



LiDAR Messkampagne – Praxisbeispiel aus Süddeutschland

Heinrich Michael Walther, Dr. Carolin Schmitt

- Fragestellung / Messkonzept
- Vorstellung Messprinzip und Installation
- Untersuchung Windmessdaten
- Untersuchung WEA Daten
- Ergebnisse: Anlagenperformance (PC, Yaw Misalignment)
- Zusammenfassung / Übertragbarkeit



- **Untersuchung der Performance eines Windparks**
Leistungskennlinie, Yaw Misalignment, Abschattungen
- **Erstellung und Erprobung eines generellen Messkonzeptes**
Anwendung, Output, Übertragbarkeit

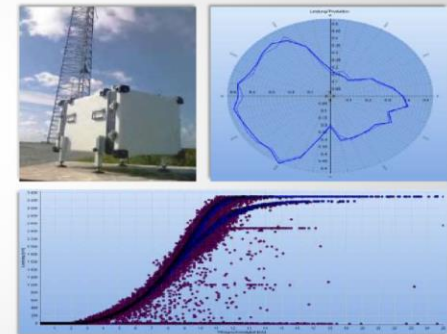
Einsatz von LiDAR Systemen (Light Detection and Ranging)

- **Bodengebundenen WindCube v2**
Geschwindigkeitsprofil und Richtung in verschiedenen Höhen in fixer Position vor der Anlage
- **Gondellidar WindIRIS**
Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Abständen vor dem Rotor, Korrektur der Verschattung WindCube, Messung Yaw Misalignment

WELCHE ANALYSE-TIEFE IST ERFORDERLICH?



- **Level I:** Analyse monatlicher Produktionsdaten (Windindex-Methode) und Betriebsführungsberichte
- **Level II:** Leistungs- und Verlustanalyse basierend auf 10min-SCADA-Daten und Inspektionsberichten
- **Level III:** Leistungsanalyse mit zusätzlichen Windmessungen (Messmast, LiDAR (bodengebunden oder auf der Gondel))



RAMBOLL

A.Grötzner, Spreewindtage 2018
“WINDPARK-BETRIEBSDATENANALYSE
AUF DER SUCHE NACH DEN FEHLENDEN PROZENTEN“

Messkampagne Übersicht

EnBW-Windpark (WEA 1-3)

3 x VESTAS V126-3,3MW@137m

WindCube WLS 582

ca. 340m westlich WEA1

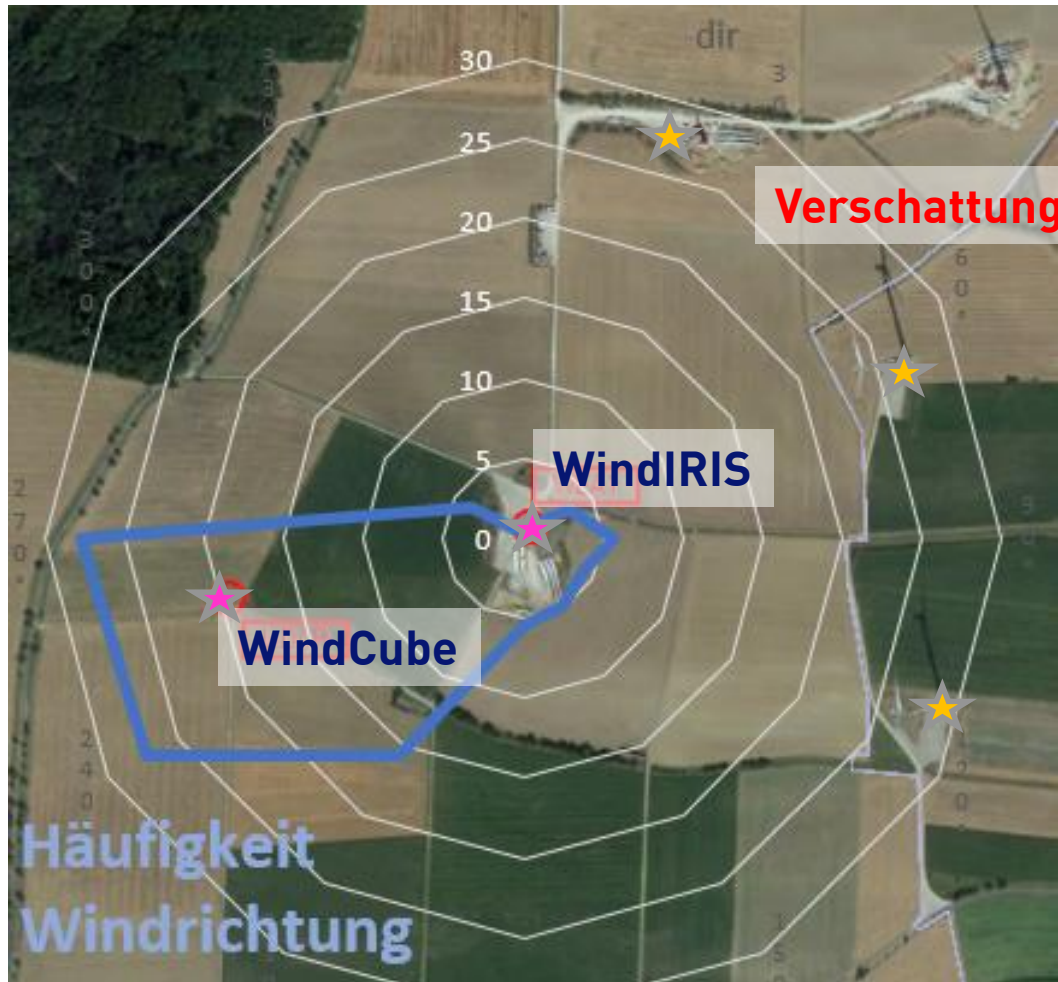
WindIRIS D300145

Gondel WEA1



Messkonfiguration

Windrichtungsverteilung



- **WindCube** Aufstellung in Hauptwindrichtung (ca. 2,5 Rotordurchmesser) WSW von WEA1
- Häufigkeitsverteilung (blau) zeigt in der Messperiode meist **Westrichtung**: frei von Abschattung durch andere WEA oder Wald
- Bei **Ostlage**: WindCube steht im Wake von WEA1, und misst nur verschattete Windgeschwindigkeiten. WEA1 steht selber im Wake von drei östlichen Anlagen
- **WindIRIS** misst für beide Lagen immer die Windgeschwindigkeit, die den Rotor trifft → WindCube Daten können korrigiert werden
- Größe der Verschattungssektoren laut IEC berechnet

WINDCUBE

Installation - Trailer und USV für WindCube



WINDCUBE

Prinzip (GWU/Leosphere)

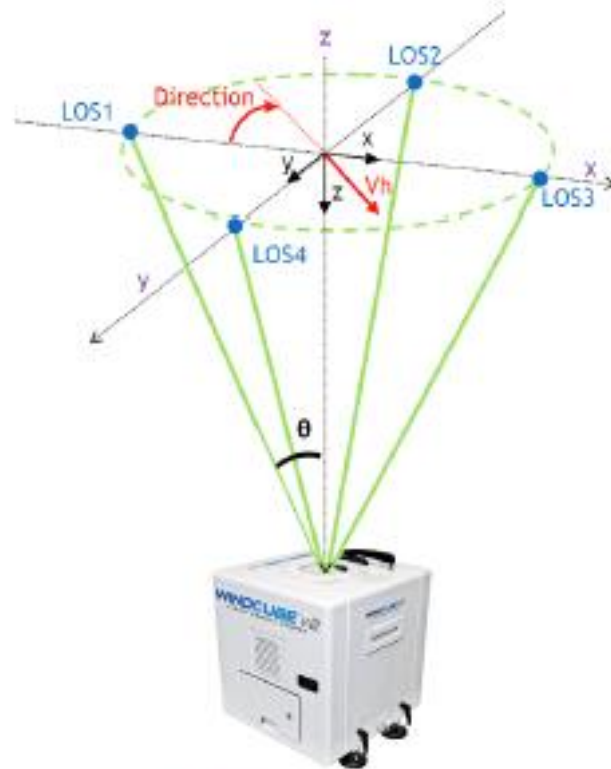
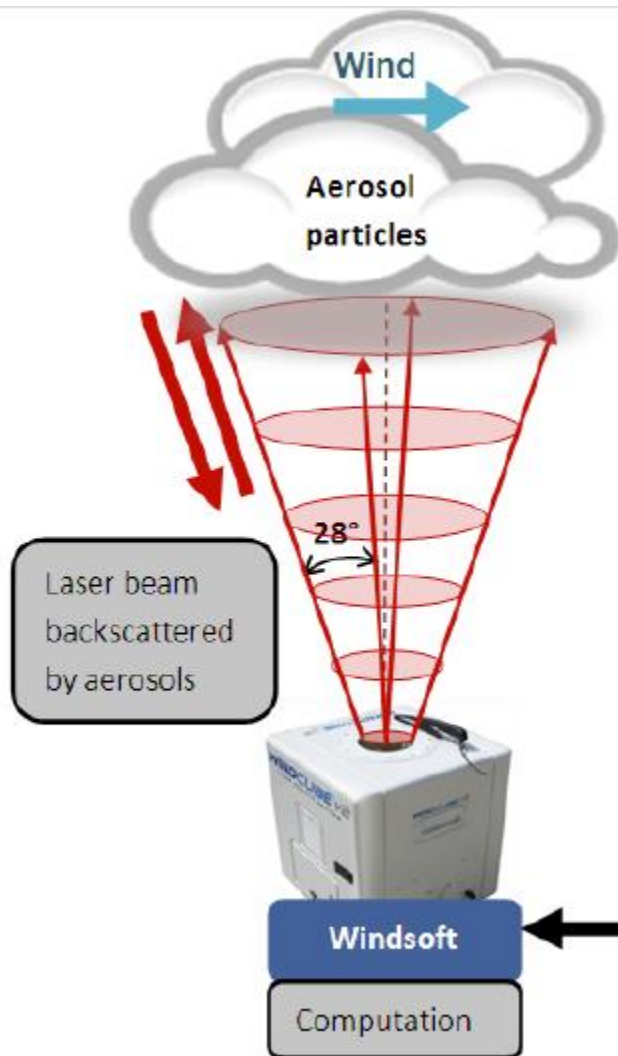


Fig. 40 - Wind vector reconstruction

$$Vr1 = u \sin \theta_{las} + w \cos \theta_{las}$$

$$Vr2 = v \sin \theta_{las} + w \cos \theta_{las}$$

$$Vr3 = -u \sin \theta_{las} + w \cos \theta_{las}$$

$$Vr4 = -v \sin \theta_{las} + w \cos \theta_{las}$$

$$u = \frac{Vr1 - Vr3}{2 \sin \theta_{las}}$$

$$v = \frac{Vr2 - Vr4}{2 \sin \theta_{las}}$$

$$w = \frac{Vr1 + Vr3 + Vr2 + Vr4}{4 \cos \theta_{las}}$$

$$Vh = \sqrt{u^2 + v^2} \quad \vec{V} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

$$azi = \text{atan}(v/u)$$

WINDIRIS

Installation (Theorie)

According to the IEC 61400-12-1 norm [1] relative to the establishment of power curve, the measurement needs to be done:

- A distance of 2 to 4 diameters (2.5D commonly used)
- In an interval centered on the hub height. This interval is defined as $\pm 2,5\%$ of the hub height.

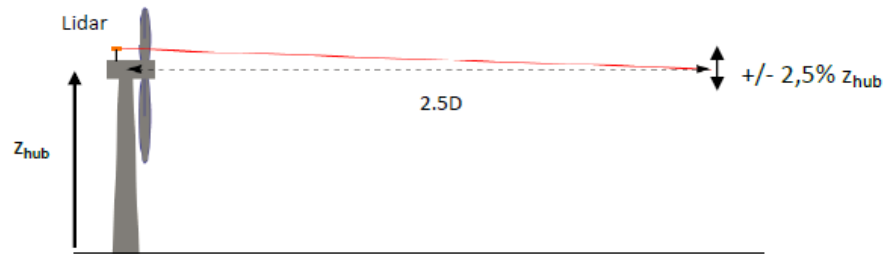


Figure 4.15: Height of measurement constraint
(source: Procedure for wind turbine power performance measurement with a two-beam nacelle lidar [2])

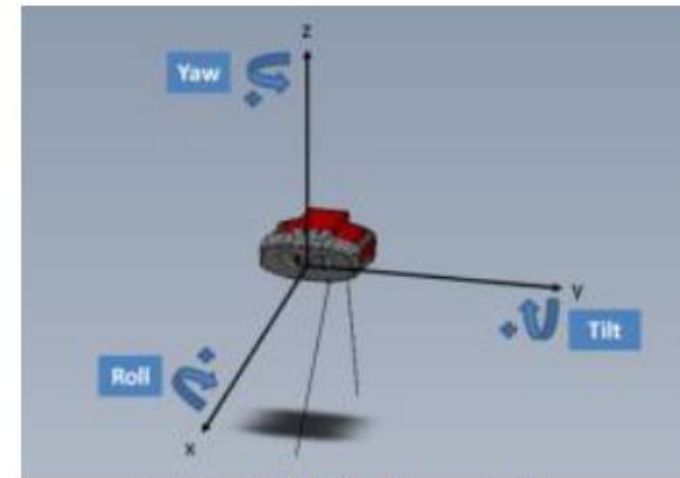
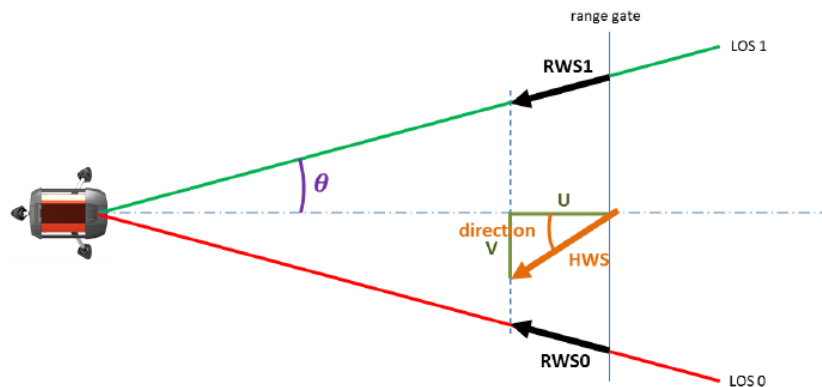


Figure 2.5: Tilt, Roll and Yaw orientation

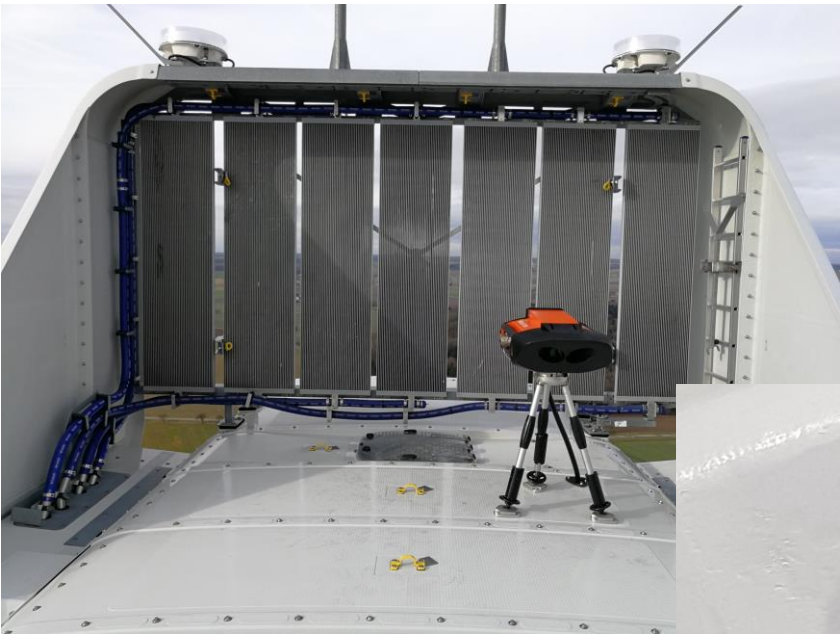
WINDIRIS

Installation (Praxis)



WINDIRIS

Installation (Praxis)



The cleanness of the ferrule may be verified by using a connector imaging device. It is dirty when it is like this:



The ferrule has to be clean, without any traces, like below:



WINDIRIS

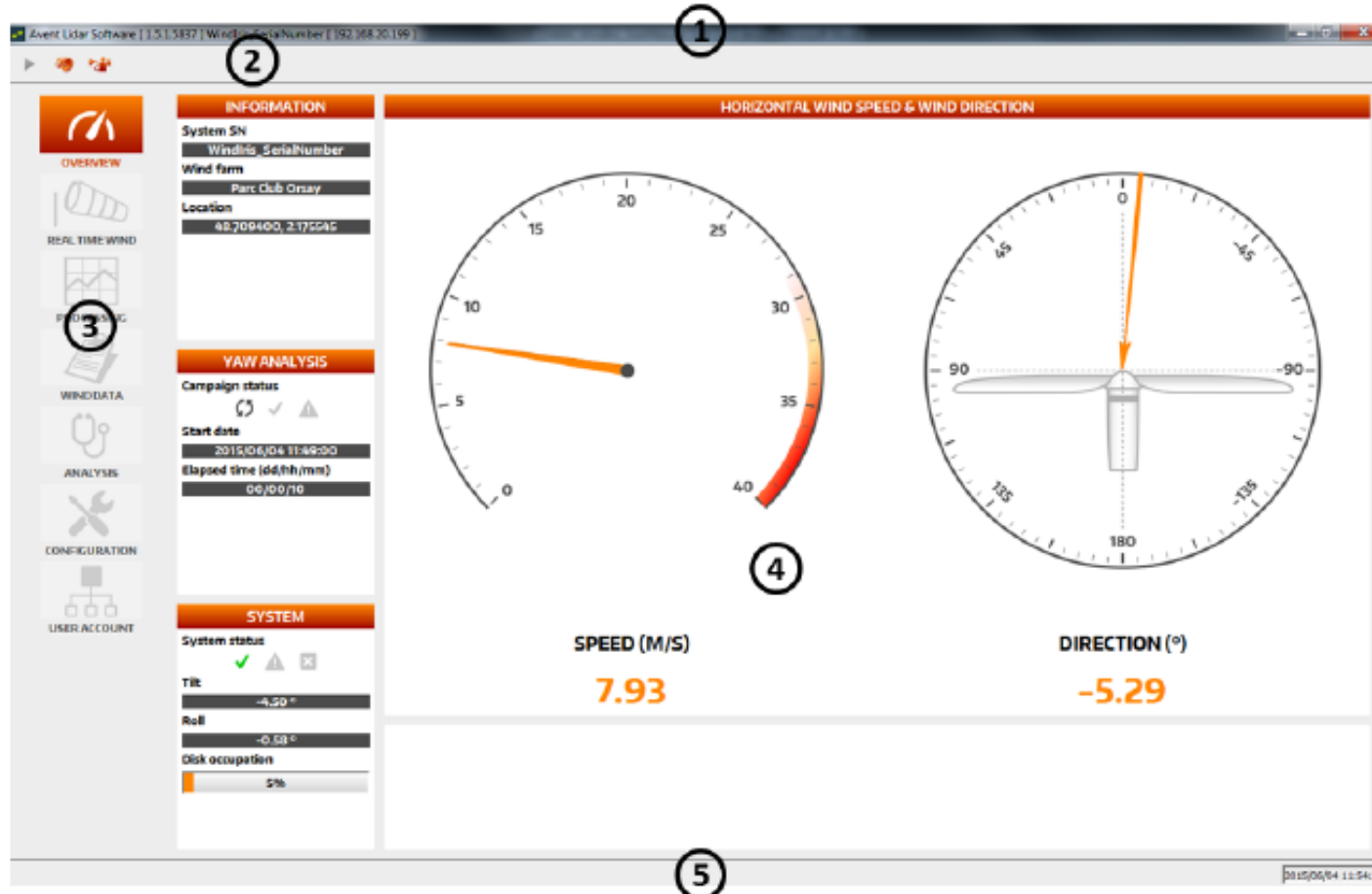
Installation (Praxis)



WINDIRIS

Installation (Praxis)

- (1) **Title bar:** Software version, system serial number and IP address are specified. It contains window buttons too
- (2) **Tools bar** contains START/STOP acquisition, Live data and Connection buttons
- (3) **Menu:** Click the icons of the menu to enter into the corresponding page
- (4) **Page:** display part of the graphical user interface
- (5) **Task bar:** Ongoing operations are specified and system clock is displayed



Datensätze und Verarbeitung

Überlappender Zeitraum: 25.01.2018 – 02.05.2018 (3/6 Monate)



➤ **WindCUBE 25.11.17 – 2.5.2018 in UTC Time**

Problemlose Messung ohne Ausfälle, früherer Abbau wg. Pollen/Blütenstaub
Filterung nach Mindestverfügbarkeit (Availability < 40%) und verschatteten Sektoren
Zusätzliche Meteodaten (p, T, RH)

➤ **WindIRIS 25.01.18 – 23.5.2018 in UTC Time**

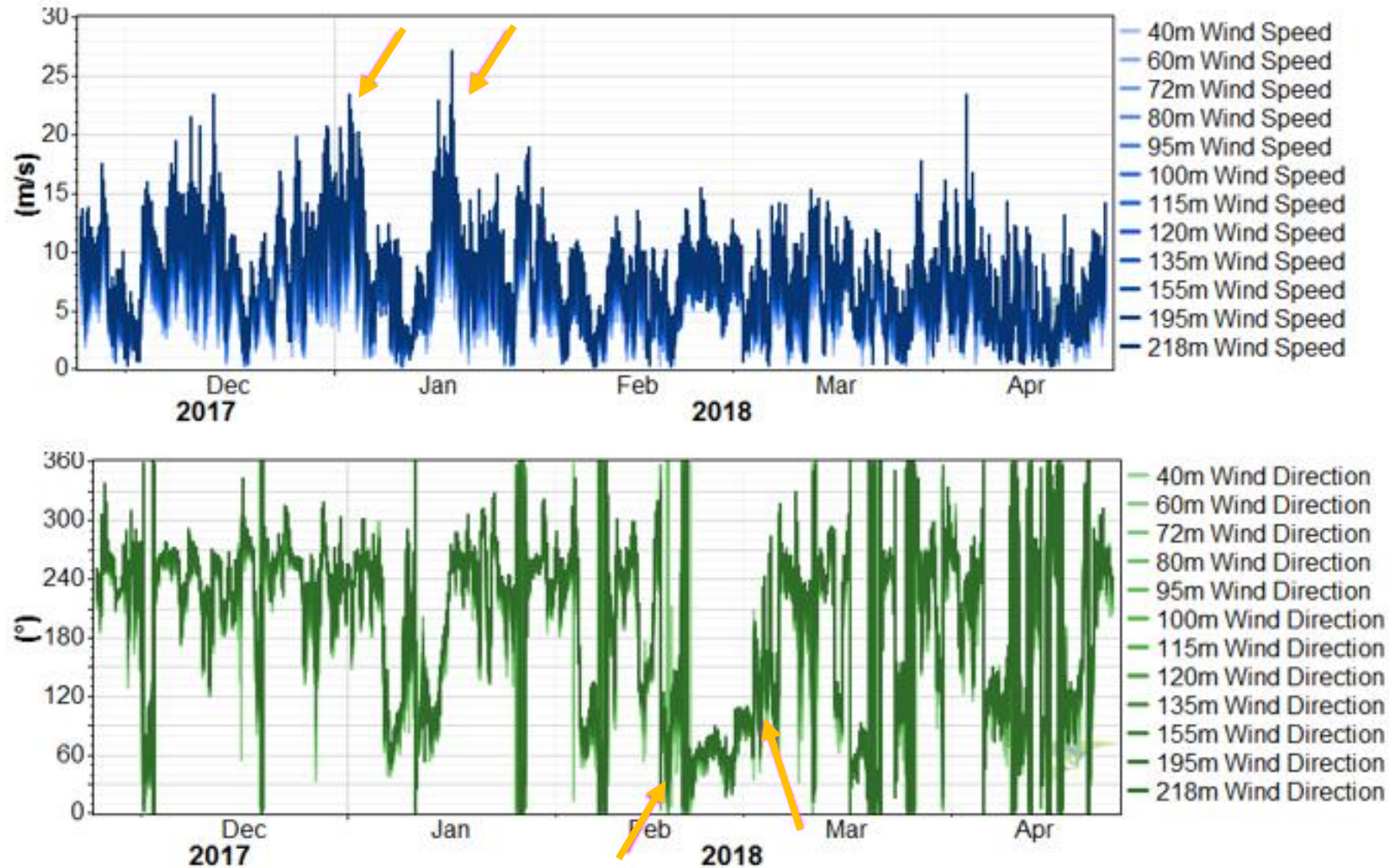
Datenlücken durch interne Umbauten und Stromabschaltung im Park
Filterung nur nach Datenqualität

➤ **WEA- Betriebsdaten ab 1.11.17 in LOC Time**

1. Filterung nach Betriebszuständen (Leistung < 0, Rotordrehzahl < 0)
2. WEA1 und WEA 3 Drosselungsperioden aus Vergleich ausgenommen

WindCUBE

Zeitreihenanalyse: Geschwindigkeit & Richtung



Mittelwerte in Nabenhöhe
(137m)

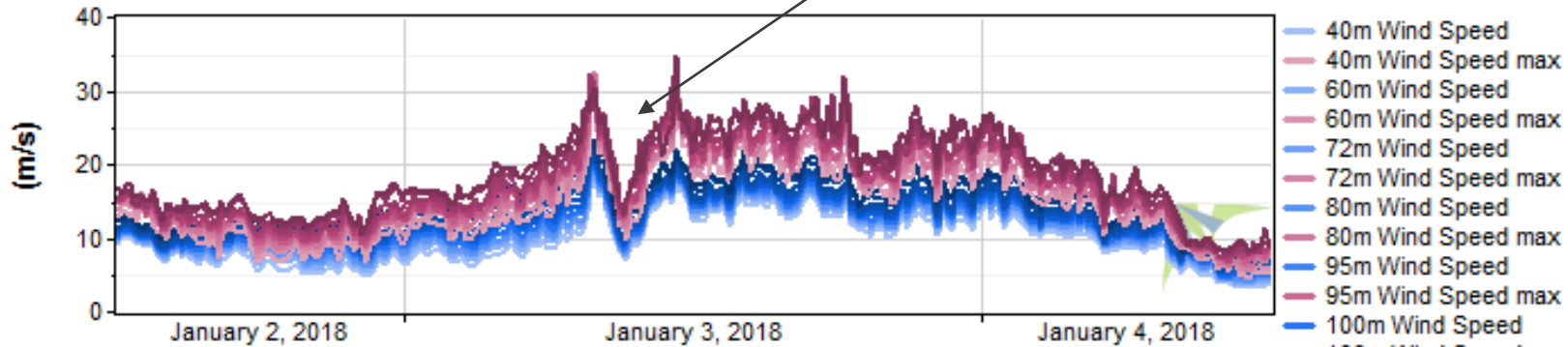
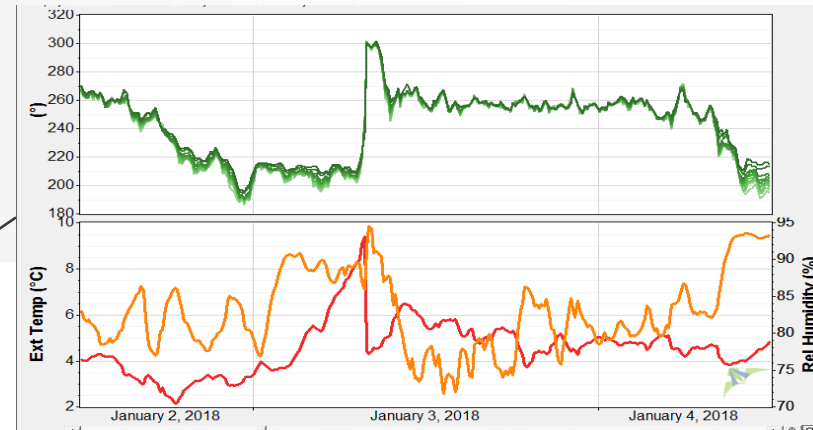
$$v = 6.79 \text{ m/s}$$

Durch zwei **Winterstürme** innerhalb der Mesperiode liegt der Mittelwerte über dem erwarteten langjährigen Mittel.

Auffällige **Ostwindperiode** im Februar/März

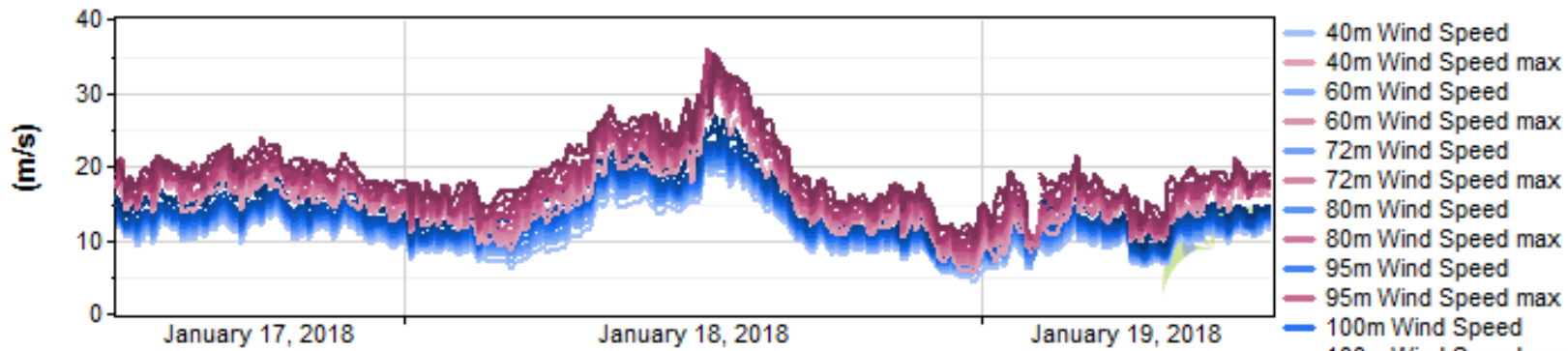
WindCUBE

Winterstürme 3.1.18 und 18.1.18



03.1.18

Maximalwert 10min Mittel 23 m/s
Spitzenwerte: 34 m/s (122km)

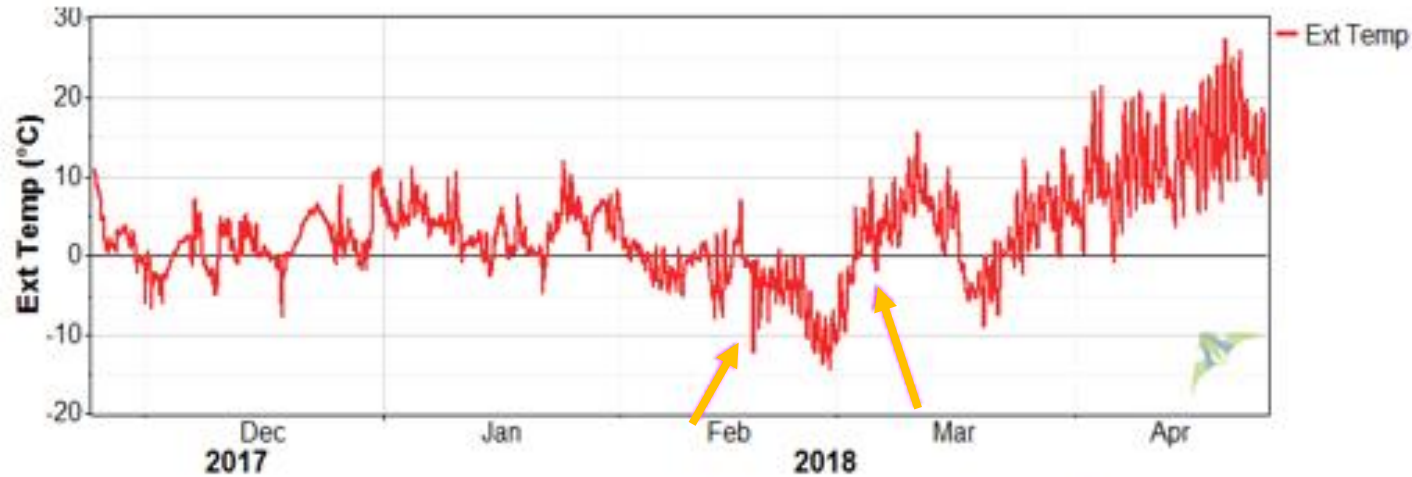


18.1.18

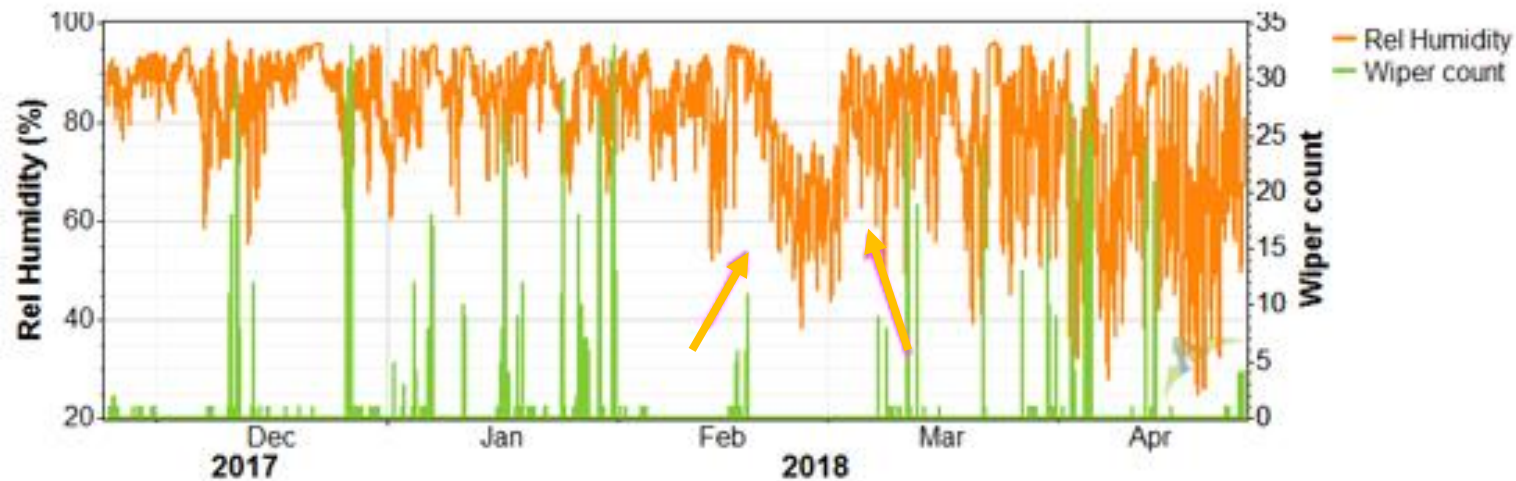
Maximalwert 10min Mittel 24 m/s
Spitzenwerte: 36 m/s (130km/h)

PTH-Sensor (WindCUBE)

Zeitreihenanalyse: Temperatur & Feuchte



Verlauf Außentemperatur 2m

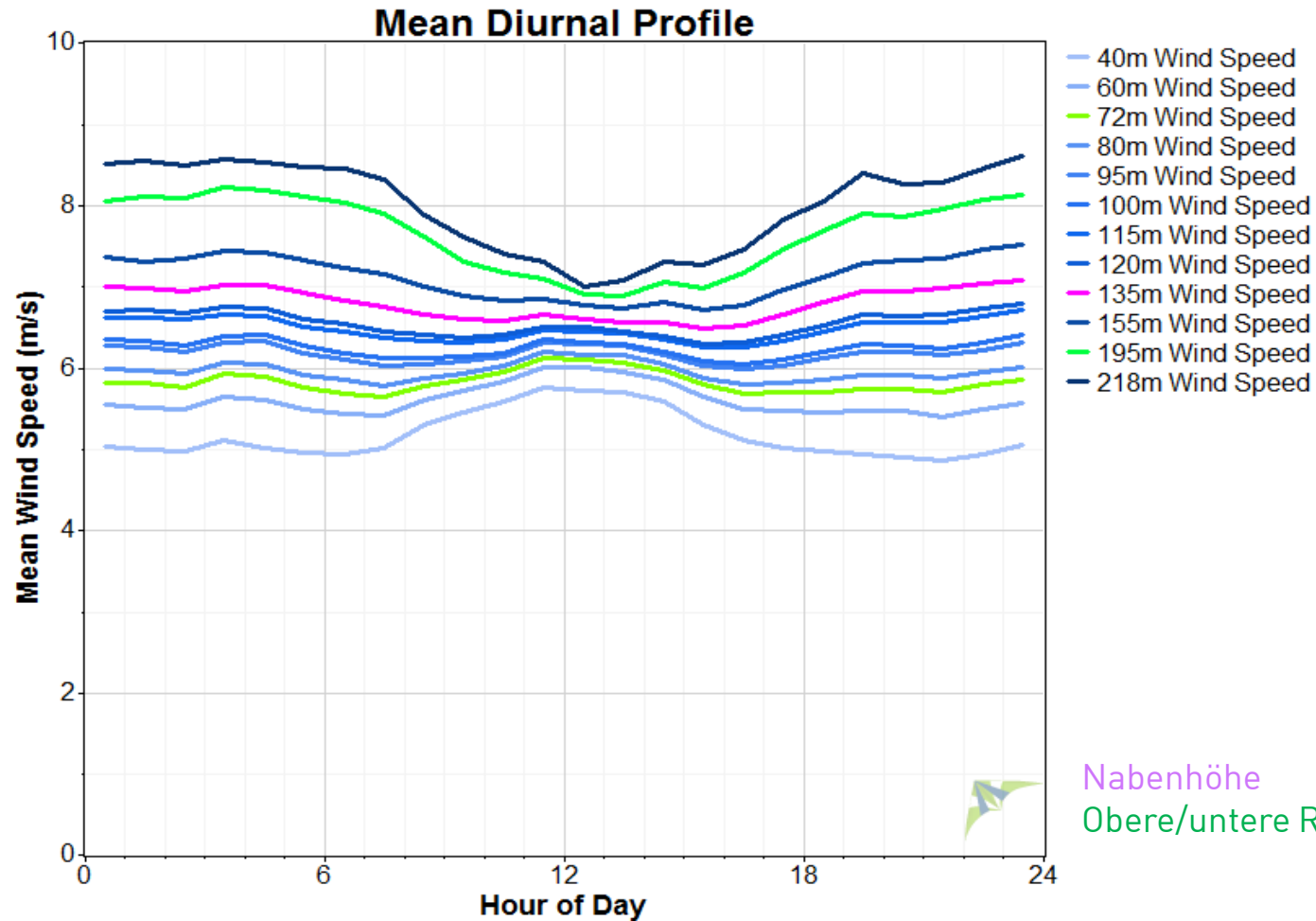


Wiper Counts im normalen Bereich, keine Ausfälle/Störungen

Rel. Feuchte Maximalwert bei 96,5% (liegt evtl. am Sensor)

WindCUBE

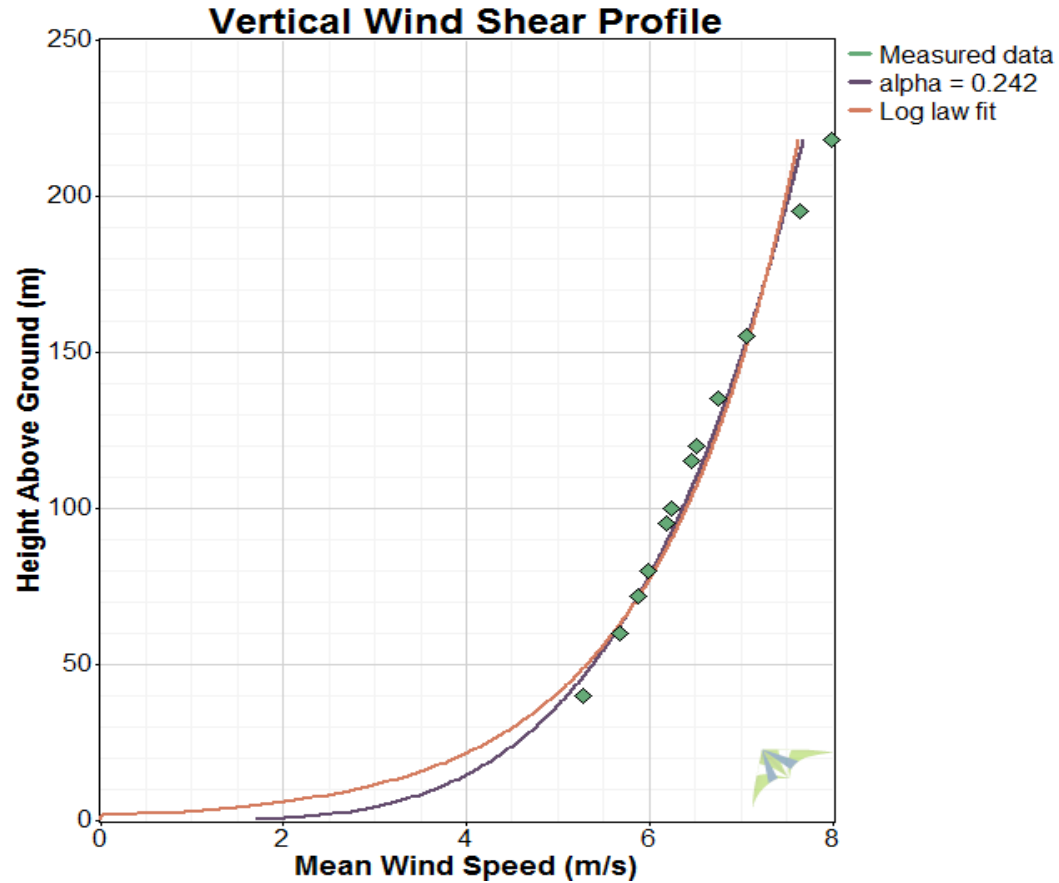
Mittlerer Tagesgang & vertikale Windscherung



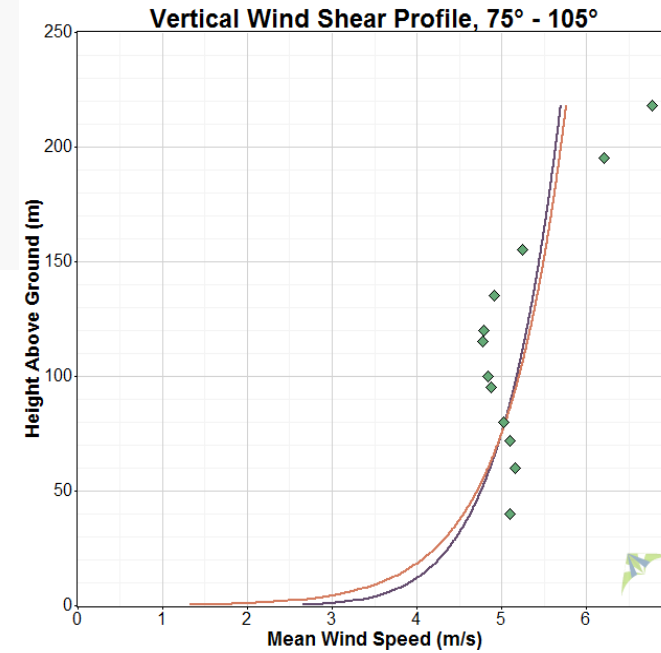
- Nächtliche Windzunahme am deutlichsten in den Höhen über 150m, d.h. größere Shearwerte im oberen Teil der Rotorfläche.
- Mittlerer Gradient von 2m/s über die Rotorfläche in den Nachtstunden

WindCUBE

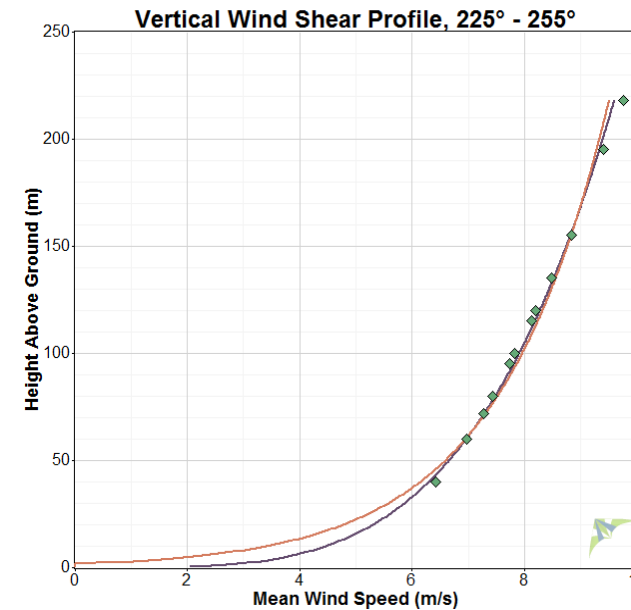
Vertikales Windprofil



Windprofil komplette Messperiode



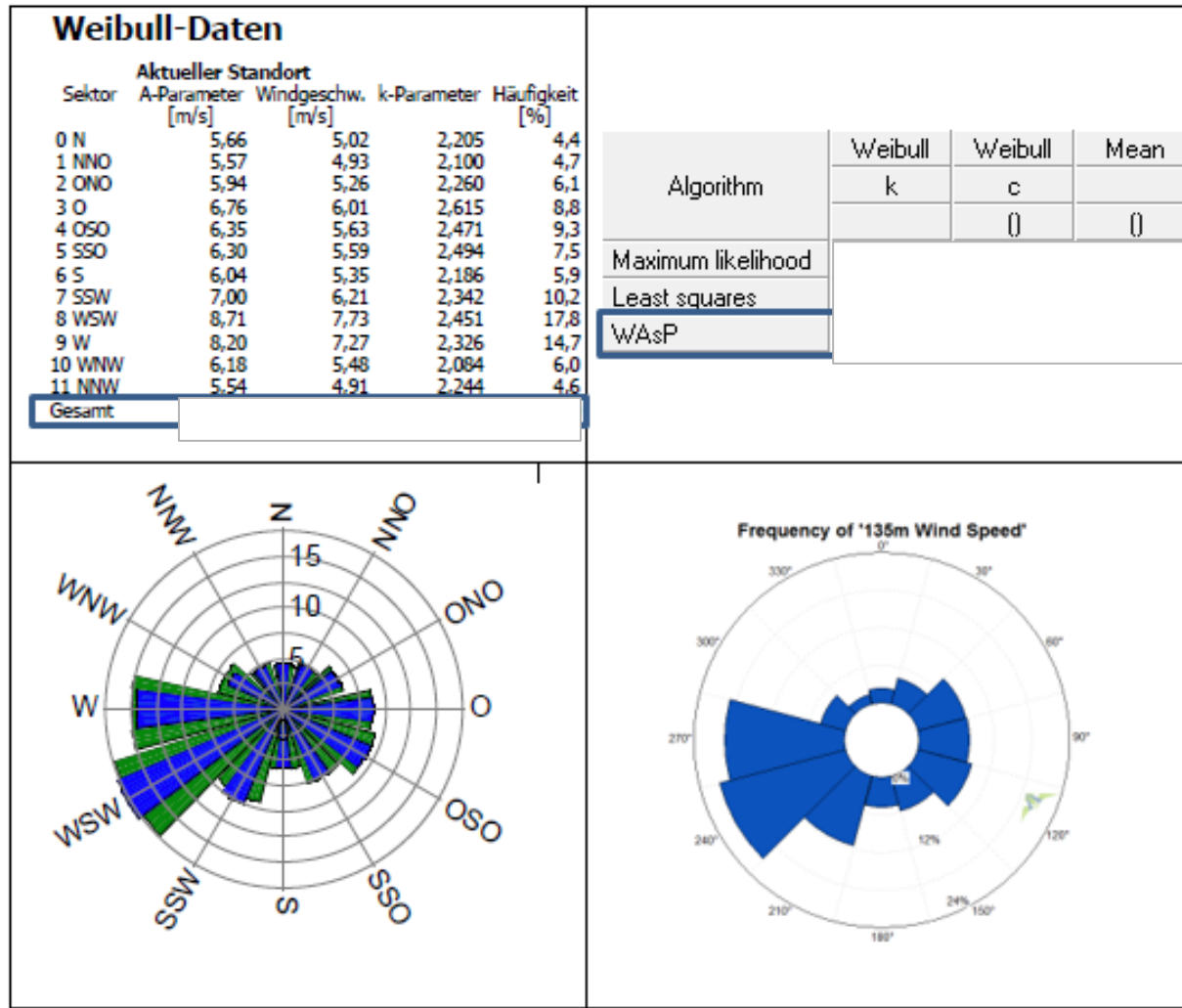
Sektor Ost
Wake von WEA 1
sichtbar



Sektor West
Freie
Anströmung
zwischen LiDAR
und WEA

WindCUBE

Vergleich Messperiode vs. Langzeitwerte

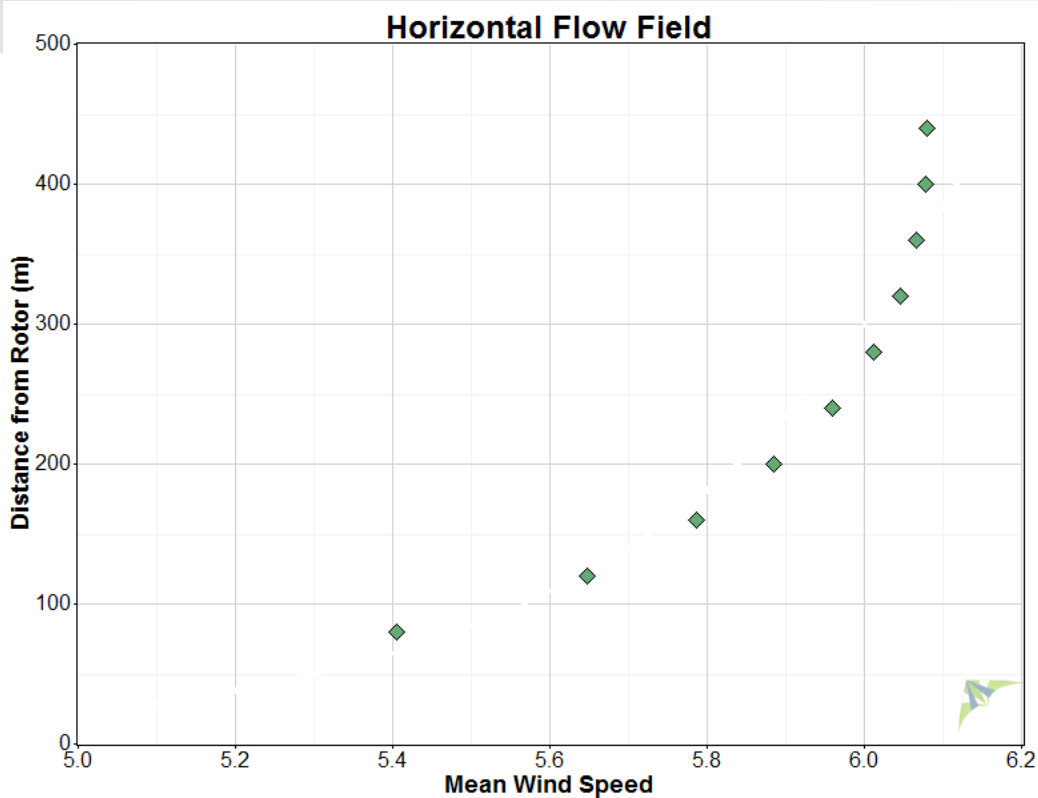


- Ähnliche Verteilung der Windrichtung
- Höhere Windgeschwindigkeiten durch Winterperiode

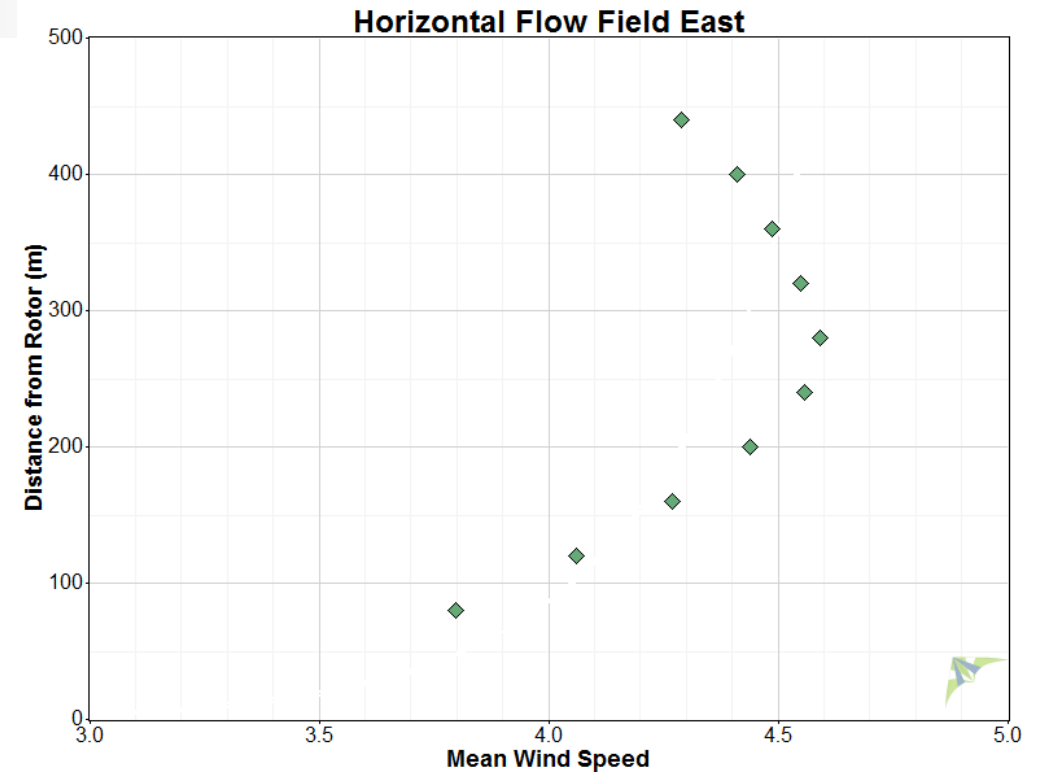
→ Messung repräsentativ für die zugrunde gelegten Windverhältnisse im Park

WindIRIS

Horizontales Geschwindigkeitsfeld



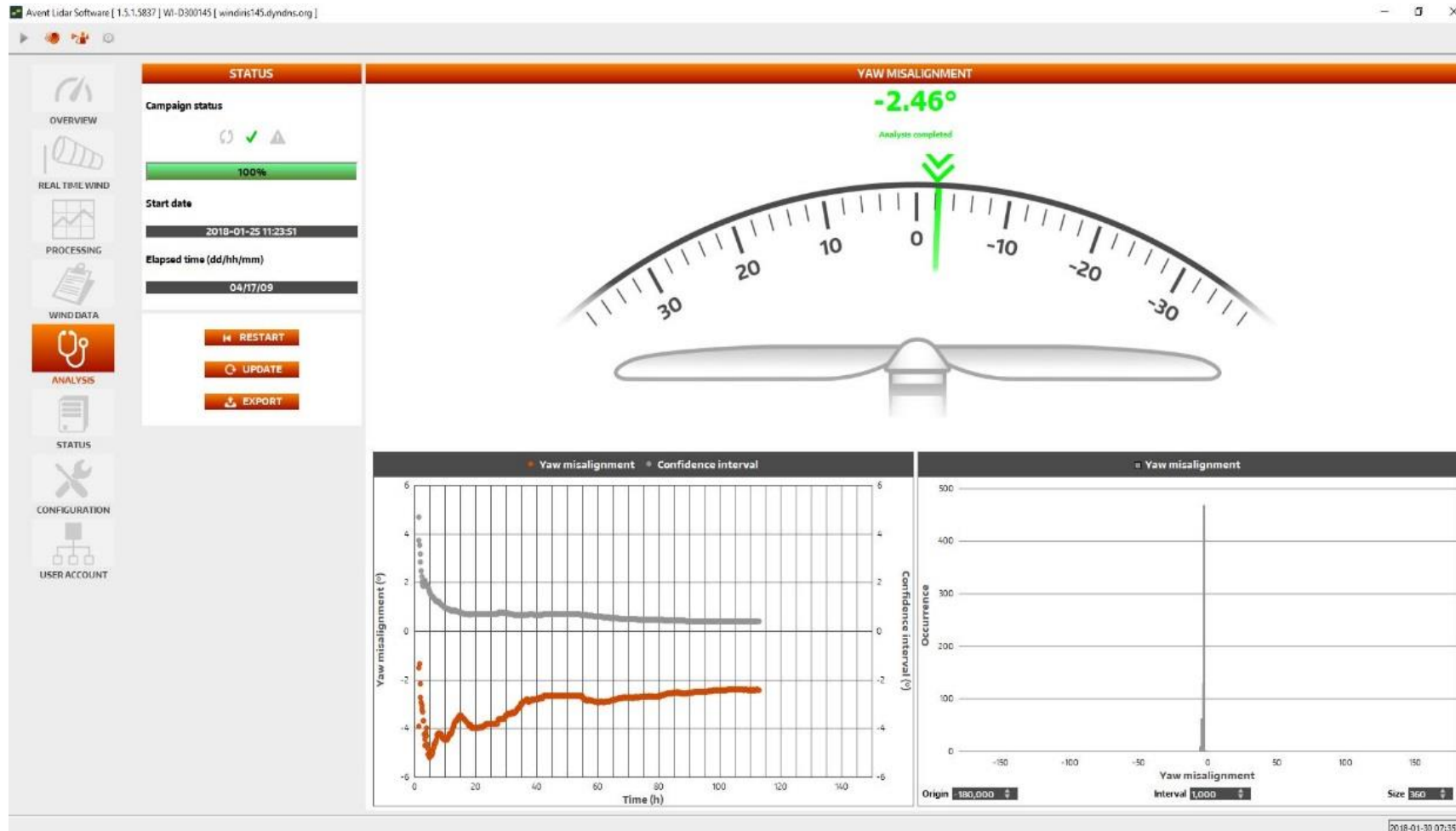
- Direkt vor dem Rotor Abnahme der Geschwindigkeit durch Staueffekte
- Im Bereich 2,5 RD normale Geschwindigkeit



- In größere Entfernung bei Ostlage Geschwindigkeitsabnahme durch Wakes

Yaw Misalignment

6 verschiedene Testzeiträume (1x verschattet)

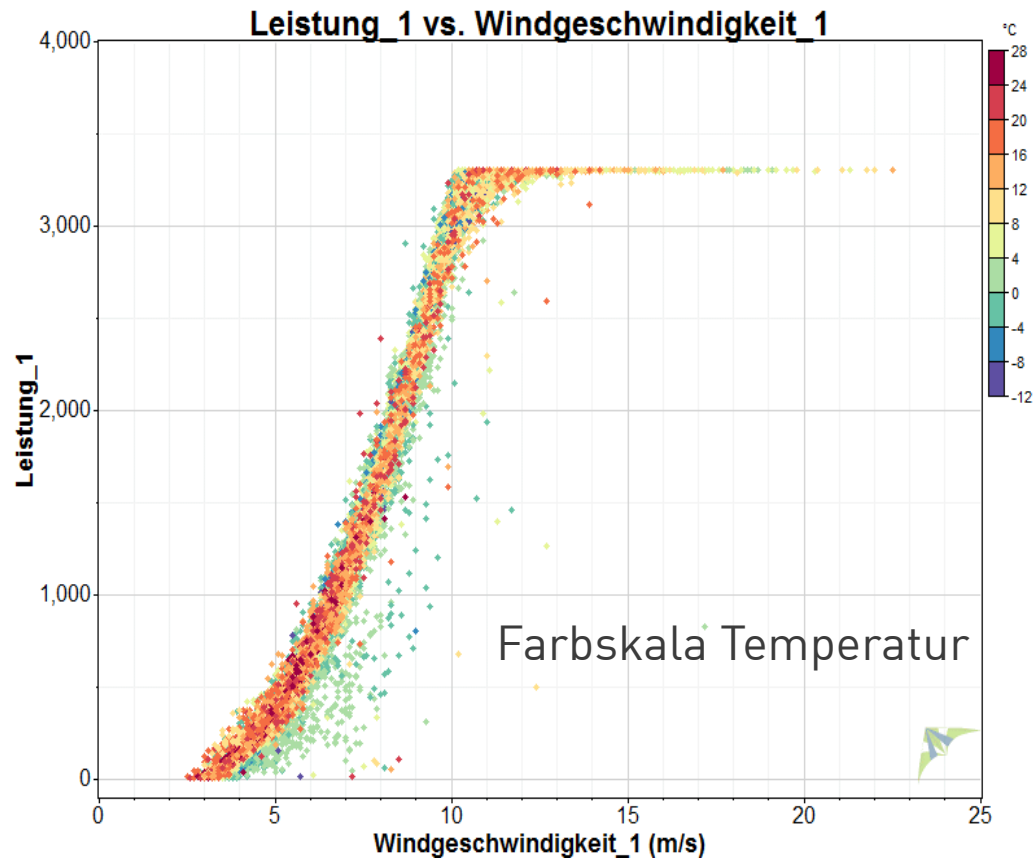


Automatisierte
Berechnung

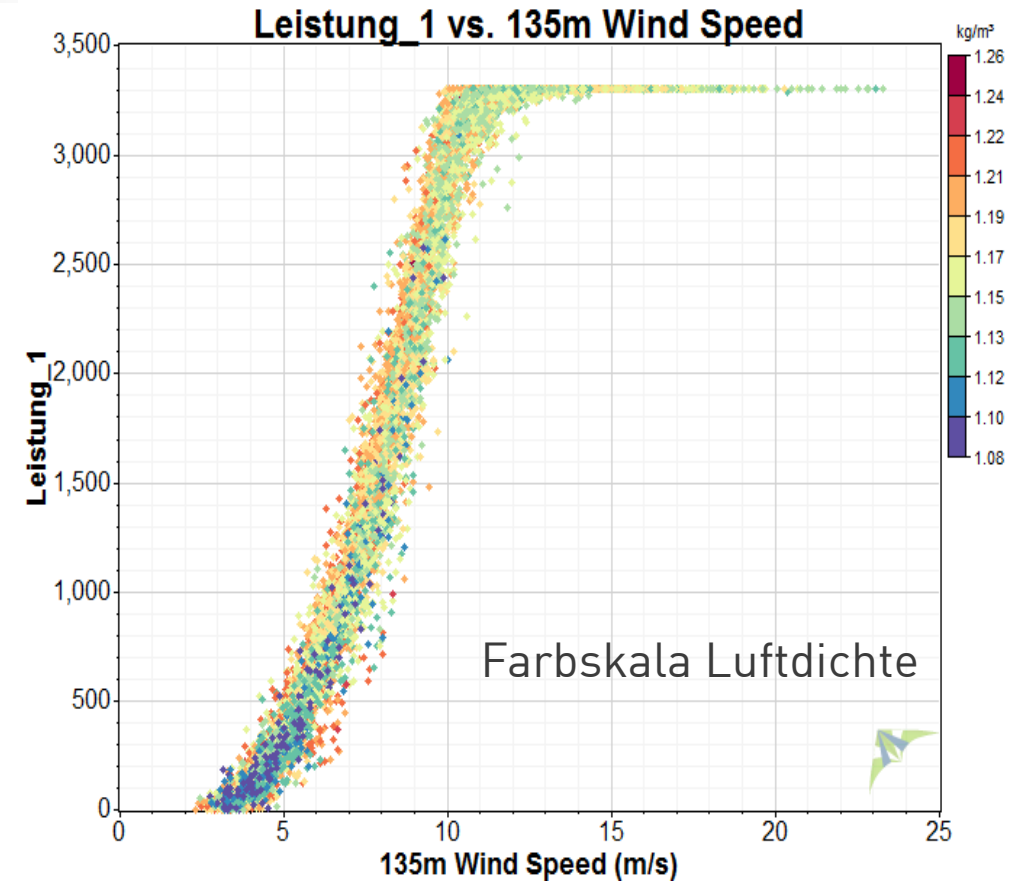
Nach Aufsetzen der
Messung Einschwingen
des Differenzwertes und
Minimierung der
Abweichung

Betriebsdatenanalyse

Gefilterte Daten, freier Sektor



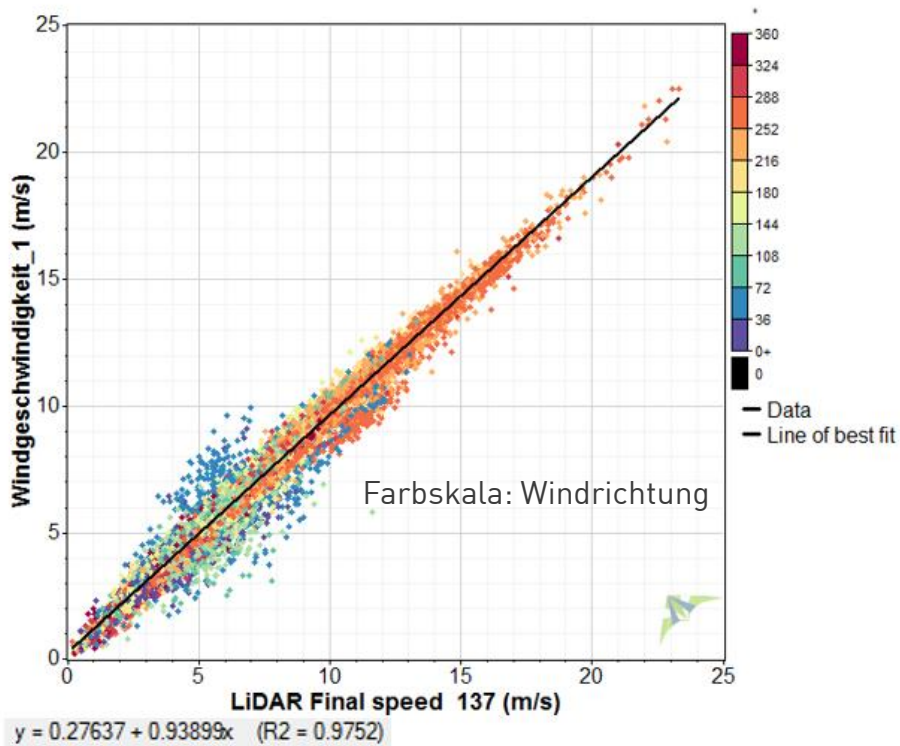
Scatterwerte bei geringer Temperatur/hoher Feuchte



Bessere LK Werte bei hoher Luftdichte (gelb/rot)

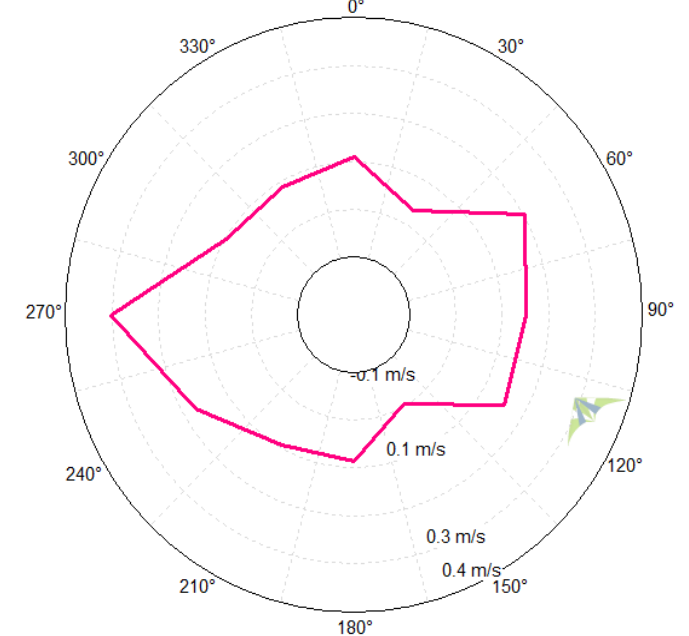
Betriebsdatenanalyse

Gondelanemometer vs. LiDAR



- Korrelationen der beiden Windmessungen $r = 0.97$
 - Offset der Regression und Verteilung der Differenzen von $v_{\text{LiDAR}} - v_{\text{Gondel}}$ im Mittel **0.16 m/s**
- Einfluss auf Bewertung der Anlagenperformance

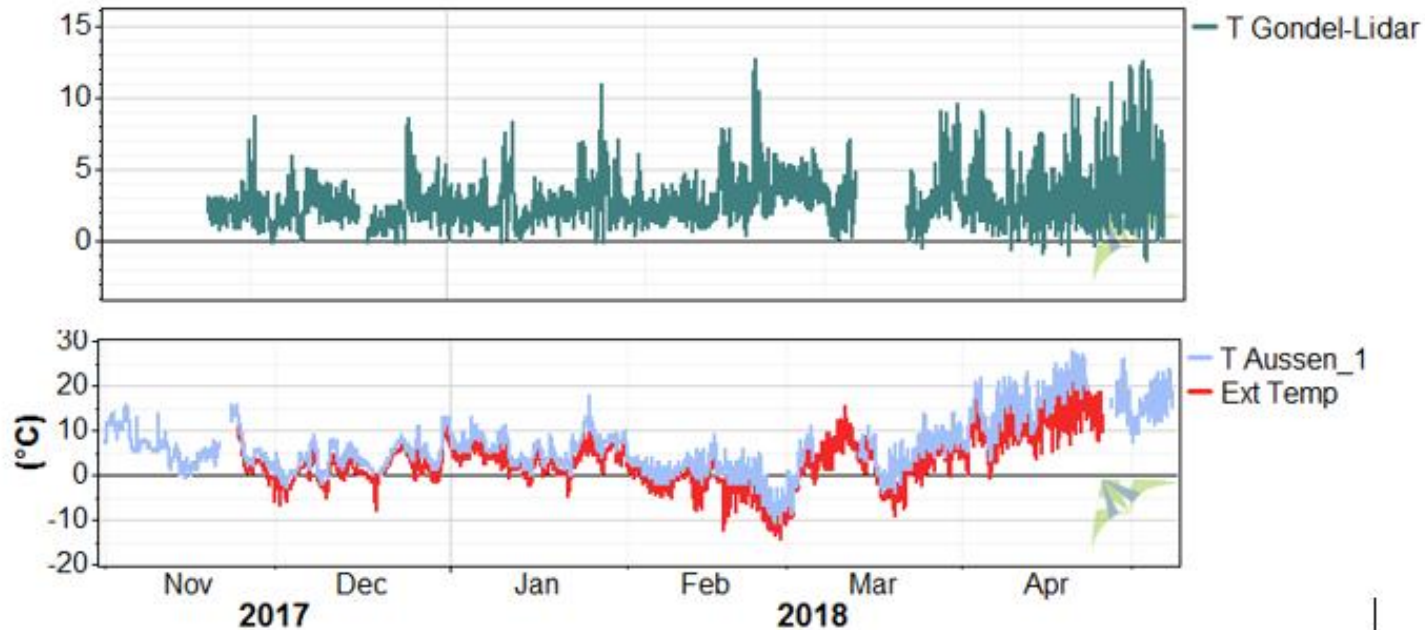
Mean of 'Lidar Final-Gondel' vs. Windrichtung_1



Wenn der gemessenen Leistung der WEA eine geringere Windgeschwindigkeit zugeordnet wird, kommt es hier zu deutlich besseren Werten der Leistungskurve.

Auswertung

Sensitivität Lufttemperatur

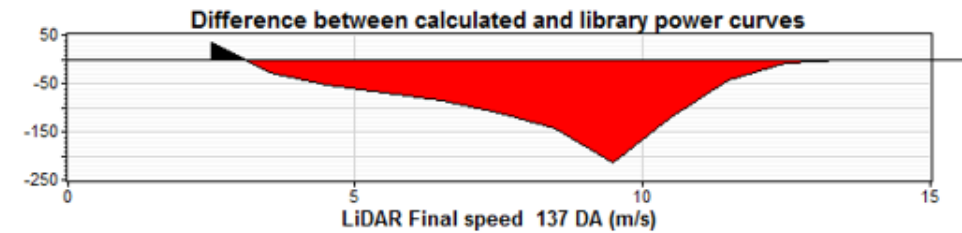
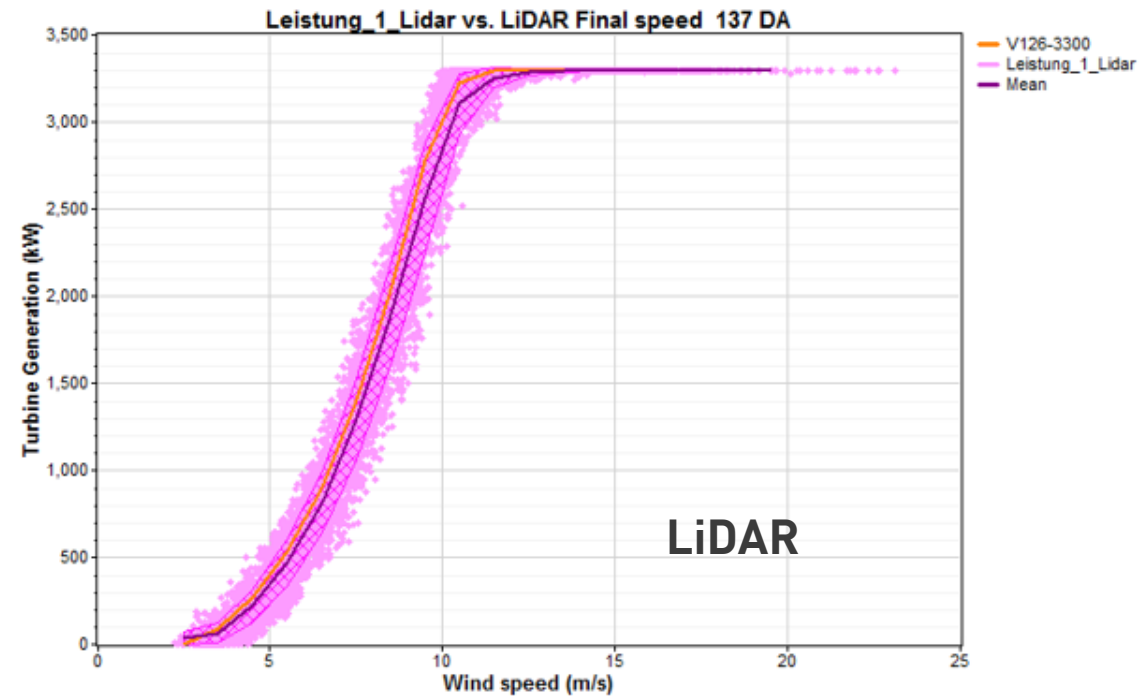
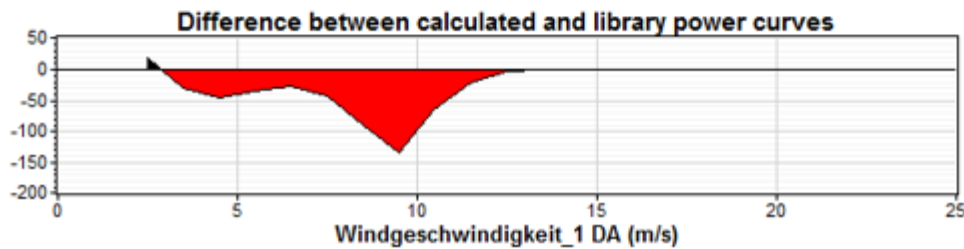
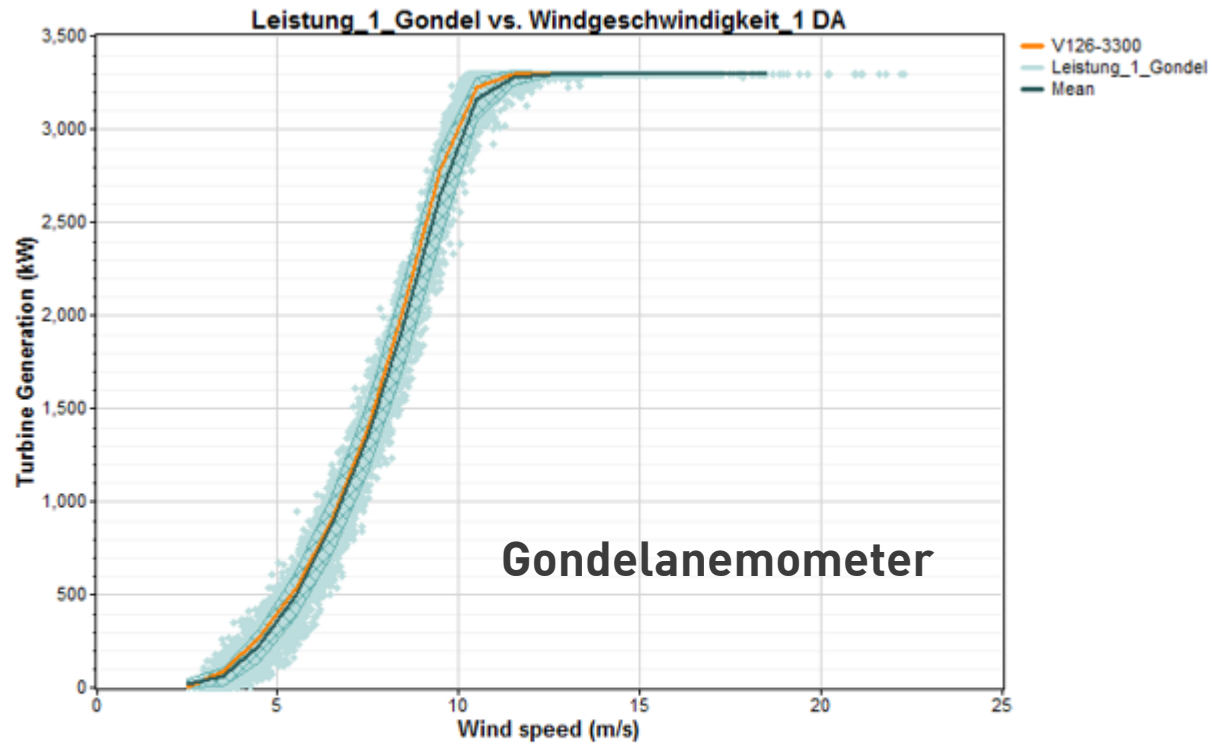


Mittlere Luftdichte von 1.213 kg/m³.

- Bezogen auf $T_{2m} = 4.86^{\circ}\text{C}$
- T_{Aussen} (WEA01) im Mittel 2.8° höher obwohl nach oben hin Temperaturabnahme erwartet.
- Wert von der WEA beeinflusst?
- Verwendung dieses Wertes hätte eine reduzierte Luftdichte von 1.186 kg/m³ zur Folge
- **Einfluss auf Leistungsbewertung!**

Auswertung

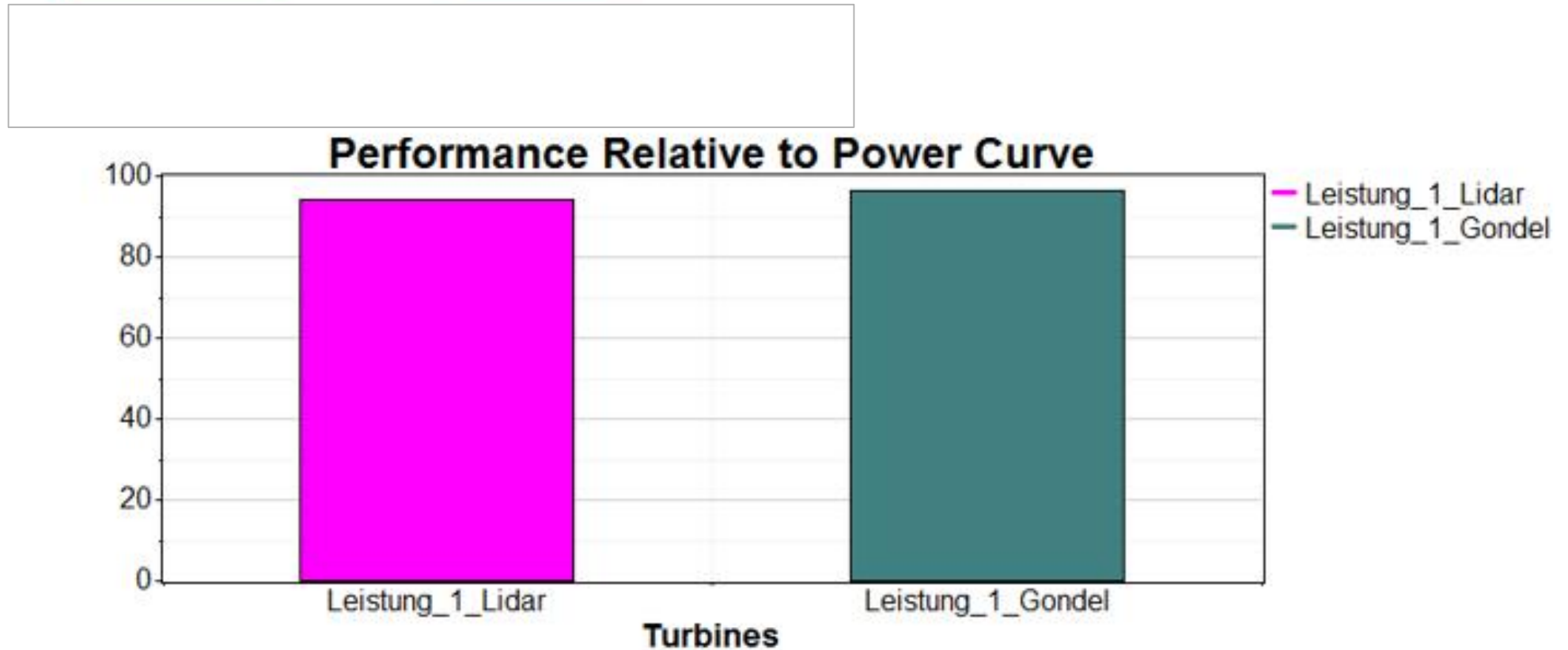
Abgleich WEA01 mit theoretischer LK



Auswertung

Vergleich zur theoretischen Leistungskennlinie

- Mittlere, relative Performance (Gefilterter Messzeitraum)



- **Erfolgreiches Messprojekt**
Technische Seite + Datenqualität
- **Einsatz der WindIRIS bringt den gewünschten Mehrwert**
Abdeckung der verschatteten Sektoren und Bestimmung des Yaw Misalignment
- **WEA1 zeigt eine Underperformance, je nach Sensor zwischen 3% (Gondelanemometer) und rund 5% (LiDAR)**
Differenzen durch die unterschiedliche Messung der Windgeschwindigkeiten
- **Stärkste Abweichungen im Bereich 8-10 m/s**
- **Einfluss von Temperatursensor auf verwendete Luftdichte beachten (~ 1,5% AEP)**
- **YAW Misalignment für WEA1 bei rund 2.5° (< 1% AEP)**

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



EnBW Energie Baden-Württemberg AG

Schelmenwasenstraße 15, 70567 Stuttgart

Heinrich Michael Walther

Konzernexperte

mailto: he.walther@enbw.com

Für Fragen

Dr. Carolin Schmitt

mailto: ca.schmitt@enbw.com

