

**Wetterprognosen  
Erneuerbare Energien  
Luft und Klima  
Umweltinformatik**

Genossenschaft METEOTEST  
Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern  
Tel. +41 (0)31 307 26 26  
Fax +41 (0)31 307 26 10  
office@meteotest.ch, www.meteotest.ch



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI  
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Bern, 3. September 2009

## **Forschungsprogramm Wind des Bundesamtes für Energie**

### **Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände**

---

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie  
Katja Maus / Markus Geissmann / Robert Horbaty  
Bundesamt für Energie  
3003 Bern

Bearbeitung:

Silke Dierer – *METEOTEST*  
Christophe Hug – MeteoSchweiz  
Jan Remund – *METEOTEST*  
Beat Schaffner – *METEOTEST* (Projektleitung)  
Vanessa Stauch – MeteoSchweiz

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände" wurden verschiedene Prognose-Methoden erarbeitet und mit einem Prototyp getestet.

Die Prognosen wurden für zwei zeitliche Horizonte untersucht: die Kurzfristprognosen für den nächsten Tag, sowie die Kürzestfristprognosen für den Intra-Day Handel. Prognostiziert wurden stündliche Werte der Windgeschwindigkeit und Leistung.

Folgende Methoden wurden entwickelt und untersucht:

- Direct Model Output: Windgeschwindigkeits-Prognosen wurde direkt vom Resultat des operationellen numerischen Wettermodells COSMO der MeteoSchweiz übernommen. Die Prognose der Leistung wurde von der Windgeschwindigkeit mit Hilfe der theoretischen Leistungskurve der entsprechenden Windenergieanlage (WEA) abgeleitet.
- WindSim: WindSim ist ein hochauflösendes Modell zur Simulation von Windfeldern über dem Gelände. Die Windgeschwindigkeitsprognosen des COSMO-Modells wurden mit den in WindSim gerechneten Windfeldern an den Anlagenstandort auf Nabenhöhe umgerechnet. Die Leistungsprognose wurde wie für den Direct Model Output aus der theoretischen Leistungskurve abgeleitet.
- Model Output Statistics: Anhand von historischen Mess- und Modelldaten wurden für jeden individuellen Standort ein möglichst guter linearer Zusammenhang zwischen verschiedenen Prognosen des COSMO-Modells und gemessenen Werten der Windgeschwindigkeit und Leistung bestimmt. Damit wurden die aktuellen COSMO-Prognosen in Windgeschwindigkeits- bzw. Leistungsprognosen umgerechnet.
- Kalman Filter: Mit den lokalen Windgeschwindigkeitsmessungen der letzten 24 Stunden wurden laufend die Vorhersagefehler aktualisiert, anhand derer die COSMO-Prognosen korrigiert wurden. Die Leistungsprognose wurde aus einem empirischen Zusammenhang zwischen gemessener Windgeschwindigkeit und gemessener Leistung am Standort abgeleitet.

Die verschiedenen Vorhersagemethoden wurden sowohl für die Kurzfrist- als auch die Kürzestfristprognose erfolgreich entwickelt. Die Genauigkeit der Resultate ist trotz der sehr komplexen Topografie der Schweiz grösstenteils besser oder im Bereich von internationalen Referenzwerten.

Die entwickelten statistischen Methoden haben bei ähnlicher Güte unterschiedliche Anforderungen an die zugrunde liegende Datenbasis. Dies verleiht uns eine grosse Flexibilität für die Entwicklung eines operationellen Betriebs und die Möglichkeit, auf die individuellen Gegebenheiten an einem neuen Standort (z.B. die Datenverfügbarkeit) einzugehen.

## Résumé

Le projet de recherche "Prévision à court terme et à très court terme de la production d'énergie éolienne en terrain complexe" a permis le développement de plusieurs méthodes de prévision et la mise au point d'un prototype pour évaluer ces dernières.

Deux horizons temporels de prévision ont fait l'objet d'une évaluation: la prévision à court terme qui concerne le jour suivant et la prévision à très court terme ou immédiate qui concerne le marché intra-journalier. Les valeurs horaires de la vitesse du vent et de la production d'énergie ont été prédites.

Les méthodes de prévision suivantes ont été développées:

- Direct Model Output: la prévision est directement déduite à partir des résultats du modèle de prévisions numériques COSMO de MétéoSuisse. La production d'énergie est calculée à partir de la vitesse du vent prédite par le modèle en se basant sur la courbe de puissance théorique pour chaque installation.
- WindSim: WindSim est un modèle de simulation de champs de vent à haute résolution. Les prévisions du modèle COSMO sont transférées à l'emplacement de l'installation éolienne et à la hauteur de l'hélice sur la base des champs de vent calculés par WindSim. La production d'énergie est calculée à partir de la vitesse du vent prédite en se basant sur la courbe de puissance théorique pour chaque installation.
- Model Output Statistics: pour chaque emplacement, une relation basée sur analyse statistique a été calculée entre le modèle COSMO et les mesures locales. Sur cette base, les prévisions du modèle COSMO ont été converties en prévision de vent et de production d'énergie pour les emplacements sélectionnés.
- Filtre de Kalman: sur la base des mesures de vent locales des dernières 24 heures les erreurs de prévision sont mise à jour régulièrement et servent à corriger la prévision du modèle COSMO. Les prévisions de production d'énergie ont été calculées sur la base d'une courbe empirique décrivant la relation entre le vent mesuré et la production d'énergie.

Les méthodes de prévision ont été développées avec succès aussi bien pour la prévision à court-terme que la prévision immédiate. Malgré la très grande complexité de la topographie en Suisse, la précision des résultats obtenus se trouve être en grande partie meilleure ou du moins comparable par rapport à des valeurs de référence internationales.

Les différentes méthodes développées permettent d'obtenir un haut degré de flexibilité pour le développement d'un produit opérationnel. Dans le cas d'un nouvel emplacement, il est ainsi possible de choisir et d'appliquer la méthode la plus adaptée et donc de prendre en compte les spécificités de ce site (p. ex. disponibilité des données).

## Abstract

In the research project "Fore- and nowcasting of the electricity production of wind turbines in complex terrain" several forecast methods were developed and tested in a prototype.

The forecasts were analyzed for two temporal horizons: Short term forecasts for the next day as well as shortest term forecasts for intra-day trade. Hourly values of wind speed and power output were forecast.

The following methods were developed and analyzed:

- Direct Model Output: Wind speed forecasts were directly adopted from Meteo-Swiss's operational numerical weather model COSMO. Power output was derived using the theoretical power curve of each wind turbine.
- WindSim: WindSim is a high resolution model for simulating wind fields over complex terrain. The COSMO model's wind speed forecasts were transferred to hub height at the turbine sites based on wind fields calculated by WindSim. Power output was derived using the theoretical power curve of each wind turbine.
- Model Output Statistics: Based on historical data, linear relations between the forecast parameters and measured data (wind speed and power output) was determined for each site individually. Based on these, current COSMO forecast were transferred to wind speed and power output forecasts.
- Kalman Filter: Based on the local wind measurements of the last 24 hours, forecast errors were continuously updated and the COSMO forecasts were accordingly corrected. Power forecasts were calculated based on the empirical relation between measured wind speeds and power output at each site.

These methods were developed successfully for short and shortest term forecasts. Despite the very complex terrain of Switzerland, the accuracy of the results is mostly in the range of or better than international reference values.

On one hand, the developed methods display similar performances; on the other hand, they are based on different input data. This allows a certain flexibility for the development of operational forecasts with the possibility to take into account each site's individual characteristics (e.g. data availability).

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	12
2. Spezifikation des Vorhersagesystems für die Schweiz .....	13
2.1. Anforderungen an das Windenergie-Vorhersagesystem .....	13
2.2. Struktur des Windenergie-Vorhersagesystems .....	13
2.3. Das Wettervorhersagemodell COSMO.....	15
3. Untersuchungsstandorte .....	16
4. Dynamisches Downscaling mit WindSim .....	18
4.1. Einleitung .....	18
4.2. Beschreibung der WindSim-Simulationen .....	20
5. Statistisches Downscaling mit MOS .....	22
5.1. Einleitung .....	22
5.2. Datengrundlage .....	22
5.3. Erarbeitung des MOS.....	23
6. Statistisches Downscaling mit Kalman Filter.....	27
6.1. Einleitung .....	27
6.2. Datengrundlage .....	29
7. Der Prognose-Prototyp.....	30
7.1. Prognose-Prozess.....	30
7.2. Visualisierung.....	34
8. Verifikation .....	36
8.1. Vorgehen .....	36
8.2. Gütemasse und Boxplots .....	37
8.3. Kurzfristprognose der Windgeschwindigkeit (Horizont 24–48 Stunden).....	39
8.4. Kürzestfristprognose der Windgeschwindigkeit (Horizont 3–9 Stunden).....	44
8.5. Kurzfristprognose der Leistung (Horizont 24–48 Stunden) .....	48
8.6. Kürzestfristprognose der Leistung (Horizont 3–9 Stunden) .....	54
8.7. Unsicherheit der Windgeschwindigkeit.....	59
8.8. Unsicherheit der Leistung.....	61
8.9. Vergleich mit wind-data.ch .....	63
9. Zusammenfassung der Ergebnisse .....	66
9.1. Methodenvergleich.....	66
9.2. Fazit der Verifikation .....	69
9.3. Mögliche Weiterentwicklungen.....	72
9.4. Entwurf eines operationellen Angebots .....	73
Literatur.....	76
Anhang A: Weitere Angaben zum Kalman Filter.....	77
Anhang B: Beschreibung der Online-Visualisierung .....	80

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Methoden zur Verfeinerung von Ergebnissen des Wettervorhersagemodells COSMO und wie sie im Rahmen des Projektes kombiniert werden. Die blauen Pfeile zeigen die Abläufe für den Prognosehorizont 24–48 Stunden mit COSMO-7 Daten, die grünen Pfeile die Abläufe für den Horizont 3–9 Stunden mit COSMO-2 Daten.....	14
Abb. 2:	Vergleich der wirklichen Topographie (überhöht) mit der COSMO-2 Topographie (schwarze Punkte) am Beispiel Gütisch. Der Standort der WEA und der Meteostation ist rot eingezeichnet. ....	18
Abb. 3:	Orografiehöhe [m] im inneren Modellgebiet für die Windmessung Chasseral (links) und simulierte Windgeschwindigkeit [m/s] in der untersten Modellschicht bei Westanströmung (rechts). Der blaue Punkt markiert die Position der Windmessung, der blaue Rahmen kennzeichnet die Gitterbox des COSMO-7 Modells mit 6.6 km Gitterweite und die weiss gestrichelten Rahmen die Gitterboxen des COSMO-2 Modells mit 2.2 km Gitterweite. ....	21
Abb. 4:	Schematische Darstellung der im Prototypen benutzten COSMO-Modellläufe: gestrichelt dargestellt sind die täglich verfügbaren COSMO-7-Läufe mit 72 Stunden Vorhersage, gepunktet die COSMO-2-Läufe mit 24 Stunden Vorhersage. Im Prototypen wurden die blau markierten Läufe genutzt. Blau hinterlegt sind dabei die Abschnitte, die für die Vorhersagen im Prototypen benutzt wurden (Vorhersagehorizont 3–9 Stunden bzw. 24–48 Stunden). ....	31
Abb. 5:	Schematische Darstellung der Komponenten der COSMO Produktionskette während der Testphase.....	32
Abb. 6:	Postprocessing für die Windenergie Vorhersage. ....	33
Abb. 7:	Auswahl-Möglichkeiten der Online-Visualisierung. ....	34
Abb. 8:	Visualisierung der 48-h-Prognose vom 10.2.2009 für die Leistung der WEA Gütisch (Darstellung aller Prognosemodelle). ....	35
Abb. 9:	Visualisierung der 48-h-Prognose vom 10.2.2009 für die Leistung der WEA Gütisch für den Kalman Filter inkl. Prognose-Unsicherheit.....	35
Abb. 10:	Visualisierung der 48-h-Prognose vom 1.2.2009 für die Windgeschwindigkeit an der Messstation Chasseral (Darstellung aller Prognosemodelle). In diesem Fall ist deutlich die Verbesserung der Postprocessings (blau, grün, schwarz) gegenüber dem Direct Model Output (orange) zu erkennen: Die nachbearbeiteten Werte liegen unabhängig von der Methode näher an der Beobachtung (rot).....	35
Abb. 11:	Illustration eines Boxplots (Erklärung im Text).....	39

---

Abb. 12: rRMSE der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts (Lead Time) am Standort Chasseral. ....	41
Abb. 13: rRMSE der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts (Lead Time) am Standort Evionnaz.....	41
Abb. 14: Boxplot der Kurzfristprognose für die Windgeschwindigkeit am Standort Chasseral.....	43
Abb. 15: rRMSE der Windgeschwindigkeit für die Kürzestfristprognose in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts (Lead Time) am Standort Gütsch (COSMO-2 03 UTC Lauf).....	46
Abb. 16: rRMSE der Windgeschwindigkeit für die Kürzestfristprognose in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts (Lead Time) am Standort Chasseral (COSMO-2 03 UTC Lauf). ....	46
Abb. 17: Boxplot der Kürzestfristprognose der Windgeschwindigkeit am Standort Gütsch (COSMO-2 03 UTC Lauf).....	48
Abb. 18: Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose (normiert auf die installierte Leistung) für Mt. Crosin mit der Lead Time für die verschiedenen Vorhersageverfahren basierend auf dem COSMO-7 Lauf. ....	50
Abb. 19: Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose (normiert auf die installierte Leistung) für Collonges mit der Lead Time für die verschiedenen Vorhersageverfahren basierend auf dem COSMO-7 Lauf. ....	51
Abb. 20: Auf die installierte Leistung normierte rRMSE für die Leistungsvorhersagen für die Kurzfristprognose. Die horizontalen Linien markieren Referenz-Werte für normalisierte Leistungsvorhersage rRMSE aus der Literatur.....	53
Abb. 21: Boxplot der Kurzfristprognose der Leistung am Beispiel der WEA Gütsch.....	53
Abb. 22: Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose für Collonges (normiert auf die installierte Leistung) mit der Lead Time für die verschiedenen Vorhersageverfahren basierend auf dem COSMO-2 03 UTC Lauf.....	56
Abb. 23: Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose für den Gütsch (normiert auf die installierte Leistung) mit der Lead Time für die verschiedenen Vorhersageverfahren basierend auf dem COSMO-2 03 UTC Lauf.....	56
Abb. 24: Auf die installierte Leistung normalisierter rRMSE für die Leistungsvorhersage für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 12 UTC Lauf). Die horizontalen Linien markieren Werte für normalisierte Leistungsvorhersage rRMSE aus der Literatur. ....	58

---

Abb. 25: Boxplot der Kürzestfristprognose der Leistung an der WEA Gütsch. ....	59
Abb. 26: Prognostizierte Unsicherheit (uncert) und RMSE am Standort Gütsch für die Kurzfristprognose. ....	60
Abb. 27: Prognostizierte Unsicherheit (uncert) und RMSE am Standort Gütsch für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC Lauf).....	60
Abb. 28: Prognostizierte Unsicherheit (uncert) und RMSE für MOS und KF an der WEA Mt. Crosin für die Kurzfristprognose. ....	61
Abb. 29: Prognostizierten Unsicherheit (uncert) und RMSE für MOS und KF an der WEA Mt. Crosin für die Kürzestfristprognose (Cosmo-2 03 UTC Lauf).....	62
Abb. 30: Prognose der Windgeschwindigkeit auf <a href="http://www.wind-data.ch">www.wind-data.ch</a> (hier am Beispiel der WEA Gütsch). ....	63
Abb. 31: Auf die installierte Leistung normierte rRMSE für die Leistungsvorhersagen für die Kurzfristprognose. Die horizontalen Linien markieren Referenz-Werte für normalisierte Leistungsvorhersage rRMSE aus der Literatur.....	70
Abb. 32: Auf die installierte Leistung normalisierter rRMSE für die Leistungsvorhersage für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 12 UTC Lauf). Die horizontalen Linien markieren Werte für normalisierte Leistungsvorhersage rRMSE aus der Literatur. ....	71

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Liste der Teststandorte, Typ Messstation.....	17
Tab. 2:	Liste der Teststandorte, Typ WEA.....	17
Tab. 3:	Standorte mit WEA und nahe gelegener Station des MeteoSchweiz Messnetzes.....	17
Tab. 4:	Aufteilung des Untersuchungszeitraums für COSMO-2 und COSMO-7.....	23
Tab. 5:	Liste der Prädiktoren.....	24
Tab. 6:	Für den Prototyp benutzte COSMO-Vorhersagen.....	30
Tab. 7:	Mittlerer Fehler (ME) der Windgeschwindigkeit für die Kurzfristprognose.....	39
Tab. 8:	Standardabweichung (STD) der Windgeschwindigkeit für die Kurzfristprognose.....	40
Tab. 9:	Relative Abweichung (rRMSE) der Windgeschwindigkeit für die Kurzfristprognose.....	40
Tab. 10:	Mittlere Fehler (ME) der Windgeschwindigkeit für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC).....	44
Tab. 11:	Standardabweichung (STD) der Windgeschwindigkeit für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC).....	44
Tab. 12:	Relative Abweichung (rRMSE) der Windgeschwindigkeit für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC).....	45
Tab. 13:	Relativer mittlerer absoluter Fehler ( <i>rMAE</i> ) der Windgeschwindigkeit für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC).....	45
Tab. 14:	Mittlerer Fehler (ME) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzfristprognose.....	49
Tab. 15:	Standardabweichung (STD) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzfristprognose.....	49
Tab. 16:	Relative Abweichung (RMSE) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzfristprognose.....	49
Tab. 17:	Mittlerer absoluter Fehler (MAE) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzfristprognose.....	50
Tab. 18:	Bias (ME) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kürzestfristprognose basierend auf COSMO-2 03 UTC.....	54

---

Tab. 19: Standardabweichung (STD) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzzeitprognose basierend auf COSMO-2 03 UTC.....	54
Tab. 20: Relative Abweichung (RMSE) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzzeitprognose basierend auf COSMO-2 03 UTC.....	55
Tab. 21: Mittlerer absoluter Fehler (MAE) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzzeitprognose basierend auf COSMO-2 03 UTC. ....	55
Tab. 22: Mittlere Abweichung (ME), relative Abweichung (rRMSE) und Standardabweichung (STD) der Windgeschwindigkeit der wind-data-Prognosen im Vergleich zu den erarbeitete Methoden für den Vorhersagehorizont 24–48 Stunden. ....	64
Tab. 23: Mittlere Abweichung (ME), relative Abweichung (rRMSE) und Standardabweichung (STD) der Windgeschwindigkeit der wind-data-Prognosen im Vergleich zu den erarbeiteten Methoden für den Vorhersagehorizont 3–9 Stunden (COSMO-2 03 UTC Lauf). ....	65
Tab. 24: Anforderungen an die Verfügbarkeit von Messdaten und historischer Prognosedaten für die Prognose-Methoden. ....	68

## Abkürzungen, Glossar

CFD	Computational Fluid Dynamics: Etablierte Methode der Strömungsmechanik. Sie hat das Ziel, strömungsmechanische Probleme approximativ mit numerischen Methoden zu lösen. <sup>1</sup>
COSMO-2	Operationelles Wettervorhersagemodell von MeteoSchweiz mit 2.2 km horizontaler Gitterweite
COSMO-7	Operationelles Wettervorhersagemodell von MeteoSchweiz mit 6.6 km horizontaler Gitterweite
DMO	Direct Model Output: Hier sind damit die direkt aus dem Wettermodell (COSMO) stammenden Resultate ohne Postprocessing gemeint.
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; betreibt ein globales Wettermodell
GFS	Global Forecast System (Globales Wettermodell) der National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)
Kalman Filter	Der Kalman Filter ist ein Satz von mathematischen Gleichungen. Mithilfe dieses Filters sind bei Vorliegen fehlerbehafteter Beobachtungen Rückschlüsse auf den exakten Zustand von der Technik oder Physik zugeordneten Systemen möglich. <sup>1</sup>
MAE	Mittlerer absoluter Fehler
ME	Mittlerer Fehler / Bias
MEZ	Mitteleuropäische Zeit: Gilt u.a. für die Schweiz
MM5	Mesoscale Meteorology Model 5 ist ein Computerprogramm für Modellrechnungen zur Wettervorhersage im regionalen Bereich. <sup>1</sup>
MOS	Model Output Statistics: MOS ist ein statistisches Verfahren in der modernen Wettervorhersage. Oftmals handelt es sich dabei um multilineare Regressionsgleichungen, die auf numerische Wettermodelle angewandt werden. <sup>1</sup>
rMAE	relativer mittlerer absoluter Fehler
RMSE	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
rRMSE	Relative Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
SMN	SwissMetNet, meteorologisches Messnetz der MeteoSchweiz
STD	Standardabweichung des Fehlers
UTC	Universal Time Coordinated: Weltzeit, entspricht der mitteleuropäischen Winterzeit minus eine Stunde
WEA	Windenergieanlage
WindSim	Numerisches Windmodell auf Basis von Computational Fluid Dynamics

---

<sup>1</sup> Quelle: wikipedia.de

## 1. Einleitung

Das Ziel des Forschungsprojekts "Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände" ist es, ein für die Bedingungen und Anforderungen der Schweiz geeignetes Windenergie-Vorhersagesystem zu entwickeln, indem bereits vorhandene Modelle und Verfahren möglichst optimal kombiniert werden.

Das für die Schweiz angepasste Vorhersagesystem wurde in Kooperation von **METEOTEST** und dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz unter der Leitung von **METEOTEST** erarbeitet. Dabei brachten beide Partner ihre jeweilige Expertise ein. MeteoSchweiz entwickelt und betreibt das hoch auflösende numerische Wettervorhersagemodell COSMO (Consortium for Small-scale Modelling<sup>2</sup>). Die neue Modellversion mit einer Maschenweite von 2.2 km wurde Ende Februar 2008 operationell und bietet die zur Zeit beste Grundlage für Wettervorhersagen in der komplexen Topographie der Schweiz. **METEOTEST** besitzt als Spezialist für Windenergie in komplexem Gelände langjährige Erfahrung in der Anwendung von Strömungsmodellen zur Berechnung hoch aufgelöster Windfelder und mit Ertragsrechnungen für Windenergieanlagen (WEA). Zudem bestehen gute Kontakte zwischen **METEOTEST** und verschiedenen Windenergie-Betreibern, welche die Zusammenarbeit im Projekt vereinfachen.

Beide Projektpartner brachten zudem ihre Expertise im Bereich der statistischen Nachbearbeitung von Wettervorhersagen ins Projekt ein.

Das Projekt war in drei Phasen gegliedert:

1. Prüfung bestehender Modelle und Definition der Anforderungen für ein Schweizer Windenergie-Vorhersagesystem
2. Erarbeitung des Windenergie-Vorhersagesystems
3. Testbetrieb und Validierung

Die Ergebnisse der ersten beiden Phasen wurden in zwei Zwischenberichten<sup>3</sup> vorgestellt. Der vorliegende Bericht basiert auf diesen Ergebnissen, erweitert sie und stellt die Schlussresultate vor.

---

<sup>2</sup> [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org)

<sup>3</sup> Forschungsprogramm Wind des Bundesamtes für Energie – Zwischenbericht, 1. Phase: Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände, 14.5.2008

Forschungsprogramm Wind des Bundesamtes für Energie – Zwischenbericht, 2. Phase: Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände, 18.10.2008

## 2. Spezifikation des Vorhersagesystems für die Schweiz

### 2.1. Anforderungen an das Windenergie-Vorhersagesystem

Die WEA-Betreiber wurden im Rahmen des Projekts zu ihren Anforderungen an Windenergie-Prognosen befragt (1. Zwischenbericht des Projekts). Daraus und als Ergebnis einer Literatur-Recherche wurden die Anforderungen an das Windenergie-Vorhersagesystem definiert.

Zwei Zeithorizonte sind für die Energieertragsvorhersagen von besonderer Bedeutung:

- Kurzfristprognosen: Vorhersagen für den nächsten Tag (Vorhersagehorizont 24–48 Stunden), stündliche Werte, für die Energieprognosen des Stromhandels
- Kürzestfristprognosen: Vorhersagen für die nächsten Stunden (Vorhersagehorizont 3–9 Stunden), stündliche Werte, für den Intra-Day-Handel

Die Ergebnisse für den Vorhersagehorizont 24–48 Stunden (Kurzfristprognosen) sollten gegen 7 Uhr morgens vorliegen, diejenigen für den Vorhersagehorizont 3–9 Stunden (Kürzestfristprognosen) jeweils so rasch wie möglich. Die gewünschte Vorhersagegrösse ist die zu erwartende Leistung der WEA in stündlicher Auflösung. Da die Wettermodelle die Windgeschwindigkeit vorhersagen und Windprognosen teilweise von WEA-Betreibern zur Leistungsprognose genutzt werden, wird diese ebenfalls prognostiziert.

### 2.2. Struktur des Windenergie-Vorhersagesystems

Systeme zur Vorhersage der Windenergie-Produktion setzen sich gewöhnlich aus folgenden Elementen zusammen:

- Numerische Wettervorhersage
- Dynamisches und/oder statistisches Downscaling inkl. Umrechnung in Leistung der WEA

Entscheidend für die Qualität des Vorhersagesystems sind die Güte der einzelnen Komponenten des Systems und ihre Zusammensetzung (Abb. 1). Das hier geplante Vorhersagesystem für die Schweiz basiert auf dem numerischen Wettervorhersagemodell COSMO, das speziell für die Anwendung in komplexem Gelände entwickelt wurde. Es wurden die folgenden Downscaling-Verfahren erarbeitet und auf ihre Güte untersucht:

- dynamisches Downscaling mit WindSim (Kapitel 4)
- statistisches Downscaling mit Model Output Statistics (MOS, Kapitel 5)
- statistisches Downscaling mit Kalman-Filter (Kapitel 6)

Grundsätzlich ist die Gitterpunktsprognose eines numerischen Modells (als repräsentativ für die gesamte Gitterbox zu interpretieren) von einer Punktmessung (ganz lokal) zu unterscheiden. In komplexem Gelände fällt dieser Unterschied besonders ins Gewicht, da Effekte der subgridskaligen Orografie im Modell gemittelt werden und sich in COSMO in einer erhöhten Rauigkeitslänge äussern. Daraus folgt eine verstärkte Abbremsung der Luftmassen an der Oberfläche. Entsprechend ist für den Direct Model Output (DMO) gegenüber Punktmessungen in Kuppen- oder Kretenlagen eine systematisch kleinere Windgeschwindigkeit zu erwarten. Dieser Unterschied muss bei der Interpretation der Ergebnisse mitberücksichtigt werden.

Primäres Ziel der statistischen Methoden MOS und Kalman Filter ist es, den mittleren Fehler bzw. Bias – das heisst die systematischen Abweichungen zwischen Prognosemodell und den beobachteten Werten – zu korrigieren. Das dynamische Downscaling mit WindSim hingegen soll das Windfeld weiter verfeinern und dadurch sowohl den Bias als auch die Variabilität des Fehlers verkleinern.

Als Endergebnis der Downscaling-Verfahren wurden stündliche Prognosen der mittleren Windgeschwindigkeit bzw. der mittleren Leistung inklusive deren erwarteten Unsicherheiten berechnet.

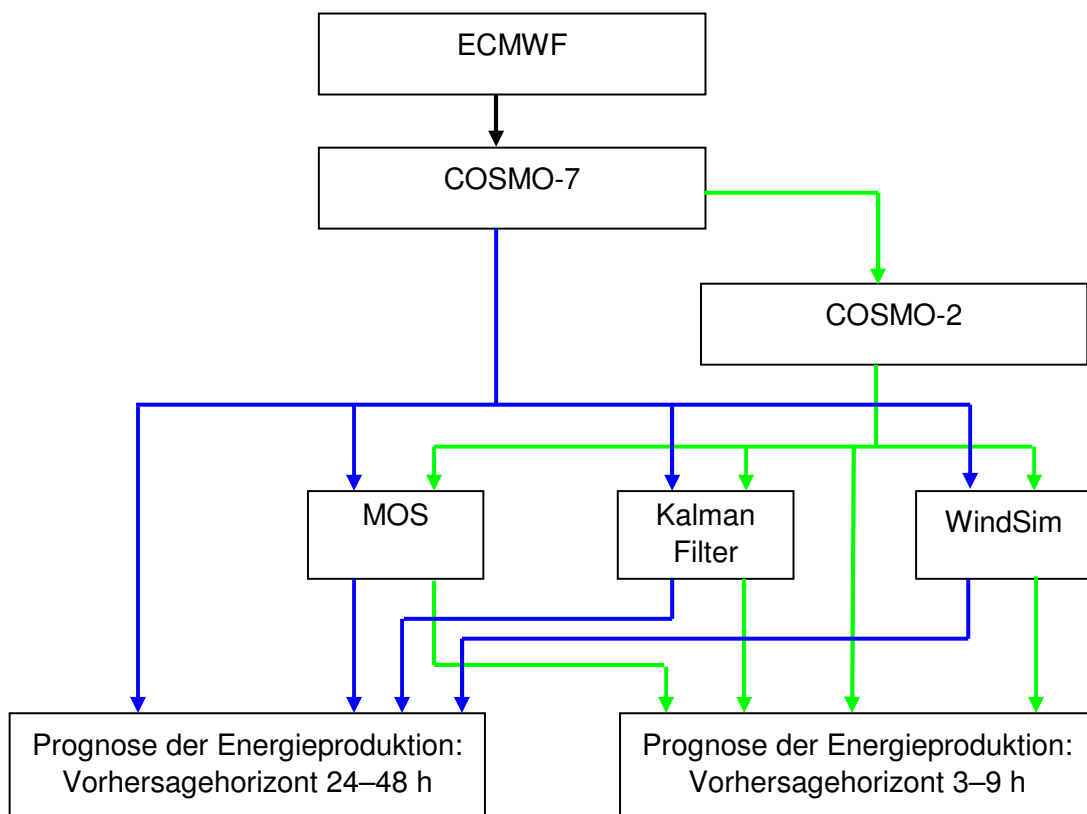


Abb. 1: Methoden zur Verfeinerung von Ergebnissen des Wettervorhersagemodells COSMO und wie sie im Rahmen des Projektes kombiniert werden. Die blauen Pfeile zeigen die Abläufe für den Prognosehorizont 24–48 Stunden mit COSMO-7 Daten, die grünen Pfeile die Abläufe für den Horizont 3–9 Stunden mit COSMO-2 Daten.

### 2.3. Das Wettervorhersagemodell COSMO

COSMO ist das operationelle Wettervorhersagemodell des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, das speziell für Vorhersagen in komplexem Gelände entwickelt wurde. Zweimal am Tag (00 und 12 UTC) werden Vorhersagen mit COSMO-7 mit einer horizontalen Gitterweite von 6.6 km produziert, die einen Vorhersagezeitraum von 72 Stunden haben. Sie sind im Rahmen dieses Projekts für die Kurzfristprognose (Horizont 24–48 Stunden) geeignet. Als Randdaten werden Vorhersagen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) verwendet. Dazu wird COSMO-7 zu weiteren Tageszeiten mit einem Vorhersagezeitraum von 24 Stunden gerechnet (03, 06, 09, 15, 18, 21 UTC). Die Ergebnisse der täglichen acht Modellläufe mit 6.6 km Gitterweite werden jeweils als Randfelder für eine Simulation von COSMO-2, der Modellversion mit 2.2 km horizontaler Gitterweite, für den Bereich der Alpen verwendet. Diese Simulationen werden für einen Vorhersagezeitraum von 24 Stunden durchgeführt und ermöglichen so ein häufiges Update der Vorhersage mit den letzten verfügbaren Beobachtungen. Diese Prognosen sind im Rahmen dieses Projekt für die Kurzzeitprognose (Horizont 3–9 Stunden) geeignet.

Die Assimilation von Messdaten spielt eine entscheidende Rolle für die Qualität der ersten Stunden der Vorhersage. Der Vorteil des Modellsystems COSMO liegt darin, dass Messdaten in einem quasi ununterbrochenen Prozess einbezogen werden. Das Modell nutzt so in optimaler Weise die vorhandenen Messdaten und erlaubt damit die Berechnung einer Prognose basierend auf dem bestmöglichen Anfangszustand. Das häufige Update der Prognose reduziert die mit der Vorhersagezeit wachsende Unsicherheit. Darüber hinaus steht ein bereits relativ hoch aufgelöstes Modellergebnis für weitere Verfeinerung zur Verfügung.

### 3. Untersuchungsstandorte

Das Vorhersagesystem wurde in Phase 2 auf der Basis von Beobachtungsdaten verschiedener Teststandorte entwickelt und in Phase 3 verifiziert. Dabei wurden zwei Typen von Teststandorten definiert:

- WEA mit Produktionsdaten
- Meteorologische Station des SwissMetNet (SMN) mit Windmessung

Die Auswahl der Teststandorte basierte auf folgenden Kriterien:

- Die Standorte sollen die verschiedenen Regionen der Schweiz mit ihren unterschiedlichen Charakteristika – wie Orografie und regionale Windsysteme – möglichst gut repräsentieren (Jura, Voralpen, Alpen).
- Die Messreihen (Leistung bzw. Windgeschwindigkeit) sollen homogen sein (keine Wechsel von Messgeräten, keine Verschiebung der Station) und eine Länge von mindestens einem Jahr aufweisen (minimale Länge für das Training des MOS).

Die auf Grund der oben genannten Kriterien ausgewählten Teststandorte sind in Tab. 1 und Tab. 2 zusammengefasst.

Windmessungen auf einer WEA sind durch den Rotor stark gestört und wurden deshalb nicht berücksichtigt. Hingegen wurde versucht, zu jeder WEA eine Nahe gelegene, repräsentative SwissMetNet Station zu bestimmen (Tab. 3).

Die Messdaten der SwissMetNet Stationen wurden von MeteoSchweiz zur Verfügung gestellt. Die WEA-Daten wurden von den Anlagenbetreibern zur Verfügung gestellt.

Tab. 1: Liste der Teststandorte, Typ Messstation<sup>4</sup>.

Standort	WMO-Nr.	CH-x-Koord.	CH-y-Koord.	Höhe	Charakteristik
Chasseral	66050	571'290	220'320	1'599 m.ü.M.	Jura Gipfel
Evionnaz	67150	568'190	114'700	480 m.ü.M.	Alpental (nahe Collonges)
Gütsch	67500	690'140	167'590	2'287 m.ü.M.	Alpen
Oron	67080	555'500	158'050	830 m.ü.M.	Mittelland, windstark
Piz Martegnas	67950	760'250	160'570	2'670 m.ü.M.	Inneralpiner Gipfel
Schaffhausen	66200	688'700	282'800	437 m.ü.M.	N-Schweiz (Mast)
Uetliberg	66770	679'450	245'050	1'043 m.ü.M.	Mittelland Gipfel/Mast

Tab. 2: Liste der Teststandorte, Typ WEA.

Standort	installierte Leistung	CH-x-Koord.	CH-y-Koord.	Höhe	Nabenhöhe	Charakteristik
Collonges	2'050 kW	569'000	112'125	450 m.ü.M.	100 m	Alpental
Feldmoos	900 kW	649'313	204'522	1'020 m.ü.M.	61 m	Voralpen
Gütsch	600 kW	690'145	167'675	2'331 m.ü.M.	46 m	Alpen
Mt. Crosin	1'750 kW	564'350	223'250	1'230 m.ü.M.	67 m	Jura Plateau

Tab. 3: Standorte mit WEA und nahe gelegener Station des MeteoSchweiz Messnetzes.

WEA	SwissMetNet Station
Collonges	Evionnaz
Gütsch	Gütsch
Mont Crosin	Chasseral

<sup>4</sup> Station des Messnetzes der MeteoSchweiz (SwissMetNet, ANETZ oder ENET).

## 4. Dynamisches Downscaling mit WindSim

### 4.1. Einleitung

Heute gängige Wettervorhersagemodelle haben Gitterweiten zwischen etwa 5 und 10 km. COSMO-2 – mit einer Gitterweite von 2.2 km – führt seit März 2008 eine neue Generation von Vorhersagemodellen an, die seit kurzem von verschiedenen Vorhersagezentren in operativen Betrieb genommen werden. Doch auch Ergebnisse mit dieser recht feinen Gitterweite sind noch weit entfernt von der Genauigkeit, die für Windvorhersagen für Windenergiezwecke benötigt wird. Das wichtigste Defizit einer ungenügend hohen Horizontalauflösung in komplexem Gelände wie der Schweiz ist eine ungenügende Beschreibung der orografischen Gegebenheiten. Komplexe Orografie verursacht Effekte wie Beschleunigung über Bergrücken oder Tunnel- und Abschattungseffekte, die einen starken Einfluss auf das lokale Windfeld haben. Um diese Effekte beschreiben zu können, sind sehr hohe Horizontalaufösungen im Bereich von wenigen Dekametern notwendig (siehe Abb. 2).

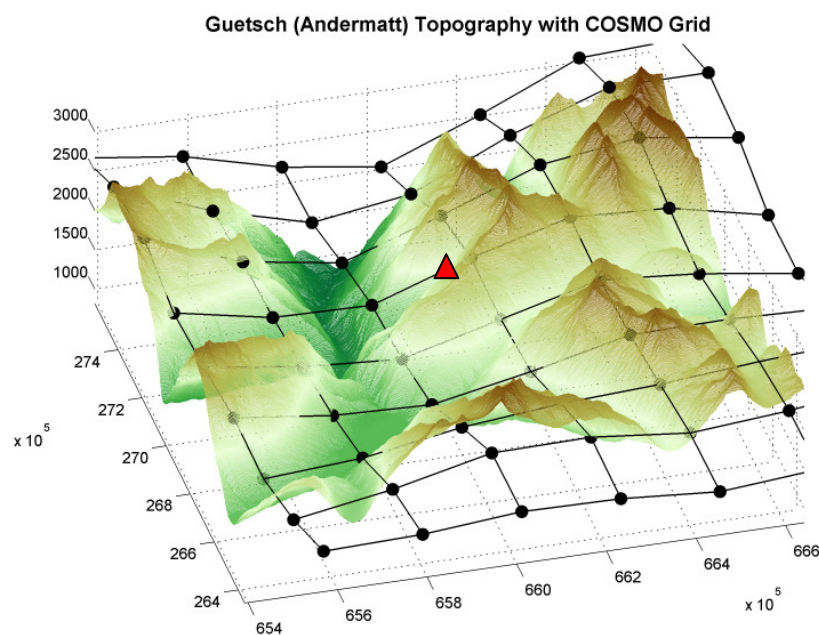


Abb. 2: Vergleich der wirklichen Topographie (überhöht) mit der COSMO-2 Topographie (schwarze Punkte) am Beispiel Gütsch. Der Standort der WEA und der Meteostation ist rot eingezeichnet.

Eine Methode, um das Ergebnis einer numerischen Wettervorhersage weiter zu verfeinern, ist ein dynamisches Downscaling. Dabei werden die Ergebnisse eines gröber aufgelösten Modells als Anfangs- und Randwerte für ein feiner auflösendes Modell verwendet. In dem hier beschriebenen Downscaling-Verfahren werden die Ergebnisse des Wettervorhersagemodells COSMO durch Simulationen mit dem Computational Fluid Dynamics (CFD) Modell WindSim verfeinert.

WindSim<sup>5</sup> ist eine komplexe Software, die für die Bestimmung von Windressourcen und die Planung von Windparks entwickelt wurde. WindSim basiert auf dem weit verbreiteten CFD Modell PHOENICS<sup>6</sup>. Auf Basis der Grundgleichungen der Strömungsmechanik (Massenerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung) werden die Windfelder im dreidimensionalen Raum berechnet.

Der erste Schritt bei der Bestimmung der Windressourcen mit WindSim besteht in der Berechnung der Windfelder. Hierfür wird das Modellgebiet aus 12 Richtungen (alle 30 Grad) angeströmt. Als Anfangs- und Randwerte werden horizontal homogene logarithmische Windprofile vorgegeben. Diese logarithmischen Windprofile werden durch die Höhe der Grenzschicht und durch die Windgeschwindigkeit oberhalb der Grenzschicht bestimmt. Die Standardwerte sind 500 m Grenzschichthöhe und 10 m/s Windgeschwindigkeit oberhalb der Grenzschicht. Für die Simulationen wird eine neutrale Schichtung angenommen. Das Ergebnis der Strömungssimulation mit WindSim ist ein stationäres, dreidimensionales Windfeld.

Aufgrund der idealisierten Anfangs- und Randbedingungen stellt das Ergebnis keine absolute Lösung dar. Im Falle von Windressourcenberechnungen wird eine, meist gemessene, Klimatologie zur Bestimmung der absoluten Werte eingefügt. Im Falle des hier angewandten dynamischen Downscalings werden die Ergebnisse des Wettervorhersagemodells COSMO entsprechend der mit WindSim berechneten relativen Änderung modifiziert. Hierfür werden Windgeschwindigkeit und -richtung im WindSim Ergebnis in der Höhe der COSMO-Ergebnisse über die Gitterweite des COSMO Modells gemittelt. Diese Windgeschwindigkeit und Windrichtung wird ins Verhältnis gesetzt zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der Position der Windmessung bzw. WEA und daraus ein Korrekturfaktor berechnet. Der Korrekturfaktor beschreibt die Winddrehung zwischen der gemittelten Windrichtung in der Höhe und der Windrichtung an der Zielposition und die relative Geschwindigkeitsänderung zwischen der gemittelten Windgeschwindigkeit in der Höhe und an der Zielposition. Diese Korrekturfaktoren für Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden auf die COSMO Ergebnisse angewendet, wobei im Grenzbereich zwischen den Windrichtungssektoren die Korrekturfaktoren interpoliert werden.

Die Berechnung der Korrekturfaktoren erfolgt offline und die Ergebnisse werden in einer Lookup-Tabelle zusammengefasst, mit der die COSMO-Ergebnisse in einem schnellen Postprocessing modifiziert werden können. So kann trotz ressourcenaufwändiger WindSim-Simulationen ein Postprocessing durchgeführt werden, das auch für den operativen Betrieb geeignet ist. Für WEA Standorte wird die korrigierte Windgeschwindigkeit mit Hilfe der dichtekorrigierten Leistungskurve der jeweiligen Anlage in Leistung umgerechnet.

---

<sup>5</sup> [www.windsim.com](http://www.windsim.com)

<sup>6</sup> [www.cham.co.uk](http://www.cham.co.uk)

Das dynamische Downscaling unterliegt einigen Beschränkungen:

- Eine grundlegende Schwierigkeit liegt darin, dass das dynamische Downscaling massgeblich durch das antreibende Modell bestimmt wird. Eine ungenügende Vorhersage des Wettervorhersagemodells kann durch das Downscaling nicht oder nur in sehr geringem Masse korrigiert werden. Wird z.B. ein Frontdurchgang vom Wettervorhersagemodell zu spät vorhergesagt, wird das höher auflösende Windmodell diesen verzögerten Frontdurchgang verfeinern, kann aber nicht den zeitlichen Verlauf korrigieren.
- Bei den hier durchgeführten Rechnungen mit WindSim wird eine neutrale Schichtung angenommen. In Realität treten natürlich auch andere Schichtungen auf, die zu deutlich geändertem Strömungsverhalten führen können.

Diese Einschränkung muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

## 4.2. Beschreibung der WindSim-Simulationen

Für folgende Untersuchungsstandorte wurden WindSim Simulationen durchgeführt:

- Mont Crosin (WEA)
- Collonges (WEA)
- Evionnaz (Messstation)
- Gütsch (WEA und Messstation)
- Feldmoos (WEA)
- Chasseral (Messstation)

Die WindSim-Simulationen wurden als so genannte genestete Modellrechnungen durchgeführt. Zunächst wird für ein grösseres Gebiet eine Rechnung mit horizontalen Gitterweiten von ca. 200 m durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Rechnung werden als Anfangs- und Randwerte für eine Simulation mit kleineren Gitterweiten verwendet. Diese Rechnung wurde meist mit einem gestauchten Gitter durchgeführt, d.h. die Gitterweite ist an den Rändern des Modellgebiets am grössten und wird zur Mitte hin geringer. Am Prognosestandort liegt sie im Bereich von 25–50 m in Abhängigkeit von der Grösse des Gebiets.

Abb. 3 zeigt am Beispiel des Chasserals die simulierte, bodennahe Windgeschwindigkeit für Westanströmung. Es ist deutlich zu erkennen, wie stark die räumliche Variabilität des Windfelds schon auf kleinstem Raum ist. Der blaue Rahmen bzw. die weissgestrichelten Linien kennzeichnen die Gitterbox des COSMO-7 bzw. COSMO-2. Es ist deutlich zu erkennen, dass z.B. innerhalb der COSMO-7-Gitterbox subgridskalige Höhenunterschiede von etwa 700 m auftreten, die in der COSMO-7 Simulation durch eine Höhe repräsentiert werden. Entsprechend werden auch die orografischen Effekte auf die

Windgeschwindigkeit vernachlässigt. Die Korrektur anhand von WindSim-Simulationen kann hier zu einer besseren Beschreibung der Windverhältnisse führen.

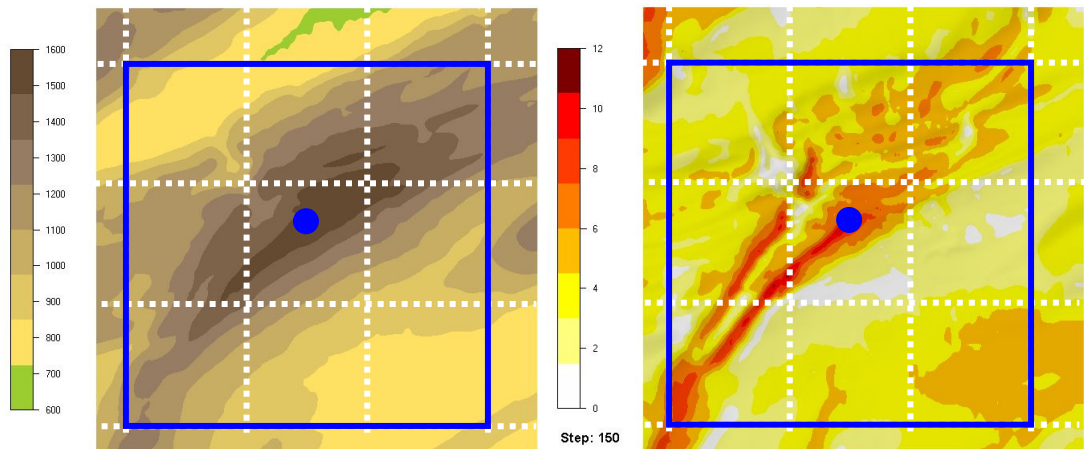


Abb. 3: Orografiehöhe [m] im inneren Modellgebiet für die Windmessung Chasseral (links) und simulierte Windgeschwindigkeit [m/s] in der untersten Modellschicht bei Westanströmung (rechts). Der blaue Punkt markiert die Position der Windmessung, der blaue Rahmen kennzeichnet die Gitterbox des COSMO-7 Modells mit 6.6 km Gitterweite und die weiss gestrichelten Rahmen die Gitterboxen des COSMO-2 Modells mit 2.2 km Gitterweite.

## 5. Statistisches Downscaling mit MOS

### 5.1. Einleitung

Der Begriff Model Output Statistics (MOS) fasst im Grunde alle statistischen Verfahren zur Nachbearbeitung von meist numerischen Prognosen in der modernen Wettervorhersage zusammen. Die Entwicklung des in diesem Bericht beschriebenen MOS Systems ist basierend auf den aktuellen Erkenntnissen der Wissenschaft, der verfügbaren Ressourcen und den im ersten Zwischenbericht definierten Zielen durchgeführt worden. Dabei wurde mit einem Trainingsdatensatz eine schrittweise, multiple lineare Regression zwischen Modellvariablen (Prädiktoren) und vorhergesagter Grösse (Prädiktand) mittels Regression auf den verbleibenden Residuen durchgeführt. Ergebnisse dieser Methode sind für jeden Standort hergeleitete Regressionsgleichungen mit optimierten Regressionskoeffizienten (MOS-Parametern). Dieses Verfahren ist einfach, übersichtlich und wird erfolgreich z.B. auch von Haalman und Knüpfner (2003) verwendet.

### 5.2. Datengrundlage

#### Untersuchungsstandorte

Es wurde für alle Standorte der Tab. 1 ein MOS basierend auf folgenden Daten entwickelt:

- Abhängig von der Art des Untersuchungsstandorts (WEA oder Messstation) ist der Prädiktand entweder die Leistung der WEA oder die Windgeschwindigkeit.
- Die Daten des SMN vom 15.5.2007 bis 31.7.2008 wurden verwendet. Sie basieren auf 10-Minuten-Werten, aus denen Stundenmittel berechnet wurden.
- Die Daten der WEA vom 15.5.2007 bis 31.7.2008 wurden verwendet. Die WEA-Daten wurden vorgängig geprüft. Unplausible Daten (z.B. Anlagenausfall oder übermässig tiefe Leistungen) wurden eliminiert.

#### Modelldaten

Prognosedaten des COSMO-2 Modells standen vom 15.5.2007 bis 31.7.2008 zur Verfügung. Pro Untersuchungsgebiet lagen die Modelldaten in Form eines dreidimensionalen Arrays von 21 x 21 horizontalen Gitterpunkten vor, der auf den Untersuchungsstandort zentriert ist. Der in der Mitte liegende Gitterpunkt (10,10) wurde für die punktuellen Prädiktoren verwendet. In der vertikalen Richtung wurden die 31 untersten Schichten des COSMO-2 Modells extrahiert. Für die Analysen und die Modellanpassung wurde nur der 03 UTC Lauf verwendet.

Prognosedaten des COSMO-7 Modells standen für den 00 UTC Lauf vom 15.5.2007 bis 31.7.2008 zur Verfügung. Allerdings wurden die Daten vor dem 1.12.2007 für die finalen MOS Gleichungen nicht verwendet, da das COSMO-Modell vorher mit einer niedrigeren

vertikalen Auflösung betrieben wurde und eine einheitliche Modellkonfiguration für die Entwicklung des MOS notwendig ist (vgl. Abs. 9.1). Pro Untersuchungsgebiet lagen die Modelldaten in Form eines dreidimensionalen Arrays von 11 x 11 horizontalen Gitterpunkten vor, der auf den Untersuchungsstandort zentriert ist. Der in der Mitte liegende Gitterpunkt (5,5) wurde für punktuelle Analysen verwendet. Auch hier beträgt die vertikale Auflösung 31 Schichten.

#### Untersuchungsperiode

Die Untersuchungsperiode ("Trainingsperiode") wurde basierend auf den vorhandenen Daten, wie in Tab. 4 dargestellt, aufgeteilt.

Tab. 4: Aufteilung des Untersuchungszeitraums für COSMO-2 und COSMO-7.

Modell	Gesamter Zeitraum	Sommer	Winter
COSMO-7	1.12.2007 – 31.7.2008	1.4.2008 – 31.7.2008	1.12.2007 – 31.3.2008
COSMO-2	1.6.2007 – 31.5.2008	1.6.2007 – 30.9.2007 1.4.2008 – 31.5.2008	1.10.2007 – 31.3.2008

#### Aufteilung in Entwicklungs- und Testdatensatz

Für die Bestimmung der MOS-Parameter wurde auf eine Aufteilung in Entwicklungs- und Testphase verzichtet. Der Grund dafür ist die kurze Entwicklungsphase und die Tatsache, dass im Projekt nach der Entwicklungsphase eine zusätzliche Testphase vorgesehen ist.

### **5.3. Erarbeitung des MOS**

Es wurde ein MOS verwendet, das auf multiplen linearen Regressionen beruht. Die Prädiktoren wurden anhand der Korrelationskoeffizienten ausgewählt, d.h. es wurde bei jedem Regressionsschritt der Prädiktor mit dem höchsten Wert des Korrelationskoeffizienten verwendet. Der entsprechende MOS-Koeffizient wurde mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Jeder nachfolgende Regressionsschritt wurde auf den Residuen der vorangegangenen Regressionen durchgeführt. Es wurden maximal vier Prädiktoren verwendet (maximal vier Regressionsschritte).

### 5.3.1. Prädiktoren

In Tab. 5 sind die Prädiktoren aufgelistet. Diese wurden aus den Arrays der COSMO-Prognosen berechnet, die für jeden einzelnen Standort vorhanden waren (vgl. Modelldaten).

Tab. 5: Liste der Prädiktoren.

Prädiktoren	Beschreibung
FF10 m	Windgeschwindigkeit auf 10 m über Grund [m/s]
FF100 m	Windgeschwindigkeit auf 100 m über Grund [m/s]
RH	Relative Feuchtigkeit auf 2 m über Grund [%]
RHUP	Relative Feuchtigkeit auf 3'000 m über Meer [%]
TT	Temperatur auf 2 m über Grund [°C]
TGRAD	Vertikaler TT-Gradient [°C/m] zwischen 3'000 m.ü.M. und Oberfläche
DPWE	Horizontaler Druckgradient W–E auf 3'000 m.ü.M. [Pa/m]
DPNS	Horizontaler Druckgradient S–N auf 3'000 m.ü.M. [Pa/m]
FGEO	Geostrophischer Wind auf 3'000 m.ü.M., berechnet aus DPNS und DPWE [m/s]

Der geostrophische Wind wurde mit folgender Formel angenähert:

$$F_{geo} = \sqrt{(uu^2 + vv^2)}$$

$$uu = \frac{DPWE}{f \cdot rho}$$

$$vv = \frac{DPNS}{f \cdot rho}$$

$$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin(lat)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{86400}$$

$$rho = 1.247015 \cdot \exp(-0.0001404 * 3000)$$

DPWE und DPNS wurden mit Hilfe von exponentiellen Höhengradienten auf das Höhengniveau von 3'000 m korrigiert (basierend auf den Daten des nächstgelegenen Höhenglevels).

### 5.3.2. Prädiktanden

Zwei Prädiktanden wurden bestimmt: Für WEA-Standorte die Leistung und für Messstationen die Windgeschwindigkeit auf der jeweiligen Messhöhe.

Für das COSMO-2-Modell wurden insgesamt fünf unterschiedliche MOS-Gleichungen angepasst: eine über den gesamten Untersuchungszeitraum und alle Zeitpunkte und je eine pro Jahres- (Sommer/Winter) und Tageszeit (Tag/Nacht).

Für das COSMO-7-Modell wurden zwei MOS-Gleichungen angepasst: eine für Tag 0 ("heute") und eine für Tag 1 ("morgen").

#### Windgeschwindigkeit ( $FF_{mod}$ )

Zur Berechnung der Windgeschwindigkeit ( $FF_{mod}$ ) wurde folgendes Modell verwendet:

$$FF_{mod} = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_3 + e \cdot x_4 \text{ [m/s]}$$

Als Abbruchkriterium galten folgende Bedingungen:

- Es wurden maximal vier Prädiktoren aus Tab. 5 bestimmt.
- Die lineare Regression musste ein Bestimmtheitsmass  $r^2$  von mindestens 0.1 aufweisen.

#### Leistung der WEA ( $PR_{mod}$ )

Zur Berechnung der Leistung der WEA ( $PR_{mod}$ ) wurde folgendes Modell verwendet:

$$PR_{mod} = (a + b \cdot x_1)^2 + f + d \cdot x_2 + d \cdot x_3 + e \cdot x_4 ,$$

$$x_1 > x_{min} \text{ und } PR_{mod} < PR_{max}$$

wobei

$$x_{min} = -a/b$$

$$PR_{max} = \text{Installierte Turbinenleistung}$$

$$PR_{mod} \text{ in [kW]}$$

Für diese MOS-Gleichungen galten die gleichen Abbruchkriterien wie für diejenigen der Windgeschwindigkeit:

- Es wurden maximal vier Prädiktoren aus Tab. 5 bestimmt.
- Die lineare Regression musste ein Bestimmtheitsmass  $r^2$  von mindestens 0.1 aufweisen.

### 5.3.3. Tageszeit- und Saison-Modell

Für das COSMO-2-Modell wurde eine Aufteilung in Tag und Nacht vorgenommen:

- 20–4 Uhr (UTC): Nachtmodell
- 8–16 Uhr (UTC): Tagesmodell
- 5–7 und 17–19 Uhr (UTC) Übergangszeit (lineare Interpolation der MOS-Ergebnisse)

Die Jahreszeiten wurden wie folgt aufgeteilt:

- Winterhalbjahr: November–Februar
- Sommer: Juni–August
- Übergangsperioden März, April, Oktober und November: lineare Interpolation der MOS-Ergebnisse (z.B. März = 2/3 Winter und 1/3 Sommer).

### 5.3.4. Erwartete Unsicherheit

Die Prognose der relativen Unsicherheit (in %) wird mit folgendem exponentiellen Modell abgeschätzt:

$$r_{ff,mod} = \exp(a + b \cdot FF_{mod})$$

$$r_{pr,mod} = \exp(a + b \cdot PR_{mod})$$

Wobei a und b an die jeweiligen Verhältnisse empirisch angepasst werden.

## 6. Statistisches Downscaling mit Kalman Filter

### 6.1. Einleitung

Ziel der statistischen Nachbereitung zur lokalen Verfeinerung von Modellprognosen ist die Identifizierung eines geeigneten Modells, das den systematischen Unterschied zwischen den Wettermodellprognosen und den beobachteten Werten beschreibt, um diesen Unterschied für die vorhergesagten Modellwerte in die Zukunft zu simulieren.

Hierfür können stationäre Modelle identifiziert werden, die aus vergangenen Daten hergeleitet und deren geschätzte Parameter (z.B. Linearkoeffizienten) als konstant angenommen werden. Die Variabilität des Fehlers wird dabei lediglich durch die Variabilität der gewählten Prädiktoren erklärt (siehe lineares MOS, Kapitel 5).

Ein anderer Ansatz wird bei der Modellierung und Simulation des Prognosefehlers mit Hilfe des Kalman Filters verfolgt (Kalman 1960, Persson 1989). Hier kann die Änderung des Fehlers mit der Zeit explizit formuliert und zeitvariable Parameter rekursiv aus vergangenen Fehlern geschätzt werden. Dabei werden sowohl Messfehler als auch Unsicherheiten in der Schätzung der Parameter berücksichtigt. Voraussetzung für diese Art von statistischer Nachbereitung ist ein geeignetes Fehlermodell, das die dominantesten Prädiktoren beinhaltet. Um die aktuelle Vorhersage zu korrigieren, werden die Beobachtungen des vergangenen Tages und die entsprechenden Vorhersagen herangezogen. Das Fehlermodell ist für jeden Standort gleich, lediglich die zeitvariablen Parameter werden aus den stationsspezifischen Daten geschätzt. Dies ermöglicht eine Übertragung auf neue Standorte ohne nennenswerten Aufwand.

Der Prognosefehler errechnet sich aus der Differenz zwischen der Modellvorhersage und der Beobachtung,

$$err_{FF}(t) = FF_{MOD}(t) - FF_{OBS}(t) \quad (1)$$

Erwartungsgemäß und wie auch die Ergebnisse der stückweisen linearen Regression bestätigen (Kapitel 5), ist die prognostizierte Windgeschwindigkeit in einer der Messung entsprechenden Höhe stark mit den Beobachtungen korreliert. Allerdings sind Muster zu beobachten, die Hinweise für ein Fehlermodell geben. Zum einen gibt es eine systematische Abweichung der Prognose von der Beobachtung und zum anderen hängt der Fehler mit der Höhe der vorhergesagten Windgeschwindigkeit ab. Der Prognosefehler kann deshalb mit einer dynamisch linearen Regression beschrieben werden,

$$\hat{err}_{FF}(t) = x_1(t) + x_2(t) \cdot FF_{MOD}(t) + \eta_{FF} \quad (2)$$

wobei  $\eta_{FF}$  die Unsicherheit dieses Modells beschreibt. Der zeitliche Verlauf der Linearkoeffizienten  $x_1$  und  $x_2$  wird mit einer Zufallsbewegung mit gegebenen Varianzen,  $v_1$  und  $v_2$  beschrieben,

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i, i = 1, 2 \quad (3)$$

Die Schätzung der  $x_i$  wird mit dem Kalman Filter durchgeführt. Die dazugehörigen Gleichungen und der rekursive Schätzalgorithmus sind in Anhang A kurz erläutert. Für die Verfeinerung der aktuellen Prognose wird dann der Fehler mit (3) und den Modellvorhersagen propagiert und zur Prognose addiert.

Für eine erfolgreiche Anwendung des Kalman Filters sind geeignete Anfangsbedingungen für die Komponenten (insbesondere die Fehlervarianzen  $v$  und  $\eta$ ) der Filtergleichungen vonnöten. Diese können, wenn verfügbar, aus längeren Datenreihen abgeschätzt werden oder "online" optimiert werden. Für die lokale Korrektur von Windgeschwindigkeitsprognosen in der Projekt-Testphase werden die Fehlervarianzen  $\eta_{FF}$  nach dem Algorithmus von Smith (1967) online optimiert und die Varianzen  $v_i$  über ihr konstantes Verhältnis ("*noise variance ratio*") berechnet.

Die Ergebnisse des Kalman Filters umfassen auch die Kovarianzmatrix der geschätzten Koeffizienten. Aus ihren diagonalen Einträgen kann mittels Gauss'scher Fehlerfortpflanzung die Unsicherheit in den verfeinerten Prognosen abgeschätzt werden.

$$\sigma_{FFcorr}(t) = \sigma_{x_1}(t) + \sigma_{x_2}(t) \cdot abs(FF_{MOD}(t)) \quad (4)$$

Für die ausgewählten WEA Standorte stehen Leistungsmessungen für die Testperiode zur Verfügung. Aus den Windgeschwindigkeitsmessungen der nächsten meteorologischen Messstandorte und den entsprechenden Leistungsdaten kann eine empirische Leistungskurve ermittelt werden, die nicht nur die Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und Leistung beschreibt, sondern auch systematische "Störfaktoren", wie zum Beispiel den Unterschied zwischen Nabenhöhe und Höhe der Windmessungen, oder Unterschiede durch grossen räumlichen Abstand (vor allem beim Standort Collonges/Evionnaz). Mit dieser Beziehung können aktuelle Windgeschwindigkeitsprognosen in Leistungsprognosen umgewandelt werden, wenn die Leistungsbeobachtungen nicht online zur direkten Fehlermodellierung bereitstehen. Zur Umwandlung in Leistung wird die empirische Leistungskurve durch Fitting an eine S-Kurve der folgenden Form bestimmt,

$$P(FF) = \frac{P_{max}}{(1 + \exp^{-k(FF - FF_h)})} \quad (5)$$

Wobei  $P_{max}$  der Nennleistung der jeweiligen installierten Turbine entspricht, der Fitting Parameter  $k$  die Steigung und  $FF_h$  den Wendepunkt der S-Kurve bestimmen. Die Parameterwerte und ein Beispiel dieses Zusammenhangs finden sich im Anhang A. Zur Fehlerfortpflanzung der Koeffizientenunsicherheiten aus (3) in der Prognose dienen lokale Ableitungen dieser Kurve.

$$\sigma_{ppcorr}(t) = \frac{dpp}{dff} \cdot \sigma_{ffcorr}(t) \quad (6)$$

## 6.2. Datengrundlage

Im Unterschied zur MOS-Methode (Kapitel 5) wird für eine korrigierte Prognose lediglich die Messungen der vergangenen 24 Stunden benötigt. Für den Test verschiedener Fehlermodelle für die Windgeschwindigkeit und die Leistung wurden COSMO-2 und COSMO-7 Vorhersagen und stündlichen Beobachtungen der Windgeschwindigkeit an den ausgewählten Messstationen, sowie auf Leistungsmessungen der beteiligten WEA für den Zeitraum von 15.5.2007 bis 31.7.2008 genutzt. Die Untersuchungsstandorte sind in Kapitel 3 beschrieben.

Zwei verschiedene Fehlermodelle wurden für die Verfeinerung der Windgeschwindigkeitsprognose und der Ableitung der zu erwartenden Leistung getestet und anhand von ausgewählten Gütemassen (Kapitel 8.2) gegen die direkte Modellprognose verglichen. Daraus ergab sich eine standortspezifische Wahl des im Fehlermodell eingehenden Prädiktors, in der sich die Höhenunterschiede zwischen Modellgitterpunkt und Messstation widerspiegelt. Liegt die Modell-Orografie tiefer als der Standort von Interesse (vor allem bei Bergstandorten), dann ist die prognostische Windgeschwindigkeit auf dem Modell-Level 59 (etwa 30 m über Grund) zu wählen. Sind sich die Höhen von Station und Modellgitterpunkt ähnlich (Oron, Schaffhausen), ist die Windgeschwindigkeit des Modell-Levels 60 (etwa 10 m über Grund) geeigneter.

## 7. Der Prognose-Prototyp

### 7.1. Prognose-Prozess

#### 7.1.1. *Modelldaten*

Achtmal täglich sind Prognosen beider Versionen des COSMO Modells verfügbar. Der Prognosehorizont variiert je nach Tageszeit. Alle drei Stunden wird mit COSMO-7 eine 24-Stunden-Prognose gerechnet und als Randfelder für die verfeinerte 24-Stunden-Prognose von COSMO-2 zur Verfügung gestellt. Bei den Läufen von 00 UTC und 12 UTC werden, zusätzlich zu den 24-Stunden-Prognosen mit den beiden COSMO Gitterweiten, 72-Stunden-Prognosen mit COSMO-7 gerechnet.

Der zeitliche Ablauf der COSMO-Vorhersagen ist schematisch in Abb. 4 dargestellt. Die COSMO-7 Vorhersagen mit Startzeit 00 und 12 UTC sind nach 150 Minuten (etwa 2:30 UTC, entspricht 3:30 MEZ im Winter und 4:30 MESZ im Sommer) verfügbar. Die kürzeren Läufe sind schon nach 90 Minuten fertig gerechnet.

Für den Prognose-Prototyp wurden für die Kurzfristprognosen (Horizont 24–48 Stunden) die COSMO-7 Daten des 00 UTC Laufs verwendet. Für die Kürzestfristprognosen wurden die COSMO-2 Vorhersagen der Einfachheit halber nur für 03 UTC und 12 UTC berücksichtigt (Tab. und Abb. 4). Im operationellen Betrieb an der MeteoSchweiz werden die COSMO-2-Rechnungen jedoch alle drei Stunden aktualisiert, so dass für die Kürzestfristprognosen regelmässig aktuelle Ergebnisse zur Verfügung stehen.

Tab. 6: Für den Prototyp benutzte COSMO-Vorhersagen.

COSMO-Modell	Lauf	verfügbar	Prognosezeitraum	Zielperiode Prognose
COSMO-7	00 UTC	ca. 02:30 UTC	72 h (00:00–24:00)	00:00–24:00 (2. Tag)
COSMO-2	03 UTC	ca. 04:30 UTC	24 h (03:00–03:00)	06:00–12:00 (1. Tag)
COSMO-2	12 UTC	ca. 13:30 UTC <sup>7</sup>	24 h (12:00–12:00)	15:00–21:00 (1. Tag)

<sup>7</sup> Für den Prototypen wurden die COSMO-2 Daten vom 12 UTC Lauf erst mit denjenigen von COSMO-7 fertiggestellt. Es entstand in diesem Fall eine Verzögerung von ca. 60 Minuten auf ca 14:30 UTC

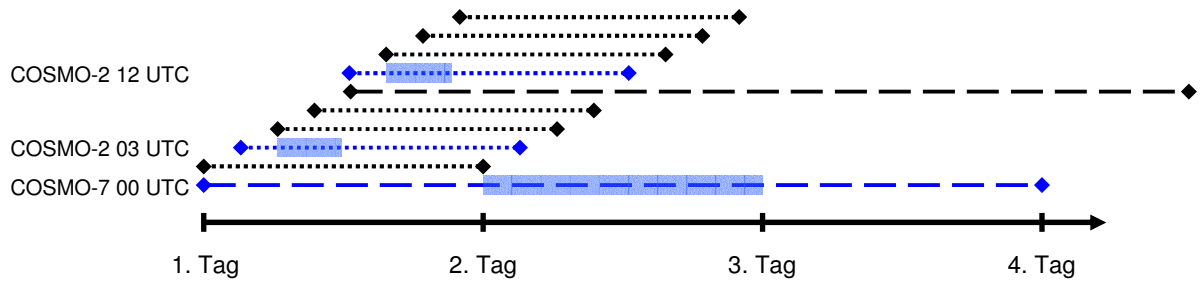


Abb. 4: Schematische Darstellung der im Prototypen benutzten COSMO-Modellläufe: gestrichelt dargestellt sind die täglich verfügbaren COSMO-7-Läufe mit 72 Stunden Vorhersage, gepunktet die COSMO-2-Läufe mit 24 Stunden Vorhersage. Im Prototypen wurden die blau markierten Läufe genutzt. Blau hinterlegt sind dabei die Abschnitte, die für die Vorhersagen im Prototypen benutzt wurden (Vorhersagehorizont 3–9 Stunden bzw. 24–48 Stunden).

### 7.1.2. Modellbetrieb

Der Betrieb des Modells auf den Rechnern des Schweizerischen Hochleistungsrechenzentrums CSCS in Manno läuft grundsätzlich völlig automatisch. Eine Reihe von Skripts – das so genannte LM-Package – überwacht und startet zu den gegebenen Zeitpunkten die verschiedenen Teile der Systems.

Im Wesentlichen sind zwei Komponenten für einen COSMO Lauf nötig:

- Ergebnisse aus dem globalen Model des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen ECMWF werden als Randfelder für die COSMO-7-Rechnung benutzt.
- Sämtliche vorhandene Messdaten werden gesammelt und durch das Assimilationsverfahren ins Modell eingespeist, um einen Zustand der Atmosphäre abzubilden, der der Realität so nahe wie möglich ist.

Die Resultate der COSMO-Rechnungen werden im GRIB-Format gespeichert. Die binären GRIB-Files können in einem ersten Postprocessing-Schritt mit einem speziellen Programm (Fieldextra) für die weitere Verarbeitung vorbereitet werden. Die Software Fieldextra ermöglicht auch eine Umformatierung der Modelldaten in andere Formate, die den Anforderungen der Kunden entsprechen.

Abb. 5 zeigt die wichtigen Elemente der Datenflüsse, die für die COSMO-Rechnung eine Rolle spielen. Die Farben der Pfeile zeigen das Format der Daten, die zwischen zwei Etappen übermittelt werden, und sind in der Legende der Abbildung erklärt.

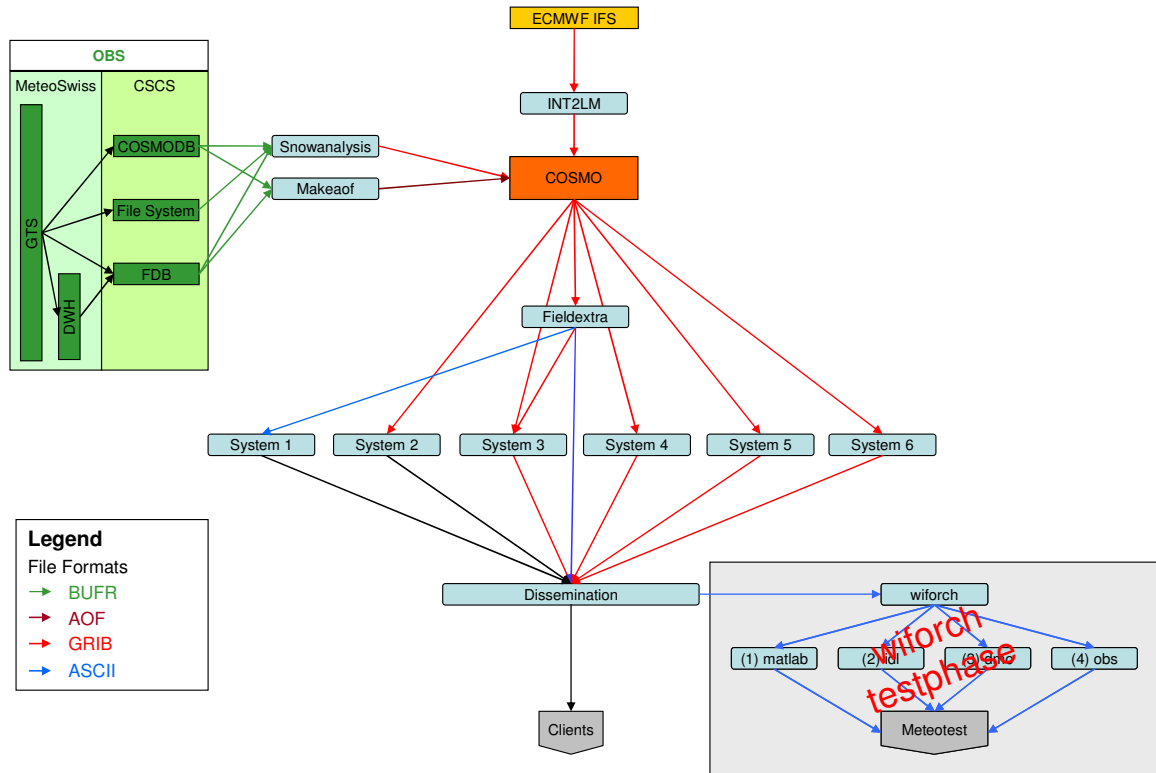


Abb. 5: Schematische Darstellung der Komponenten der COSMO Produktionskette während der Testphase.

### 7.1.3. Betrieb während der Testphase

Für die Testphase wurde entschieden, die verschiedenen Downscaling-Methoden im Anschluss an die Modellläufe laufen zu lassen statt sie in das LM-Package zu integrieren. Diese Lösung wurde aus zwei Gründen vorgezogen:

- Einerseits waren keine Eingriffe ins aktuelle System nötig, bis auf die Extrahierung der Daten aus den Modellergebnissen.
- Andererseits bot die Lösung eine grössere Flexibilität und erlaubte schnellere Anpassungen.

Jedes Postprocessing System wurde unabhängig entwickelt und mit Hilfe von Skripts aufgerufen, sobald neue Modelldaten bereit waren.

Das Windforecasting Hauptskript ("Wiforch") wird dreimal täglich gestartet. In einer ersten Phase wird kontrolliert, ob die nötigen Modelldaten existieren. Falls die Daten fehlen, wird zuerst gewartet, bis diese eintreffen. Sobald Daten gefunden werden, ruft das Skript die verschiedenen Postprocessing Skripts auf (Abb. 6).

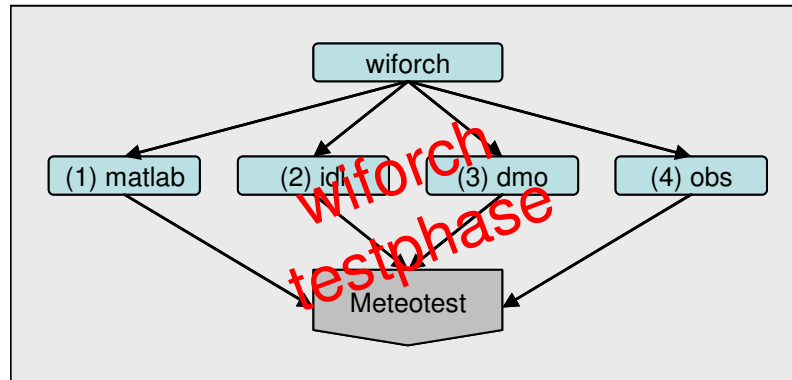


Abb. 6: Postprocessing für die Windenergie Vorhersage.

Die Produkte, die im Rahmen des Windforecastings zur Verfügung gestellt wurden, werden mit verschiedenen Systemen gerechnet. Das Ausgabeformat hingegen ist standardmässig festgelegt.

1. Ein auf Matlab basierendes Postprocessing liefert die Ergebnisse der auf Kalman Filter (KF) gestützten Verfeinerung.
2. Das MOS-Postprocessing und das Downscaling mit Hilfe der WindSim Rechnungen ist mit IDL Skripts entwickelt worden.
3. Die Werte aus dem COSMO-Model werden für die Visualisierung umformatiert.
4. Die Messdaten werden ebenfalls für die Visualisierung formatiert.

Anschliessend werden alle Daten mittels FTP auf einen **METEOTEST**-Server geschickt, wo sie für die Online-Visualisierung verarbeitet werden.

Die Lösung bot eine hohe Flexibilität während der Testphase. Es waren noch keine Sicherheitsmechanismen eingebaut, die sicherstellen, dass das ganze System läuft, falls ein Teil der Daten fehlt. In einem solchen Fall musste ein Operator eingreifen, d.h. die Nachberechnung der Daten wurde manuell initiiert.

#### 7.1.4. Möglicher operationeller Betrieb

Nach dem Abschluss des Forschungsprojekts ist es möglich, die verschiedenen überarbeiteten Postprocessing-Systeme bei Bedarf in das offizielle operative Prognosesystem der MeteoSchweiz zu integrieren, und somit die gleichen Endprodukte für die Dissemination im Rahmen einer sicheren Umgebung mit einer hohen Zuverlässigkeit zu erstellen. Mit einer solchen Lösung würde man die Wartezeiten bis zur Lieferung der Prognosedaten verkürzen können. Der genaue Aufbau des Systems muss aber noch überprüft und abgeklärt werden, da im Rahmen der Entwicklung des Prototyps mehr Gewicht auf Flexibilität als auf Schnelligkeit gelegt wurde.

## 7.2. Visualisierung

Unter der URL [aurora.meteotest.ch/wiforch](http://aurora.meteotest.ch/wiforch) wurden die Resultate des Prognose-Prototyps online visualisiert. Die Seite war passwort-geschützt. Die Projektteilnehmer und Auftraggeber erhielten in einer letzten Phase des Projekts Zugriff auf alle Resultate, während die Anlagenbetreiber nur die Daten ihres Standorts abrufen konnten. Rückmeldungen der Anlagenbetreiber wurden erbeten, blieben aber aus.

Die Resultate des Postprocessings sowie der Direct Model Output (DMO) und die Beobachtungsdaten (OBS) der SMN-Stationen und der WEA Gütsch wurden auf dem Server periodisch eingelesen und in eine MySQL-Datenbank abgelegt.

Für die Visualisierung standen folgende Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung (Abb. 7):

- Prognosedatum (Zieldatum)
- Modelllauf (COSMO-7 00 UTC, COSMO-2 03 UTC oder COSMO-2 12 UTC).
- Prognosemethoden (OBS, DMO, WindSim, MOS, KF; Mehrfachauswahl möglich)

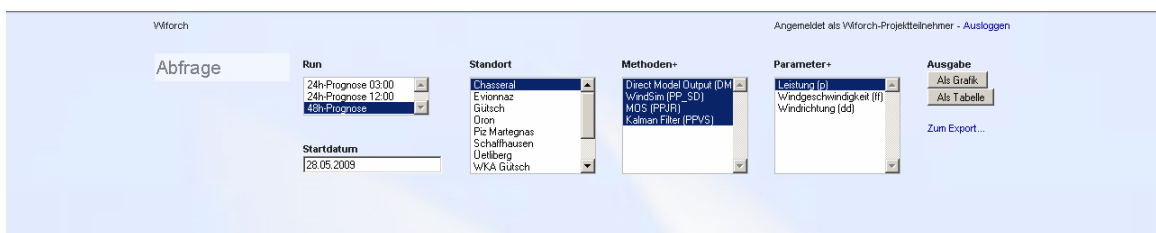


Abb. 7: Auswahl-Möglichkeiten der Online-Visualisierung.

Die Resultate wurden mit einer Grafik pro Parameter (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Leistung; Mehrfachauswahl möglich) dargestellt (Illustrationsbeispiele in Abb. 8 bis Abb. 10). Wahlweise konnten die Resultate auch als Tabelle dargestellt werden.

Neben der Onlinedarstellung als Grafiken und Tabellen wurde ein Interface erstellt, das den Export von Daten aus der Datenbank zur weiteren Analyse ermöglicht.

Eine detaillierte Bedienungsanleitung zur Visualisierung befindet sich in Anhang B.

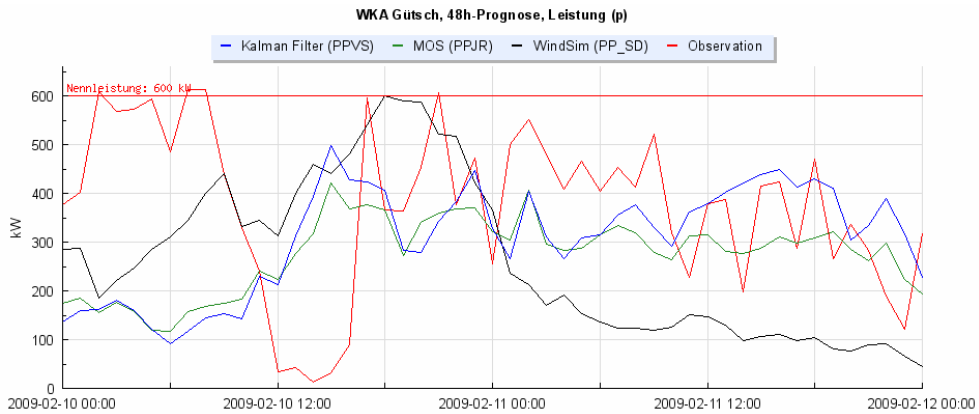


Abb. 8: Visualisierung der 48-h-Prognose vom 10.2.2009 für die Leistung der WEA Gütsch (Darstellung aller Prognosemodelle).

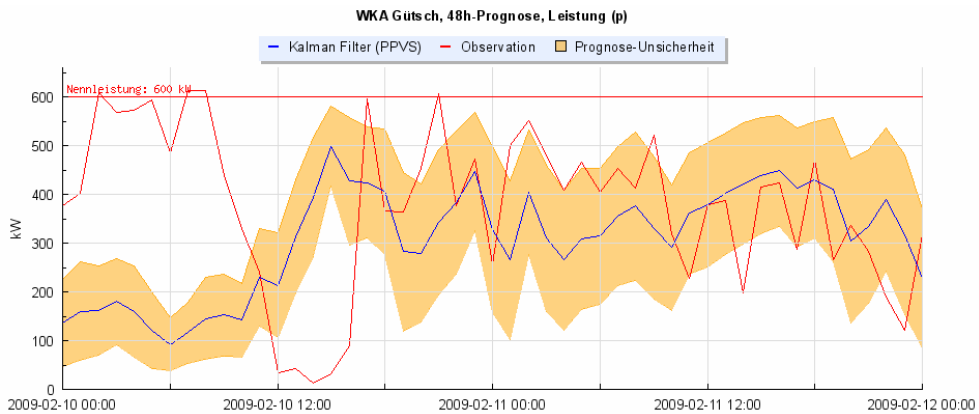


Abb. 9: Visualisierung der 48-h-Prognose vom 10.2.2009 für die Leistung der WEA Gütsch für den Kalman Filter inkl. Prognose-Unsicherheit.

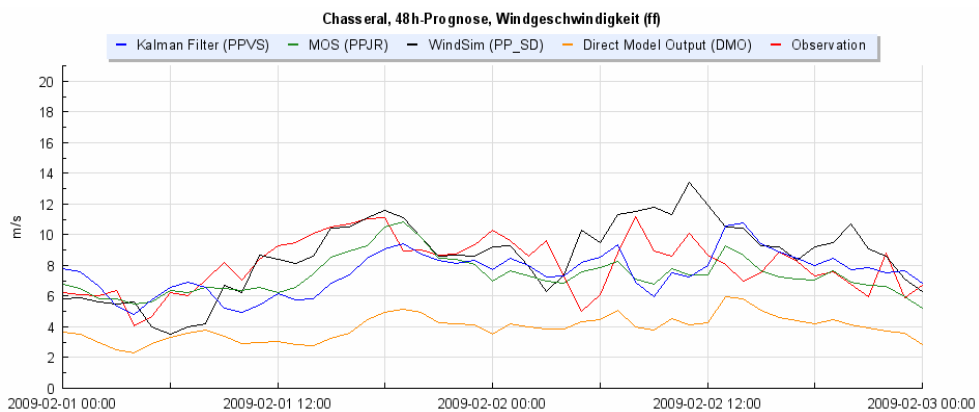


Abb. 10: Visualisierung der 48-h-Prognose vom 1.2.2009 für die Windgeschwindigkeit an der Messstation Chasseral (Darstellung aller Prognosemodelle). In diesem Fall ist deutlich die Verbesserung der Postprocessings (blau, grün, schwarz) gegenüber dem Direct Model Output (orange) zu erkennen: Die nachbearbeiteten Werte liegen unabhängig von der Methode näher an der Beobachtung (rot).

## 8. Verifikation

Das entwickelte Prognosesystem war vom 1.9.2008 bis 31.3.2009 sieben Monate quasi-operationell in Betrieb und lieferte täglich online Windgeschwindigkeits- und Leistungsprognosen für die ausgewählten Standorte und Vorhersagetermine. Die archivierten Ergebnisse dienen als Datenbasis für eine unabhängige Verifikation der verschiedenen Vorhersagemethoden.

Ziel der Verifikation ist es, die verschiedenen Vorhersagemethoden zu bewerten, zu vergleichen und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden zu identifizieren.

In Kapitel 9 wird auf Basis dieser Verifikation ein Fazit gezogen und daraus Lösungen für ein operationelles Prognosesystem skizziert.

### 8.1. Vorgehen

An den Messstationen der MeteoSchweiz werden die Prognosen der Windgeschwindigkeit verifiziert (Abs. 8.3 und 8.4), an den WEA-Standorten diejenigen der Leistung (Abs. 8.5 und 8.6). In den Verfahren MOS und Kalman Filter (KF) wurde auch die erwartete Unsicherheit der Prognose berechnet. Diese wird in Abs. 8.7 (Unsicherheit der Windgeschwindigkeitsprognose) Abs. 8.8 (Unsicherheit der Leistungsprognose) verifiziert.

Gemäss Spezifizierung des Systems und Relevanz für den Energiehandel (Abschnitt 2.1) werden die Vorhersagehorizonte 24–48 Stunden (Kurzfristprognose) und 3–9 Stunden analysiert. Neben dem direkten Vergleich der verschiedenen Vorhersagemethoden werden folgende Grössen beigezogen:

- Vergleich Kurzfristprognose mit einer Persistenzprognose (PER): Für den Folgetag definieren wir Persistenz als gleichen Tagesgang wie am Vortag beobachtet.
- Vergleich Kürzestfristprognose mit einer Persistenzprognose (PER): Diese definieren wir für den Vorhersagehorizont 3–9 Stunden konstant als der beobachtete Wert (Windgeschwindigkeit oder Leistung) um 03 UTC für den 03 UTC Lauf. Insbesondere für die Kürzestfristprognose ist eine hohe Güte der Persistenz zu erwarten, da die Beobachtung lediglich drei Stunden alt ist und systematische Fehler ausgeschlossen werden können.
- Vergleich zwischen verfeinerter Prognose und direkter COSMO Vorhersage (Direct Model Output – DMO) als Mass für die Verbesserung der Nachbereitung.
- Vergleich der Resultate der Leistungsprognosen mit Referenzwerten aus der Literatur.

Bei der Verifikation der Kürzestfristprognosen wurden sowohl die Resultate basierend auf dem 03 UTC Lauf und dem 12 UTC Lauf von COSMO-2 untersucht. Da sich keine entscheidenden Unterschiede zeigten, verzichten wir in der Präsentation der detaillierten Verifikationsergebnisse auf die Darstellung der Resultate des 12 UTC Laufs.

Neben den über den Prognosehorizont von 24–48 Stunden bzw. 3–9 Stunden gemittelten Gütemassen wird auch die Entwicklung der Gütemasse mit dem Verlauf der Zeit bzw. mit der Dauer seit Start der Prognose ("Lead Time") untersucht.

Zusätzlich wird an drei Standorten ein Vergleich der entwickelten Prognosemethoden mit den bestehenden Windgeschwindigkeitsvorhersagen auf [www.wind-data.ch](http://www.wind-data.ch) gemacht (Abs. 8.9).

## 8.2. Gütemasse und Boxplots

Die Güte der Prognosen wird mit nachfolgend definierten Gütemassen beschrieben.

Die Analyse der Vorhersagequalität basiert auf Statistiken des Unterschieds zwischen der Vorhersage (Suffix *MOD*) und der tatsächlichen Beobachtung (Suffix *OBS*),

$$err_i = (x_{MOD,i} - x_{OBS,i}),$$

wobei hier  $x$  entweder die Windgeschwindigkeit oder die Leistung repräsentiert.  $i$  steht für den jeweilige Zeitpunkt der Vorhersage/Beobachtung.

### Mittlerer Fehler / Bias (ME)

Der mittlere Fehler (Bias) über alle  $N$  Vorhersagen,  $ME$ , gibt die Lage der Fehlerverteilung an und gibt vor allem Auskunft über systematische Abweichungen der Vorhersage. Eine gute Vorhersage hat einen mittleren Fehler von null.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N err_i$$

### Standardabweichung des Fehlers (STD)

Die Standardabweichung des Fehlers,  $STD$ , gibt die Streuung der Verteilung um den mittleren Fehler an und beschreibt damit, wie weit einzelne Stundenprognosen vom mittleren Fehler abweichen können. Eine gute Vorhersage hat eine kleine Standardabweichung.

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (err_i - ME)^2}$$

### Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE)

Ein Fehlermass, welches diese beiden Eigenschaften zusammenfasst ist die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers,  $RMSE$ . Sie wird deshalb gern als einziges Vergleichs- und Gütekriterium herangezogen. Ausserdem wird der  $RMSE$  auch genutzt, um die prognostizierte Unsicherheit zu verifizieren. Ist der mittlere Fehler null, ist  $RMSE$  gleich  $STD$ . Durch die Quadrierung des Fehlers (siehe Gleichung) werden grosse Abweichungen stärker gewichtet. Eine gute Vorhersage hat einen kleinen  $RMSE$ .

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N err_i^2}{N}}$$

### Relative Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (rRMSE)

Die relative Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers,  $rRMSE$ , liefert einen auf die mittleren Beobachtungen ( $\overline{x_{OBS}}$ ) normierten Wert, der die Vergleichbarkeit zwischen den Stationen oder Saisons ermöglicht.

$$rRMSE = \frac{1}{\overline{x_{OBS}}} \cdot RMSE$$

### Mittlerer absoluter Fehler (MAE)

Der mittlere absolute Fehler ( $MAE$ ) ist ebenfalls ein zusammenfassendes Mass und beschreibt die gemittelte Abweichung der Vorhersage vom beobachteten Wert unabhängig vom Vorzeichen und ohne sie zu quadrieren. Diese Grösse ist als Alternative zum  $RMSE$  zu sehen und hier vor allem für potentielle Anwender mit aufgenommen.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |err_i|$$

### Relativer mittlerer absoluter Fehler (rMAE)

Entsprechend dem  $rRMSE$  ist der  $rMAE$  die mit mittleren Beobachtungen normierte Form des  $MAE$ .

$$rMAE = \frac{1}{\overline{x_{OBS}}} \cdot MAE$$

### Boxplots

Als geeignete Visualisierung der statistischen Verteilung der Fehler werden Boxplots oder Kastengraphik herangezogen (Beispiel in Abb. 11). An einem Boxplot lassen sich viele Eigenschaften der Fehler ablesen: Die rote horizontale Linie zeigt den Median der Verteilung, die blaue Box markiert das 25–75% Quantil (Interquartil), die schwarzen Balken sind die "Whisker" nach Tukey, d.h. die Länge der schwarzen Balken beträgt das 1.5-fache des Interquartilabstands. Die roten Kreuze markieren Daten, die noch ausserhalb der Whisker übrig bleiben.

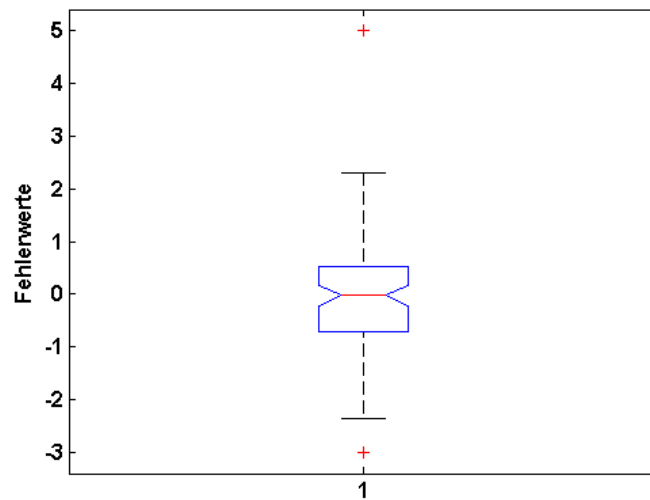


Abb. 11: Illustration eines Boxplots (Erklärung im Text).

### 8.3. Kurzfristprognose der Windgeschwindigkeit (Horizont 24–48 Stunden)

#### 8.3.1. Resultate

Tab. 7, Tab. 8, Tab. 9 und Tab. 10 zeigen den ME, STD, rRMSE und rMAE der verschiedenen Methoden an den untersuchten Standorten. Abb. 12 zeigt den typischen Verlauf des rRMSE mit dem Prognosehorizont am Beispiel der Standorte Chasseral und Abb. 13 den Sonderfall Evionnaz.

Die Saisonalität der Ergebnisse wurde für den Herbst und Winter untersucht, die Vorhersagequalität zeigte aber nur geringe Unterschiede. Daher werden die Ergebnisse im Folgenden für den gesamten Evaluationszeitraum dargestellt.

Tab. 7: Mittlerer Fehler (ME) der Windgeschwindigkeit für die Kurzfristprognose.

Methode	GUE [m/s]	PMA [m/s]	UEB [m/s]	CHA [m/s]	EVI [m/s]	SHA [m/s]	ORO [m/s]
DMO	-1.9	-1.2	-2.8	-4.0	-1.8	-1.1	-0.1
WindSim	-2.7	-	-	-1.6	-0.9	-	-
MOS	-0.3	0.2	1.4	-0.2	0.1	-2.3	0.3
KF	0.0	0.0	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	-0.1

Tab. 8: Standardabweichung (STD) der Windgeschwindigkeit für die Kurzfristprognose.

Methode	GUE [m/s]	PMA [m/s]	UEB [m/s]	CHA [m/s]	EVI [m/s]	SHA [m/s]	ORO [m/s]
DMO	3.4	3.1	3.5	3.2	2.6	1.5	1.6
PER	5.6	5.5	5.8	6.3	3.9	2.7	2.9
WindSim	4.1	-	-	4.4	3.0	-	-
MOS	3.3	4.4	6.2	3.2	2.7	1.8	1.8
KF	3.5	3.2	3.5	3.2	2.7	1.5	1.6

Tab. 9: Relative Abweichung (rRMSE) der Windgeschwindigkeit für die Kurzfristprognose.

Methode	GUE [%]	PMA [%]	UEB [%]	CHA [%]	EVI [%]	SHA [%]	ORO [%]
DMO	56	53	77	57	90	55	56
PER	80	88	98	70	110	80	97
WindSim	70	-	-	53	88	-	-
MOS	48	70	109	36	77	85	61
KF	50	52	59	36	77	45	56

Tab. 10: Relativer mittlerer absoluter Fehler (rMAE) der Windgeschwindigkeit für die Kurzfristprognose.

Methode	GUE [%]	PMA [%]	UEB [%]	CHA [%]	EVI [%]	SHA [%]	ORO [%]
DMO	41	39	58	47	65	42	42
PER	61	67	76	54	79	61	73
WindSim	54	-	-	42	66	-	-
MOS	36	43	61	27	60	69	46
KF	39	38	47	28	59	34	42

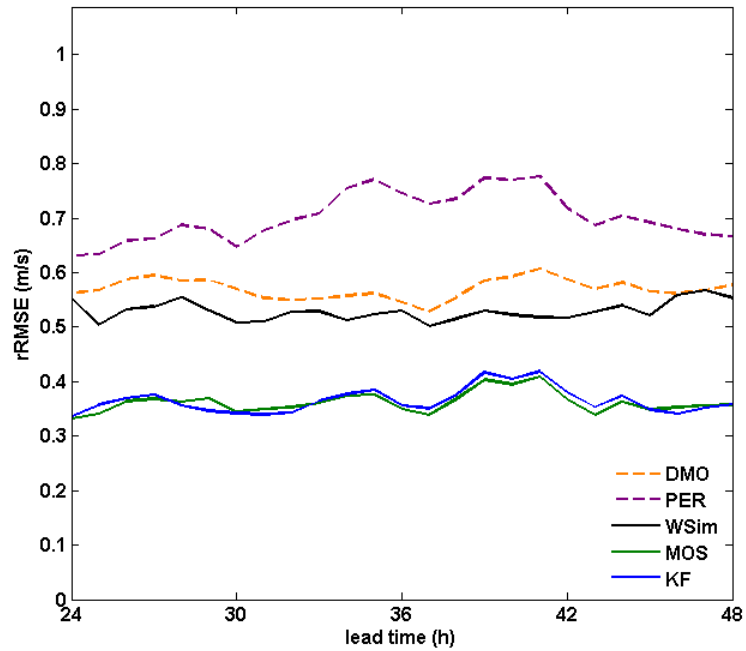


Abb. 12: rRMSE der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts (Lead Time) am Standort Chasseral.

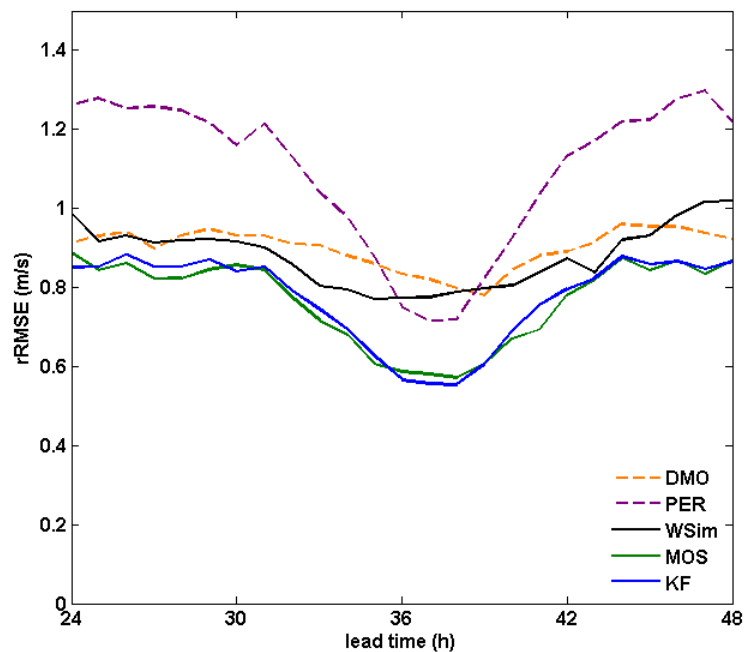


Abb. 13: rRMSE der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts (Lead Time) am Standort Evionnaz.

### 8.3.2. Analyse

Der Direct Model Output (DMO) zeigt wie erwartet (vgl. Abs. 2.2) an allen Standorten eine Unterschätzung (negativer ME), besonders deutlich an den Gipfelstandorten (Tab. 7). Dies könnte zusätzlich damit zusammenhängen, dass die Kuppenlage dieser Standorte durch das Modellgitter abgeschwächt wird.

Durch die statistische Korrektur reduzieren MOS und KF den ME weitgehend gegen Null, während die STD im Bereich derjenigen des DMO bleibt. WindSim verringert den ME nicht konsequent und die STD steigt im Vergleich zum DMO leicht.

Beim MOS zeigt sich an den Standorten Piz Martegnas, Uetliberg und Schaffhausen eine Verschlechterung der Resultate gegenüber dem DMO. Die Probleme zeigen sich am Standort Schaffhausen während der ganzen Untersuchungsperiode, bei Piz Martegnas und Uetliberg nur während eines Teils. Die genauen Ursachen dieser Resultate konnten im Rahmen des Projektes nicht untersucht werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Abweichungen nicht an der MOS-Methode an sich, sondern an deren Umsetzung liegen.

Der rRMSE des DMO schwankt zwischen 53% beim Piz Martegnas und 90% bei Evionnaz (Tab. 9). An der Mehrheit der Standorte liegt der rRMSE des DMO zwischen 50% und 60%. Typische Vorhersagefehler für den Wind in 10 m Höhe für die ersten 36 Stunden liegen in der Grössenordnung von 33–45% für den rRMSE (Focken et al., 2003). Diese Werte werden durch andere Studien bestätigt (Tambke et al., 2005; Hao et al., 2004). Berücksichtigt man die komplexe Orografie der Schweiz, liegen die Ergebnisse des DMO im erwarteten Rahmen.

In Abb. 12 ist der Verlauf des rRMSE in Abhängigkeit des Prognosehorizonts (Lead Time) für den Standort Chasseral dargestellt. Es ist kein eindeutiger Trend zur Zunahme des rRMSE mit der Lead Time erkennbar. Das bedeutet, dass die Güte der Prognose während des Prognosehorizonts 24–48 Stunden in etwa gleich bleibend ist. Daran kann auch abgelesen werden, dass der DMO eine eindeutige Verbesserung im Vergleich zur Persistenz bringt. MOS und KF schneiden am besten ab. Der Verlauf des rRMSE und die Reihenfolge der Güte der verschiedenen Verfahren sind typisch für die meisten Stationen, die in dieser Studie untersucht wurden.

Evionnaz hingegen zeigt einen deutlich anderen Verlauf des Vorhersagefehlers (Abb. 13). Tagsüber sinkt der relative Fehler, da die Windgeschwindigkeit dann im Schnitt deutlich höher ist. In Evionnaz liefern alle Methoden deutlich schlechtere Resultate als an den anderen Standorten. MOS und KF können die Prognosen nicht entscheidend verbessern. Dies muss mit der Lage des Standorts in einem engen Alpental und den entsprechenden speziellen Windbedingungen (Berg- und Talwind-System, Kanalisierungseffekte), die weder vom Vorhersagemodell und noch von einem Verfeinerungsverfahren richtig abgebildet werden, begründet werden. Um solche Standorte gut beschreiben zu können, wären Rechnungen von Wettervorhersagemodellen mit deutlich kleineren Gitterweiten notwendig.

Es lassen sich die folgenden allgemeingültigen Ergebnisse zusammenfassen (siehe Abb. 14 als Illustration für den Standort Chasseral):

- Die Kurzfristprognose der Windgeschwindigkeit durch COSMO-7 DMO ist deutlich besser als die Persistenz.
- Durch die Postprocessing-Methoden MOS und KF wird durchgehend eine Verbesserung des rRMSE im Vergleich zum DMO erzielt (Tab. 8), da sie den mittleren Fehler der Prognosen gegen Null korrigieren.
- WindSim scheint hingegen die Windgeschwindigkeitsprognosen nicht eindeutig zu verbessern; am Standort Gütsch werden die Prognosen verschlechtert.

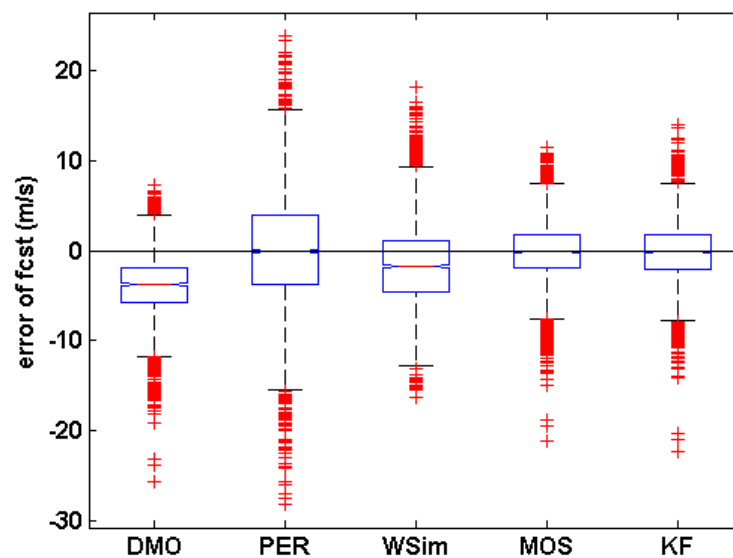


Abb. 14: Boxplot der Kurzfristprognose für die Windgeschwindigkeit am Standort Chasseral.

## 8.4. Kürzestfristprognose der Windgeschwindigkeit (Horizont 3–9 Stunden)

### 8.4.1. Resultate

Tab. 10, Tab. 11, Tab. 12 und Tab. 13 zeigen den ME, STD, rRMSE und rMAE der verschiedenen Methoden an den untersuchten Standorten. Abb. 15 und Abb. 16 zeigen den Verlauf des rRMSE mit dem Prognosehorizont an den Standorten Gütsch bzw. Chasselral.

Die Saisonalität der Ergebnisse wurde auch für die Kürzestfristprognose untersucht, die Vorhersagequalität zeigte aber auch hier nur geringe Unterschiede zwischen Herbst und Winter. Daher werden die Ergebnisse im Folgenden für den gesamten Evaluationszeitraum dargestellt.

Tab. 10: Mittlere Fehler (ME) der Windgeschwindigkeit für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC).

Methode	GUE [m/s]	PMA [m/s]	UEB [m/s]	CHA [m/s]	EVI [m/s]	SHA [m/s]	ORO [m/s]
DMO	-1.1	0.2	-2.1	-2.4	-1.2	-0.8	0.6
WindSim	-2.9	-	-	-1.1	-3.0	-	-
MOS	-0.1	-0.4	0.6	0.1	-0.5	-1.8	0.2
KF	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3	0.0	-0.1

Tab. 11: Standardabweichung (STD) der Windgeschwindigkeit für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC).

Methode	GUE [m/s]	PMA [m/s]	UEB [m/s]	CHA [m/s]	EVI [m/s]	SHA [m/s]	ORO [m/s]
DMO	2.9	2.6	3.1	2.8	3.5	1.4	1.7
PER	3.4	3.7	3.4	3.7	3.0	1.7	1.9
WindSim	3.8	-	-	4.3	2.9	-	-
MOS	2.7	2.5	2.9	2.7	2.8	1.8	1.4
KF	3.0	2.6	3.1	2.8	3.2	1.4	1.5

Tab. 12: Relative Abweichung ( $rRMSE$ ) der Windgeschwindigkeit für die Kurzzeitprognose (COSMO-2 03 UTC).

Method	GUE [%]	PMA [%]	UEB [%]	CHA [%]	EVI [%]	SHA [%]	ORO [%]
DMO	46	44	64	40	98	51	64
PER	49	61	61	41	83	55	70
WindSim	70	-	-	49	112	-	-
MOS	40	43	51	30	77	79	52
KF	43	42	53	30	85	45	56

Tab. 13: Relativer mittlerer absoluter Fehler ( $rMAE$ ) der Windgeschwindigkeit für die Kurzzeitprognose (COSMO-2 03 UTC).

Method	GUE [%]	PMA [%]	UEB [%]	CHA [%]	EVI [%]	SHA [%]	ORO [%]
DMO	34	32	48	32	73	37	48
PER	38	42	48	33	63	40	49
WindSim	54	-	-	38	86	-	-
MOS	30	31	41	23	57	59	39
KF	32	31	42	24	65	32	41

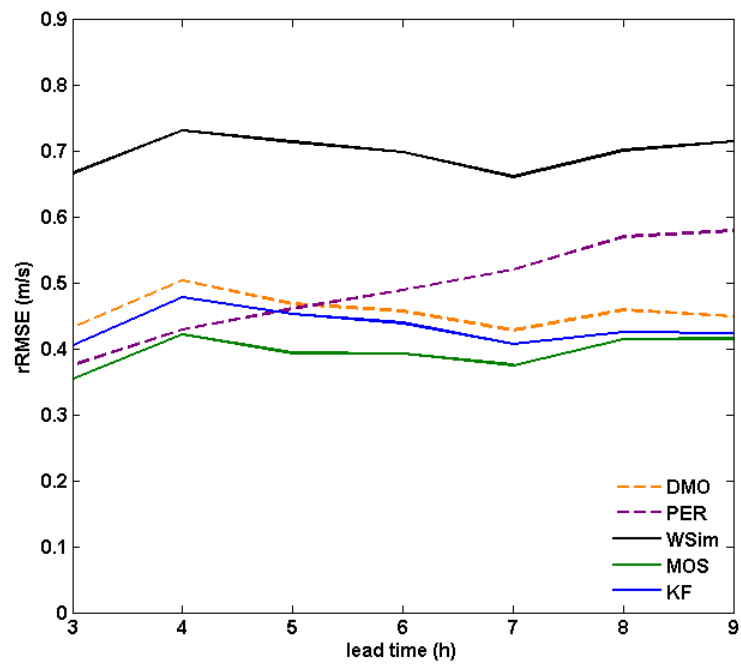


Abb. 15: rRMSE der Windgeschwindigkeit für die Kurzzeitprognose in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts (Lead Time) am Standort Gütsch (COSMO-2 03 UTC Lauf).

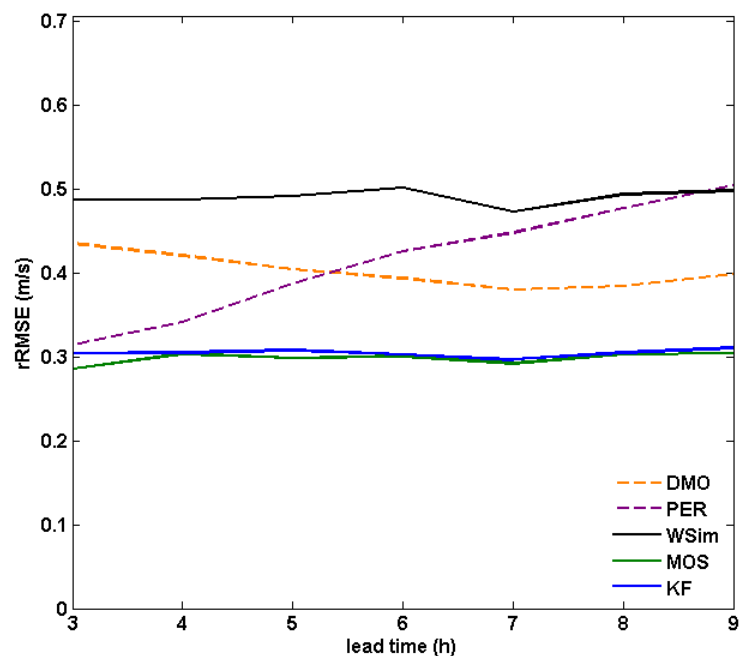


Abb. 16: rRMSE der Windgeschwindigkeit für die Kurzzeitprognose in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts (Lead Time) am Standort Chasseral (COSMO-2 03 UTC Lauf).

### 8.4.2. Analyse

Die Ergebnisse decken sich weitgehend mit denjenigen der Kurzfristprognose der Windgeschwindigkeit (Abs. 8.3). Der rRMSE des DMO schwankt zwischen 40% beim Chasseral und 98% bei Evionnaz. An vielen Standorten liegt dieser bei ca. 40–50%, was angesichts der komplexen Orographie der Schweiz im Rahmen der erwarteten Ergebnisse liegt.

MOS und KF verbessern vor allem den ME. Die STD bleibt in der Grössenordnung des DMO. Die tiefsten Werte des rRMSE mit 30% beim Chasseral. Die grössten Fehler treten wieder für Evionnaz auf, wo schon die DMO Daten den grössten rRMSE aufweisen.

Beim MOS zeigt sich am Standort Schaffhausen eine Verschlechterung der Resultate gegenüber dem DMO. Dies weist auf dieselben Probleme bei der Berechnung der MOS-Gleichungen wie bei den Kurzfristprognosen hin (vgl. Abs.8.3.2).

Beim zeitlichen Verlauf des rRMSE (Abb. 15 am Beispiel des Gütsch und Abb. 16 für den Chasseral) ist wider Erwarten eine deutliche Verschlechterung der Persistenzprognose mit der Zeit zu beobachten. Zu Beginn ist der DMO jeweils noch schlechter als die Persistenzprognose. In der Regel aber ist der DMO insgesamt gesehen besser als Persistenz.

Folgende allgemeine Beobachtungen können zu den Kürzestfristprognosen der Windgeschwindigkeit zusammengefasst werden (zur Veranschaulichung siehe Abb. 17 für den Gütsch):

- Die Prognosen des DMO sind etwas besser als Persistenz.
- Der mittlere Fehler der Prognosen wird durch die statistischen Downscaling-Verfahren gegen Null korrigiert. Vor allem dadurch erzielen sie eine Verbesserung der Prognosen, denn die Abweichungen bleiben in einem ähnlichen Rahmen wie beim DMO.
- WindSim bringt gegenüber DMO keine Verbesserung.

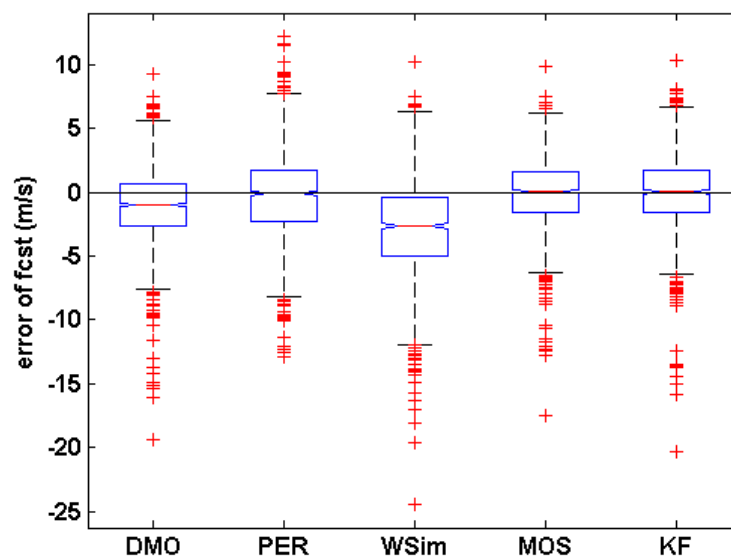


Abb. 17: Boxplot der Kurzzeitprognose der Windgeschwindigkeit am Standort Gütsch (COSMO-2 03 UTC Lauf).

### 8.5. Kurzfristprognose der Leistung (Horizont 24–48 Stunden)

Die Leistungsprognose wird für die verschiedenen Vorhersagemethoden sehr unterschiedlich berechnet (Abs. 4.1, 5.3.2 und 6.1):

- Für den DMO und WindSim werden die auf Nabenhöhe prognostizierten Windgeschwindigkeiten mit der theoretischen Leistungskurve der jeweiligen Anlage in Energieproduktion umgerechnet.
- Das MOS-Verfahren stellt eine statistische Relation zwischen verschiedenen von COSMO prognostizierten Grössen und der beobachteten Energieproduktion her.
- Der KF prognostiziert die Windgeschwindigkeit basierend auf der COSMO-Vorhersage in Kombination mit der beobachteten Windgeschwindigkeit und berechnet aus dieser aufgrund einer empirischen Leistungskurve, die die beobachtete Windgeschwindigkeit mit der beobachteten Energieproduktion in Verbindung setzt, die Energieproduktion.

Dies bedeutet, dass bei den Energievorhersagen mit DMO, WindSim und KF nicht nur die Qualität der Windvorhersage sondern auch die Qualität der Leistungskurve eine Rolle spielen. Die verwendete Leistungskurve ist bei der Energievorhersage von grosser Bedeutung (Lange, 2005). Die Leistungsvorhersagen für DMO und WindSim könnten durch Verwendung einer empirischen Leistungskurve vermutlich noch deutlich verbessert werden.

### 8.5.1. Resultate

Tab. 14, Tab. 15, Tab. 16 und Tab. 17 zeigen den ME, STD, RMSE und MAE der verschiedenen Methoden an den untersuchten Standorten. Abb. 18 und Abb. 19 zeigen den Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose.

Die Saisonalität der Ergebnisse wurde untersucht, die Vorhersagequalität zeigte aber nur geringe Unterschiede zwischen den Monaten. Daher werden die Ergebnisse im Folgenden für den gesamten Evaluationszeitraum dargestellt.

Tab. 14: Mittlerer Fehler (ME) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzfristprognose.

Methode	Feldmoos [kW] ([%])	Gütsch [kW] ([%])	Mt. Crosin [kW] ([%])	Collonges [kW] ([%])
DMO	219 (24)	249 (42)	448 (26)	60 (3)
PER	-4 (0)	-2 (0)	-9 (0)	0 (0)
WindSim	36 (4)	-69 (12)	390 (22)	586 (29)
MOS	22 (2)	-18 (3)	72 (4)	94 (5)
KF	-	-21(4)	76 (4)	-149 (7)

Tab. 15: Standardabweichung (STD) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzfristprognose.

Methode	Feldmoos [kW] ([%])	Gütsch [kW] ([%])	Mt. Crosin [kW] ([%])	Collonges [kW] ([%])
DMO	281 (31)	257 (43)	560 (32)	840 (41)
PER	194 (22)	208 (35)	451 (26)	885 (43)
WindSim	191 (21)	154 (26)	544 (31)	1123 (55)
MOS	111 (12)	124 (21)	263 (15)	594 (29)
KF	-	129 (22)	267 (15)	610 (30)

Tab. 16: Relative Abweichung (RMSE) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzfristprognose.

Methode	Feldmoos [kW] ([%])	Gütsch [kW] ([%])	Mt. Crosin [kW] ([%])	Collonges [kW] ([%])
DMO	357 (40)	357 (60)	716 (41)	846 (41)
PER	194 (22)	208 (35)	450 (26)	883 (43)
WindSim	194 (22)	169 (28)	668 (38)	1276 (62)
MOS	114 (13)	125 (21)	272 (16)	606 (30)
KF	-	130 (22)	277 (16)	629 (31)

Tab. 17: Mittlerer absoluter Fehler (MAE) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzfristprognose.

Methode	Feldmoos [kW] ([%])	Gütsch [kW] ([%])	Mt. Crosin [kW] ([%])	Collonges [kW] ([%])
DMO	237 (26)	293 (49)	516 (30)	592 (29)
PER	104 (12)	145 (24)	297 (17)	627 (31)
WindSim	107 (12)	108 (18)	473 (27)	1046 (51)
MOS	79 (9)	88 (15)	209 (12)	517 (25)
KF	-	90 (15)	205 (12)	442 (22)

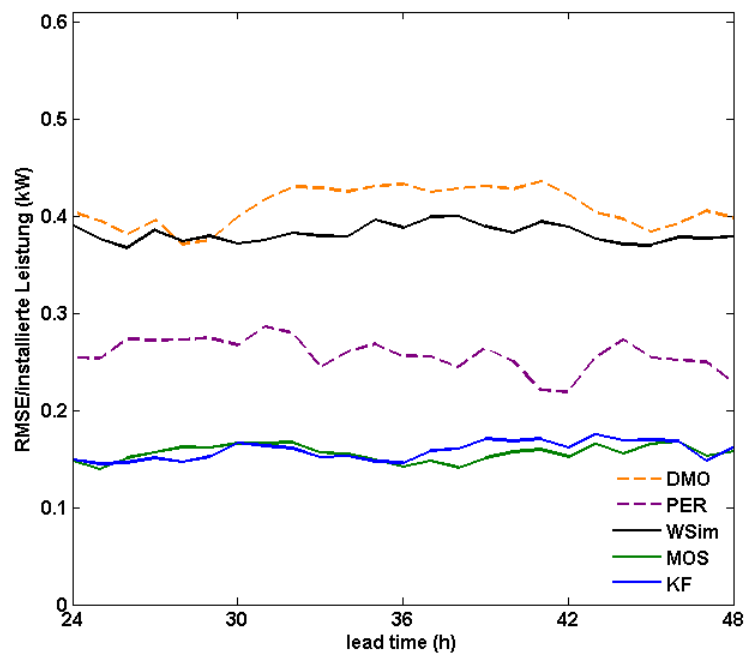


Abb. 18: Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose (normiert auf die installierte Leistung) für Mt. Crosin mit der Lead Time für die verschiedenen Vorhersageverfahren basierend auf dem COSMO-7 Lauf.

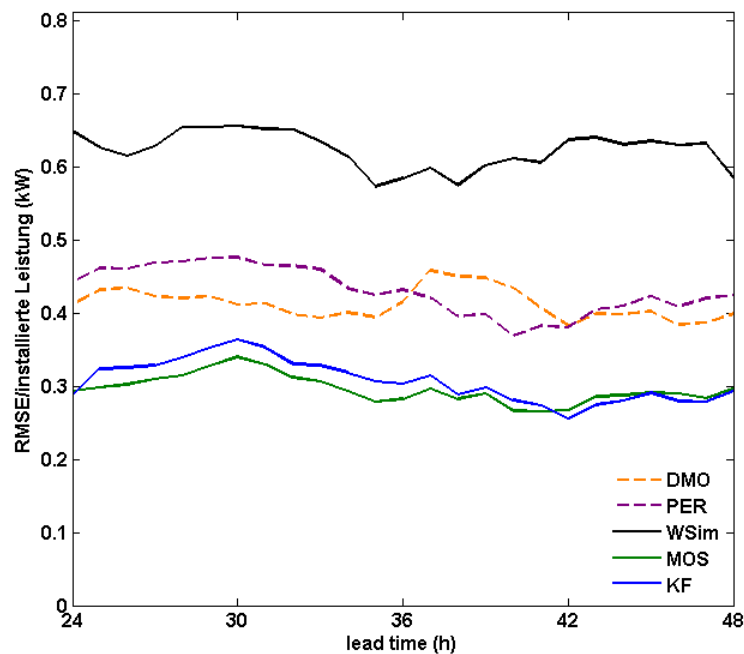


Abb. 19: Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose (normiert auf die installierte Leistung) für Collonges mit der Lead Time für die verschiedenen Vorhersageverfahren basierend auf dem COSMO-7 Lauf.

### 8.5.2. Analyse

Der DMO zeigt meistens die stärksten Abweichungen (ME, Tab. 14 und Standardabweichung, Tab. 15). Dies liegt einerseits daran, dass die Vorhersage der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe einen grossen Bias hat. Über die Leistungskurve wirkt sich dieser Bias überproportional (nichtlinear) auf die berechnete Leistung aus und führt so zu grossen Abweichungen (siehe auch Abbildung A1 in Anhang A). Darüber hinaus ist die theoretische Leistungskurve an den meisten Standorten nur eine ungenügende Näherung des realen Zusammenhangs zwischen Wind und Leistung. Eine standortspezifische Leistungskurve könnte das Ergebnis verbessern.

Interessant ist zu beobachten, dass das Postprocessing mit WindSim, das für die Windgeschwindigkeit kaum Verbesserungen gegenüber dem DMO brachte, auf Nabenhöhe oft eine deutliche Verbesserung ergibt. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass das WindSim Modell für den Höhenbereich zwischen etwa 50 m und 150 m entwickelt wurde und einige für den bodennahen Bereich wichtige Prozesse vernachlässigt und deshalb für die Messhöhen der Meteostationen (in der Regel 10 m) schlechtere Resultate ergibt. Trotz deutlicher Reduktion des ME bleibt bei diesem dynamischen Postprocessing-Verfahren ein Bias gegenüber der beobachteten Windgeschwindigkeit. Dieser wirkt sich aufgrund des nicht-linearen Zusammenhangs zwischen Wind und Leistung stark auf die Berechnung der Energieproduktion aus.

MOS und KF verringern den mittleren Fehler (Tab. 14) in der Regel auf unter 5% der installierten Leistung und die Standardabweichung (Tab. 15) mit der Ausnahme von Collonges auf ca. 20% oder weniger.

Der zeitliche Verlauf des rRMSE mit der Lead Time (Abb. 18 und Abb. 19) zeigt am zweiten Vorhersagetag ein relativ einheitliches Verhalten für die verschiedenen Methoden und Standorte. Abgesehen von Collonges zeigen alle Standorte für die meisten Methoden ein zeitlich relativ konstantes Fehlerverhalten. Am Standort Mt. Crosin zeigen DMO und WindSim zwischen 30 und 42 Stunden Lead Time einen erhöhten rRMSE, der eventuell darauf zurück zu führen ist, dass die lokale Grenzschichtentwicklung während des Tages vom COSMO Modell ungenau beschrieben wird. Die statistischen Verfahren MOS und KF korrigieren dieses Fehlerverhalten quasi vollständig. Collonges zeigt ein auffälliges Verhalten mit einem Anstieg des rRMSE nach etwa 39 Stunden Vorhersagezeit (Abb. 19). Dieser Anstieg des Fehlers könnte damit zusammen hängen, dass sich nachmittags lokale, thermische Zirkulationssysteme ausbilden, die vom Modell nicht erfasst werden. Hier bestätigt sich wieder, dass Collonges aufgrund seiner Lage eine besondere Schwierigkeit für alle Vorhersagesysteme darstellt.

Abb. 20 zeigt den RMSE normiert mit der installierten Leistung der Anlage und gemittelt über den Vorhersagezeitraum 24–48 Stunden. Neben den Leistungsprognosen dieses Projekts sind auch normierte Leistungsvorhersage-rRMSE-Werte aus der Literatur als Referenz dargestellt. Es handelt sich um folgende Ergebnisse verschiedener Vorhersagesysteme, die für einzelne Anlagen in komplexem Gelände für den Vorhersagehorizont 24–48 Stunden erzielt wurden:

- 24% der installierten Leistung für eine Windfarm in Grossbritannien oder Irland in komplexer Orografie (Parkes and Tindal, 2004)
- 25% der installierten Leistung für eine Windfarm in komplexem Gelände in Spanien (Nielsen et al., 2006)
- 21% für eine Windfarm in komplexer Orografie in Irland (McKeogh et al., 2006).

Für flaches Gelände wurden rRMSE-Werte von 15–20% erzielt (von Bremen et al., 2006 und Universität Oldenburg, 2002).

Beim Vergleich unserer Ergebnisse mit den Werten aus der Literatur ist zu berücksichtigen, dass die Komplexität der Orografie in diesen Studien deutlich hinter der Komplexität zurückbleibt, die wir in der Schweiz vorfinden.

Der Vergleich in Abb. 20 sowie der Boxplot am Beispiel der WEA Gütsch (Abb. 21) zeigen, dass mit den statistischen Postprocessing-Verfahren ausgezeichnete Ergebnisse erzielt werden, die trotz der komplexen Orografie in der Schweiz noch deutlich unter den Literaturwerten liegen. Zusammenfassend kann für die Kurzfristprognose der Leistung folgendes festgehalten werden:

- Sowohl der Bias wie auch die Abweichung der Leistungsvorhersage basierend auf dem DMO werden durch alle anderen Vorhersageverfahren effektiv gesenkt.

- Die statistischen Methoden MOS und KF reduzieren den Bias praktisch auf Null. Im Gegensatz zur Windgeschwindigkeit werden auch die anderen Gütemasse entscheidend gesenkt
- Für Feldmoos und Gütsch reduziert auch WindSim den Bias sehr stark. Auch für Mt. Crosin wird noch eine Reduktion des Bias auf etwa 85% des ursprünglichen Wertes erreicht.
- Eine Ausnahme bildet wieder der Standort Collonges: hier gelingt es keinem Verfahren, den Bias der DMO-Leistungsvorhersage zu reduzieren.

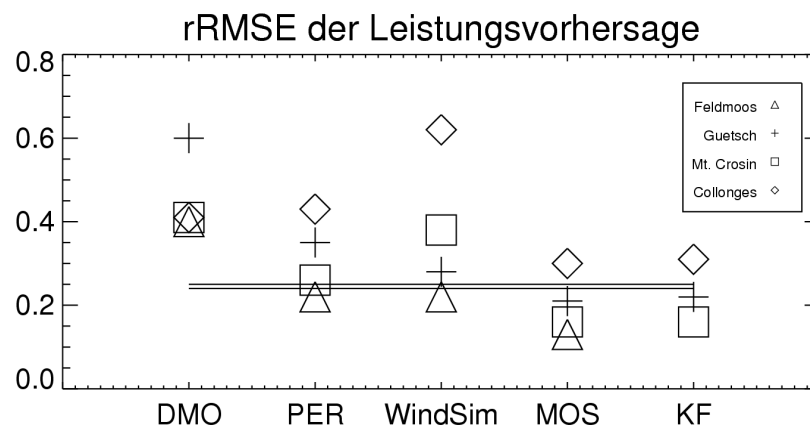


Abb. 20: Auf die installierte Leistung normierte rRMSE für die Leistungsvorhersagen für die Kurzfristprognose. Die horizontalen Linien markieren Referenz-Werte für normalisierte Leistungsvorhersage rRMSE aus der Literatur.

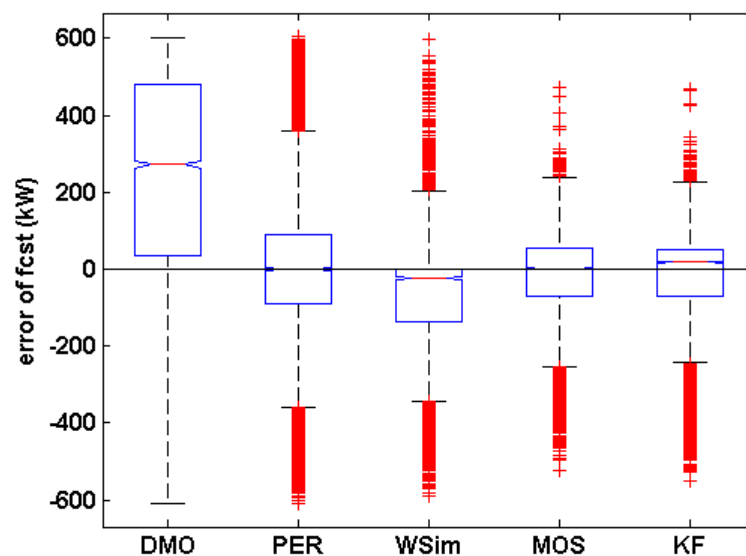


Abb. 21: Boxplot der Kurzfristprognose der Leistung am Beispiel der WEA Gütsch.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass die WEA Collonges offensichtlich eine besondere Herausforderung für das Vorhersagesystem darstellt: Bei fast alle Methoden treten hier die grössten Abweichungen auf. An der Messstation Evionnaz, die in demselben engen Tal liegt, zeigen sich bei den Windgeschwindigkeitsprognosen (Abs. 8.3) ähnliche Probleme. Die Schwierigkeiten der Modellierung müssen mit der extremen Orografie erklärt werden. Das Tal ist schmal und steil, so dass es mit den Gitterweiten von COSMO-7 und selbst COSMO-2 nicht richtig erfasst wird. Die Windverhältnisse werden durch spezielle Windbedingungen (Berg- und Talwind-System, Kanalisierungseffekte) geprägt, die von COSMO aufgrund Auflösung nur ungenügend reproduziert werden. Auch die Postprocessing-Verfahren können diese unrepräsentativen Ausgangsdaten nicht genügend korrigieren.

## 8.6. Kürzestfristprognose der Leistung (Horizont 3–9 Stunden)

### 8.6.1. Resultate

Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20 und Tab. 21 zeigen den ME, STD, rRMSE und MAE der verschiedenen Methoden an den untersuchten Standorten. Abb. 22 und Abb. 23 zeigen den Verlauf des rRMSE für die Leistungsprognose.

Die Saisonalität der Ergebnisse wurde untersucht, die Vorhersagequalität zeigte aber nur geringe Unterschiede zwischen Herbst und Winter. Daher werden die Ergebnisse im Folgenden für den gesamten Evaluationszeitraum dargestellt.

Tab. 18: Bias (ME) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kürzestfristprognose basierend auf COSMO-2 03 UTC.

Methode	Feldmoos [kW] ([%])	Gütsch [kW] ([%])	Mt. Crosin [kW] ([%])	Collonges [kW] ([%])
DMO	104 (12)	211 (35)	432 (25)	-67 (3)
PER	0 (0)	2 (0)	-5 (0)	-54 (3)
WindSim	37 (4)	-75 (13)	314 (18)	-186 (9)
MOS	-1 (0)	-45 (8)	15 (1)	-506 (25)
KF	-	-13 (2)	105 (6)	-88 (4)

Tab. 19: Standardabweichung (STD) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kürzestfristprognose basierend auf COSMO-2 03 UTC.

Methode	Feldmoos [kW] / ([%])	Gütsch [kW] / ([%])	Mt. Crosin [kW] / ([%])	Collonges [kW] / ([%])
DMO	200 (22)	226 (38)	539 (31)	648 (32)
PER	138 (15)	143 (24)	270 (15)	699 (34)
WindSim	154 (17)	139 (23)	524 (30)	801 (39)

MOS	94 (10)	118 (20)	243 (14)	657 (32)
KF	-	118 (20)	212 (12)	681 (33)

Tab. 20: Relative Abweichung (RMSE) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzzeitprognose basierend auf COSMO-2 03 UTC.

Methode	Feldmoos [kW] / ([%])	Gütsch [kW] / ([%])	Mt. Crosin [kW] / ([%])	Collonges [kW] / ([%])
DMO	225 (25)	310 (52)	690 (39)	650 (32)
PER	138 (15)	142 (24)	270 (15)	701 (34)
WindSim	158 (18)	158 (26)	609 (35)	822 (40)
MOS	95 (11)	126 (21)	245 (14)	834 (41)
KF	-	118 (20)	237 (14)	687 (34)

Tab. 21: Mittlerer absoluter Fehler (MAE) der Leistung (normiert auf die installierte Leistung) für die Kurzzeitprognose basierend auf COSMO-2 03 UTC.

Methode	Feldmoos [kW] / ([%])	Gütsch [kW] / ([%])	Mt. Crosin [kW] / ([%])	Collonges [kW] / ([%])
DMO	123 (14)	240 (40)	493 (28)	483 (24)
PER	67 (7)	93 (16)	166 (9)	478 (23)
WindSim	82 (9)	100 (17)	410 (23)	576 (28)
MOS	53 (6)	79 (13)	160 (9)	564 (28)
KF	-	80 (13)	182 (10)	508 (25)

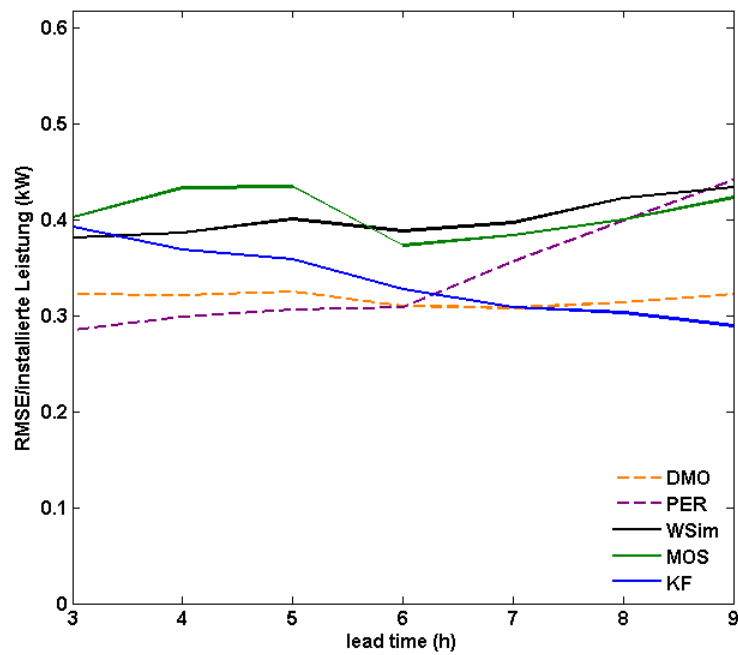


Abb. 22: Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose für Collonges (normiert auf die installierte Leistung) mit der Lead Time für die verschiedenen Vorhersageverfahren basierend auf dem COSMO-2 03 UTC Lauf.

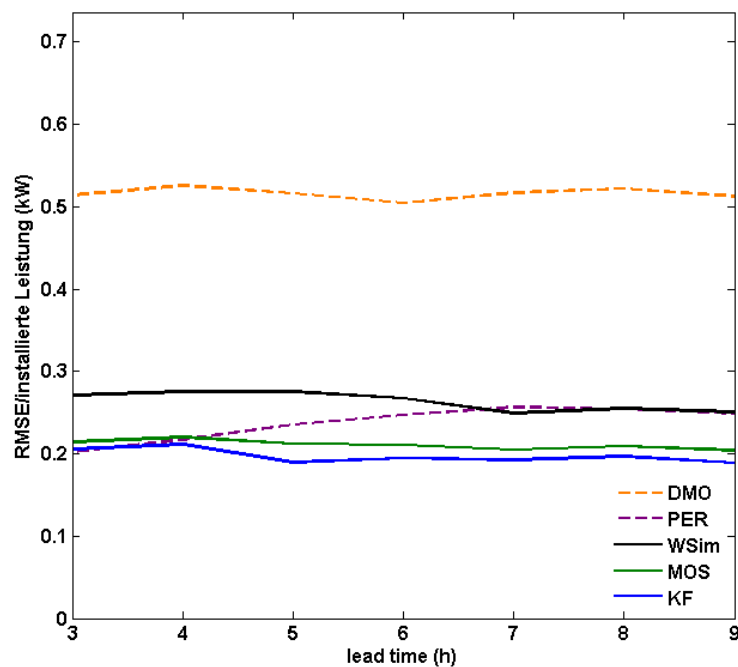


Abb. 23: Verlauf des RMSE für die Leistungsprognose für den Gutsch (normiert auf die installierte Leistung) mit der Lead Time für die verschiedenen Vorhersageverfahren basierend auf dem COSMO-2 03 UTC Lauf.

### 8.6.2. Analyse

Es ist gut zu erkennen, dass die statistischen Verfahren MOS und KF weitgehend ME-frei sind (Tab. 18). Die dynamischen Verfahren DMO und WindSim zeigen einen deutlichen ME. WindSim gelingt es zwar, den ME gegenüber dem DMO deutlich zu reduzieren, erreicht aber nicht den kleinen ME, den die statistischen Verfahren in der Regel erreichen. Lediglich Collonges zeigt wieder ein aussergewöhnliches Verhalten, so dass der ME der statistischen Verfahren teilweise sogar über dem des DMO liegt.

In Tab. 19 ist die STD der verschiedenen Methoden für die verschiedenen Standorte dargestellt. Die STD mit MOS und KF liegen leicht unter der Persistenzvorhersage. Das Postprocessing mit WindSim hat für die Standorte Feldmoos und Gütsch eine STD vergleichbar zu PER, die STD für die Standorte Mt. Crosin und Collonges liegt über der der PER. Die STD des DMO liegt ausser für Collonges deutlich über dem der PER.

Der Verlauf des rRMSE mit dem Vorhersagezeitraum variiert stark für die verschiedenen Methoden. Die Persistenzvorhersage zeigt an allen Standorten den erwarteten Anstieg des Fehlers mit der Lead Time (Abb. 22 und Abb. 23). MOS und KF zeigen dagegen, abgesehen von Collonges, ein zeitlich konstantes Fehlerverhalten (Abb. 23). Das Verhalten der Verfahren DMO und WindSim ist für die verschiedenen Standorte sehr unterschiedlich.

Abb. 24 zeigt den RMSE normiert mit der installierten Leistung der Anlage und gemittelt über den Vorhersagezeitraum 3–9 Stunden. Neben den Leistungsprognosen dieses Projekts sind auch normierte RMSE-Werte aus der Literatur als Referenz dargestellt. Es handelt sich um die folgenden Ergebnisse verschiedener Vorhersagesysteme, die für einzelne Anlagen in komplexem Gelände für den Vorhersagehorizont von 3 bis 9 Stunden erzielt wurden:

- 18% für eine Windfarm in UK oder Irland in komplexer Orografie (Parkes and Tindal, 2004)
- 18% für eine Windfarm in komplexem Gelände (Panteri und Papathanassiou, 2008).

Für flaches Gelände wurden rRMSE-Werte von 11–13% erzielt (von Bremen et al., 2006 und Universität Oldenburg, 2002).

Beim Vergleich unserer Ergebnisse mit den Werten aus der Literatur ist zu berücksichtigen, dass die Komplexität der Orografie in diesen Studien deutlich hinter der Komplexität zurückbleibt, die wir in der Schweiz vorfinden.

Anhand des Vergleichs in Abb. 24 kann für die Kurzzeitprognose der Leistung allgemein (mit Ausnahme der WEA Collonges) folgendes zusammengefasst werden (siehe auch Abb. 25 als Illustration):

- Die Kurzzeitprognose der Leistung abgeleitet vom DMO kann die Persistenzprognose nicht schlagen.
- Mit WindSim kann die DMO-basierte Prognose zwar verbessert werden, die entsprechende Prognose ist aber noch immer weniger gut als die Persistenzprognose.
- MOS und KF liefern die besten Ergebnisse, die die Persistenzprognose übertreffen.
- Die statistischen Verfahren (MOS und KF) liefern ähnlich der Persistenz sehr gute Ergebnisse, die im Kurzzeitbereich trotz der sehr komplexen Orografie der Schweiz im Bereich von internationalen Ergebnissen liegen.
- Die Güte der KF- und MOS-Prognosen ist trotz struktureller Unterschiede (MOS nutzt explizit die Leistung als Prädiktand) vergleichbar.

Die WEA Collonges ist auch bei der Kurzzeitprognose der Leistung ein Sonderfall, was mit der speziellen Lage des Standorts erklärt werden muss (Abs. 8.5.2).

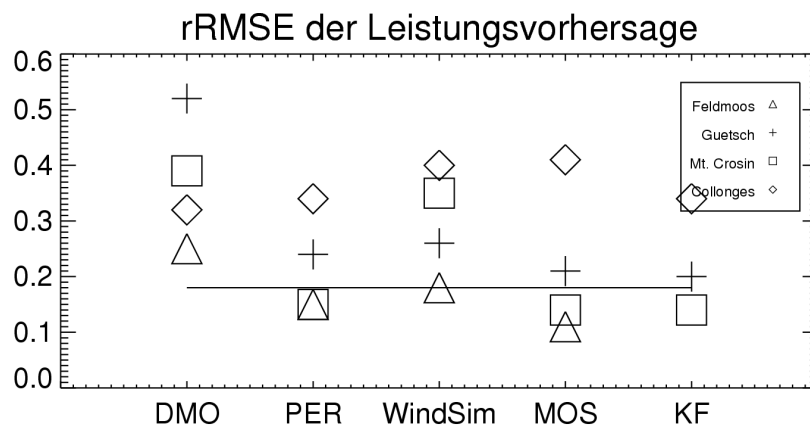


Abb. 24: Auf die installierte Leistung normalisierter rRMSE für die Leistungsvorhersage für die Kurzzeitprognose (COSMO-2 03 UTC Lauf). Die horizontalen Linien markieren Werte für normalisierte Leistungsvorhersage rRMSE aus der Literatur.

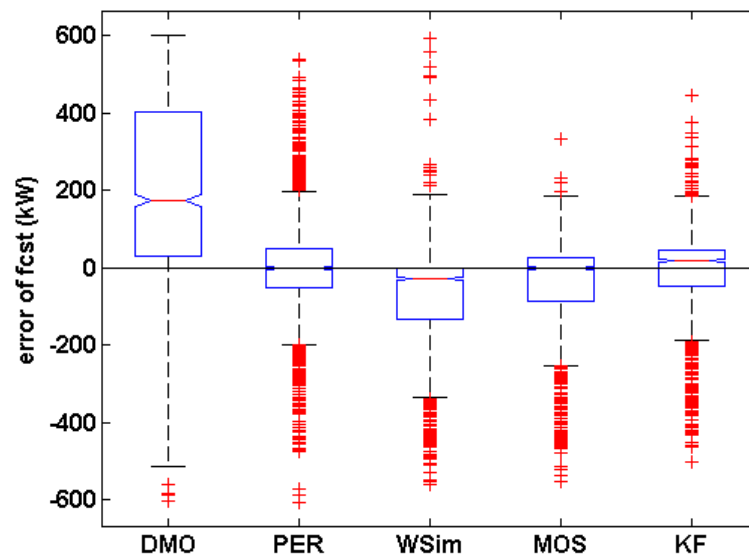


Abb. 25: Boxplot der Kurzzeitprognose der Leistung an der WEA Gütsch.

## 8.7. Unsicherheit der Windgeschwindigkeit

### 8.7.1. Resultate

Während des Testbetriebs haben die Verfahren MOS und KF zusammen mit der Windgeschwindigkeits- und Leistungsprognose eine Prognose der Vorhersageunsicherheit produziert (schraffierte Fläche in der online Visualisierung in Abb. 9). Sie sollte den Nutzern dabei behilflich sein, die Genauigkeit der Vorhersage angemessen einzuschätzen. Zur Verifikation dieser Größe wird der im Nachhinein berechnete RMSE als Mass für die gesamte Variabilität der Vorhersage herangezogen. Abb. 26 und Abb. 27 zeigen einen Vergleich der erwarteten Unsicherheiten der Prognose der Windgeschwindigkeit mit dem RMSE der Windgeschwindigkeitsprognosen für die Kurz- sowie Kurzzeitprognose am Beispiel der Messstation Gütsch.

### 8.7.2. Analyse

Bei einer guten Prognose der Unsicherheit würden sich in Abb. 26 und Abb. 27 die Werte decken (jeweils die gleiche Farbe). Die prognostizierten Unsicherheiten weichen jedoch stark von den RMSE-Werten ab. Bei der MOS-Methode sind die RMSE-Werte meist beträchtlich tiefer als die prognostizierten Unsicherheiten. Bei der KF-Methode sind die RMSE-Werte hingegen meist höher als die vorhergesagten Unsicherheiten.

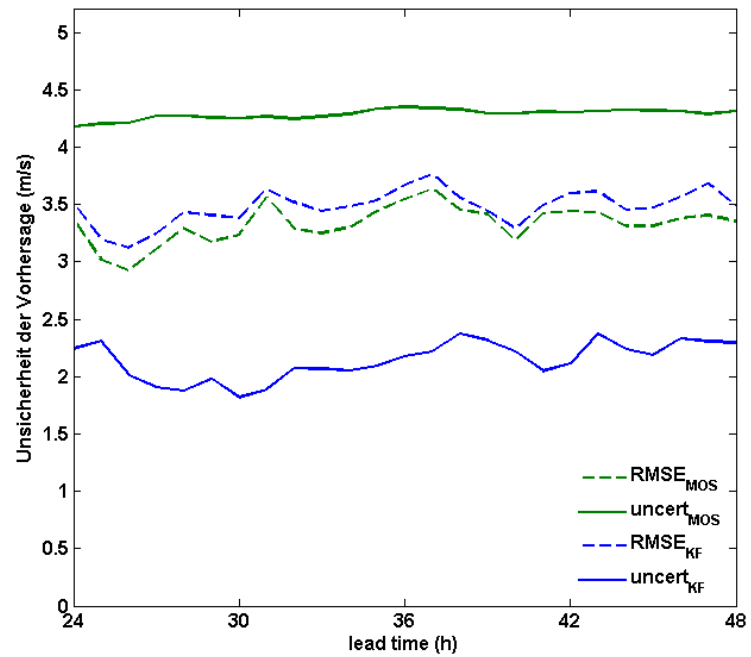


Abb. 26: Prognostizierte Unsicherheit (uncert) und RMSE am Standort Gütsch für die Kurzfristprognose.

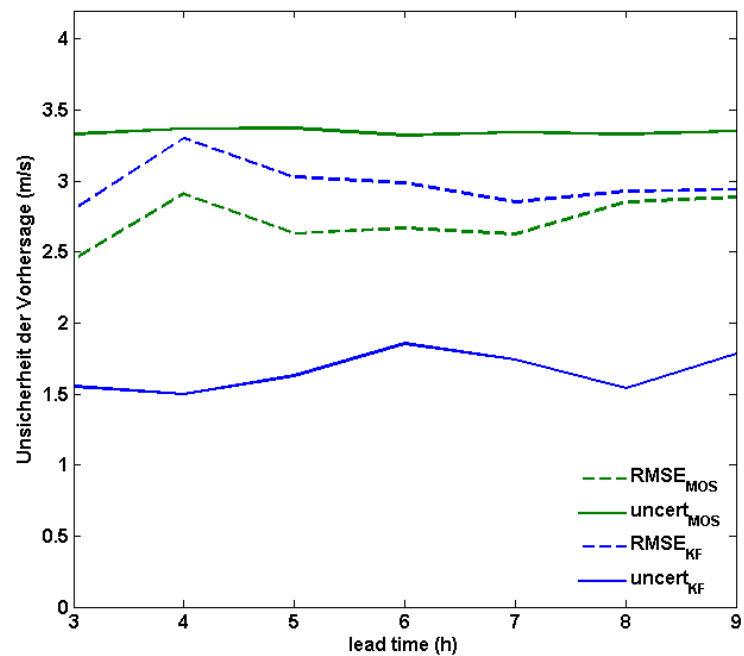


Abb. 27: Prognostizierte Unsicherheit (uncert) und RMSE am Standort Gütsch für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC Lauf).

## 8.8. Unsicherheit der Leistung

### 8.8.1. Resultate

Abb. 28 und Abb. 29 zeigen einen Vergleich der erwarteten Unsicherheiten der Prognose der Leistung zum RMSE der Leistung für die Kurz- sowie Kurzzeitfristprognose am Beispiel der WEA Mt. Crosin.

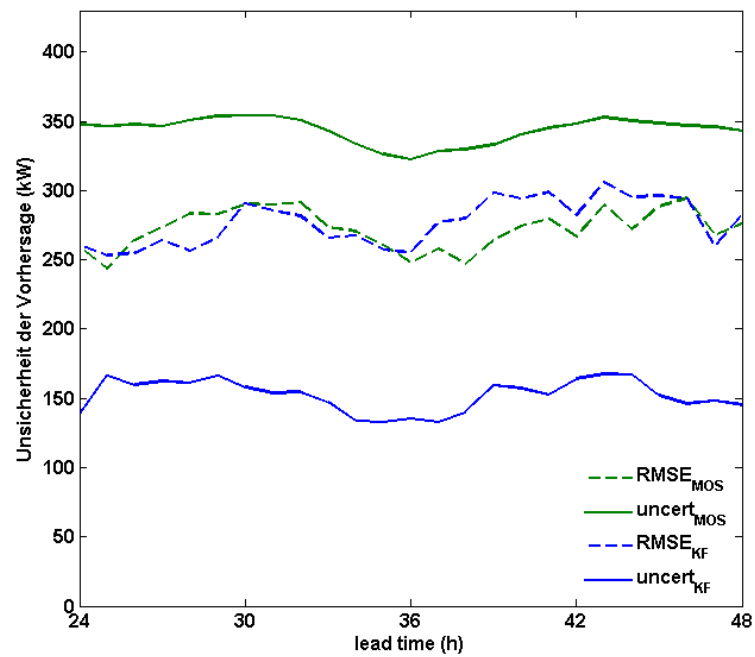


Abb. 28: Prognostizierte Unsicherheit (uncert) und RMSE für MOS und KF an der WEA Mt. Crosin für die Kurzfristprognose.

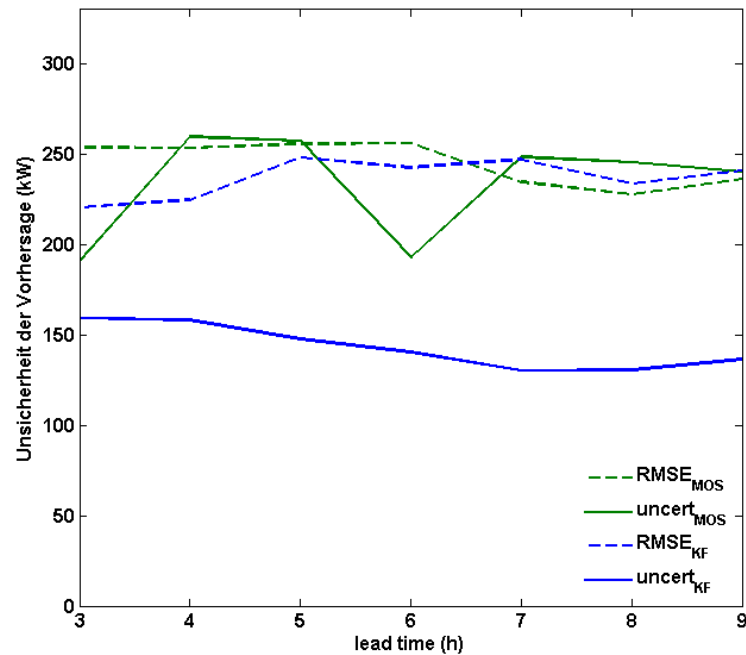


Abb. 29: Prognostizierte Unsicherheit (uncert) und RMSE für MOS und KF an der WEA Mt. Crosin für die Kurzzeitprognose (Cosmo-2 03 UTC Lauf).

### 8.8.2. Analyse

Die MOS-Prognose für die Kurzfristvorhersage überschätzt die Unsicherheit an den meisten Standorten während die Prognose des KF die Unsicherheit unterschätzt. Im Bereich der Kurzzeitvorhersage wird die Unsicherheit von beiden Verfahren in der Regel unterschätzt.

## 8.9. Vergleich mit wind-data.ch

### 8.9.1. Beschreibung der Prognosen auf wind-data

Auf der Website [www.wind-data.ch](http://www.wind-data.ch) der Suisse Eole werden für verschiedene WEA aktuelle Prognosen der Windgeschwindigkeit dargestellt (Abb. 30). Diese basieren auf dem Resultat des operationellen MM5-Modells<sup>8</sup> von METEOTEST. Als Input dienen Daten des Global Forecast Systems<sup>9</sup> (GFS). Das Grundmodell wird in einer Auflösung von 90 km über ganz Europa betrieben. Darin sind zwei höher aufgelöste Modelle (30 und 10 km) genestet. Das 10-km-Modell deckt den Alpenraum ab. Modellläufe werden zweimal täglich durchgeführt. Für die Prognosen auf [www.wind-data.ch](http://www.wind-data.ch) werden die Daten aus dem 10-km-Modell extrahiert. Die Windgeschwindigkeit für Standorte im Mittelland oder in Tälern (z.B. Feldmoos und Collonges) ist diejenige auf 10 m. Für Standorte auf Bergen (z.B. Chasseral, Gütsch und Mt. Crosin) entspricht die Windgeschwindigkeit derjenigen auf Höhe des im Vergleich zum Anlagestandort nächst höheren Drucklevels. Die vertikale Auflösung der Drucklevel beträgt 50 hPa.

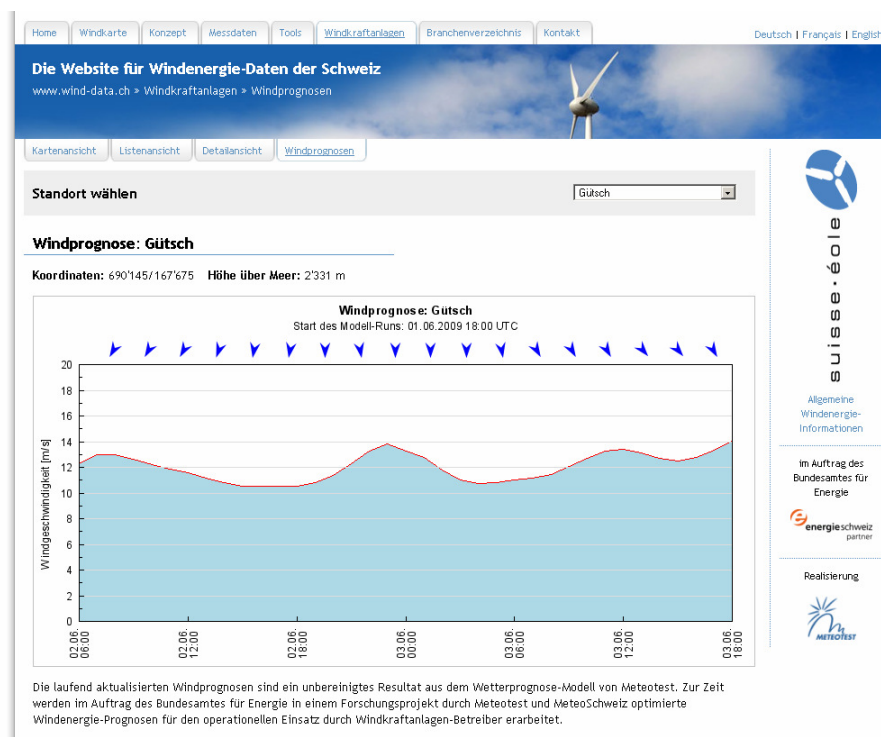


Abb. 30: Prognose der Windgeschwindigkeit auf [www.wind-data.ch](http://www.wind-data.ch) (hier am Beispiel der WEA Gütsch).

<sup>8</sup> <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>

<sup>9</sup> <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>

### 8.9.2. Resultate

Für einen exemplarischen Vergleich der Vorhersagemethoden mit wind-data wurden die drei Standorte verwendet, an denen sowohl im aktuellen Forschungsprojekt als auch aus wind-data archivierte Windgeschwindigkeitsprognosen vorliegen. Die geringe Anzahl der Vergleichsstandorte lässt einen tragfähigen Vergleich zwischen den Vorhersagen auf wind-data und im Projekt nicht zu.

In Tab. 22 und Tab. 23 sind die Resultate der Validierung für die Kurzfrist- bzw. Kürzestfristprognose aufgelistet.

Tab. 22: Mittlere Abweichung (ME), relative Abweichung (rRMSE) und Standardabweichung (STD) der Windgeschwindigkeit der wind-data-Prognosen im Vergleich zu den erarbeitete Methoden für den Vorhersagehorizont 24–48 Stunden.

Gütemass	Modell	GUE	CHA	EVI
ME [m/s]	wind-data	4.3	0.7	-0.9
	COSMO-7	-1.9	-4.0	-1.9
	WindSim	-2.7	-1.6	-0.9
	MOS	-0.3	-0.2	0.1
	KF	0.0	-0.2	-0.2
STD [m/s]	wind-data	4.6	4.6	2.8
	COSMO-7	3.4	3.2	2.6
	WindSim	4.1	4.4	3.0
	MOS	3.3	3.2	2.7
	KF	3.5	3.2	2.7
rRMSE [%]	wind-data	100	52	82
	COSMO-7	56	57	90
	WindSim	70	53	88
	MOS	48	36	77
	KF	50	36	77

Tab. 23: Mittlere Abweichung (ME), relative Abweichung (rRMSE) und Standardabweichung (STD) der Windgeschwindigkeit der wind-data-Prognosen im Vergleich zu den erarbeiteten Methoden für den Vorhersagehorizont 3–9 Stunden (COSMO-2 03 UTC Lauf).

Gütemass	Modell	GUE	CHA	EVI
ME [m/s]	wind-data	4.3	0.6	-0.9
	COSMO-2	-1.1	-2.4	-1.2
	WindSim	-2.9	-1.1	-3.0
	MOS	-0.1	0.1	-0.5
	KF	0.0	0.0	-0.3
STD [m/s]	wind-data	4.5	4.2	2.8
	COSMO-2	2.9	2.8	3.5
	WindSim	3.8	4.3	2.9
	MOS	2.7	2.7	2.8
	KF	3.0	2.8	3.2
rRMSE [%]	wind-data	91	47	82
	COSMO-2	46	40	98
	WindSim	70	49	112
	MOS	40	30	77
	KF	43	30	85

### 8.9.3. Analyse

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der ME und damit auch der rRMSE der Resultate nur schon aufgrund der Unterschiede zwischen Modell-Orografie und realer Orografie starke Abweichungen zeigen können. Dies bestätigt sich bei beiden numerischen Wettermodellen. Zieht man als Gütemass die Standardabweichung hinzu, so zeigt sich (ausser beim Standort Evionnaz) die erwartete Tendenz, dass die Variabilität der Prognosefehler mit Verkleinerung der Gitterweite von 10 km (wind-data) über 6.6 km (COSMO-7) auf 2.2 km (COSMO-2) abnimmt. Die Ergebnisse der operationellen COSMO-Verifikation gegen die automatischen Messstationen der gesamten Schweiz (ca. 100 Stationen) bestätigen diese Tendenz. Da der ME mit Postprocessing gut korrigiert werden kann, bietet die kleinere Standardabweichung der COSMO-Prognosen die bessere Voraussetzung für das Postprocessing. Für die Kurzzeitprognose besteht ein weiterer Vorteil der COSMO-2-Prognosen darin, dass sie alle drei Stunden aktualisiert werden und somit immer neuste Prognosen zur Verfügung stehen.

Der Vergleich zeigt insbesondere, dass durch die Postprocessing-Verfahren deutlich bessere Prognosen erzielt werden als mit dem auf wind-data verwendeten Direct Model Output aus MM5.

## 9. Zusammenfassung der Ergebnisse

### 9.1. Methodenvergleich

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände" wurden verschiedene Prognose-Methoden erarbeitet und mit einem Prototyp in einer Testphase vom 1.9.2008 bis 31.3.2009 sieben Monate getestet und verifiziert.

Vorhergesagt wurden zwei Parameter:

- Windgeschwindigkeit
- Leistung der WEA

Eine Windgeschwindigkeitsprognose muss stets noch in die Leistung der WEA umgerechnet werden, damit sie die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Anforderungen von WEA-Betreibern erfüllt. Durch die entwickelten Verfahren wird es möglich, die Leistung der WEA zu prognostizieren.

Trotzdem wurde im Forschungsprojekt auch ein grosses Gewicht auf die Windgeschwindigkeitsprognose gelegt – einerseits, weil sie in verschiedenen Methoden als Basis für die Leistungsberechnung dient, andererseits, weil sie den Einbezug meteorologischer Messstationen als Teststandorte erlaubte.

Die Prognosen wurden gemäss den Spezifikationen (Abs. 2.1) jeweils für zwei zeitliche Horizonte untersucht:

- Kurzfristprognosen: Vorhersagen für den nächsten Tag (Vorhersagehorizont 24–48 Stunden), stündliche Werte, für die Energieprognosen des Stromhandels
- Kürzestfristprognosen: Vorhersagen für die nächsten Stunden (Vorhersagehorizont 3–9 Stunden), stündliche Werte, für den Intra-Day-Handel

Die Methoden zur Verfeinerung der Prognosen sind in den Kapiteln 4–6 detailliert beschrieben. Sie werden hier nochmals zusammengefasst:

- Persistenzprognose (PER): Die Persistenzprognose ist die einfachste Prognose – sie geht davon aus, dass sich die Bedingungen nicht ändern. Für die Kurzfristprognose wurde am nächsten Tag (Stunde 24–48) der gleiche Tagesgang der Windgeschwindigkeit und Leistung wie am vergangenen Tag angenommen. Für die Kürzestfristprognose wurde angenommen, dass die Werte der Windgeschwindigkeit und Leistung in den nächsten Stunden konstant bleiben.
- Direct Model Output (DMO): Die Prognose der Windgeschwindigkeit wird direkt vom Resultat des operationellen COSMO-Modells der MeteoSchweiz übernommen. Dabei liefert COSMO-7 mit einer horizontalen Auflösung von 6.6 km die Kurzfristprognose und COSMO-2 mit einer Auflösung von 2.2 km die Kürzestfristprognose. Die Leistungsprognose wurde aus der theoretischen Leistungskurve abgeleitet.
- WindSim: WindSim ist ein hochauflösendes Modell zur Simulation von Windfeldern über dem Gelände und wird in der Windenergie für Standortanalysen eingesetzt. Die Windgeschwindigkeits-Prognosen des COSMO-Modells wurden von einem hoch über dem Boden gelegenen, von Geländeeinflüssen relativ ungestörten Punkt mit den in WindSim gerechneten Windfeldern an den Anlagenstandort auf Nabenhöhe umgerechnet. Für die Leistungsprognose wurde die Windgeschwindigkeit anschliessend mit der theoretischen Leistungskurve der WEA verrechnet.
- Model Output Statistics (MOS): Anhand von historischen Mess- und Modelldaten wurde für jeden individuellen Standort ein möglichst guter linearer Zusammenhang zwischen verschiedenen Prognosen des COSMO-Modells (u.a. Windgeschwindigkeit, -richtung und Druckgradient) und den gemessenen Werten der Windgeschwindigkeit und Leistung bestimmt. Damit wurden die aktuellen COSMO-Prognosen in Windgeschwindigkeits- bzw. Leistungsprognosen umgerechnet.
- Kalman Filter (KF): Mit den lokalen Windgeschwindigkeitsmessungen der letzten 24 Stunden wurden laufend die Vorhersagefehler aktualisiert, anhand derer die COSMO-Prognosen korrigiert wurden. Die Leistungsprognose wurde aus einem empirischen Zusammenhang zwischen gemessener Windgeschwindigkeit und gemessener Leistung am Standort abgeleitet.

Aufgrund der Anforderung der einzelnen Methoden an die Input-Daten ergeben sich die in Tab. 24 aufgeführten Voraussetzungen an die Verfügbarkeit und zeitliche Abdeckung von Messdaten zur Nutzung der einzelnen Methoden.

Tab. 24: Anforderungen an die Verfügbarkeit von Messdaten und historischer Prognosedaten für die Prognose-Methoden.

Methoden	Voraussetzungen für Windgeschwindigkeits-Prognosen	Voraussetzungen für Leistungsprognosen
Persistenz	sofort verfügbare, repräsentative Messung der Windgeschwindigkeit auf oder in der Nähe der WEA	sofort verfügbare Messung der WEA-Leistung
Direct Model Output	keine	Leistungskurve der WEA, wenn möglich standortspezifisch
WindSim	keine	Leistungskurve der WEA, wenn möglich standortspezifisch
Model Output Statistics	Messdatenreihe der Windgeschwindigkeit sowie homogene historische Prognosedaten am Anlagenstandort, die mindestens ein Jahr abdecken.	Messdatenreihe der Leistung sowie homogene historische Prognosedaten am Anlagenstandort, die mindestens ein Jahr abdecken.
Kalman Filter	sofort verfügbare, repräsentative Messung der Windgeschwindigkeit auf oder in der Nähe der WEA	sofort verfügbare, repräsentative Messung der Windgeschwindigkeit auf oder in der Nähe der WEA, sowie Leistungskurve der WEA, wenn möglich standortspezifisch, oder sofort verfügbare aktuelle Leistungsdaten

Über die Anforderungen an die Verfügbarkeit und den Umfang der zugrunde liegenden Daten hinaus unterscheiden sich die untersuchten Methoden in ihrem Entwicklungsaufwand und im Unterhalt.

WindSim ist eine kommerziell erhältliche Software. Die Nachbearbeitung mit WindSim beruht auf einer Simulation, die spezifisch für den neuen Standort durchgeführt wird und auf einem einfachen Rechner etwa einen Tag Rechenzeit beansprucht. Die Resultate müssen sorgfältig validiert werden. Für das Aufsetzen der Rechnung werden digitale Modelle der Topografie und Landnutzung für den Standort benötigt. Das Ableiten der Korrekturfaktoren wird automatisiert durchgeführt und bedeutet kaum Zeitaufwand.

Bei den statistischen Verfahren MOS und Kalman Filter liegt der Grossteil des Aufwands in der Entwicklung der Prozeduren zur Anpassung der Regressionsgleichungen.

Liegen genügend Messdaten vor, lassen sich für einen neuen Standort mit statistischen Standardverfahren zügig geeignete Regressionsgleichungen für die MOS-Methode ableiten und parametrisieren. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist eine präzisere Beschreibung des Modellfehlers, da mehrere Prognoseparameter des COSMO Modells miteinbezogen werden. Allerdings können die Regressionsgleichungen sensitiv auf Änderungen im zugrunde liegenden Wettermodell reagieren und erfordern folglich Nachkalibrierung (unter Einbezug der neuesten Prognosen und Messdaten) bei geringen Änderun-

gen und unter Umständen die Herleitung neuer Regressionsgleichungen bei grossen Änderungen.

Die Nachbearbeitung mit dem Kalman Filter ist wegen des implizit adaptiven Schätzverfahrens Modelländerungen gegenüber robuster. Die Entwicklung der Methode selbst ist unter Umständen statistisch etwas anspruchsvoller, kann aber, ist sie einmal entwickelt, ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung an einem neuen Standort eingesetzt werden.

Die Möglichkeiten der beiden statistischen Methoden bieten in Kombination mit einem hochauflösenden dynamischen Modell eine ausgewogene Produktpalette für hochwertige Prognosen.

## 9.2. Fazit der Verifikation

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden verschiedene Vorhersagemethoden sowohl für die Kurzfrist- als auch die Kürzestfristprognose erfolgreich entwickelt. Trotz der sehr komplexen Topografie der Schweiz ist die Genauigkeit der Resultate grösstenteils besser oder im Bereich von internationalen Referenzwerten.

Die entwickelten Methoden haben bei ähnlicher Güte unterschiedliche Anforderungen an die zugrunde liegende Datenbasis. Dies verleiht uns eine grosse Flexibilität für die Entwicklung eines operationellen Betriebs und die Möglichkeit, auf die individuellen Gegebenheiten an einem neuen Standort (z.B. die Datenverfügbarkeit) einzugehen.

Die Verifikation der Methoden ist in Kapitel 8 detailliert beschrieben. In den Absätzen 9.2.1 und 9.2.2 werden die entsprechenden Resultate für die Kurz- und Kürzestfristprognosen der Leistung zusammengefasst.

Auffällig war, dass die Resultate der Messstation Evionnaz sowie der WEA Collonges immer einen Sonderfall bildeten. Offensichtlich war es mit den verwendeten Methoden an diesen Standorten nicht möglich, verlässliche Prognosen zu erstellen. Dies liegt in der speziellen Lage der beiden Standorte im tiefen und engen Rhonetal nordwestlich von Martigny begründet, wo bereits das Ausgangsmodell COSMO die örtlichen Windbedingungen nicht genügend reproduzieren kann.

Die Prognosequalität für die aufsummierte Leistung einer grossen Anzahl Anlagen liegt deutlich tiefer als diejenige für Einzelanlagen (Tambke et al., 2006). In Norddeutschland liegt der rmse der flächenhaften Prognose je nach Grösse der Region rund 30–60% tiefer als derjenige für die Einzelanlagen. In der vorliegenden Untersuchung standen aber zu wenige Anlagen zur Verfügung, um eine statistisch gesicherte Aussage für die Prognosequalität für die aufsummierte Leistung einer Vielzahl von Anlagen für die Schweiz zu erhalten.

### 9.2.1. Kurzfristprognose der Leistung

Für die Kurzfristprognose (Prognosehorizont 24–48 Stunden) bildet der Direct Model Output die Referenz, an der die anderen Methoden gemessen werden. Der Vergleich der COSMO-7-Resultate mit den Windgeschwindigkeitsprognosen auf [www.wind-data.ch](http://www.wind-data.ch) zeigt auf, dass durch die Postprocessing-Verfahren deutlich bessere Prognosen als auf [www.wind-data.ch](http://www.wind-data.ch) erzielt werden.

Der Vergleich der verschiedenen Methoden an den verschiedenen WEA-Standorten ist in Abb. 31 dargestellt:

- Es zeigt sich, dass die (biasfreie) Persistenzvorhersage meist bessere Resultate als die vom Direct Model Output abgeleitete Leistungsprognose liefert. Für eine gute Prognose ist es also zwingend nötig, den Direct Model Output auf eine geeignete Weise nachzubearbeiten. Allerdings ist auch zu berücksichtigen, dass sich schon zusätzliche Verbesserungen der Leistungskurve positiv auswirken würden.
- WindSim vermag den Direct Model Output zwar zu verbessern, erreicht aber kein besseres Niveau als die Persistenzvorhersage.
- Die beiden statistischen Postprocessing-Verfahren MOS und Kalman Filter zeigen sehr ähnliche Resultate: Sie verbessern den Direct Model Output entscheidend und liefern in der Regel Resultate, die besser sind als diejenigen von internationalen Referenzstudien.

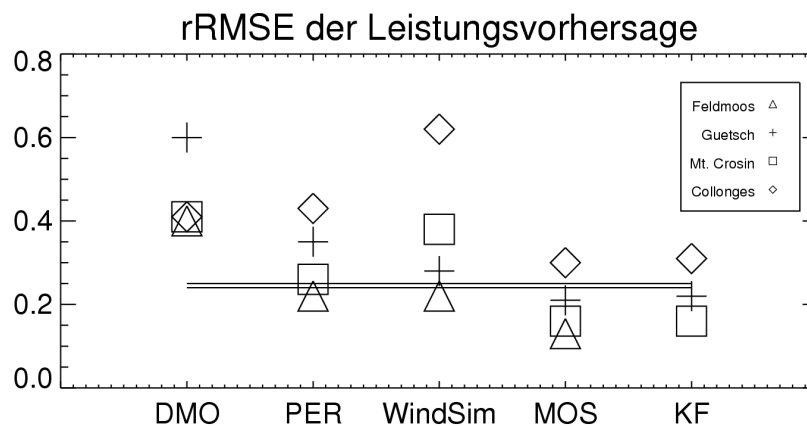


Abb. 31: Auf die installierte Leistung normierte rRMSE für die Leistungsvorhersagen für die Kurzfristprognose. Die horizontalen Linien markieren Referenz-Werte für normalisierte Leistungsvorhersage rRMSE aus der Literatur.

### 9.2.2. *Kürzestfristprognose der Leistung*

Für die Kürzestfristprognose bildet die Persistenzvorhersage die Referenz, an der die anderen Methoden gemessen werden. Die Persistenzprognose ist eindeutig besser als der Direct Model Output, was aber aufgrund der systematischen Abweichungen im unkorrigierten Modellresultat und der Umrechnung über eine nicht standortspezifische (und nicht-lineare) Leistungskurve nicht weiter erstaunlich ist.

Der Vergleich der verschiedenen Methoden an den verschiedenen WEA-Standorten ist in Abb. 32 dargestellt:

- Die Persistenzprognose liefert bereits sehr gute Werte, die zum Teil im Bereich der Referenzwerte internationaler Vergleichsstudien liegt.
- WindSim verbessert den Direct Model Output meist, hat aber die schlechtere Genauigkeit als die Persistenzvorhersage.
- Die Ergebnisse der Methoden MOS und Kalman Filter sind vergleichbar und liefern die besten Prognosen, die im Bereich der internationalen Referenzwerte liegen.

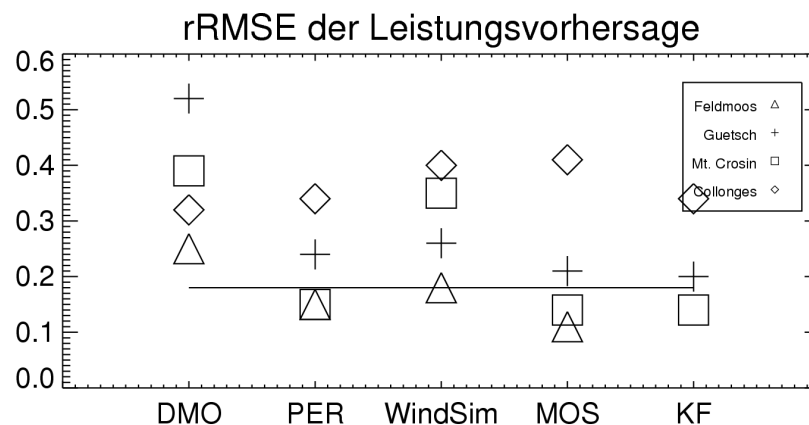


Abb. 32: Auf die installierte Leistung normalisierter rRMSE für die Leistungsvorhersage für die Kürzestfristprognose (COSMO-2 03 UTC Lauf). Die horizontalen Linien markieren Werte für normalisierte Leistungsvorhersage rRMSE aus der Literatur.

### 9.3. Mögliche Weiterentwicklungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden verschiedenen Aspekte identifiziert, bei denen weitere Entwicklungsmöglichkeiten bestehen:

- In der Regel bildet das COSMO-Modell eine gute Grundlage für die Prognosen, doch für gewisse extreme Standorte – wie die Messstation Evionnaz und die WEA Collonges – ist diese ungenügend. Für solche Standorte könnte als Zwischenschritt ein weiteres dynamisches Downscaling mit einem ins COSMO-Modell eingebetteten mesoskaligen Wettermodell in Betracht gezogen werden.
- Die Verifikation an den Beispielstandorten hat die Überlegenheit des COSMO-2 Modells im Vergleich zum COSMO-7 Modell gezeigt und legt die Nutzung von COSMO-2 für eine Prognose für den Folgetag nahe. Eine Verlängerung des Prognosehorizontes ist aktuell an der MeteoSchweiz in Diskussion.
- Die MOS-Resultate könnten durch den Einbezug aktueller Daten laufend nachkalibriert werden und damit die Robustheit der MOS-Methode erhöht werden.
- Für die MOS-Methode könnten Erweiterungen der Regressionsgleichungen gegebenenfalls zu zusätzlichen Verbesserungen führen. Die Globalstrahlung beispielsweise könnte im Rhonetal mit dem Bergwind korrelieren und somit eine engere Beziehung zwischen Modell und Beobachtung ermöglichen.
- Beim Kalman Filter wird die Leistung über die Windgeschwindigkeit und eine empirische Leistungskurve berechnet, was eine zusätzliche Unsicherheit beinhaltet. Würde der Kalman Filter direkt auf die Leistung gerechnet, könnte ein Unsicherheitsfaktor eliminiert werden. Allerdings müssen dazu Leistungsdaten live zur Verfügung stehen.
- Die Leistungsdaten der WEA wurden im Rahmen des Forschungsprojekts nur rudimentär validiert. Für den operationellen Betrieb ist eine gute Validierung dieser Daten wichtig, um Fehlinterpretationen (z.B. aufgrund von Vereisung oder technischen Problemen der WEA) zu vermeiden.
- Die Unsicherheiten der Prognosen wurden im Forschungsprojekt mit relativ einfachen Methoden abgeschätzt. Die Resultate sind noch ungenügend. Eine weitere Entwicklung der Methodik ist nötig, wenn diese Angabe für die Anlagenbetreiber wichtig ist.
- Im Forschungsprojekt wurden Stundenwerte prognostiziert. Im operationellen Betrieb könnte die zeitliche Auflösung der Prognosen je nach Anforderungen der Betreiber noch verfeinert werden, z.B. auf Viertelstunden-Werte.

## 9.4. Entwurf eines operationellen Angebots

### 9.4.1. Geeignete Methoden

Für die Erstellung einer operationellen Windenergie-Prognose für einen neuen Standort müssen die Voraussetzungen und Anforderungen des Standorts und des Betreibers genau abgeklärt werden. Aufgrund der Resultate des Forschungsprojekts stehen folgende Varianten im Vordergrund:

#### A. Model Output Statistics via Windgeschwindigkeit

Prinzip: Das mesoskalige Wettermodell COSMO liefert die Grundlagendaten, mit denen ein MOS entwickelt wird, das die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe voraussagt. Die Leistung der WEA wird via Leistungskurve berechnet.

Voraussetzung: Es steht für eine Periode von mindestens einem Jahr (auf die Nabenhöhe hochgerechnete) Windmessdaten am Anlagenstandort zur Verfügung (z.B. aus der Standortabklärung). Nach Möglichkeit sollten aktuelle Windmessdaten vom Standort eingebunden werden.

#### B. Model Output Statistics

Prinzip: Das mesoskalige Wettermodell COSMO liefert die Grundlagendaten, mit denen ein MOS entwickelt wird, das die Leistung voraussagt.

Voraussetzung: Es handelt sich um eine bestehende WEA, von der über ein Jahr Leistungsdaten mindestens in stündlicher Auflösung zur Verfügung stehen. Nach Möglichkeit sollten aktuelle Leistungsdaten der WEA eingebunden werden.

#### C. Kalman Filter via Windgeschwindigkeit

Prinzip: Das mesoskalige Wettermodell COSMO liefert die Grundlagendaten, mit denen mittels Kalman Filter die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe vorausgesagt wird. Die Leistung der WEA wird via Leistungskurve berechnet.

Voraussetzung: Es stehen aktuelle (auf die Nabenhöhe hochgerechnete) Windmessdaten am Anlagestandort "live" zur Verfügung.

#### D. Kalman Filter

Prinzip: Das mesoskalige Wettermodell COSMO liefert die Grundlagendaten, mit denen mittels Kalman Filter die Leistung prognostiziert wird.

Voraussetzung: Von der WEA müssen aktuelle Leistungsdaten "live" vorhanden sein bzw. periodisch übermittelt werden.

Falls keine der für die oben genannten Methoden benötigten Datensätze zur Verfügung stehen, ist als "first guess" auch folgende Methodik denkbar:

### **E. Statistik auf Windmessung und Transfer mit WindSim**

Prinzip: Das mesoskalige Wettermodell COSMO liefert die Grundlagendaten. Mit MOS oder Kalman Filter wird die Windgeschwindigkeit einer möglichst nahe liegender Messstation prognostiziert. Anschliessend wird diese mit WindSim an den WEA-Standort in Nabenhöhe umgerechnet. Schliesslich wird über die Leistungskurve die Leistung berechnet.

Voraussetzung: Es wird eine nahe des WEA-Standorts liegende Messstation mit mindestens einem Jahr Windgeschwindigkeitsdaten (für MOS) oder Live-Daten (für den Kalman Filter) benötigt.

Falls die entsprechenden Voraussetzungen erfüllt sind, können verschiedene Varianten auch parallel umgesetzt werden. Der Kunde hat damit mehrere Prognosen zur Verfügung, auf die er seine Entscheide abstützen kann.

### 9.4.2. Kosten

Die Kosten eines operationellen Angebots hängen von verschiedenen Faktoren ab:

- Initialkosten Anbieter: Aufgrund der noch kleinen Anzahl WEA in der Schweiz und weil die Anforderungen und Voraussetzungen je nach Standorte und Anlage ganz unterschiedlich sein können, wird ein operationelles Angebot auf jeden Fall für jeden Kunden massgeschneidert. Entsprechend fallen Initialkosten an, die dem Kunden entweder direkt verrechnet oder auf die Betriebskosten abgewälzt werden.
- Initialkosten Kunde: Der Kunde (z.B. Anlagenbetreiber) muss sicherstellen, dass der Anbieter die zum Betrieb der Vorhersage nötigen Daten zuverlässig erhält. Es kann notwendig sein, zusätzliche Messgeräte, Logger und Kommunikationsschnittstellen an der WEA zu installieren.
- Betriebskosten Anbieter: Unter die Betriebskosten fallen die planmässigen und unplanmässigen Aufwendungen und Arbeiten im Rahmen des operationellen Betriebs. Diese werden dem Kunden periodisch verrechnet.
- Betriebskosten Kunde: Der Kunde muss den Betrieb der oben genannten Messgeräte gewährleisten. Zudem müssen die eingehenden Prognosedaten verwertet werden.
- Datenkosten Anbieter: In der Regel sind Grundlagendaten aus einem operationellen mesoskaligen Wettermodell wie COSMO als Grundlagen nötig. Dafür fallen weitere Betriebskosten sowie allenfalls Initialkosten an, wenn das Modell für die Anwendung modifiziert werden muss.

Über die einzelnen Kostenpunkte können zum jetzigen Zeitpunkt keine verlässlichen Aussagen gemacht werden.

## Literatur

- Focken, U.; Lange, M.; Tambke, J.; Waldl, H.P., 2003: Predicting Offshore windpower, University of Oldenburg, Germany, 2003.
- Haalman D., Knüpfner K., 2003: Mos-mix: Integrated Statistical Interpretation of Multiple Numerical Models, European Conference on Applications of Meteorology, ECAM.
- Hao W., Ku M., Sistla G., 2004: Analysis of MM5 Simulations based on three PBL schemes over the eastern US for August 6 to 16, 2002, NYSDEC-DAR, Albany, NY 12233, 2004.
- Kalman R., 1960: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, Vol 82.
- Lange M., 2005: On the uncertainty of wind power predictions – analysis of the forecast accuracy and statistical distribution of errors. J. Sol. Energy Eng, Vol. 127 (2), 177–125.
- McKeogh et al., 2006: Forecasting Wind Power on the Irish Power System with a Multi-Scheme Ensemble Prediction System. CEEM Workshop, UniSA, Adelaide, 22nd Sept 2006.
- Nielsen T.S. et al., 2006: Short-term Wind Power Forecasting Using Advanced Statistical Methods. In Proc. of the European Wind Energy Conference 2006, Athens, Greece, 27/2–2/3 2006.
- Panteri E., Papathanassiou S., 2008: Evaluation of two simple wind power forecasting models. Proc. EWEC '08, Brussels, April 2008.
- Parkes J. and Tindal A., 2004: Forecasting short term wind farm production in complex terrain. . Proc. EWEC '04, London, November 2004.
- Persson A., 1989: Kalman filtering, a new approach to adaptive statistical interpretation of numerical meteorological forecasts. ECMWF Newsletter no 46, 16–20.
- Smith G., 1967: Sequential estimation of observation error variances in a trajectory estimation problem. AIAA Journal, Vol 5 (11), 1964–1970.
- Tambke J.; Lange M.; Focken U.; Bremen L.; Lange B., 2005: Wind Speed Forecasts for the North and Baltic Sea -Verification against 10m to 100m Observations, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 10222, 2005.
- Universität Oldenburg, 2002: [http://ehf.uni-oldenburg.de/wind/previento/verif\\_deutsch.html](http://ehf.uni-oldenburg.de/wind/previento/verif_deutsch.html) (Stand vom 31.08.2009).
- von Bremen L., Saleck N., Gräwe U., Tambke J., Heinemann D., 2006: Meteorological Models for Prediction and Simulation of Wind Power, Workshop Forschungsverbund Sonnenenergie, Energiemeteorologie, 2. November 2006, Berlin.

## Anhang A: Weitere Angaben zum Kalman Filter

### Verfeinerung der Prognose mittels Kalman Filter

Der diskrete Kalman Filter besteht aus zwei Gleichungen, der Systemgleichung und der Beobachtungsgleichung.

$$x_k = Ax_{k-1} + w_{k-1}$$

$$y_k = Hx_k + v_k$$

wobei in präsentierter Form  $A=1$ ,  $x$  = Vektor der beiden Koeffizienten und  $H = [1 \quad ff_{\text{MOD}}]$  für die Schätzung der Windgeschwindigkeit und  $H = [1 \quad ff_{\text{MOD}}^2]$  für die Schätzung der Leistung ist für jeden Zeitschritt  $t$ .  $v$  und  $w$  sind normalverteilte Zufallsvariablen mit dem Erwartungswert 0 und der Standardabweichung  $Q$  bzw.  $R$ .

$$p(w) \sim N(0, Q), \quad p(v) \sim N(0, R)$$

Die Werte für  $Q$  und  $R$  sind durch nichtlineare Optimierung über die gesamte Periode ermittelt worden. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Werte nicht konstant sein müssen. Adaptive Methoden können angewendet werden, um die zeitliche Änderlichkeit der beiden Varianzen zu bestimmen.

Der rekursive Vorhersage-Korrektur-Algorithmus des Kalman Filters ist dann der folgende. "Dächer" auf den einzelnen Variablen bedeuten Schätzungen, hochgestellte Minuszeichen die jeweilige Schätzung vor der Korrektur.

#### Vorhersageschritt:

a. Zustandsvorhersage:  $\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}$

b. Fehlerkovarianzvorhersage:  $P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$

#### Korrekturschritt:

a. Berechnung des "Kalman gain":  $K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$

b. Korrektur des Zustands:  $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - H\hat{x}_k^-)$

c. Korrektur der Fehlerkovarianzen:  $P_k = (I - K_k H)P_k^-$

wobei  $P$  die Kovarianzmatrix beschreibt,  $K$  der "Kalman gain" ist und  $I$  die Einheitsmatrix darstellt. Dieser Algorithmus wird für jeden Zeitschritt  $k=1, \dots, n$  ausgeführt und liefert neben den geschätzten Linearkoeffizienten ( $x_i$ ) auch die Unsicherheiten der Schätzung in der Hauptdiagonalen von  $P$ .

## Empirische Leistungskurve

Zur Umrechnung der prognostizierten Windgeschwindigkeit in die zu erwartende Leistung wurden die gemessenen Wertepaare an jedem WEA Standort bzw. meteorologischen Standort herangezogen. Die so genannte empirische Leistungskurve wurde mit einer sigmoidalen Funktion der Form,

$$\hat{P} = \frac{K_{\max}}{(1 + \exp(-k(FV - FF_h)))}$$

an die stündlichen Daten im Zeitraum August 2007 – Juli 2008 gefittet (siehe Beispiel Abbildung B1) und die optimalen Parameterwerte (Tabelle B1 für alle Standorte) für die Leistungsprognosen in der quasi-operationellen Testphase des Projekts benutzt. Hierbei bedeutet  $\hat{P}$  die geschätzte Leistung,  $K_{\max}$  ist die Nennleistung der Anlage,  $k$  ist ein Parameter, der die Steigung der Kurve bestimmt und  $FF_h$  ist die Lage des Wendepunktes der Kurve.

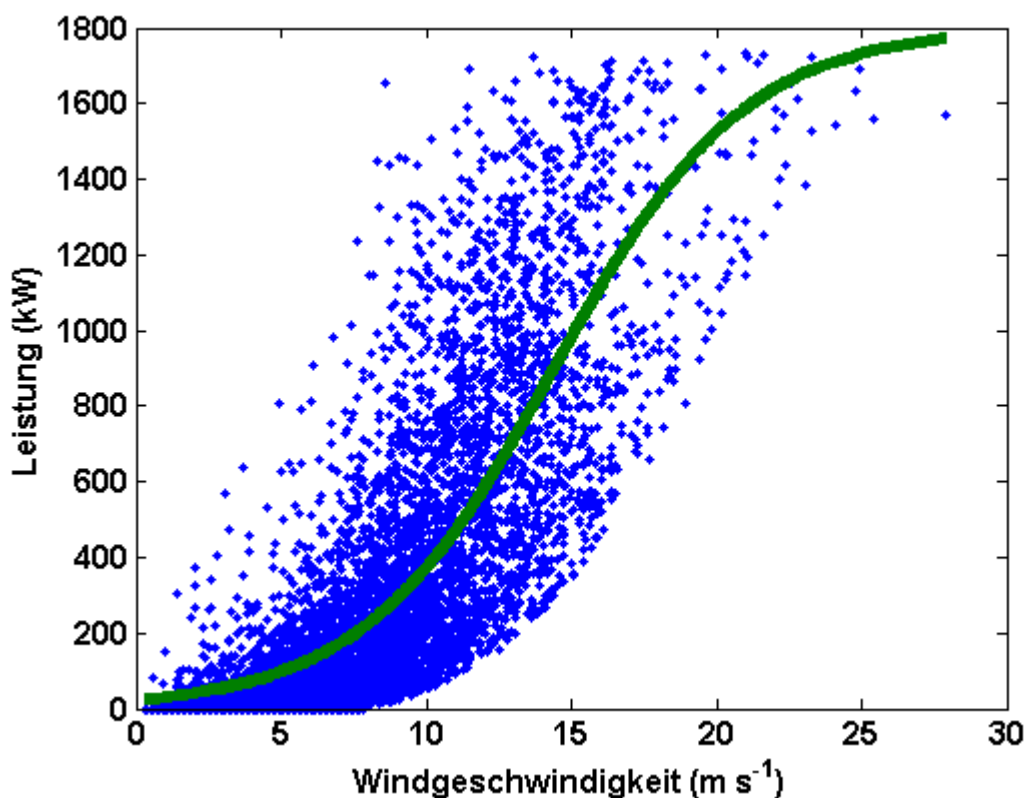


Abbildung A1: Empirische Leistungskurve für den Standort Mt. Crosin (in grün) verglichen mit den Messwertpaaren (blau). Eine leichte Unterschätzung der Leistung bei Windgeschwindigkeiten um  $15 \text{ m s}^{-1}$  ist auch am Standort Collonges zu verzeichnen.

Tabelle B1: Optimierte Parameterwerte für die empirische Beziehung zwischen gemessener Windgeschwindigkeit an der SMN Station und gemessener Leistung der Anlage gemäss Gleichung 1B.

<b>Parameter</b>	<b>Einheit</b>	<b>Collonges</b>	<b>Mt. Crosin</b>	<b>Gütsch</b>
$K_{max}$	kW	2000	1800	600
$k$		0.57	0.30	0.30
$FF_h$	m/s	6.18	14.40	13.20

## Anhang B: Beschreibung der Online-Visualisierung

### Einloggen



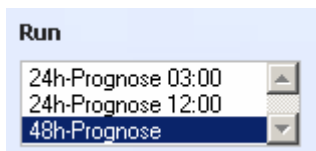
The login form consists of a light blue header with the word 'Login' on the left. Below it, there are two input fields: 'Benutzername:' followed by a text box, and 'Passwort:' followed by a text box. To the right of the password field is a grey button labeled 'Anmelden'.

Loggen Sie sich mit dem Ihnen mitgeteilten Benutzernamen und Passwort unter <http://aurora.meteotest.ch/wiforch> ein. Cookies und JavaScript müssen dazu in Ihrem Browser aktiviert sein.

Sie gelangen anschliessend auf die Hauptseite, wo Sie sich die verschiedenen Daten anzeigen lassen können.

Wiforch steht für WInd FOrecast CH.

### Run



The dropdown menu is titled 'Run' and contains three options: '24h-Prognose 03:00', '24h-Prognose 12:00', and '48h-Prognose'. The '48h-Prognose' option is currently selected and highlighted in blue.

Hier wählen Sie den Modell-Run, den Sie betrachten wollen:

- Der Run "48h-Prognose" steht jeden Tag um ca. 02:30 UTC zur Verfügung. Er beinhaltet eine 2-tägige Prognose ab 0 UTC des aktuellen Tages und ist primär für die Produktionsvorhersage des Folgetags gedacht.
- Der Run "24h-Prognose 03:00" ist jeden Tag ab ca. 04:30 UTC verfügbar und beinhaltet Prognosen von 03:00 UTC des aktuellen Tags bis 03:00 UTC des Folgetags. Die Zielperiode für die Prognose ist 06:00 bis 12:00 UTC des aktuellen Tags.
- Der Run "24h-Prognose 12:00" ist jeden Tag ab ca. 14:30 UTC verfügbar und beinhaltet Prognosen von 12:00 UTC des aktuellen Tags bis 12:00 UTC des Folgetags. Die Zielperiode für die Prognose ist 15:00 bis 21:00 UTC des aktuellen Tags.

Grundsätzlich könnten die 24h-Prognosen alle drei Stunden aktualisiert werden. Darauf wurde im Prototypen jedoch noch verzichtet.

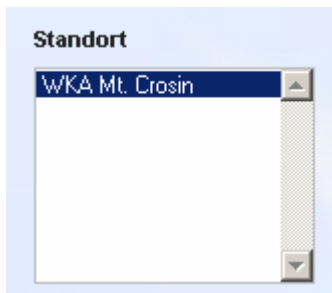
## Startdatum



The 'Startdatum' dialog box contains a text input field with the date '29.03.2009'. To the right of the input field are two buttons: 'löschen' and 'schliessen'. Below the input field is a navigation bar with '<zurück', 'heute', and 'Vor>' buttons. Underneath is a month and year selector showing 'März' and '2009'. The main part of the dialog is a calendar grid with days of the week (Mo, Di, Mi, Do, Fr, Sa, So) as columns and dates as rows. The date '29' is highlighted in a darker shade.

Hier wählen Sie das Startdatum der Prognose. Dies ist in der Regel der aktuelle Tag. Zur Kontrolle kann auch das Prognose-Archiv der vergangenen Tage abgerufen werden.

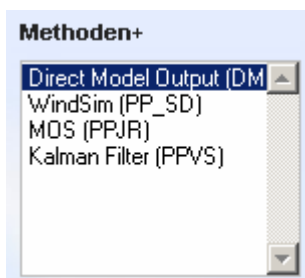
## Standort



The 'Standort' dialog box features a list box containing the text 'WKA Mt. Crosin'. The list box has a scroll bar on the right side.

Hier steht Ihr WEA-Standort zur Verfügung.

## Methoden



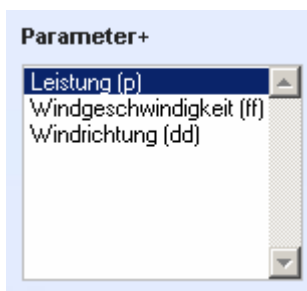
The 'Methoden+' dialog box contains a list box with four entries: 'Direct Model Output (DM)', 'WindSim (PP\_SD)', 'MOS (PPJR)', and 'Kalman Filter (PPVS)'. The first entry, 'Direct Model Output (DM)', is selected and highlighted.

Wählen Sie die Prognosemethode(n). Mehrfachauswahl mit Shift- oder Ctrl-Taste möglich:

- Direct Model Output: Alle Prognosen basieren auf dem Output des COSMO-Modells der MeteoSchweiz. Direct Model Output zeigt die nicht nachbearbeiteten Resultate des COSMO-Modells am Gitterpunkt, der Ihrem Standort am nächsten ist.
- WindSim: Hier wurde der Direct Model Output einem dynamischen Downscaling unterzogen, d.h. mittels des mit der Model-Software WindSim errechneten Windfelds vom Punkt der COSMO-Prognose genau auf die Nabenhöhe der WKA umgerechnet.
- MOS: Der Direct Model Output wird mit Model Output Statistics (MOS) mittels statistischer Verfahren auf den Anlagenstandort angepasst. Das MOS basiert auf dem Vergleich vergangener Modell-Outputs mit den tatsächlich am Standort gemessenen Werten.
- Kalman Filter: Der Kalman Filter passt den Direct Model Output durch eine laufend neu errechnete Korrektur auf Basis der vergangenen Stunden an die tatsächlich gemessenen Werte an. Der Kalman Filter steht nur zur Verfügung, wenn auch die Messdaten kontinuierlich vorliegen.

Wenn Sie nur eine Methode wählen, wird in den Grafiken bzw. Tabellen auch die Prognose-Unsicherheit zur gewählten Methode angezeigt. Bei der Anzeige mehrerer Methoden wird die Unsicherheit der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

### Parameter



Wählen Sie die darzustellenden Parameter. Mehrfachauswahl mit Shift- oder Ctrl-Taste möglich:

- Leistung: Die prognostizierte Leistung der WKA
- Windgeschwindigkeit: Die prognostizierte Windgeschwindigkeit, entweder am nächsten Modellgitterpunkt, auf Nabenhöhe der WKA oder an der nächstgelegenen Meteostation gemäss untenstehender Tabelle.
- Windrichtung: Die prognostizierte Windrichtung, entweder am nächsten Modellgitterpunkt, auf Nabenhöhe der WKA oder an der nächstgelegenen Meteostation gemäss untenstehender Tabelle.

Method	WKA Gütsch	WKA Mt. Crosin	WKA Feldmoos	WKA Collonges
Direct Model Output	nächster Modellgitterpunkt	nächster Modellgitterpunkt	nächster Modellgitterpunkt	nächster Modellgitterpunkt
WindSim	Nabenhöhe WKA	Nabenhöhe WKA	Nabenhöhe WKA	Nabenhöhe WKA
MOS	Meteostation Gütsch	Nabenhöhe WKA	Nabenhöhe WKA	Meteostation Evionnaz
Kalman Filter	Meteostation Gütsch	Meteostation Chasseral	–	Meteostation Evionnaz

### Ausgabe



Wählen Sie den Ausgabebetyp:

- Als Grafik: Eine Grafik pro Tabelle zeigt den Verlauf der Prognosen aller gewählten Methoden. Falls dazu auch ein Beobachtungswert (z.B. einer Meteostation) besteht, wird dieser auch angezeigt.
- Als Tabelle: Die Prognosewerte werden in einer Tabelle aufgeführt.