

**Schlussbericht** September 2002

# Zusatzmessungen am Gütsch

Modell-Validierung / Monitoring der Windkraftanlage / Vereisung

ausgearbeitet durch  
René Cattin  
Meteotest  
Fabrikstr. 14, 3012 Bern

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des Elektrizitätswerkes Ursen entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

## **Zusammenfassung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Resultate der im Frühjahr 2002 am Standort Gütsch durchgeföhrten zusätzlichen Windmessungen. Einerseits wurde eine Messung mit einem beheizten Schalenkreuzanemometer am Mast von MeteoSchweiz durchgeföhr. Zusätzlich wurde am gleichen Mast ein unbeheiztes Anemometer installiert. Schliesslich wurde am Standort der Windkraftanlage eine SODAR-Messung gemacht.

Der Vergleich der MeteoSchweiz-Daten mit der Anemometermessung zeigt, dass die Messung von MeteoSchweiz die Windgeschwindigkeit um ca. 1.5 m/s überschätzt, und dass Werte unter 3.5 m/s falsch erfasst werden. Zudem kann ein systematischer Fehler in der Windrichtung festgestellt werden.

Die SODAR-Messung lieferte ca. 10% tiefere Windgeschwindigkeiten als die Anemometermessung. Diese Differenz ist zu gross als dass sie nur auf den unterschiedlichen Standort zurückgeführt werden könnte. Die Differenz ist einerseits auf den Unterschied zwischen skalarer (Anemometer) und vektorieller (SODAR) Mittelung zurückzuföhren. Andererseits führen die grossen Turbulenzen im Gebirge dazu, dass auf Grund der mechanischen Trägheit mit einem Anemometer zu hohe Windgeschwindigkeiten gemessen werden (Overspeeding).

Die Betrachtung der vertikalen Windprofile zeigt, dass bei Nord- und Südwind zwei verschiedene Windregimes vorliegen: Bei Nordwind kann im Mittel der Windgeschwindigkeiten eine Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe festgestellt werden. Bei Südwind dagegen bleibt die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe konstant oder nimmt sogar ab.

Die Profile verändern bei zunehmender Windgeschwindigkeit ihre Form: Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten liegt sowohl bei Süd- als auch bei Nordwind eine Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe vor. Wird die Windgeschwindigkeit grösser, nimmt bei Nordwind der Windgeschwindigkeit mit der Höhe weiter zu, während bei Südwind eine Abnahme festzustellen ist.

Die Resultate decken sich qualitativ wie quantitativ relativ gut mit den im Projekt FACTs ( Fluid-Dynamics-Model) erhaltenen Resultaten. Es bestätigt sich, dass im Gebirge nicht mit einem exponentiellen Windprofil gerechnet werden darf.

Die Korrelation der Anemometermessung mit der SODAR-Messung zeigt, dass aus einer Messung auf 10 m langfristige Mittelwerte auf Nabenhöhe gewonnen werden können. Wegen der grossen Turbulenz ist die Berechnung einzelner 10-Minuten-Mittelwerte ungenau. Um genauere Ergebnisse zu erzielen, müssen weitere Erfahrungen über den Zusammenhang zwischen den beiden Messverfahren gewonnen werden.

Die Messung von Vereisungsperioden anhand des Vergleichs eines beheizten und eines unbeheizten Anemometers zeigt, dass die Vereisungsgefahr aus Temperatur- und Taupunktmessung im Projekt FACTs relativ gut abgeschätzt wurde.

## Abstract

This report is the documentation of the results of the additional wind measurements performed at the Gütsch site in spring 2002. On the mast of MeteoSwiss, measurements with one heated and one unheated cup-anemometer have been performed. Additionally wind speed and direction were measured by SODAR at the wind turbine site.

The comparison of the anemometer data measured to the MeteoSwiss data shows that the measurements of MeteoSwiss overestimate wind speed by about 1.5 m/s and wind speeds under 3.5 m/s are recorded falsely. Furthermore, there is a systematic error in wind direction.

The SODAR measurements provided wind speeds which were about 10% lower compared to the anemometer measurements. On one hand this can be attributed the different averaging methods, scalar for the anemometer and vectorial for the SODAR. Furthermore, higher turbulence in mountains leads to an overestimation of wind speed by anemometer measurements (overspeeding).

The analysis of vertical wind profiles shows that there are two different wind regimes depending on wind direction: In case of winds from the North an increase of wind speed with height can be observed, whereas in case of winds from the South, wind speed decreases with height.

The profiles change their shape with increasing wind speed: For low wind speeds, wind speed increases with height for winds from the North as well as from the South. For higher wind speeds, winds from the North increase with height whereas winds from the South decrease with height.

These results confirm the results of the FACTs project (Fluid Dynamics Model) qualitatively and quantitatively quite well. It was shown again that exponential profiles of wind speed must not be used in complex terrain.

The correlation between anemometer and SODAR measurements shows that it is possible to gain long-term averages on hub height out of measurements at 10 m. The calculation of current wind speed is imprecise because of high turbulence. To get more accurate results more experiences concerning the relation between anemometer and SODAR measurements is needed.

The comparison between heated and unheated anemometer shows that the risk of icing has been estimated quite well out of temperature and dew point measurements in the FACTs project.

## Résumé

Ce rapport est la documentation des mesures supplémentaires du vent qui ont été enregistrées en printemps 2002 au site du Gütsch. Des séries de mesures ont été enregistrées avec deux anémomètres-girouette sur le mât de MétéoSuisse, dont l'un était équipé d'un chauffage. En plus, le vent sur le site de l'installation éolienne a été mesuré avec un SODAR.

En comparaison des mesures d'anémomètre avec les mesures de MétéoSuisse (ANETZ), ces dernières se sont avérées trop élevées de 1.5 m/s env., et des vitesses de vent inférieures à 3.5 m/s n'ont pas été enregistrées correctement par le système de MétéoSuisse. En plus il y avait une erreur systématique dans la direction du vent.

Les vitesses du vent enregistrées par le SODAR étaient inférieures de 10% env. comparé aux mesures des anémomètres. Cette écart est dû aux différentes méthodes de calcul des moyennes, scalaire pour les données d'anémomètre, vectorielle pour le SODAR. En plus les turbulences en montagne produisent des valeurs trop hauts pour les anémomètres.

Les analyses des profiles verticaux du vent ont démontrés deux situations différentes lorsque le vent vient du nord ou du sud. En cas de vent du nord la vitesse du vent augmente avec l'altitude, tandis qu'avec le vent du sud la vitesse reste constante. En plus, la form des profiles varie avec la vitesse du vent. A vitesse faible, la vitesse augmente légèrement avec l'altitude, à vent du nord et à vent du sud. A vitesses plus élevées, elle augmente avec l'altitude lorsqu'il s'agit du vent du nord, mais elle diminue même avec le vent provenant du sud.

Les résultats sont en gros cohérents avec les résultats du projet FACTs. Il est devenu clair qu'en montagne on ne peut pas s'attendre à un profil exponentiel de vitesse du vent.

La correlation des mesures d'anémomètres aux mesures SODAR a montré qu'avec la combinaison de ces deux systèmes on peut gagner des moyennes à long-terme pour la vitesse du vent à niveau de la nacelle. La modélisation de vitesses momentanées est pourtant trop imprécise à cause des fortes turbulences en montagne. Pour obtenir des résultats plus précis il est indispensable de gagner plus d'expérience concernant le rapport entre les deux procédures.

La comparaison de l'anémomètre chauffé avec le non-chauffé a montré que le risque de givrage peut être estimé suffisamment bien à base de mesures de la température et du point de rosée. Les résultats présentés dans le rapport FACTs ont ainsi pu être confirmés.

## Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage.....	8
2	Ziele der Arbeit .....	10
3	Lösungsweg / Messkonzept .....	11
3.1	Güte der Winddaten von MeteoSchweiz .....	11
3.2	Verifizierung der modellierten vertikalen Windprofile.....	11
3.3	Korrelation der SODAR-Messung.....	11
3.4	Vereisungsgefahr.....	11
3.5	Erfahrungen mit Windmessung im Gebirge.....	11
4	Hauptergebnisse .....	12
4.1	Güte der Winddaten von MeteoSchweiz .....	12
4.2	Verifizierung der modellierten vertikalen Windprofile.....	16
4.2.1	Beschreibung des SODAR .....	16
4.2.2	Messkampagne.....	17
4.2.3	Bereinigung der Messwerte .....	17
4.2.4	Windgeschwindigkeit .....	19
4.2.5	Windrichtung .....	22
4.2.6	Turbulenz.....	23
4.2.7	Böenspitzen .....	25
4.2.8	Das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit .....	25
4.2.9	Vergleich mit den Modellberechnungen.....	27
4.3	Korrelation der SODAR-Messung.....	29
4.4	Vereisungsgefahr.....	31
4.5	Erfahrungen mit Windmessung im Gebirge .....	33
5	Ausblick .....	34
6	Literaturverzeichnis .....	35

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Standort der WKA und der Messungen (1:100'000, © Bundesamt für Landestopografie, DV 606).	8
Abb. 2: Skizze der Messanordnung.	9
Abb. 3: Der zusätzlich montierte Ausleger am Mast von MeteoSchweiz. Links: Anemometer und Windfahne beheizt. Innen: unbeheiztes Anemometer (vereist). Auf der Spitze: SIAP-Windmesser von MeteoSchweiz.	12
Abb. 4: Verlauf der Windgeschwindigkeit der MeteoSchweiz- und der Zusatzmessung am MeteoSchweiz-Mast (Stundenmittel).	13
Abb. 5: Die Zusatzmessung und die MeteoSchweiz-Messung im direkten Vergleich (Punkte). Die schwarze Linie entspräche gleichen Messwerten von MeteoSchweiz und Zusatzmessung, die rote Linie zeigt das tatsächliche Verhältnis.	14
Abb. 6: Windrose der Zusatzmessung.	15
Abb. 7: Windrose der MeteoSchweiz-Messung.	15
Abb. 8: Die Zerlegung eines gemessenen Windvektors (blau) in die drei Teilvektoren u, v und w (rot).	16
Abb. 9: Das SODAR auf dem Gütsch. Im Hintergrund rechts vom SODAR ist der Mast von MeteoSchweiz zu erkennen.	17
Abb. 10: Prozentsatz der verwendbaren SODAR-Daten in Abhängigkeit der Höhe.	18
Abb. 11: Verlauf der Windgeschwindigkeit auf 10 (Anemometer), 40 und 80 m (SODAR) während der Messkampagne.	19
Abb. 12: Der Unterschied zwischen skalarer und vektorieller Mittelung.	20
Abb. 13: Vergleich zwischen skalarer (schwarz) und vektorieller (rot) Mittelwertbildung der Anemometermessung, sowie der SODAR-Messung (blau).	21
Abb. 14: Die Windrose der Anemometermessung auf 10 m während der SODAR-Messkampagne.	22
Abb. 15: Die Windrose der SODAR-Messung auf 40 m.	23
Abb. 16: Die aus der Anemometermessung berechnete Turbulenzintensität.	24
Abb. 17: Die aus der SODAR-Messung berechneten Turbulenzintensitäten auf 40 m für die v- (links) und die w-Komponente (rechts).	24

---

Abb. 18: Vergleich des Verhältnisses zwischen Böen spitze und Windgeschwindigkeit von Anemometer und SODAR.	25
Abb. 19: Das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit bei Nord- (links) und Südwind (rechts) und einer Windgeschwindigkeit zwischen 6 und 7 m/s auf 10 m.	26
Abb. 20: Das vertikale Windprofil für verschiedene Windgeschwindigkeiten bei Nord- und Südwind.	27
Abb. 21: Stark vereinfachte Darstellung der topografischen Verhältnisse am Standort Gütsch.	27
Abb. 22: Vergleich der modellierten vertikalen Windprofile mit den gemessenen bei Nord- (oben) und Südwind (unten).	28
Abb. 23: Vergleich zwischen Anemometer- und SODAR-Messung bei Nord- und Südwind.	30
Abb. 24: Das Verhältnis zwischen gemessener und berechneter Windgeschwindigkeit auf 40 m bei Nordwind(links) und bei Südwind (rechts).	31
Abb. 25: Oben: Vergleich zwischen beheiztem und unbeheiztem Anemometer. Unten: Verlauf von Temperatur und Taupunkt der MeteoSchweiz-Messung.	32

**Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Messkonfiguration am Standort Gütsch (Messmast von MeteoSchweiz).	12
Tab. 2: Eichzustand des MeteoSchweiz-Windmessgerätes.	13
Tab. 3: Technische Daten des miniSODAR 4000.	16
Tab. 4: Die auf Grund technischer Probleme entstandenen Datenlücken.	17
Tab. 5: Die berechneten Regressionsparameter für Nord- und Südwind.	30

## 1 Ausgangslage

*METEOTEST* erhielt vom Bundesamt für Energie BfE und dem Elektrizitätswerk Uri den Auftrag ein Verfahren zu entwickeln, mit welchem die Windverhältnisse im Gebirge zuverlässig berechnet werden können. Diese Modellierung im Rahmen des Projektes FACTs (Sander et al., 2001) wurde für den Standort Gütsch durchgeführt. Als Basis der Modellierung dienten die Winddaten der permanenten Meteostation Gütsch von MeteoSchweiz welche in etwa 300 m Entfernung vom Standort der Windkraftanlage positioniert ist. Um die Resultate dieser Berechnungen zu verifizieren wurde beschlossen, vor der Installation der Windkraftanlage eine Zusatzmesskampagne mit herkömmlichen Anemometern am Masten von MeteoSchweiz sowie mit einem SODAR (SOund Detecting And Ranging) am Standort der zukünftigen Windkraftanlage durchzuführen. Zusätzlich wurden Messungen zur Bestimmung der Vereisungsgefahr an diesem Standort beauftragt. Abbildung 1 zeigt den Standort der Windkraftanlage und der Messungen. Abbildung 2 zeigt eine Skizze der Messanordnung.

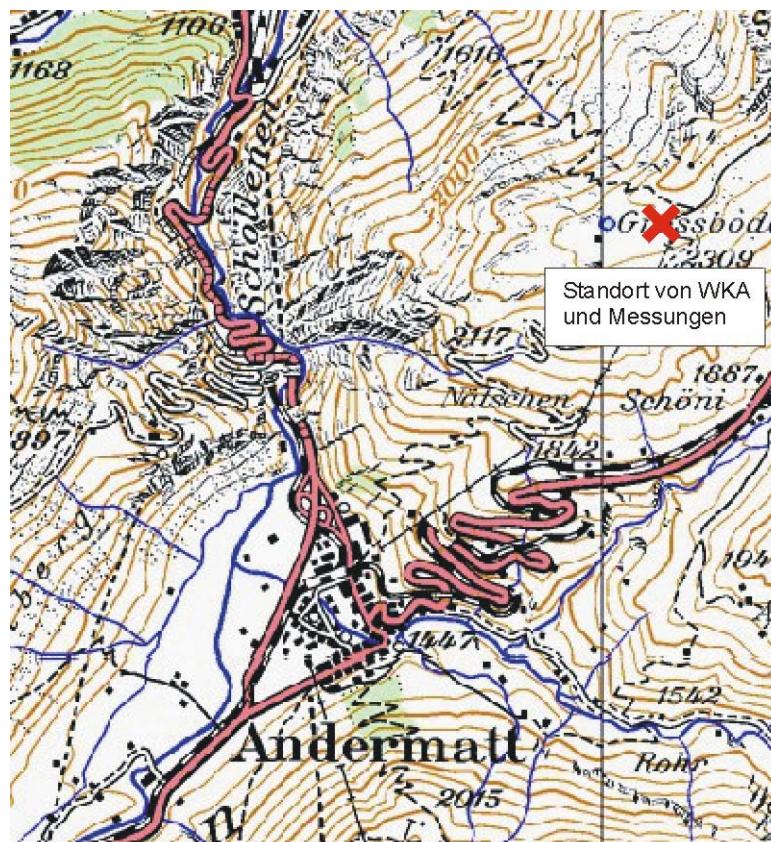


Abb. 1: Standort der WKA und der Messungen (1:100'000, © Bundesamt für Landestopografie, DV 606).

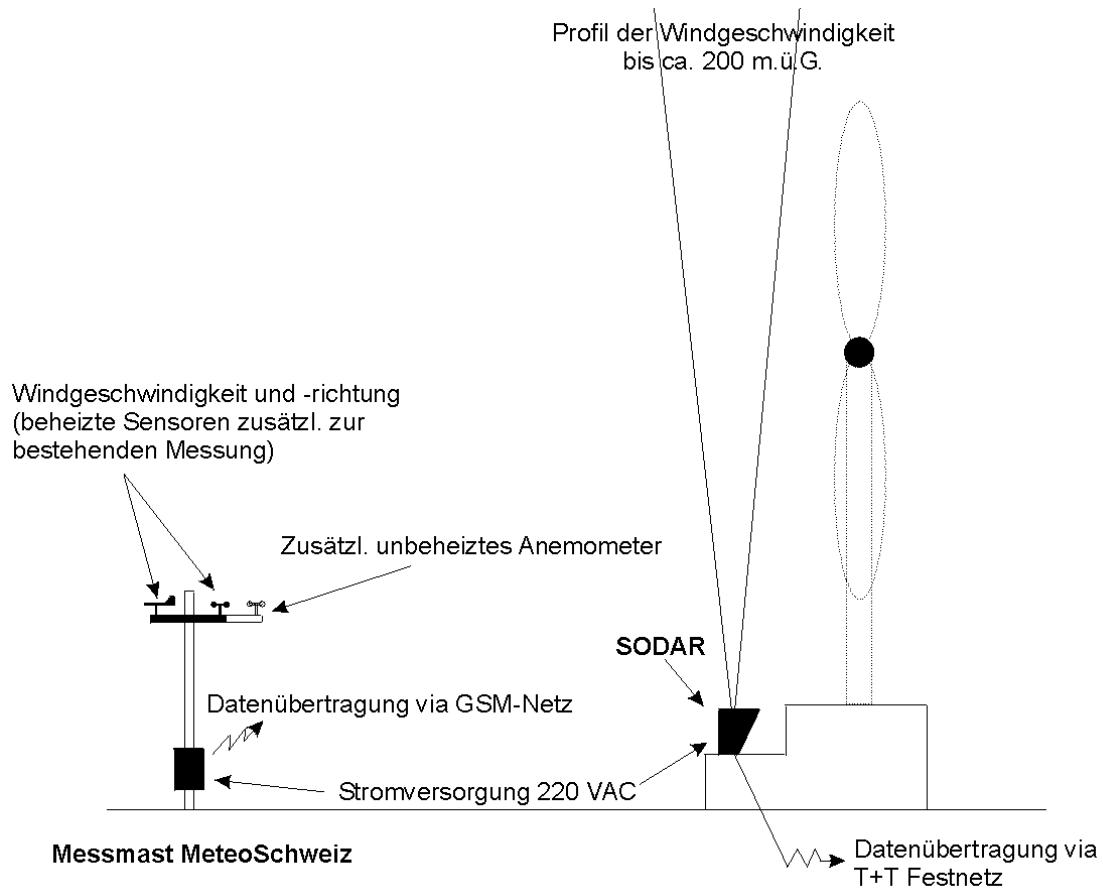


Abb. 2: Skizze der Messanordnung.

## **2 Ziele der Arbeit**

Die folgenden Ziele sollten mit dieser Arbeit erreicht werden:

- Aus der Zusatzmessung am Masten von MeteoSchweiz sollen Aussagen über die Güte der Winddaten von MeteoSchweiz gemacht werden.
- Das im Projekt FACTs berechnete vertikale Windprofil für den Standort Gütsch soll mit der SODAR-Messung verifiziert werden.
- Die Windmessungen am Masten von MeteoSchweiz sollen mit der SODAR-Messung korreliert werden um ein Monitoring der Windkraftanlage auf der Basis der Winddaten von MeteoSchweiz aufzubauen.
- Das im Projekt FACTs verwendete Verfahren zur Bestimmung der Vereisungsgefahr mit Temperatur- und Taupunktmessungen soll mit Messungen verifiziert werden.
- Es sollen weitere Erfahrungen mit Windmessung im Gebirge gewonnen werden. Insbesondere soll die Tauglichkeit von SODAR-Messungen im Gebirge evaluiert werden.

### 3 Lösungsweg / Messkonzept

#### 3.1 Güte der Winddaten von MeteoSchweiz

Am Masten von MeteoSchweiz wurde ein beheiztes Schalensternanemometer installiert und parallel gemessen. Die Messresultate wurden mit den Windwerten von MeteoSchweiz (ANETZ) verglichen, um Aussagen zur Güte der Daten von MeteoSchweiz zu machen. Dies ergab Aufschlüsse über die Güte der im Projekt FACTs durchgeführten Modellberechnungen welche auf den langjährigen Winddaten von MeteoSchweiz basierten.

#### 3.2 Verifizierung der modellierten vertikalen Windprofile

Am Standort Gütsch wurde während 2 Monaten eine SODAR-Messkampagne durchgeführt. Dabei wurden Windgeschwindigkeit und Windrichtung von 20 bis 150 m.ü.G. in Schritten von 10 m gemessen. Die erhaltenen Resultate werden nach Nord- und Südlagen getrennt betrachtet. Diese vertikalen Profile wurden mit den durch das Fluid-Dynamics-Modell berechneten Profilen verglichen und daraus Aussagen über die Güte des Modells gemacht.

#### 3.3 Korrelation der SODAR-Messung

Die Resultate der SODAR-Messung auf Nabenhöhe wurden für jeden Zeitpunkt der Messkampagne mit der Zusatzmessung am Mast von MeteoSchweiz korreliert. Diese Beziehung sollte eine Abschätzung der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe für jeden Zeitpunkt möglich machen.

#### 3.4 Vereisungsgefahr

Zusätzlich zum beheizten Anemometer wurde am Mast von MeteoSchweiz ein unbeheiztes Anemometer installiert. Aus der Parallelmessung zwischen beheiztem und unbeheiztem Anemometer können Aussagen über die Häufigkeit von Vereisung an diesem Standort gemacht werden. Die Evaluation erfolgt nach dem einfachen Prinzip, dass ein sich drehendes beheiztes Anemometer und ein still stehendes unbeheiztes Anemometer eine Vereisungsperiode bedeutet. Diese Resultate wurden mit der im Projekt FACTs angewandten Methode, Vereisungsperioden über Temperatur und Taupunkt zu berechnen, verglichen.

#### 3.5 Erfahrungen mit Windmessung im Gebirge

Diese Messkampagne war der erste Einsatz eines SODAR für die Windenergie in den Schweizer Alpen. Diese Messung lieferte wichtige Informationen über die Tauglichkeit dieses Messverfahrens für Gebirgsstandorte. Durch die Anwesenheit einer laufenden Windkraftanlage können zu einem späteren Zeitpunkt die Windwerte direkt mit der Leistungsabgabe verglichen werden und so Aussagen über den Einfluss von Turbulenz auf den Wirkungsgrad der Anlage gemacht werden.

## 4 Hauptergebnisse

### 4.1 Güte der Winddaten von MeteoSchweiz

Am 8. März 2002 wurde die Zusatzmessung am Messmast von Meteo-Schweiz installiert. Tabelle 1 zeigt die zum Einsatz gekommenen Messgeräte. Die Messkampagne dauerte bis am 19. Juni 2002. Während dieser Zeit waren keine Datenausfälle zu verzeichnen. Der installierte Ausleger ist in Abbildung 3 zu sehen.

Tab. 1: Messkonfiguration am Standort Gütsch (Messmast von MeteoSchweiz).

Datenlogger	Sensor	Typ	Messparameter	Höhe
Campbell CR10X	Anemometer	Vaisala WAA 252 (beheizt)	Windgeschwindigkeit	10.9 m
	Windfahne	Vaisala WAV 252 (beheizt)	Windrichtung	10.9 m
	Anemometer	NRG #40 (unbeheizt)	Max Windgeschwindigkeit	10.9 m

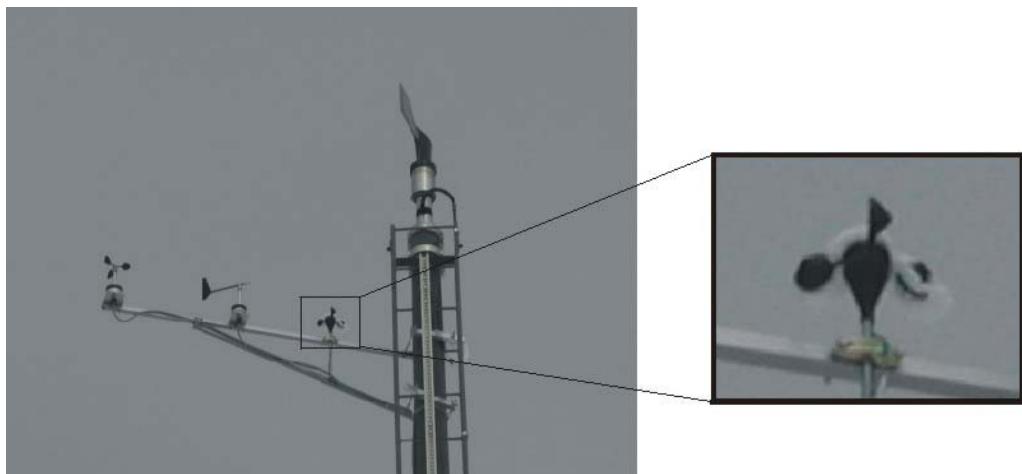


Abb. 3: Der zusätzlich montierte Ausleger am Mast von MeteoSchweiz. Links: Anemometer und Windfahne beheizt. Innen: unbeheiztes Anemometer (vereist). Auf der Spitze: SIAP-Windmesser von MeteoSchweiz.

Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit der Zusatzmessung im Vergleich zur Messung mit dem SIAP-Windmesser von MeteoSchweiz. Es ist deutlich zu erkennen, dass die beiden Messreihen bei Windgeschwindigkeiten über 3.5 m/s gut korrelieren. Ist die Windgeschwindigkeit jedoch unter 3.5 m/s, wird dies von der MeteoSchweiz-Messung falsch erfasst: Die Windgeschwindigkeit fällt praktisch nie unter diesen Wert. Dieser Umstand wirkt sich auf die Berechnung der Mittelwerte aus: Die mittlere Windgeschwindigkeit der Zusatzmessung während der Messkampagne betrug 5.9 m/s. Die Mittelung der Messwerte von MeteoSchweiz über diesen Zeitraum ergab hingegen einen Wert von 7.3 m/s.

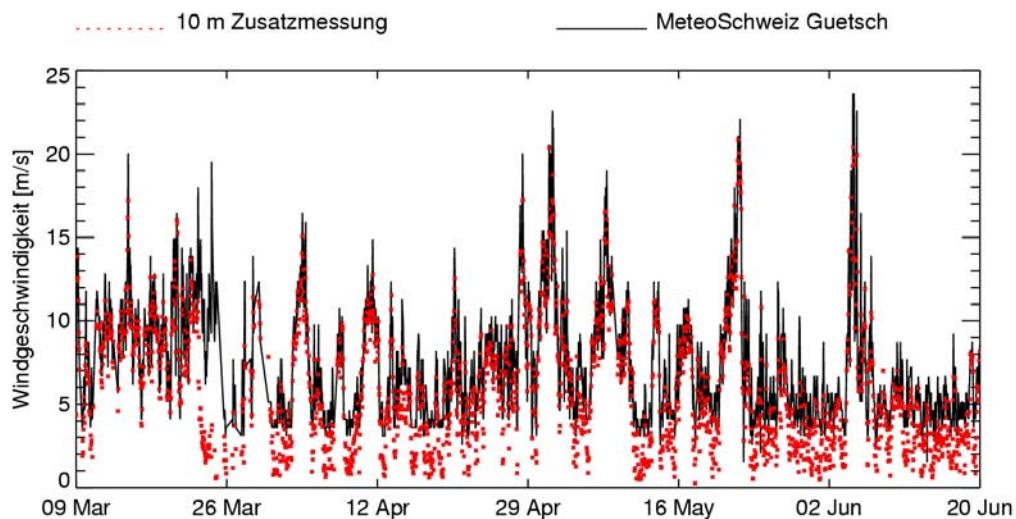


Abb. 4: Verlauf der Windgeschwindigkeit der MeteoSchweiz- und der Zusatzmessung am MeteoSchweiz-Mast (Stundenmittel).

Abbildung 5 zeigt die Korrelation der beiden Messungen. Wiederum ist zu erkennen, dass der SIAP-Windmesser von MeteoSchweiz Windgeschwindigkeiten unter 3.5 m/s falsch erfasst. Weiter zeigt sich, dass der SIAP von MeteoSchweiz die Windgeschwindigkeit systematisch um etwa 1.5 m/s überschätzt. Die rote Linie zeigt die Regression zwischen MeteoSchweiz- und Zusatzmessung, die schwarze entspricht identischen Windgeschwindigkeiten in beiden Messreihen.

Der Unterschied röhrt daher, dass während der Messperiode ein ungeeichtes MeteoSchweiz-Messgerät im Einsatz war. Tabelle 2 zeigt die Phasen falscher Windmessungen am Gütsch. Im Projekt FACTs wurden die Winddaten der Jahre 1991-2000 verwendet. Da nur im Jahre 2000 ein ungeeichtes Messgerät im Einsatz war, kann davon ausgegangen werden, dass die FACTs-Resultate nur sehr geringfügig von diesem Fehler beeinflusst wurden.

Tab. 2: Eichzustand des MeteoSchweiz-Windmessgerätes.

geeichter Sensor in Betrieb	1991 - 20.08.1999
Neueichung Sensor	20.08.1999
geeichter Sensor in Betrieb	20.08.1999 - Feb. 2000
ungeeichter Sensor in Betrieb	Feb. 2000 - 19.06.2002
Neueichung Sensor	19.06.2002
geeichter Sensor in Betrieb	19.06.2002 - ...

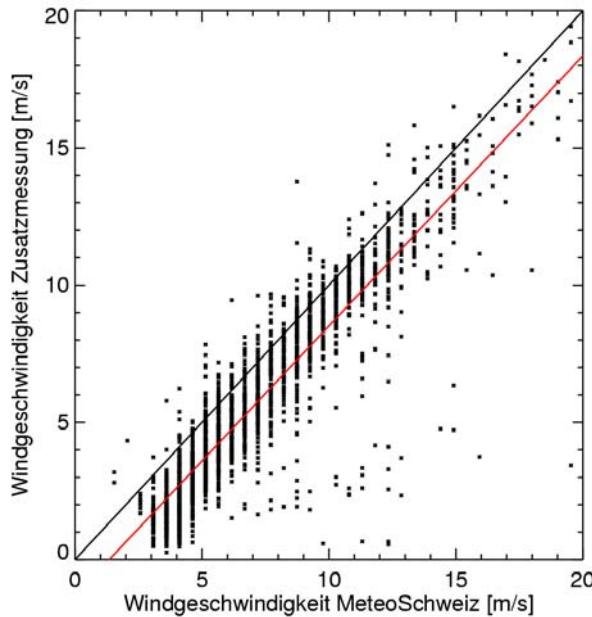


Abb. 5: Die Zusatzmessung und die MeteoSchweiz-Messung im direkten Vergleich (Punkte). Die schwarze Linie entspräche gleichen Messwerten von MeteoSchweiz und Zusatzmessung, die rote Linie zeigt das tatsächliche Verhältnis.

Abbildung 6 zeigt die Windrose der Zusatzmessung, Abbildung 7 die entsprechende Windrose der MeteoSchweiz-Messung. Es zeigt sich, dass die MeteoSchweiz-Windrose gegenüber der Zusatzmessung systematisch um etwa  $10^\circ$  gedreht ist. Die Form der Windrose ist hingegen nahezu identisch. Weiter zeigen sich in der MeteoSchweiz-Windrose die nicht vorhandenen Werte unter 3.5 m/s (fehlende grüne Linie in Abb. 7).

Ein Problem der MeteoSchweiz-Messung besteht darin, dass es sich um ein schweres und trüges Messgerät handelt. Somit ist bei kleinen Windgeschwindigkeiten nicht gewährleistet, dass sich das Gerät in den Wind dreht, wie es für eine Staudruckrohrmessung nötig ist. Abbildung 3 zeigt eine Situation, in welcher vom MeteoSchweiz-Sensor falsche Werte für Windgeschwindigkeit und -richtung aufgezeichnet wurden, da er nicht richtig in den Wind gedreht ist. Die Windgeschwindigkeit betrug zu diesem Zeitpunkt etwa 1.5 m/s.

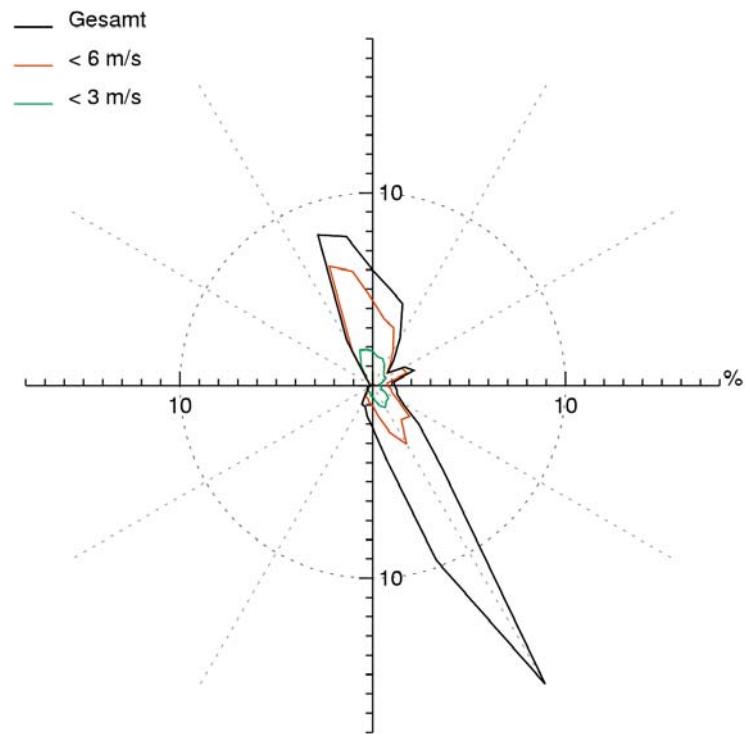


Abb. 6: Windrose der Zusatzmessung.

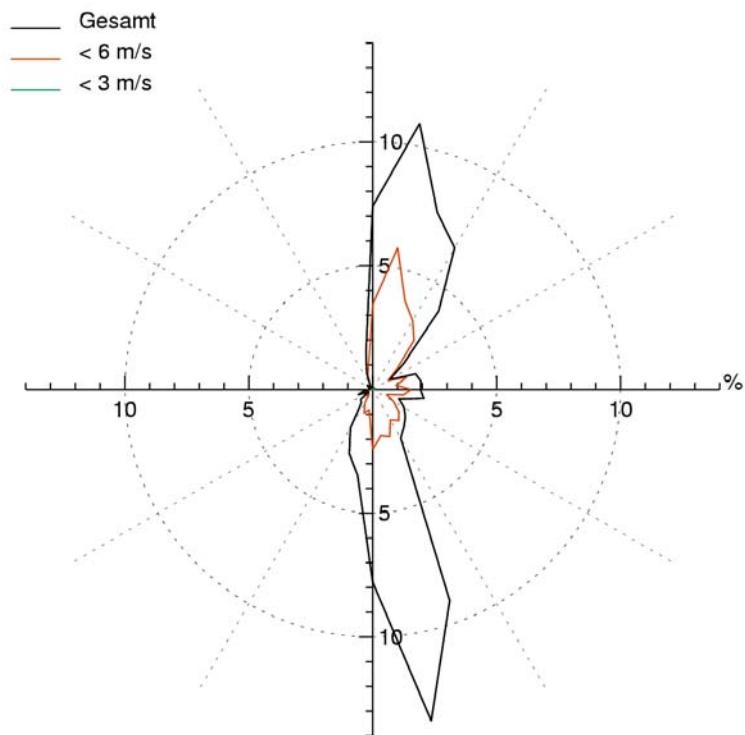


Abb. 7: Windrose der MeteoSchweiz-Messung.

## 4.2 Verifizierung der modellierten vertikalen Windprofile

### 4.2.1 Beschreibung des SODAR

SODAR ist eine berührungslose Messung vom Erdboden auf der Basis von Schallwellen. Die ausgesandten Schallwellen werden an Inhomogenitäten der Atmosphäre zurückgestreut. Aus der Dopplerverschiebung der reflektierten Signale kann auf die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung geschlossen werden. Da die Impulse in drei Richtungen ausgesandt werden, ist es auch möglich einen gemessenen Windvektor in 3 Teilvektoren  $u$ ,  $v$  und  $w$  im dreidimensionalen Raum zu unterteilen. Dies ermöglicht die Abschätzung der Vertikalkomponente des Windes. Abbildung 8 illustriert dies. Beim verwendeten SODAR handelt es sich um das Modell miniSODAR Model 4000 der Firma AeroVironment<sup>1</sup>. Tabelle 2 enthält die wichtigsten technischen Daten des Gerätes.

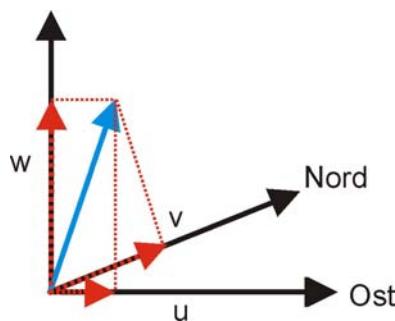


Abb. 8: Die Zerlegung eines gemessenen Windvektors (blau) in die drei Teilvektoren  $u$ ,  $v$  und  $w$  (rot).

Tab. 3: Technische Daten des miniSODAR 4000.

Maximale Messhöhe	200 m
Mindestmesshöhe	15 m
Max. Höhenauflösung	5 m
Frequenz	4500 Hz
Mittelungsintervall	1 bis 60 Minuten
Messbereich Windgeschwindigkeit	0 bis 45 m/s
Genauigkeit Windgeschwindigkeit	< 0.25 m/s
Genauigkeit Windrichtung	± 2°
Gewicht	ca. 120 kg
Dimensionen der Antenne (l x b x h)	1.5 x 1.2 x 1.2 m

<sup>1</sup> <http://www.aerovironment.com/area-atmos/prod-serv/4000minisodar.html>

#### 4.2.2 **Messkampagne**

Das SODAR wurde am 17. April 2002 auf dem Gütsch in Betrieb genommen. Die Messung dauerte bis am 4. Juni 2002. Die auf Grund technischer Probleme entstandenen Datenlücken sind in Tabelle 3 enthalten.

Tab. 4: Die auf Grund technischer Probleme entstandenen Datenlücken.

Beginn Lücke	Ende Lücke	Ursache
07.05.02 19:30	08.05.02 15:00	Software-Problem
21.05.02 01:20	24.05.02 10:20	SODAR umgestürzt
04.06.02 19:10	Ende Messkampagne	SODAR umgestürzt

Das Umkippen der SODAR-Antenne wurde in beiden Fällen durch heftige Windböen (bis 100 km/h) verursacht. Durch die grosse Angriffsfläche der Antenne entstanden Kräfte, welchen die Verankerung des SODAR nicht mehr gewachsen war. In Zukunft ist bei SODAR-Messungen im Gebirge unbedingt auf eine zuverlässige Verankerung zu achten. Abbildung 9 zeigt das installierte SODAR auf dem Gütsch. Im Hintergrund ist der Messmast von MeteoSchweiz zu erkennen.



Abb. 9: Das SODAR auf dem Gütsch. Im Hintergrund rechts vom SODAR ist der Mast von MeteoSchweiz zu erkennen.

#### 4.2.3 **Bereinigung der Messwerte**

Im Gegensatz zur Messung mit einem Anemometer können mit einem SODAR keine durchgehenden Messreihen gewonnen werden. Die Menge der plausiblen Daten ist einerseits abhängig von den atmosphärischen Bedingungen wie Wolken, Regen oder Turbulenz, andererseits von der Intensität der Umgebungsgeräusche (Crescenti, 1998). Die Messdaten wurden nach folgenden Kriterien bereinigt (Antoniou et al., 2001):

- In einer SODAR-internen Anwendungsroutine werden alle 10-Minuten-Mittelwerte verworfen, bei welchen weniger als 5% der reflektierten Signale während des Mittelungsintervalls verwertet werden konnten.
- Das SODAR zeichnet die Intensität des Umgebungsrauschen auf. Übersteigt dieses einen bestimmten Wert, wird das ganze Profil verworfen.
- Für jeden Wert auf jeder Höhe wird das Verhältnis des empfangenen Signals zum Umgebungsrauschen aufgezeichnet (Signal to Noise Ratio). Liegt dieses Verhältnis unter dem Wert 8, wird der Wert verworfen.
- Studien (Antoniou et al., 2001) zeigten, dass es ratsam ist, den Grenzwert für die Anzahl verwertbarer Messwerte pro Intervall auf 33% zu setzen.

Abbildung 10 zeigt welcher Anteil der während der Messperiode gemessenen Daten in Abhängigkeit der Höhe schliesslich für die Auswertung verwendet werden konnte. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Menge der verfügbaren Daten mit der Höhe stark abnimmt. Dies ist auf die erhöhte Turbulenz im Gebirge im Vergleich zum Flachland, sowie die auf in dieser Höhe niedrigen Wolkenbasen zurückzuführen. Für die weiteren Auswertungen wurden nur die Daten bis auf eine Höhe von 100 m betrachtet. Darüber ist die Datenverfügbarkeit zu gering um repräsentative Aussagen zu machen. Die Messung auf 20 m musste ebenfalls verworfen werden, da kaum plausible Daten vorlagen. Dies dürfte auf die erhöhte Turbulenz in Bodennähe und die damit verbundenen Umgebungsgeräusche zurückzuführen sein.

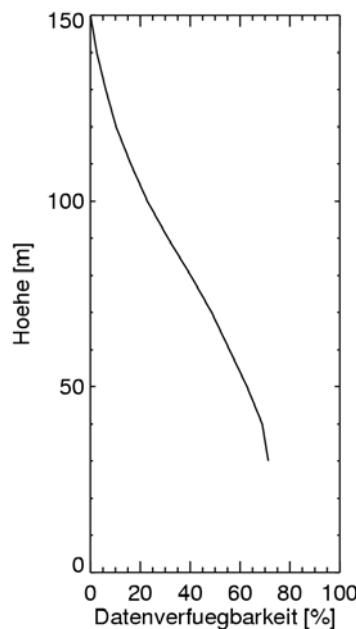


Abb. 10: Prozentsatz der verwendbaren SODAR-Daten in Abhängigkeit der Höhe.

#### 4.2.4 Windgeschwindigkeit

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit auf 10, 40 und 80 m während der Messkampagne. Die Messung auf 10 m stammt von der Zusatzmessung am Masten von MeteoSchweiz, die Werte auf 40 und 80 m wurden mit SODAR gemessen. Es ist zu erkennen, dass die Zeitreihen von SODAR- und Anemometermessung im Verlauf gut miteinander korrelieren.

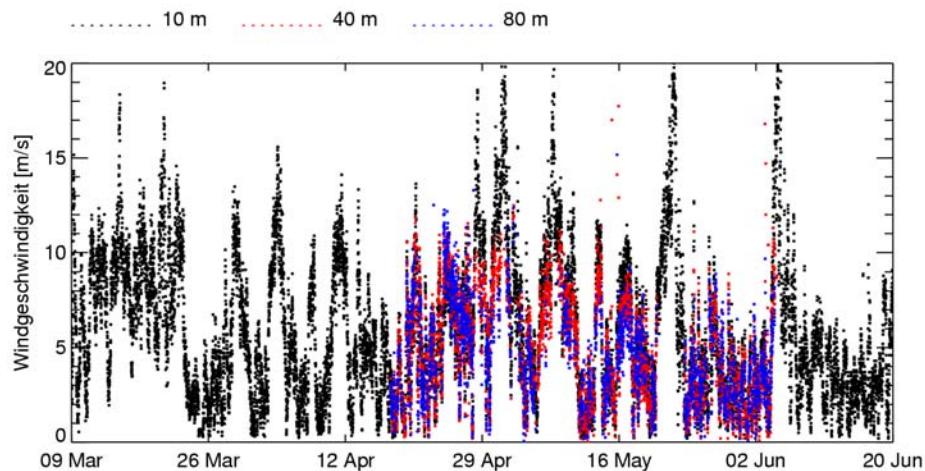


Abb. 11: Verlauf der Windgeschwindigkeit auf 10 (Anemometer), 40 und 80 m (SODAR) während der Messkampagne.

Es fällt weiter auf, dass die mit SODAR gemessenen Werte eher tiefer liegen, als die des Anemometers. Dies erstaunt, da auf 40 m (SODAR) eher höhere Werte zu erwarten wären als auf 10 m (Anemometer). Im Flachland wurden während anderer Messkampagnen Abweichungen zwischen Anemometer und SODAR von ca. 4% festgestellt (Coelingh et al., 1999; Mellinghoff, 2000). Die Hauptursache für diesen Unterschied liegt in den unterschiedlichen Mittelungsverfahren der beiden Messtechniken: Die Messwerte eines Schalenkreuzanemometers werden skalar gemittelt, während das SODAR ein vektorielles Mittel über ein Volumen von 10 m bildet. Dadurch liegen die Mittelwerte des SODAR tiefer als die eines herkömmlichen Anemometers. Abbildung 12 soll diesen Unterschied verdeutlichen. Die Vektoren A, B und C auf der linken Seite stellen drei gemessene Windvektoren dar. Auf der rechten Seite werden diese Vektoren einmal skalar (blauer Pfeil) und einmal vektoriell (rote Pfeil) addiert. Es ist gut zu erkennen, dass damit das vektorielle Mittel kleiner wird, als das skalare. Das SODAR führt die vektorielle Mittelung nun im dreidimensionalen Raum durch, womit noch grössere Abweichungen zu erwarten sind.

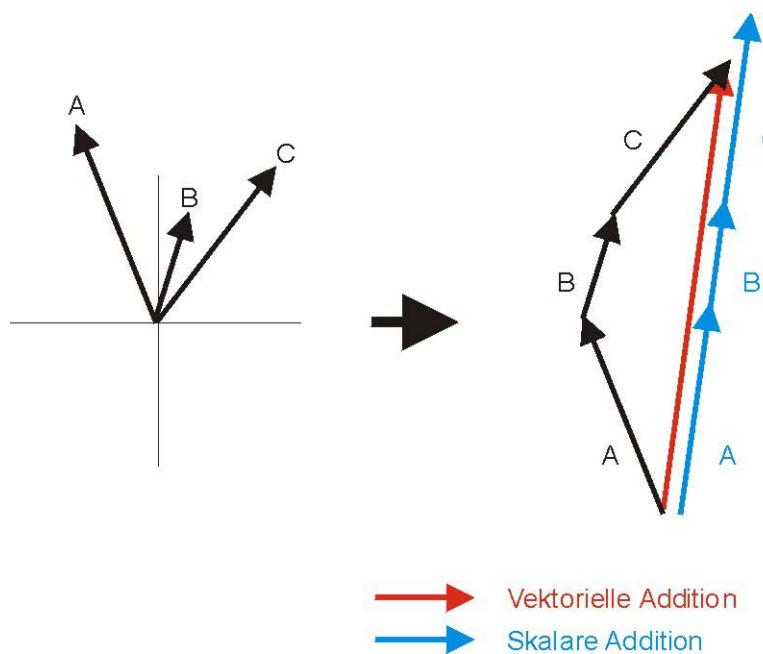


Abb. 12: Der Unterschied zwischen skalarer und vektorieller Mittelung.

Um mehr Information über die verschiedenen Mittelungsverfahren zu gewinnen, wurde bei der Anemometermessung als Zusatzinformation zum skalaren Mittel noch das vektorielle (zweidimensional) aufgezeichnet. Das Resultat dieser Messung ist in Abbildung 13 enthalten. Die vektoriell gemittelte Windgeschwindigkeit des Anemometers liegt etwa 3-4% tiefer als die skalar gemittelte. Die Werte des SODAR liegen ca. 10% tiefer als die skalaren Werte des Anemometers. Derart hohe Abweichungen wie am Gütsch wurden bei anderen Messkampagnen in komplexem Gelände ebenfalls beobachtet (Energiewerkstatt, 2001; Helmis et al., 1997).

Die verbleibende Differenz lässt sich auf zwei Umstände zurückführen: Einerseits kann eine vektorielle Mittelung der Anemometermessung nur im zweidimensionalen Raum durchgeführt werden. Die für komplexes Gelände typische Schräganströmung kann im Gegensatz zum SODAR mit einem Anemometer nicht oder nur ungenügend erfasst werden. Es ist also anzunehmen, dass die vom SODAR durchgeführte vektorielle Mittelung im dreidimensionalen Raum zu tieferen Windgeschwindigkeiten führt als beim Anemometer. Andererseits zeichnen Anemometer auf Grund ihrer mechanischen Trägheit die Turbulenz nur ungenügend auf. Die Beschleunigung des Anemometers ist bei zunehmender Windgeschwindigkeit grösser als die Abbremsung bei abnehmender Windgeschwindigkeit (Albers et al., 2000). Dadurch wird die Windgeschwindigkeit in turbulenten Bedingungen durch ein Anemometer überschätzt (Overspeeding).

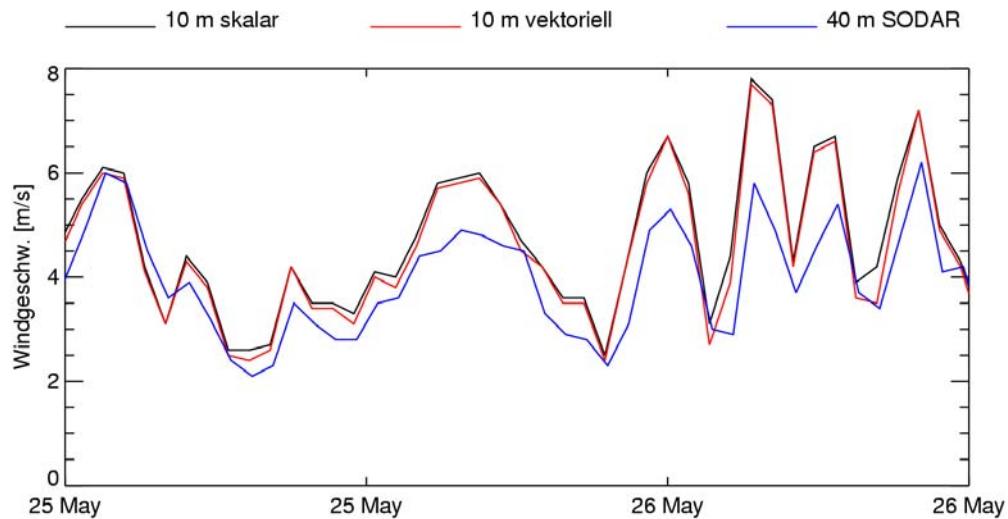


Abb. 13: Vergleich zwischen skalarer (schwarz) und vektorieller (rot) Mittelwertbildung der Anemometermessung, sowie der SODAR-Messung (blau).

Diese Vergleiche haben gezeigt, dass bei Windmessungen im Gebirge eine Anemometermessung nicht unbedingt die ideale Lösung ist. Dies deckt sich auch mit der häufig gemachten Beobachtung, dass Windkraftanlagen in komplexem Gelände oftmals weniger Leistung erbringen, als dies mit der Anemometermessung prognostiziert wurde.

Um die gemessenen Werte für die weiteren Analysen in eine vergleichbare Größenordnung zu bringen, wurden die Werte der Anemometermessung um 10% reduziert. Dies geschah im Wissen um die mögliche Ungenauigkeit dieser Annahme, jedoch liegen im Moment keine genaueren Schätzungen vor. Dafür wird es so möglich zumindest qualitative Aussagen über das vertikale Windprofil am Standort Gütsch zu machen.

#### 4.2.5 Windrichtung

Abbildung 14 zeigt die Windrose auf 40 m (SODAR) im Vergleich mit der auf 10 m von Anemometer und Windfahne gemessenen Windrose (Abb. 15). Die Hauptwindrichtung ist bei beiden Messungen die Gleiche. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass in der Windrichtungsmessung der MeteoSchweiz ein systematischer Fehler vorliegt. Die SODAR-Windrose zeigt eine breitere Streuung der Windrichtungen. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass der Wind auf 10 m (Anemometer) stärker kanalisiert wird als auf 40 m (SODAR).

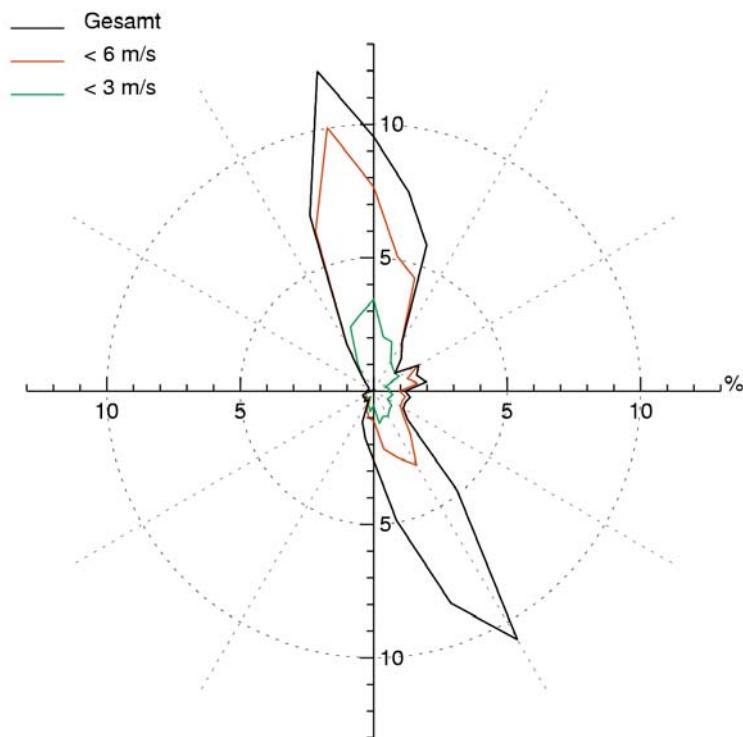


Abb. 14: Die Windrose der Anemometermessung auf 10 m während der SODAR-Messkampagne.

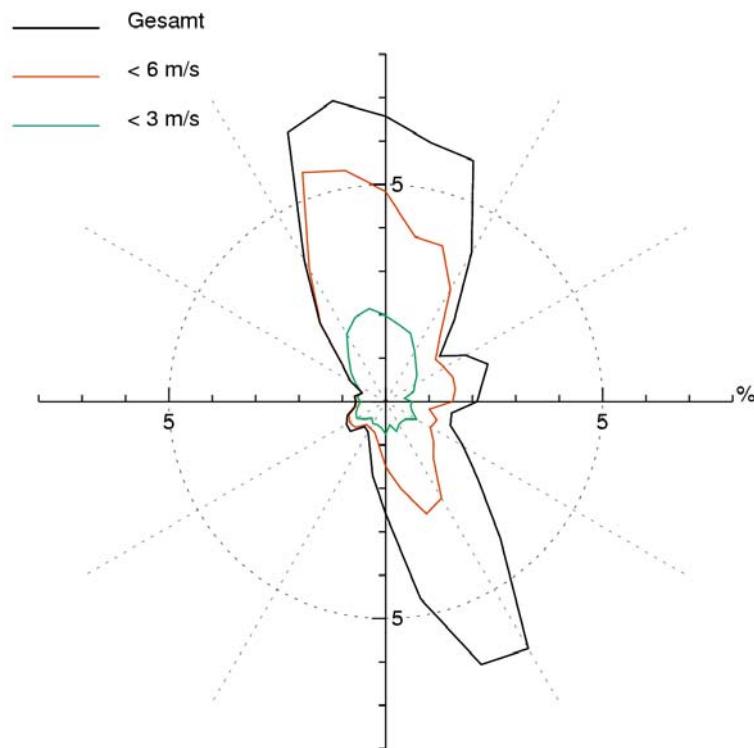


Abb. 15: Die Windrose der SODAR-Messung auf 40 m.

#### 4.2.6 Turbulenz

Abbildung 16 zeigt die aus der Anemometermessung berechnete Turbulenzintensität. Abbildung 17 zeigt die aus der SODAR-Messung berechneten Turbulenzintensitäten auf 40 m für die v-Komponente (vgl. Abb. 8) sowie für die w-Komponente (vgl. Abb. 8) des Windes. Bei der v-Komponente ist zu erkennen, dass die Werte etwa im gleichen Bereich liegen wie bei der Anemometer-Messung. Einzig im Bereich 0 – 1 m/s sind deutlich höhere Werte zu verzeichnen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass ein Anemometer eine gewisse Anlaufgeschwindigkeit benötigt, und somit bei niedrigen Windgeschwindigkeiten keine zuverlässigen Turbulenzangaben liefert. Da ein SODAR ab etwa 12 m/s keine vernünftigen Werte mehr liefern kann (Umgebungsgeräusche zu laut), konnte die Turbulenzintensität für höhere Windgeschwindigkeiten nicht berechnet werden.

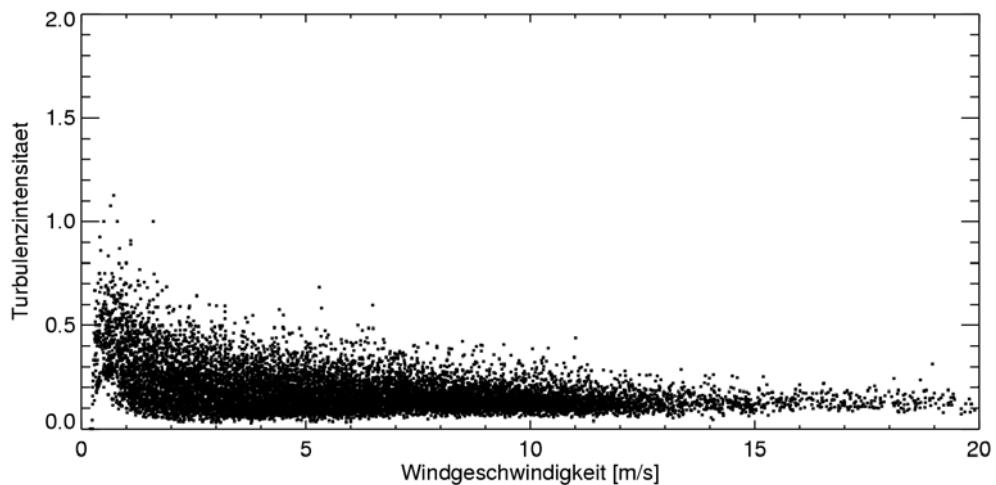


Abb. 16: Die aus der Anemometermessung berechnete Turbulenzintensität.

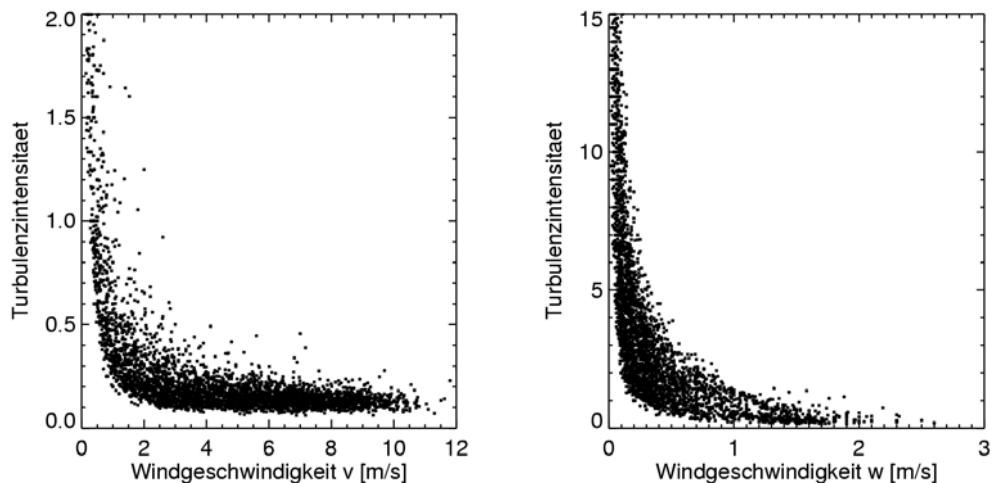


Abb. 17: Die aus der SODAR-Messung berechneten Turbulenzintensitäten auf 40 m für die v- (links) und die w-Komponente (rechts).

Bei der Vertikalkomponente des Windes dagegen sind massiv höhere Turbulenzwerte zu verzeichnen. Ein herkömmliches Anemometer zeichnet diese Schräganströmung nur bedingt auf. Das in dieser Messkampagne verwendete Anemometer WAA 252 reagiert kaum auf Schräganströmung (Tammelin et al., 1998). Somit bestätigt sich die in Kapitel 4.2.4. gemachte Vermutung, dass die Vertikalkomponente für einen Teil des Unterschieds zwischen skalarer und vektorieller Mittelung verantwortlich ist. Zudem ist die Vertikalkomponente mit Windgeschwindigkeiten bis 2 m/s relativ gross.

#### 4.2.7 Böenspitzen

Abb. 18 zeigt das Verhältnis zwischen Böenspitze und Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit für die Anemometermessung und für die SODAR-Messung auf 40 m. Die mit dem SODAR gemessenen Böenspitzen sind im Verhältnis zur Windgeschwindigkeit höher als diejenigen des Anemometers. Während für das Anemometer ein mittleres Verhältnis von 1.5 vorliegt, ist dasjenige der SODAR-Messung grösser 2. Dies lässt wiederum auf eine hohe Turbulenz schliessen, welche von SODAR besser erfasst wird als von einem Anemometer. Zudem überschätzt ein Anemometer die mittlere Windgeschwindigkeit in turbulenten Bedingungen wegen seiner mechanischen Trägheit, was zu einem kleineren Verhältnis zwischen Windgeschwindigkeit und Böenspitze führt.

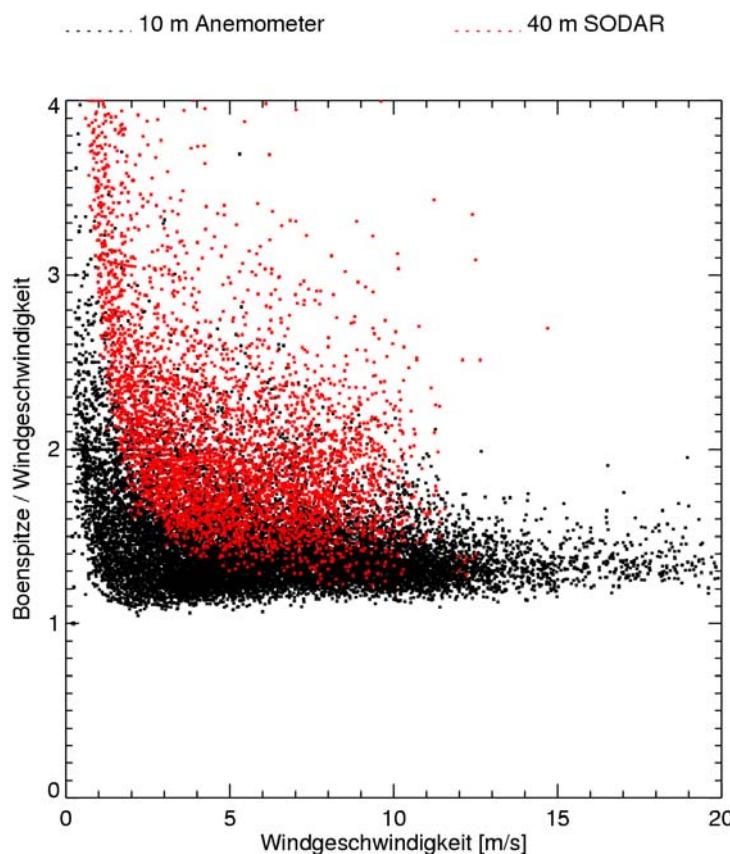


Abb. 18: Vergleich des Verhältnisses zwischen Böenspitze und Windgeschwindigkeit von Anemometer und SODAR.

#### 4.2.8 Das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit

Abbildung 19 zeigt das mittlere vertikale Profil der Windgeschwindigkeit bei Nordwind (links) und bei Südwind (rechts). Es wurden alle Profile berücksichtigt und gemittelt, bei welchen die um 10% reduzierte Windgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 4.2.4.) auf 10 m zwischen 6 und 7 m/s lag. Es ist deutlich zu erkennen, dass je nach Windrichtung zwei verschiedene Windregimes herrschen: Während bei Nordwind eine leichte Zunahme des Windes mit der Höhe zu erkennen ist, wird die Windge-

schwindigkeit bei Südwind mit zunehmender Höhe eher kleiner. Die obersten 20 m des Profils sind mit Vorsicht zu geniessen, da die Datenverfügbarkeit wie in Abbildung 10 gezeigt in diesem Bereich sehr klein ist. Die Querbalken stellen die Standardabweichung der gebildeten Mittelwerte dar. Die Streuung der Windgeschwindigkeit um  $\pm 2$  m/s zeigt, dass der Wind sehr ungleichmässig weht (hohe Turbulenz). Der schmale Balken auf 10 m röhrt daher, dass schon bei der Auswahl der Werte nur der Bereich zwischen 6 und 7 m/s berücksichtigt wurde.

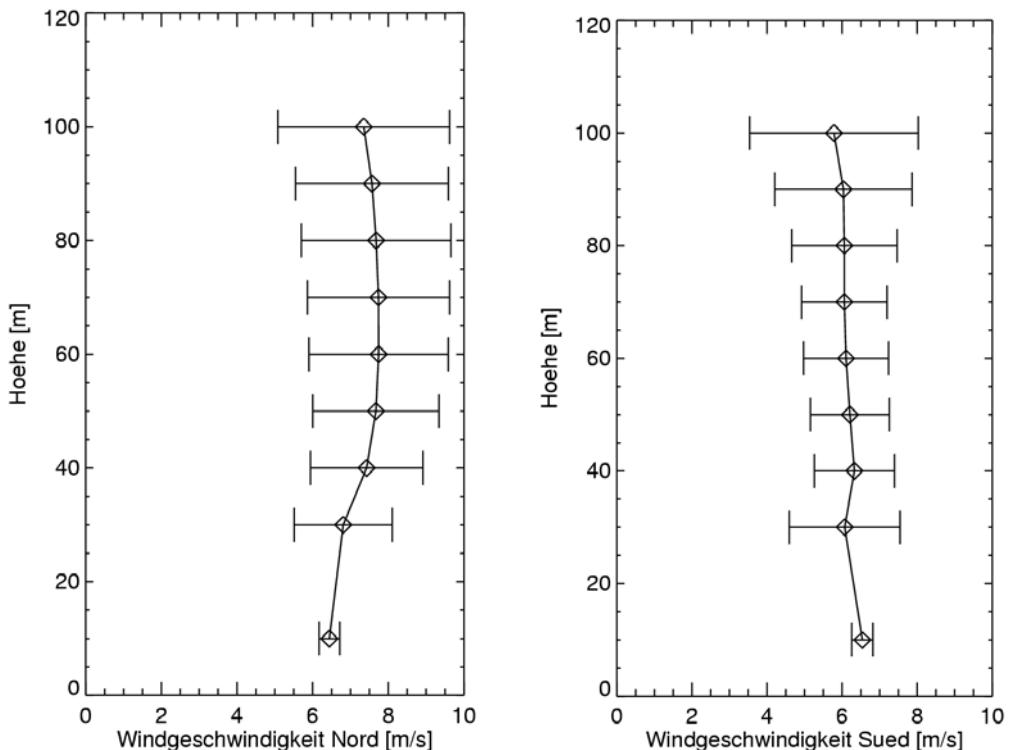


Abb. 19: Das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit bei Nord- (links) und Südwind (rechts) und einer Windgeschwindigkeit zwischen 6 und 7 m/s auf 10 m.

Abbildung 20 zeigt das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit bei Nord- und Südwind für verschiedene Windgeschwindigkeiten. Es ist erkennbar, dass sich das vertikale Windprofil bei Nord- oder Südwind bei niedrigen Windgeschwindigkeiten kaum unterscheidet. Es zeigt in beiden Fällen eine leichte Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Höhere Windgeschwindigkeiten führen bei Nordwind zu einer verstärkten Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Bei Südwind dagegen ist eine Abnahme zu verzeichnen. Dieses Verhalten dürfte auf die topografischen Verhältnisse am Standort zurückzuführen sein: Bei Nordanströmung über relativ flaches Gelände entwickelt sich ein 'klassisches' exponentielles Windprofil mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Bei Südwind dagegen wird der Standort von schräg unten angeströmt, womit sich bei höheren Windgeschwindigkeiten in Bodennähe ein 'Speed-up'-Effekt einstellt, der zu gleichbleibenden bis abnehmenden Windgeschwindigkeiten in der Höhe führt. Abbildung

21 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung der topografischen Verhältnisse am Standort Gütsch.

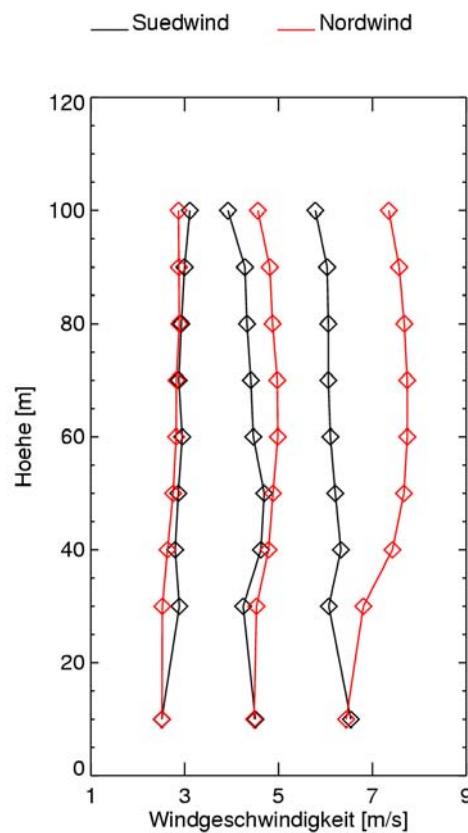


Abb. 20: Das vertikale Windprofil für verschiedene Windgeschwindigkeiten bei Nord- und Südwind.

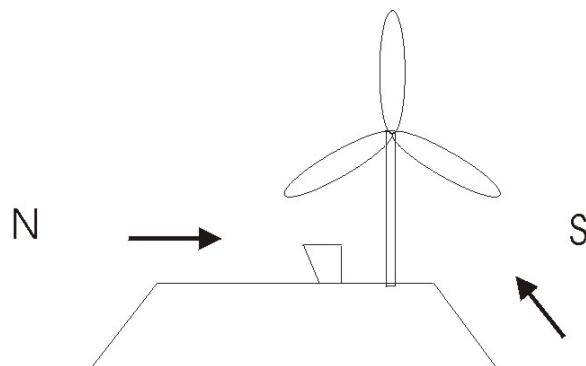


Abb. 21: Stark vereinfachte Darstellung der topografischen Verhältnisse am Standort Gütsch.

#### 4.2.9 Vergleich mit den Modellberechnungen

Die SODAR-Messungen dienen zur Verifikation der vertikalen Windprofile bzw. der Energieertragsschätzung, wie sie im Projekt FACTs gemacht wurde.

Abbildung 22 zeigt die im Projekt FACTs modellierten vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit bei Nord- (oben) und Südwind (unten) im Vergleich mit den gemessenen Profilen. Das gemessene Profil wurde jeweils auf 30 m an das modellierte angeglichen. Zusätzlich ist noch das exponentielle Profil mit einem Shear-Factor (alpha) von 0.14 eingetragen (blau). Für Nordwind wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Fluid-Dynamics-Modell (schwarz) und Messung (rot) gefunden. Beide Profile folgen im Wesentlichen dem exponentiellen Profil.

Bei Südwind konnte das modellierte Profil ebenfalls durch die Messung bestätigt werden. Mit einem exponentiellen Profil hingegen würde die Windgeschwindigkeit bei Südwind stark überschätzt.

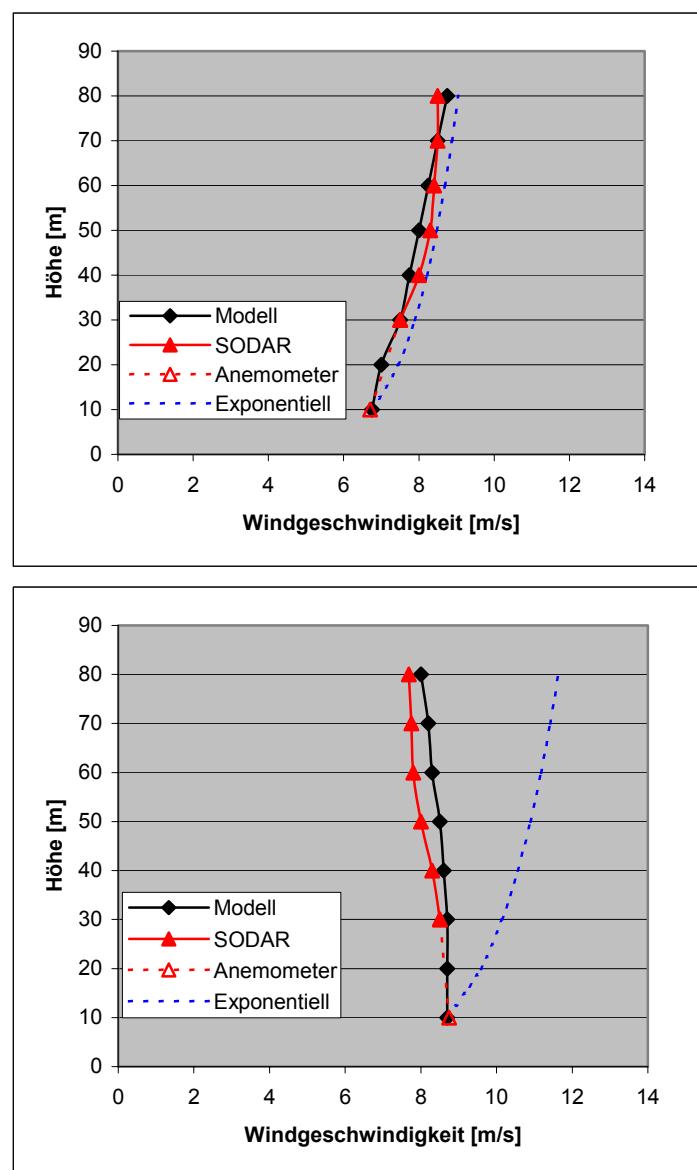


Abb. 22: Vergleich der modellierten vertikalen Windprofile mit den gemessenen bei Nord- (oben) und Südwind (unten).

Es zeigt sich, dass mit dem Fluid-Dynamics-Modell die Windbedingungen für den Gütsch repräsentativ berechnet werden konnten. Sowohl für Nord- als auch für Südwind wurde ein gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell gefunden. Deutlich wurde auch, dass an diesem Standort nicht mit einem exponentiellen Windprofil gerechnet werden darf.

Die grösste Unsicherheit besteht nun noch im Verhältnis zwischen Anemometer- und SODAR-Messung. Es konnte nicht abschliessend evaluiert werden, ob die komplexen topografischen Verhältnisse besser durch ein Anemometer oder ein SODAR wiedergegeben werden. Somit liegt die Hauptunsicherheit für die Modellierung im Projekt FACTs in den langjährigen Daten von MeteoSchweiz, welche als Basis für die Modellierung dienten. Es ist abzuklären, ob mit einer herkömmlichen Windmessung (Anemometer, Staudruckmessung) die mittleren Windgeschwindigkeiten im Gebirge eher überschätzt werden. Um diese Beziehung zu erklären sind weitere Messkampagnen dieser Art nötig.

#### 4.3 Korrelation der SODAR-Messung

Ursprünglich sollte die SODAR-Messung mit den Werten der MeteoSchweiz-Messung korreliert werden, um so eine Abschätzung der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe für jeden Zeitpunkt zu ermöglichen. Die in Kapitel 4.1. beschriebenen Auswertungen haben gezeigt, dass die während der Messkampagne aufgezeichneten Messwerte der MeteoSchweiz-Station ungeeignet sind um eine derartige Berechnung durchzuführen. Deshalb wird im Folgenden die Korrelation der SODAR-Messung mit den Werten der Zusatzmessung durchgeführt.

Abbildung 23 zeigt das Verhältnis zwischen der Anemometermessung und der SODAR-Messung auf 40 m für Nord- und Südströmung. Es ist wiederum deutlich zu erkennen, dass es sich um zwei verschiedene vertikale Windprofile handelt. Für niedrige Windgeschwindigkeiten folgen die Werte der SODAR-Messung denjenigen der Anemometermessung. Bei höheren Windgeschwindigkeiten (ab 5 m/s) driften die beiden Punktscharen auseinander. Bei Nordwind ist die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe grösser, bei Südwind kleiner als auf 10 m. Somit werden für Nord- und Südwind verschiedene Beziehungen zwischen 10 m und Nabenhöhe gefunden.

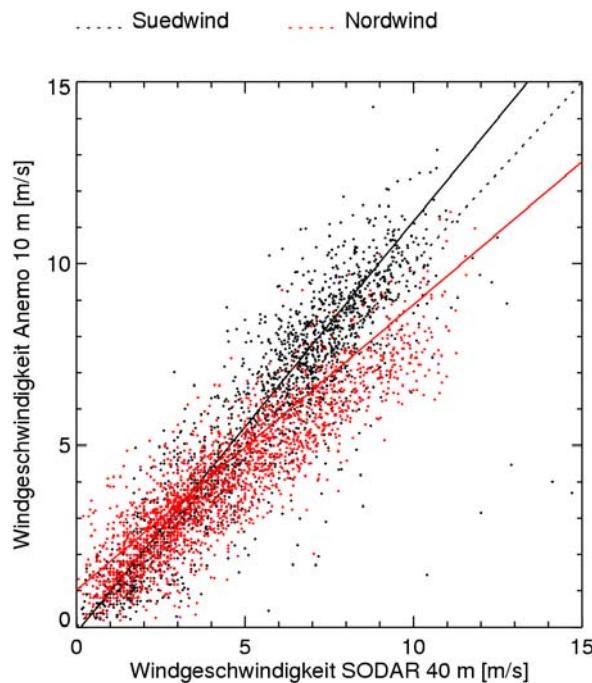


Abb. 23: Vergleich zwischen Anemometer- und SODAR-Messung bei Nord- und Südwind.

Um die Beziehung zwischen der Anemometermessung und der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe zu erhalten, wurden die entsprechenden Zeitreihen für Nord- und Südwind miteinander korreliert. Aus diesen Beziehungen wurde die Windgeschwindigkeit auf 40 m anhand der Messreihe auf 10 m berechnet. Diese berechnete Zeitreihe wurde daraufhin mit der gemessenen verglichen, um Aufschlüsse über die Güte dieser Korrelation zu erhalten. Tabelle 5 zeigt die berechneten Regressionsparameter, welche für die Extrapolation verwendet wurden.

Tab. 5: Die berechneten Regressionsparameter für Nord- und Südwind.

	Steigung	Offset	Korrelationskoeffizient
Nordwind	0.78	1.01	0.88
Südwind	1.13	-0.14	0.89

Die Abbildung 24 zeigt die erhaltenen Resultate für Nord- und Südwind. Bei Südwind ist die Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Wert kleiner als bei Nordwind. Die Betrachtung der Abbildung 19 zeigt, dass bei Südwind die Standardabweichung der mittleren Windgeschwindigkeit auf 40 m kleiner ist, als bei Nordwind. Dies lässt darauf schliessen, dass bei Südwind das vertikale Profil eine konstantere Form hat als bei Nordwind.

Dagegen ist die Verteilung bei Nordwind symmetrischer, als bei Südwind was sich in der Mittelwertberechnung auswirkt. Bei Nordwind ergab sich ein gemessener Mittelwert von 4.4 m/s gegenüber einem berechneten von 4.5 m/s. Bei Südwind lag der gemessene Mittelwert bei 5.7 m/s und der berechnete bei 6.3 m/s. Dies ergibt

eine Überschätzung der mittleren Windgeschwindigkeit um ca. 2% bei Nordwind und um ca. 10% bei Südwind.

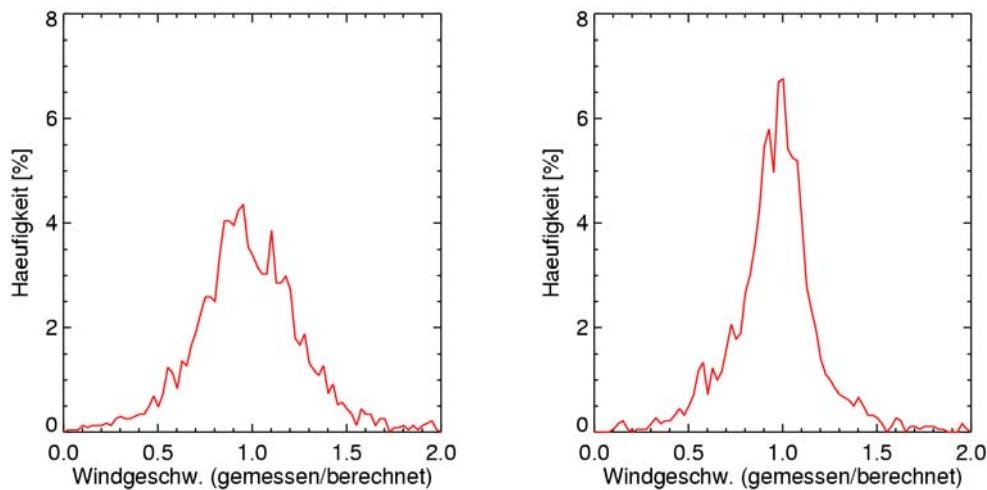


Abb. 24: Das Verhältnis zwischen gemessener und berechneter Windgeschwindigkeit auf 40 m bei Nordwind(links) und bei Südwind (rechts).

Es zeigt sich also, dass eine Korrelation der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe mit der Messung auf 10 m möglich ist. Voraussetzung für eine noch genauere Abschätzung ist in erster Linie ein besseres Verständnis für die Unterschiede zwischen Anemometer und SODAR-Messung (vektorielle, skalare Mittelung). Um hierüber mehr Erkenntnisse zu erlangen, wurden in einer nachfolgenden SODAR-Messung im Schweizer Jura auch Rohdaten aufgezeichnet, um die Bildung eines skalaren Mittels und dessen Vergleich mit der Anemometermessung zu ermöglichen. Diese Resultate lagen aber zum Zeitpunkt dieses Berichtes noch nicht vor.

Voraussetzung den Aufbau eines Monitoring der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe ist ausserdem eine verlässliche Windmessung auf 10 m. Diese Bedingung wurde von der MeteoSchweiz-Messung zumindest während der Messperiode nicht erfüllt. Deshalb wird auf diese Berechnung verzichtet.

#### 4.4 Vereisungsgefahr

Abbildung 25 zeigt einerseits den Vergleich zwischen den Windwerten des unbeheizten und des beheizten Anemometers (oben), andererseits die an der MeteoSchweiz-Station aufgezeichneten Werte für Temperatur und Taupunkt (unten). Die obere Grafik zeigt, dass das beheizte Anemometer nie eingefroren ist, während es Perioden gab, in denen das unbeheizte Anemometer eingefroren war (rote Werte bei 0 m/s).

Über die ganze Messperiode zeigten 12 % der Daten Vereisung. Mit Hilfe der Temperaturdaten der MeteoSchweiz-Station lässt sich zeigen, dass als Vereisungskriterium sowohl Lufttemperatur, Luftfeuchte, als auch Windgeschwindigkeit eine Rolle

spielen. Die längste Vereisungsperiode (3. Mai bis 6. Mai 2002) war während einer Phase mit tiefer Windgeschwindigkeit und kleiner Differenz zwischen Temperatur und Taupunkt. Dagegen blieb das Anemometer zum Beispiel in der Zeit vom 27. April bis am 30. April 2002 trotz Minustemperaturen eisfrei. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hohe Windgeschwindigkeiten und eine grosse Differenz zwischen Temperatur und Taupunkt (trockene Luft) vorlag.

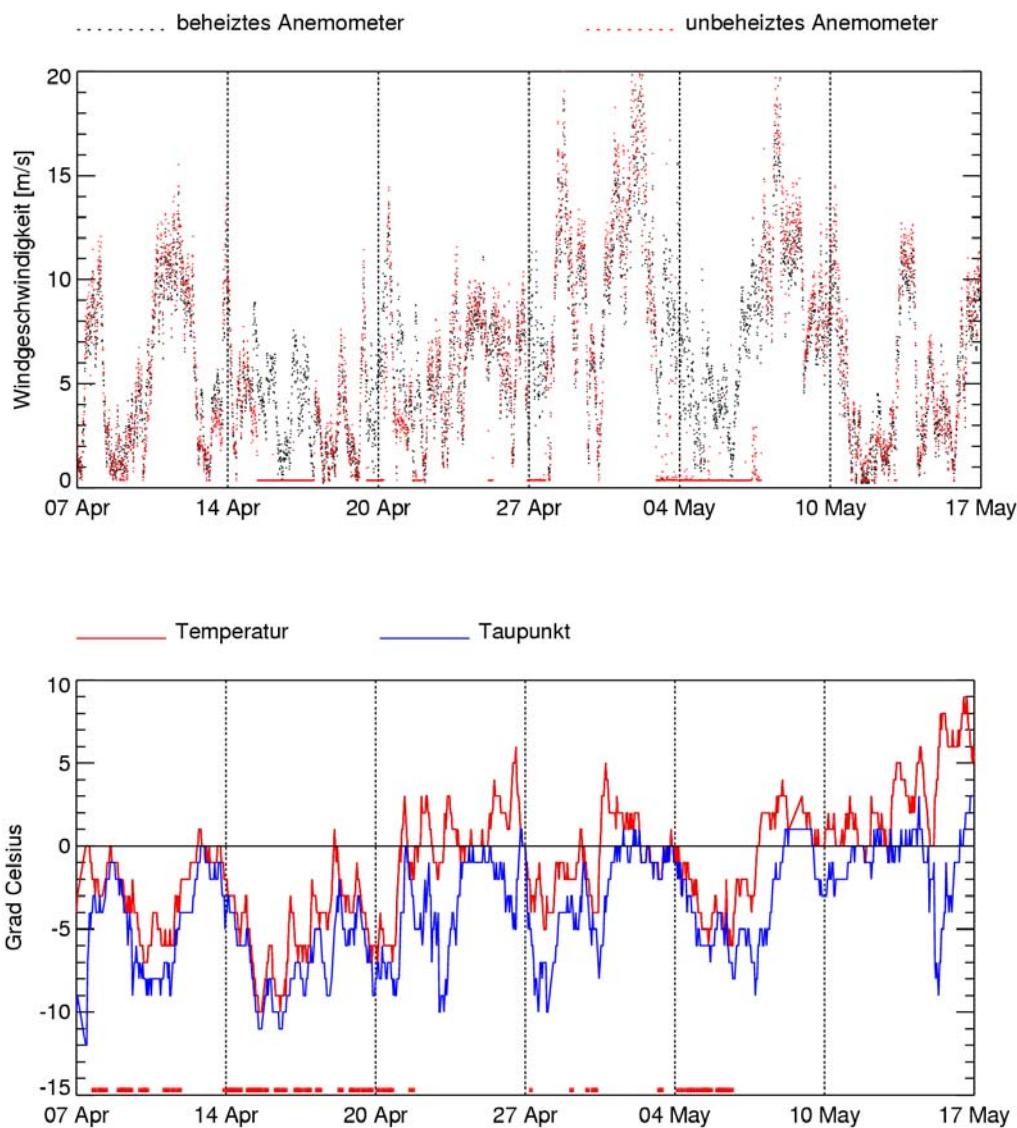


Abb. 25: Oben: Vergleich zwischen beheiztem und unbeheiztem Anemometer. Unten: Verlauf von Temperatur und Taupunkt der MeteoSchweiz-Messung.

Die rote Linie unten in der Temperaturgrafik (Abb. 25) zeigt die aus den Temperatur- und Feuchtedaten berechneten Perioden mit Vereisungsgefahr. Dabei wurde als Kriterium für Vereisung eine Lufttemperatur unter  $-1^{\circ}\text{C}$  und eine Differenz zwischen Taupunkt und Temperatur von  $1^{\circ}\text{C}$  oder weniger angenommen. Die berechneten Perioden stimmen relativ gut mit denjenigen überein an welchen tatsächlich

Vereisung festgestellt wurde. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die im Projekt FACTs ermittelten Energieverluste auf Grund von Vereisung als realistisch angesehen werden können.

#### **4.5 Erfahrungen mit Windmessung im Gebirge**

Aus dieser Messkampagne konnten diverse Erfahrungen über Windmessung im Gebirge gewonnen werden. Einerseits zeigte sich, dass Messgeräte unter diesen Bedingungen ungleich höheren Belastungen ausgesetzt sind, als dies im Flachland der Fall ist. Dieser Umstand erhöht die Aufwände für Vorbereitung und Wartung der Messsysteme. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wird es aber in Zukunft möglich sein, Messkampagnen im Gebirge noch effizienter zu planen und vorzubereiten (Wahl der geeigneten Messgeräte, stabile Verankerungen).

Andererseits zeigte sich auch, dass die Windverhältnisse im Gebirge nicht mit denjenigen im Flachland verglichen werden können. Auf Grund der komplexen Topografie können lokal sehr unterschiedliche Verhältnisse auftreten. Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer Windmessung direkt am Standort der zukünftigen Windkraftanlage. Weiter zeigt sich, dass die Vorteile einer berührungslosen SODAR-Messung bis auf 100 m im Gebirge zur Geltung kommen, und nicht durch eine einfache Mastmessung ersetzt werden können. Schliesslich konnte auch festgestellt werden, dass die im Gebirge erhöhte Turbulenz mit einer Anemometermessung nur ungenügend erfasst wird. Dies könnte eine Erklärung sein, weshalb Windkraftanlagen im Gebirge dazu neigen weniger Leistung zu produzieren, als in den Windmessungen prognostiziert wurde.

Abschliessend kann bestätigt werden, dass der vorhandene Erfahrungsschatz über Windkraft und Windmessung in flachem Gelände nicht direkt aufs Gebirge übertragen werden kann.

## 5 Ausblick

Diese Messkampagne hat gezeigt, dass die Kombination von Mast- und SODAR-Messung eine aussichtsreiche Methode ist, um die Windverhältnisse im Gebirge abzuschätzen. Lokale Einflüsse wie Turbulenz und Topografie werden besser erfasst, als nur mit einer Anemometermessung. Dennoch muss festgehalten werden, dass es unbedingt weiterer Messkampagnen bedarf, um weitere Erfahrungen in diesem Gebiet zu sammeln. Dies gilt insbesondere für den Vergleich zwischen Anemometer- und SODAR-Messung, wo im Gebirge noch kaum Erfahrungen vorliegen. Nach der Messkampagne auf dem Gütsch wurde eine weitere im Schweizer Jura durchgeführt, bei welcher mit dem SODAR auch die Rohdaten (Werte für jeden einzelnen Impuls) aufgezeichnet wurden. Aus diesen Daten kann ein skalares Mittel der SODAR-Messung gebildet, und somit weitere Aussagen über den Zusammenhang der beiden Messprinzipien gemacht werden. Leider erzeugt die Aufzeichnung der Rohdaten sehr grosse Datenmengen, was eine dauerhafte Aufzeichnung dieser Daten unattraktiv macht. Mit der Erfahrung weiterer Messkampagnen sollte es jedoch möglich sein, diese Umstände besser zu begreifen. Dies würde auch die Genauigkeit der Berechnung der Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe wie in Kapitel 4.3. durchgeführt erhöhen.

Eine Alternative zur Anemometermessung könnte die Verwendung eines Sonic-Anemometers darstellen. Da es sich um eine berührungslose Messung handelt könnten Turbulenzen besser erfasst werden. Zudem kann auch die vertikale Komponente aufgezeichnet werden. Auch andere Alternativen zur Anemometermessung wie z.B. die Messung der Windgeschwindigkeit nach dem Prinzip des Wärmeübergangs an einem dünnen, heißen Platinwiderstand (z.B. Windmesser NOWA<sup>2</sup>) sind zu untersuchen.

Erstrebenswert wäre es, eine weitere Messkampagne auf dem Gütsch im Vergleich mit den Leistungsdaten der Windkraftanlage durchzuführen. Auf diese Weise könnten klare Aussagen über den Zusammenhang zwischen Anemometer- und SODAR-Messung sowie des Energieertrags einer Windkraftanlage im Gebirge gemacht werden. Solche Erfahrungen konnten bisher mangels Windkraftanlagen in derart komplexem Gelände nicht gewonnen werden, könnten aber wegweisend sein für die Errichtung weiterer Anlagen im Gebirge.

---

<sup>2</sup> <http://www.meteolabor.ch/g/meteoprod.htm>

## **6 Literaturverzeichnis**

Albers A., Klug H., Westermann D., 2000: Outdoor Comparison of Cup Anemometers, DEWI Magazin Nr. 17.

Antoniou I., Jørgensen H., Petersen S.M., 2001: Remote Sensing of the Wind Speed for Wind Energy Purposes using a Sodar. EWEC 2001.

Coelingh J.P., Folkerts L., van Zuylen E.J., Wiegerinck G., 1999: Using SODAR measurements in the POWER project.

Crescenti, G. H., 1998: Some performance statistics of Doppler sodars as a function of atmospheric conditions. Preprint, Fourth International Symposium on Tropospheric Profiling: Needs and Technologies, Snowmass, CO, Sept. 21-25, Univ. Colorado, 67-69.

Crescenti, G. H., 1998: The degradation of Doppler sodar performance due to noise: a review. *Atmospheric Environment*, 32, 1499-1509.

Energiewerkstatt GmbH, Austria, 2001: Tauern WIndpark Oberzeiring, Short version of final report.

Helmis C.G., Papageorgas P.G., Asimakopoulos D.N., Tombrou M., Petrakis M., 1997: Evaluation of minisodar performance in high wind conditions. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 18, No. 11, 2289 - 2302.

Mellinghoff H., Albers A., Klug H., 2000: SODAR Measurements in Complex Terrain. DEWI Magazin Nr 17.

Sander J., Buzzi M., Kunz S., 2001: FACTs: Windberechnungen am Beispiel des Gütsch, Schlussbericht im Auftrag des Bundesamts für Energie.

Tammelin B., Cavaliere M., Kimura S., Morgan C., Peltomaa A., 1998: Ice Free Anemometers. BOREAS IV.