungswert für den Wetterstationsdatensatz des Standortes Polen inklusive der linearen Regressionen durch den Ursprung.

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema: „Vergleich verschiedener Verfahren zur Langfristextrapolation von Windmessdaten“ ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angaben der Quellen kenntlich gemacht.

Wentorf, den _____ Unterschrift: _____

Erklärung zur Ausleihe der Arbeit in den Bestand der Bibliothek

Ich bin mit der Veröffentlichung der oben genannten Abschlussarbeit auf dem Dokumentenserver der HAW Hamburg einverstanden.

Mit meiner Unterschrift bestätige ich obige Angaben und dass ich die Richtlinien zur Veröffentlichung von Abschlussarbeiten der HAW Hamburg zur Kenntnis genommen habe und akzeptiere.

Wentorf, den _____ Unterschrift: _____
