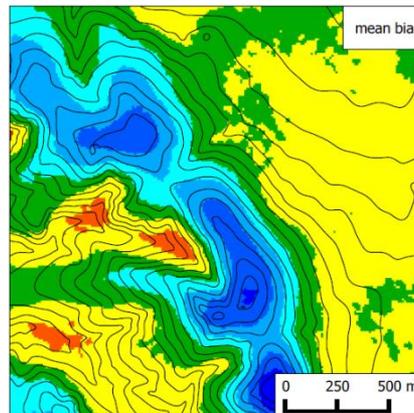


Windpotenzial mit LiDAR-Technik bestimmen

Kassel, 09. Oktober 2015
4. Hessischer Windbranchentag

Dr.-Ing. Doron Callies
Fraunhofer IWES
Doron.Callies@iwes.fraunhofer.de



Agenda

Teil 1

- LiDAR-Messung für die Standortbewertung nach TR6 Rev. 9
- LiDAR Messprinzip
- LiDAR und Messmast im Vergleich für die Standortbewertung
- LiDAR Fehler im komplexen Gelände

TR6 Revision 9

- Gültig seit 09.2014
- 9. Revision der TR6 sind umfangreiche Änderungen erfolgt (Verdopplung der Seitenzahl)
- Sehr hoher Detaillierungsgrad der Anforderungen (z. B. Plausibilisierung und Bewertungen einzelner Schritte)
- Erhöhte Transparenz und Detaillierungsgrad der Gutachten
- Windenergieanlagenenertragsverluste und Unsicherheiten werden differenzierter behandelt

Auswirkungen der neuen TR 6 auf Windmessungen

Erhöhte Anforderungen an Referenzdaten

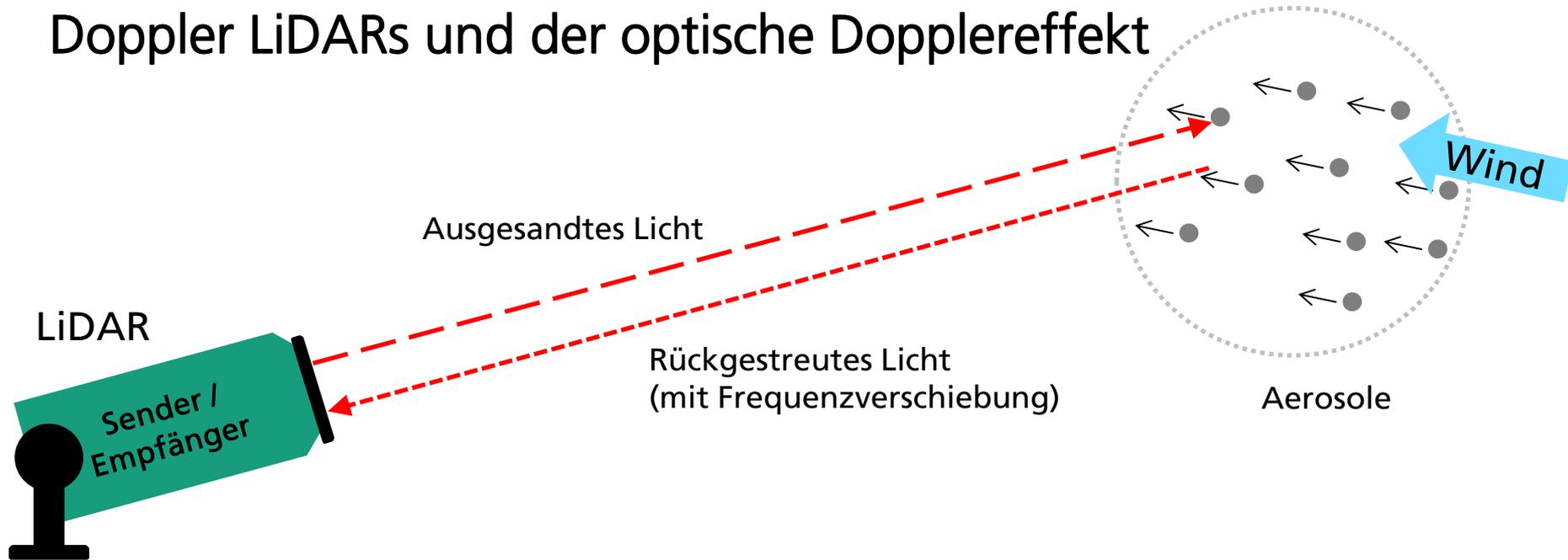
- Standortcharakteristik muss ähnlich sein
- Entfernung im flachen Gelände maximal 10 km
- Entfernung im komplexen Gelände maximal 2 km
- Höhenunterschied maximal 50 m

➔ Windmessungen am Standort sind in Nordhessen kaum zu vermeiden

Messung mit LiDAR entsprechend TR 6 Rev. 9

- Windmessungen mit LiDAR dürfen ohne Referenzmessmast durchgeführt werden
- Der verwendete Gerätetyp muss Klassifiziert sein
- Jedes verwendete LiDAR muss verifiziert sein, dies muss spätestens nach zwei Jahren wiederholt werden
- LiDAR messen Messprinzip bedingt im komplexen Gelände fehlerhaft
- In moderat komplexen Gelände kann der Messfehler korrigiert werden, dies hat eine erhöhte Unsicherheit zur Folge. Die Unsicherheit muss mindestens die Hälfte der Korrektur betragen

Doppler LiDARs und der optische Dopplereffekt



Windströmung in Richtung des LiDAR resultiert in positiver Frequenzverschiebung und Umgekehrt.

$$f = f_0 + \Delta f = f_0(1 + 2v/c)$$

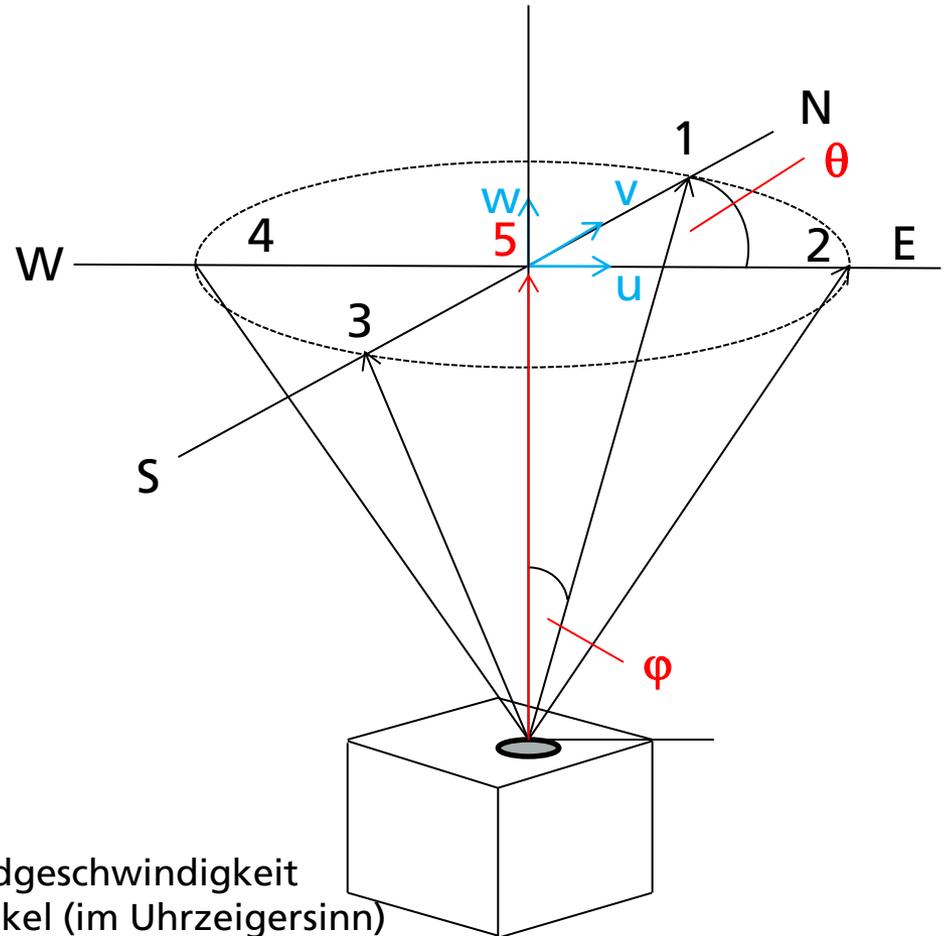
v = radiale Windgeschwindigkeit
 c = Geschwindigkeit des Lichts
 f_0 = Frequenz des Emittierten Lichts

VAD-LiDAR – Leosphere Windcube v2

$$v = \frac{v_{r3} - v_{r1}}{2 \sin \varphi}$$

$$u = \frac{v_{r4} - v_{r2}}{2 \sin \varphi}$$

$$w = -v_{r5}$$



u = West-Ost Komponente
 v = Süd-Nord Komponente
 w = vertikale Komponente

v_r = radiale Windgeschwindigkeit
 θ = Azimut-Winkel (im Uhrzeigersinn)
 φ = Neigungs-Winkel (Prisma-Winkel)

Source: Leosphere

LiDAR-Typen

Windprofiler (VAD/DBS)

Wichtigste Geräte am Markt:

Produkt	Hersteller	Lasertechnologie	Produktreife
wincube v2	Leosphere	gepulst	2. Generation; mehrere hundert Geräte verkauft
Zephir 300	Zephir	CW	2. Generation; deutlich kleinerer Marktanteil

Weitere Geräte:

- StreamLine WindPro (Halo Photonics/Sgurr)
- Compact Wind LiDAR (Mitsubishi)
- SpiDAR (Pentalum)



wincube v2



Zephir 300

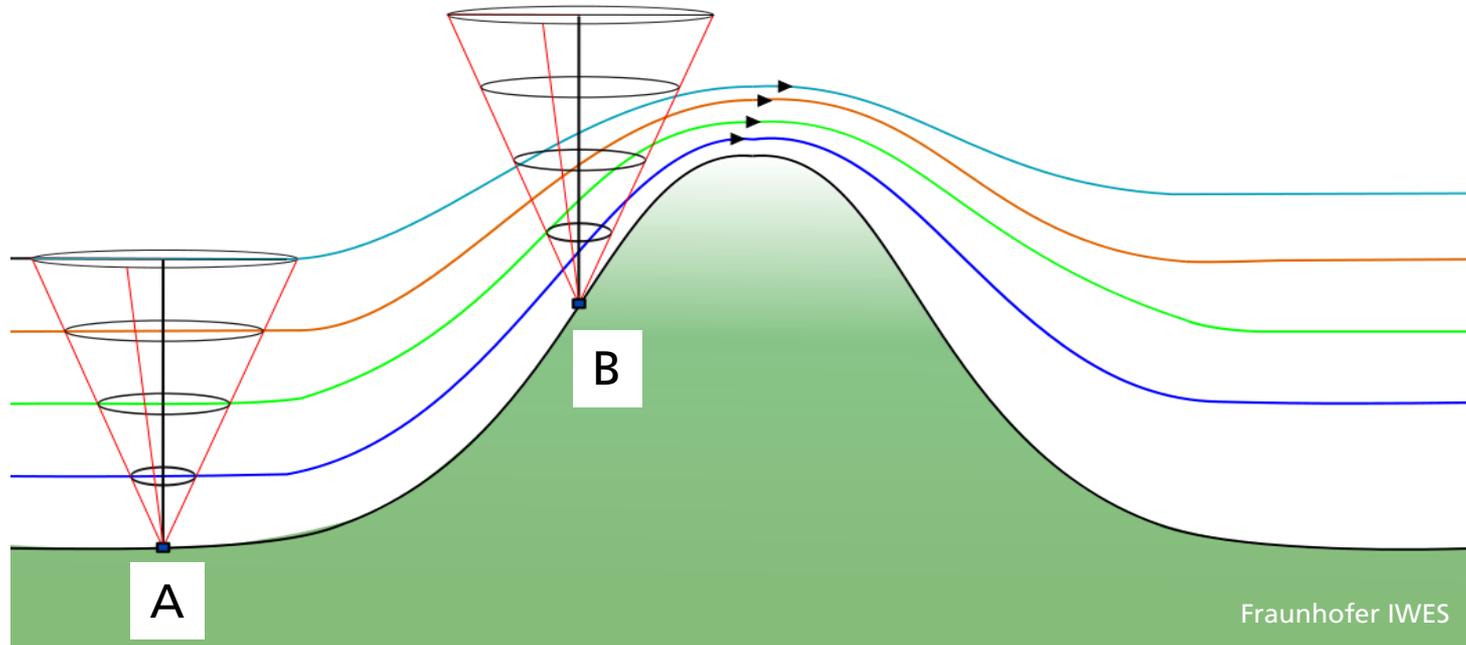
Vorteile von LiDAR gegenüber Messmast

Eigenschaft	LiDAR	Mast	Erläuterung
Messfehler durch Maststruktur	++	--	Kein Fehler durch Maststruktur und Blitzfangstange(n) bei LiDAR-Messungen
Anzahl der Messhöhen (Windprofil)	++	O	LiDAR-Messungen können auf 10 Messhöhen bis über 200 m Höhe ein Windprofil messen. Messmasten verfügen über weniger und niedrigere Messhöhen.
Kurzer Planungsvorlauf	++	--	LiDAR-Messung kann schneller und mit weniger Kosten für Vorlauf begonnen werden.
Zeitaufwand für Genehmigung	++	-	Für die Aufstellung eines LiDAR-Geräts ist keine Baugenehmigung notwendig
Flexibilität der Messdauer	++	--	LiDAR-Messungen können bei Projektabbruch vorzeitig ab und woanders wiederaufgebaut werden.
Mobilität der Messung	++	--	LiDAR-Messgerät kann flexibel am Standort platziert und an einem weiteren Standort versetzt werden.
Aufbau im Wald	+	-	Ein LiDAR hat weniger Platzbedarf als ein Messmast mit Abspannungen
Vereisung (Icing)	+	-	Beim Messmast können durch Vereisung Messdaten verfälscht oder verloren gehen beim LiDAR nicht.

Nachteile von LiDAR gegenüber Messmast

Eigenschaft	LiDAR	Mast	Erläuterung
Hohe Akzeptanz bei Banken	+(+)	++	LiDAR-Technologie ist nun nach TR6 für Stand-Alone Messungen akzeptiert. Es gibt aber weniger Erfahrungen.
Messfehler durch komplexes Gelände	--	o	Im komplexen Gelände treten insbesondere bei LiDAR- Messungenaugigkeiten auf.
Stromversorgung	-	+	Ein Messmast kann i. d. R. mit PV-Modulen betrieben werden. Ein LiDAR benötigt eine spezielle Generator-Lösung.
Sensorausfall	-	+	Beim Ausfall eines LiDAR gehen alle Messhöhen verloren und eine Reparatur kann oft nur vom Hersteller durchgeführt werden. Beim Windmessmast gibt es redundante Sensoren
Kalibrierung und Verifizierung	-	+	Verifizierung eines LiDAR ist zeit- und kostenintensiver als Cup Kalibrierung
Niedrige Wolken, Nebel, sehr klare Luft	-	++	Messmastmessungen sind nicht betroffen. LiDAR Verfügbarkeit wird reduziert

LiDAR errors in complex terrain



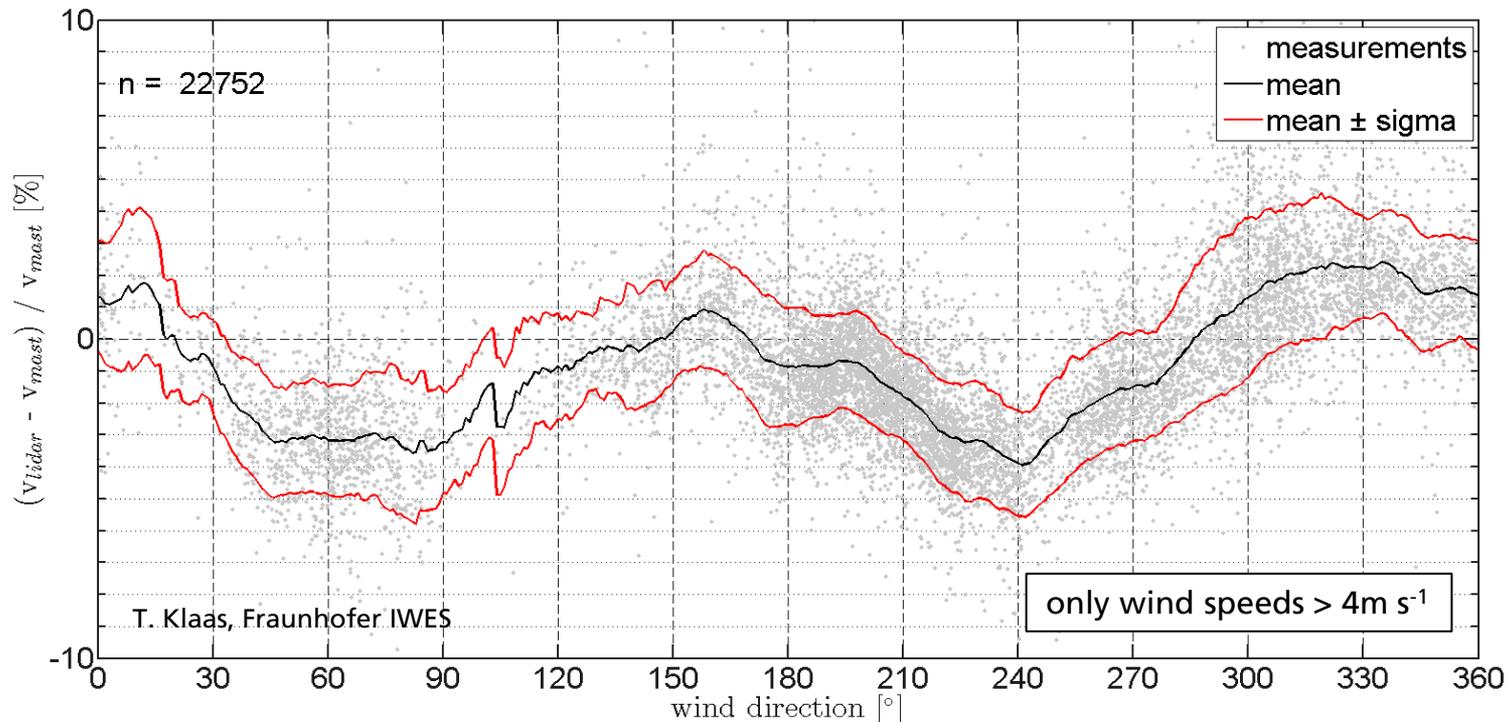
- A: Homogene Strömung → Hohe Messgenauigkeit mit LiDAR

$$v_{ri} = -u \sin \theta \sin \varphi - v \cos \theta \sin \varphi - w \cos \varphi$$

- B: Inhomogene Strömung → LiDAR-Messfehler durch Gelände

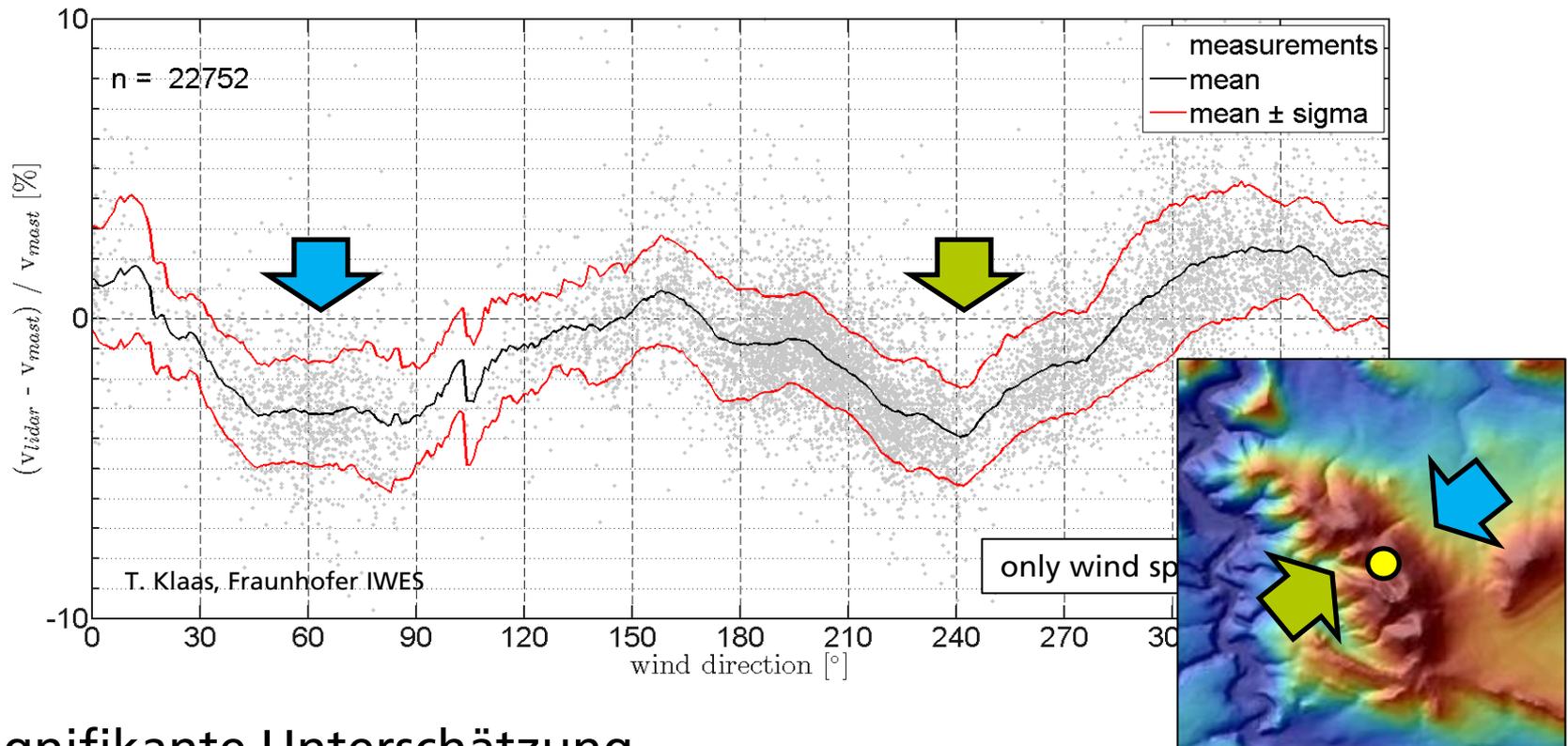
$$v_{ri} = -u_i \sin \theta \sin \varphi - v_i \cos \theta \sin \varphi - w_i \cos \varphi$$

Windcube-LiDAR Beispiel: Richtungsabhängigkeit des LiDAR-Fehlers auf 120m



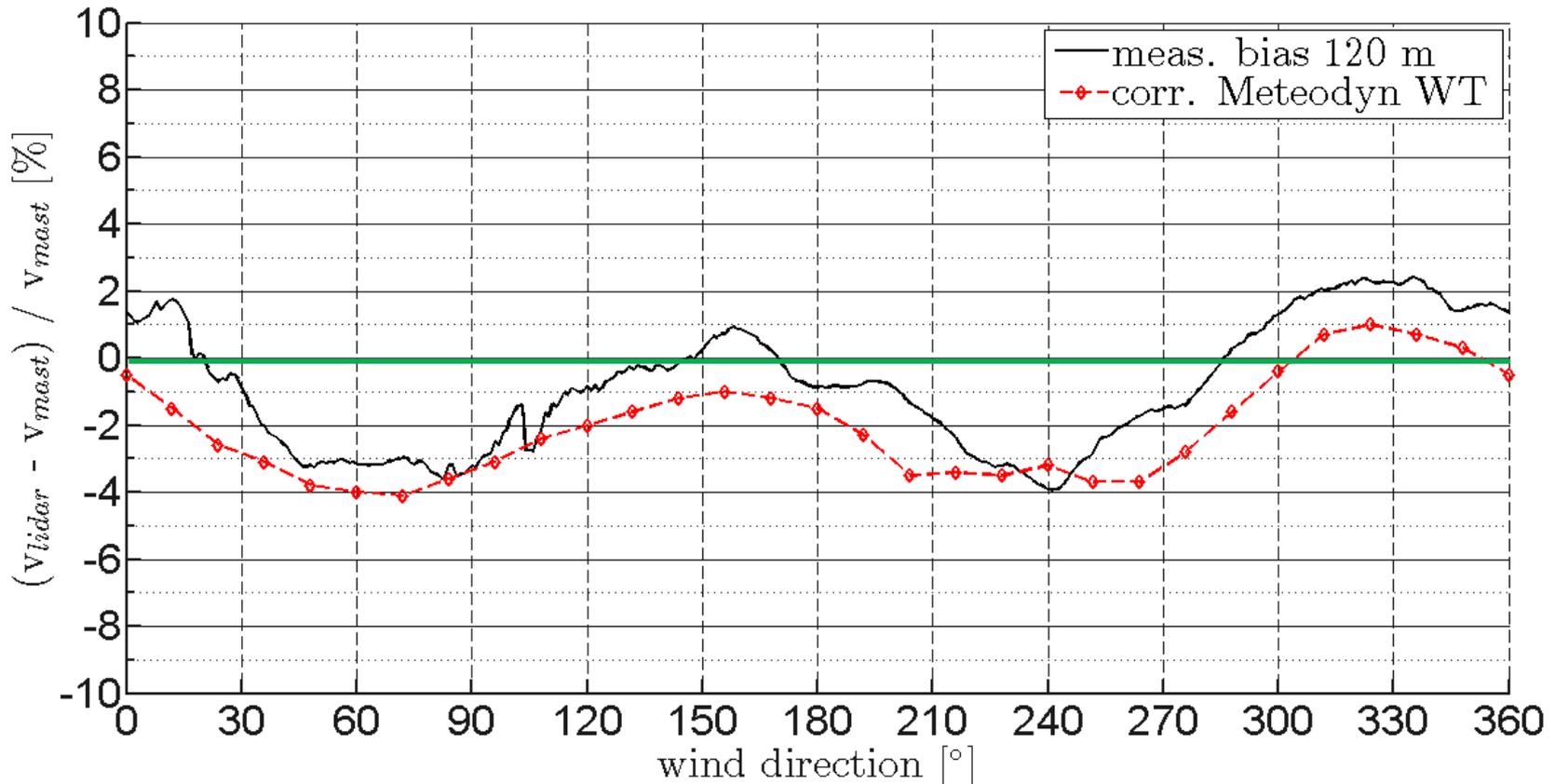
- Mittlerer Fehler ungefähr zwischen -4% und +2%

Windcube-LiDAR Beispiel: Richtungsabhängigkeit des LiDAR-Fehlers auf 120m



■ Signifikante Unterschätzung

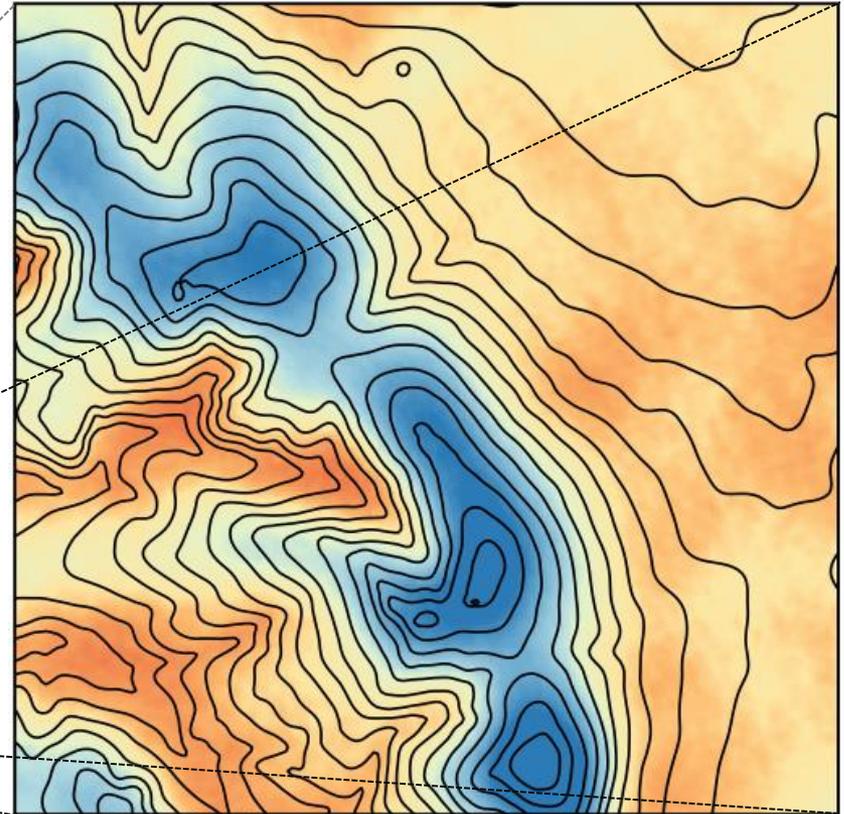
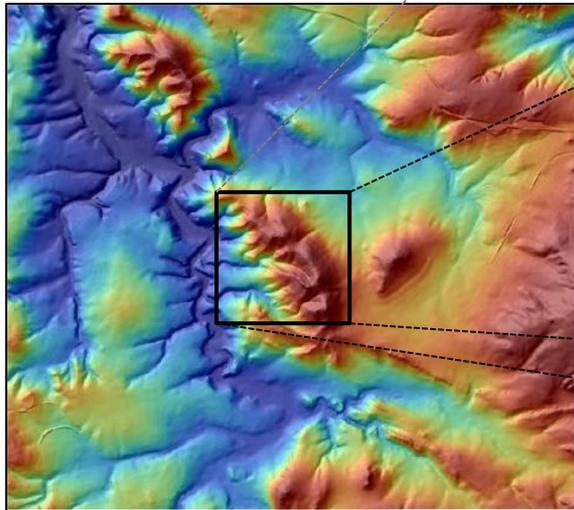
Estimation of the LiDAR error with a CFD model



- Die richtige Parametrisierung des CFD Modells ist von entscheidender Bedeutung für die Simulationsergebnisse → [Klaas et al. 2015]

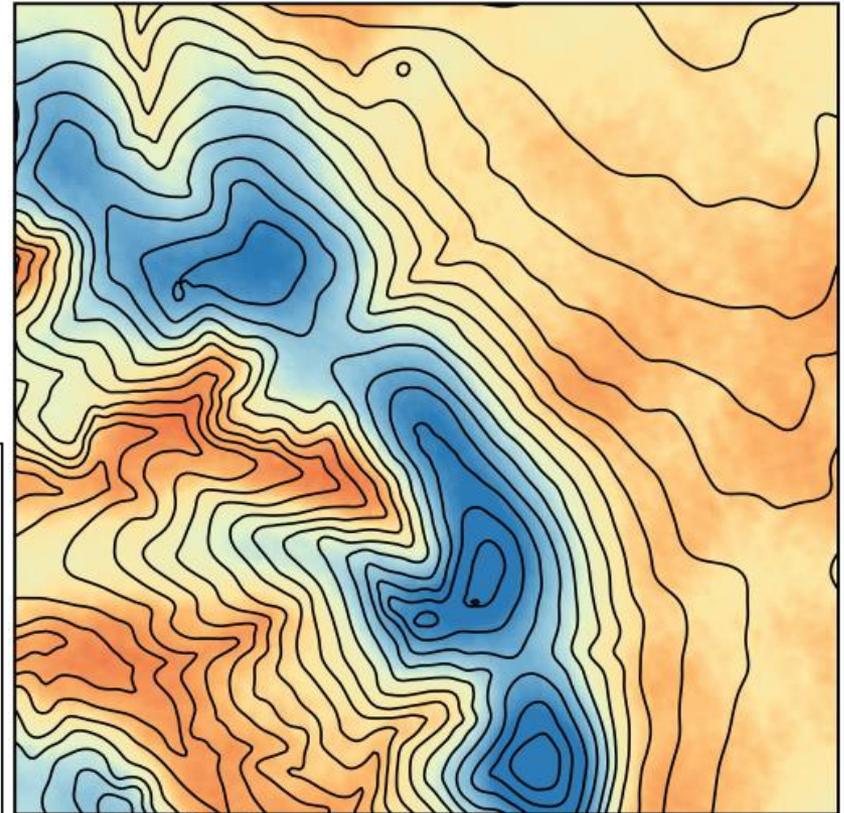
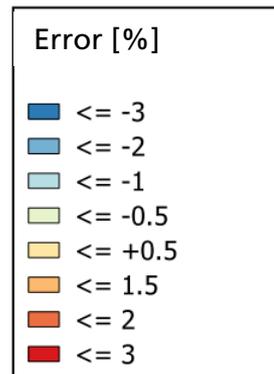
LiDAR-Fehlerkarte zur Auswahl des Messstandortes

- Der LiDAR Messfehler ist Standortabhängig
- Wie kann man den besten Standort finden?



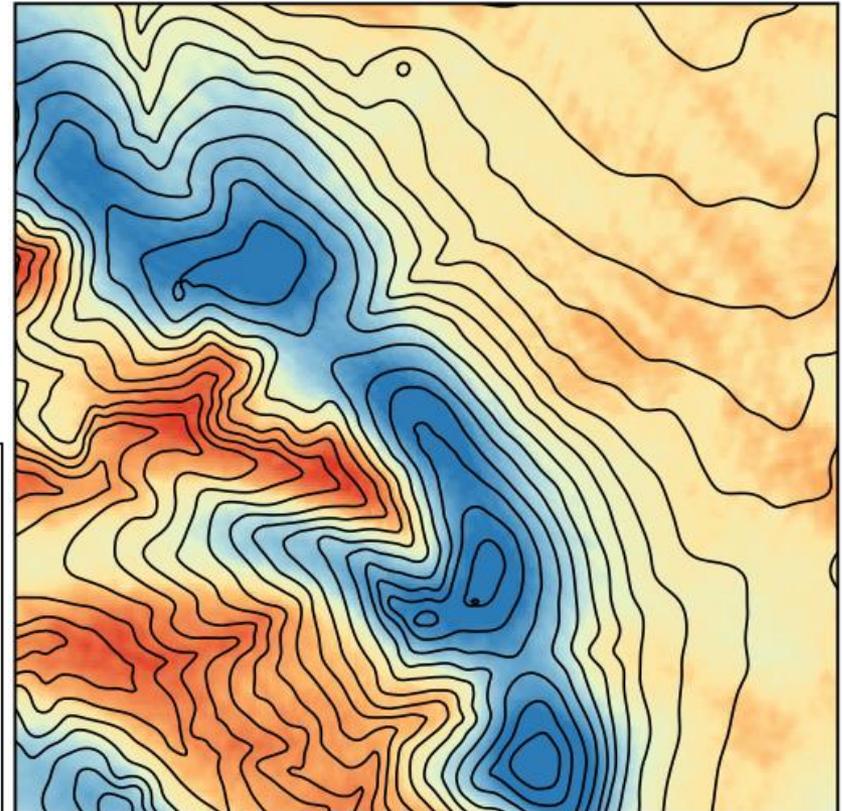
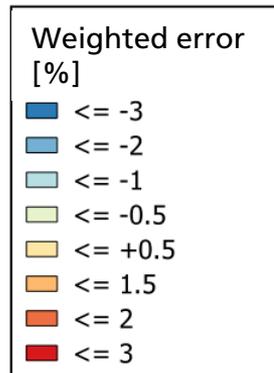
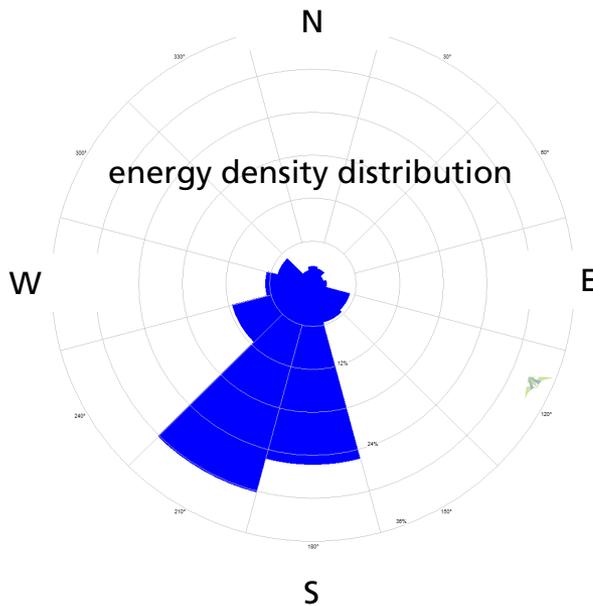
LiDAR-Fehlerkarte – Mittlerer Fehler

- Berechnung einer LiDAR-Fehlerkarte mit einem mittleren Fehler
- **Achtung:** Der Fehler ist Richtungsabhängig.
- Fehler in Hauptwindrichtung sind wichtiger als in Nebenwindrichtung



LiDAR-Fehlerkarte – Energie-gewichteter Fehler

- Nutzung der Windenergiedichte-Verteilung zur besseren Wichtung des Fehlers



0 250 500 750 1000 m



Unsicherheit der CFD-Korrektur im komplexen Gelände

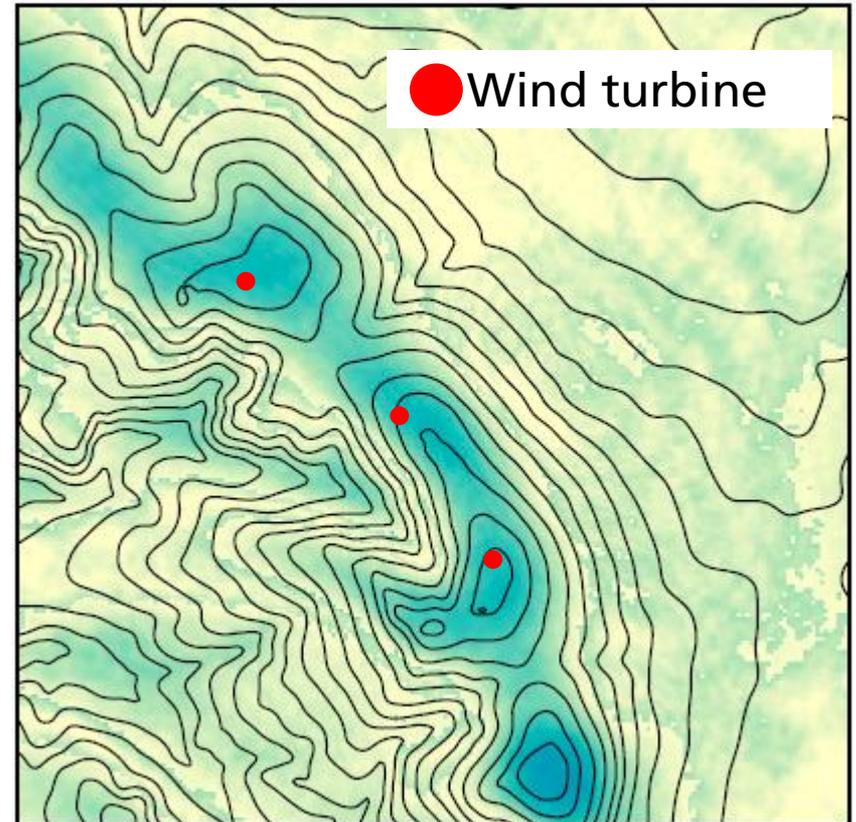
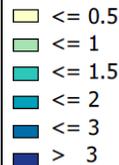
Umgang mit LiDAR Korrektur TR6 Rev. 9

- Eine Korrektur ist nur im moderat komplexen Gelände zulässig
- Die Anwendung einer Korrektur erfordert eine Erhöhung der Unsicherheit
- Die Unsicherheit muss mindestens die Hälfte der Korrektur betragen

Unsicherheitskarte für die LiDAR Korrektur im komplexen Gelände

- Die Unsicherheitskarte ist ein Schlüssel zur Unsicherheitsreduktion des Windgutachtens
- ⇒ Je komplexer der Standort desto größer kann die Unsicherheitsreduktion durch die Standortauswahl sein

Uncertainty [%]

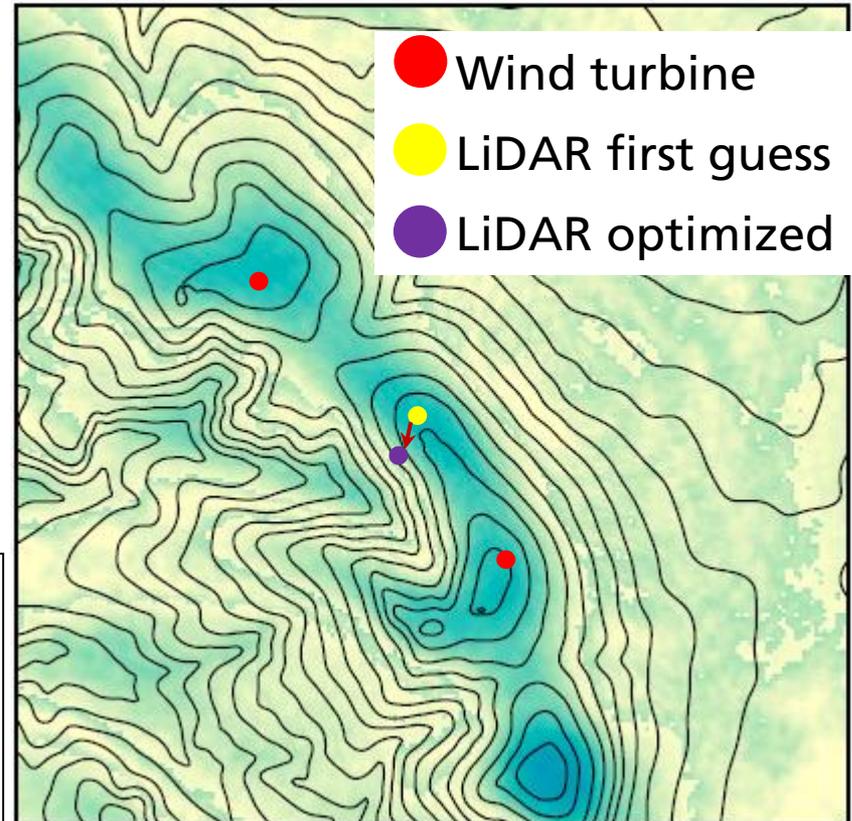
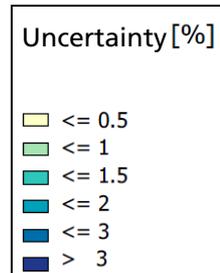


0 250 500 750 1000 m



Uncertainty map of LiDAR correction in complex terrain

- By moving the LiDAR just a few distance of 100 m the uncertainty is reduced by 1.3% (from 1.8% to 0.5%)
- This uncertainty reduction can be even higher in more complex terrain



Beispielhafter Nutzen der LiDAR Fehlerkarte

Einzelne Unsicherheiten		Unsicherheit (%)		
		Standard	Mit Karte	
Winddaten	LiDAR Verifikation		1.5	1.5
	LiDAR Klassifizierung		1.2	1.2
	LiDAR Ausrichtung		0.5	0.5
	Fehler wegen Komplexem Gelände		1.8	0.5
	Datenintegrität		0.5	0.5
	Monitoring / Zweitverifikation		0.5	0.5
	Langzeit Korrelation	Repräsentativität einer Messperiode	2.5	2.5
Repräsentativität der Langzeit Daten		1.5	1.5	
Gesamte Unsicherheit im Wind		4.02	3.63	
Gesamtunsicherheit der für die Windenergie nutzbaren Leistung im Wind (Daumenregel x 2.1)		8.45	7.63	
Unsicherheit der Modellierung (räumliche Extrapolation)		5	5	
Unsicherheit der Modellierung (vertikale Extrapolation)		0	0	
Unsicherheit der Abschattungseffekte		2	2	
Unsicherheit der Leistungskennlinie		5	5	
Gesamtunsicherheit		11.20	10.59	

$\Delta U = 0.6 \%$

Kosten von LiDAR Messungen

- LiDAR Messungen Kosten weniger als Messmastmessungen auf Nabenhöhen

Die Preise für Messungen variieren je nach:

- Messdauer
- Gerätetyp
- Bedarf für externe Stromversorgung
- Entfernung und Zugänglichkeit des Messstandorts
- Mitwirkung bzw. Sonderwünsche von Kunden

Zusammenfassung

- Nach der Revision der TR 6 ist es möglich Windgutachten mit LiDAR ohne Messmasten zu erstellen
- Doppler-LiDAR können nur die radiale Windgeschwindigkeit entlang des Laserstrahls messen. Zur Bestimmung des dreidimensionalen Windvektors muss in mindestens drei Richtungen gemessen werden
- LiDAR sind eine smarte alternative zu Messmasten
- LiDAR haben gegenüber einer Messmastmessung vor allem im komplexen Gelände und bei niedrigen Wolken Nachteile
- Der Fehler im komplexen Gelände kann mit CFD Simulationen abgeschätzt werden
- Mit der LiDAR Fehlerkarten lassen sich Messunsicherheiten vorab darstellen => Eine Optimierung der Auswahl des Messstandortes wird möglich

*VIELEN DANK FÜR DIE
AUFMERKSAMKEIT*



Fraunhofer

IWES

Dr.-Ing. Doron Callies

Onshore Standortbewertung
Abteilung Windparkplanung und Betrieb

Fraunhofer Institut für Windenergie und
Energiesystemtechnik (Kassel)

Königstor 59 | 34119 Kassel

doron.callies@iwes.fraunhofer.de

www.iwes.fraunhofer.de

References

Klaas, T., Pauscher, L., Callies, D., 2015. A comparison of LiDAR and mast measurements in complex terrain and its simulation using CFD. Meteorologische Zeitschrift (accepted)