

IEA Windenergie Task 32: Wind LIDAR Systeme für die Entwicklung der Windenergie

Arbeitsperiode 2019 – 2021

A. Krenn, A. Stökl

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

57/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter nachhaltigwirtschaften.at

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist.

Nutzungsbestimmungen: nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/

IEA Windenergie Task 32: Wind LIDAR Systeme für die Entwicklung der Windenergie

Arbeitsperiode 2019 – 2021

DI Andreas Krenn, Dr. Alexander Stökl
Energiewerkstatt

Friedburg, Mai 2023

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	8
3	Ausgangslage	9
	3.1. Windmessungen mit Wind-LiDAR.....	9
	3.2. Herausforderungen in der Anwendung von Wind-LiDAR.....	10
4	Projekthalt	12
	4.1. Der IEA Wind TCP Task 32.....	12
	4.2. Schwerpunkte im Österreichischen Teilprojekt.....	12
	4.2.1. Vergleichende Datenverfügbarkeit von LiDAR-Messkampagnen	13
	4.2.2. Messgenauigkeit und Unsicherheiten von LiDAR-Messungen im komplexen Gelände	14
5	Ergebnisse	17
	5.1. Ergebnisse aus dem Task	17
	5.2. Ergebnisse des Österreichischen Teilprojekts	18
	5.2.1. Vergleichende Datenverfügbarkeit von LiDAR-Messkampagnen	18
	5.2.2. Messgenauigkeit und Unsicherheiten von LiDAR-Messungen im komplexen Gelände	21
6	Vernetzung und Ergebnistransfer	28
7	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	30

1 Kurzfassung

LiDAR-Systeme („Light Detection And Ranging“) werden seit über einem Jahrzehnt im Bereich der Windenergie eingesetzt und haben maßgeblich zur Kostenreduktion der letzten Jahre beigetragen. Zwar ist der Reifegrad der Technologie mittlerweile sehr hoch, dennoch sind Wind-LiDAR-Geräte in der Windenergieindustrie noch nicht gänzlich akzeptiert.

Um die bestehenden Hemmnisse zu minimieren, wurde im Jahr 2013 der Task 32 des IEA Wind TCP ins Leben gerufen (seit 2022: Task 52), der sich seitdem mit den Möglichkeiten und Herausforderungen der Anwendung von LiDAR-Systemen auseinandersetzt.

Für Österreich sind aufgrund der komplexen Topographie vieler WKA-Standorte vor allem die Themen von LiDAR im komplexen Gelände und die LiDAR-Verfügbarkeit an alpinen Standorten relevant. Demnach bildeten diese beiden Themenbereiche die Schwerpunkte der Teilnahme am Task 32 durch die Energiewerkstatt:

Der erste nationale Arbeitsschwerpunkt im Rahmen des Task 32 war eine vergleichende Untersuchung von LiDAR-Verfügbarkeiten an alpinen Standorten. LiDAR-Messungen beruhen auf der Streuung von Laserlicht an Luftaerosolen. In sehr sauberer Luft mit nur wenigen Aerosolen ist daher die Verfügbarkeit der Messungen oft stark eingeschränkt. Für eine Quantifizierung dieser Problematik wurden die Verfügbarkeiten von Windmessungen an alpinen und an Flachlandstandorten im Jahresverlauf ausgewertet. Die Ergebnisse bestätigten einen drastischen Unterschied in der Verfügbarkeit, die an Bergstandorten, insbesondere im Winter, auf durchschnittlich etwa 50% absank. Da Bergstandorte in großer Seehöhe außerhalb Österreichs kaum für die Windenergie genutzt werden, war die Problematik in dieser Form in den bisherigen internationalen Erfahrungen zu LiDAR-Windmessungen nicht bekannt. Die Ergebnisse zu diesem Arbeitsschwerpunkt werden in Abschnitt 5.2.1 des vorliegenden Dokuments vorgestellt.

LiDAR-Messungen in komplexem Gelände sind der zweite Schwerpunkt der Österreichischen Teilnahme am Task 32. Bei einer LiDAR-Windmessung müssen jeweils Daten von Messstrahlen in unterschiedlicher Richtung zu einem Windvektor kombiniert werden. Für diese sogenannte Rekonstruktion der Windgeschwindigkeit geht man von einer stetigen und homogenen Strömung aus. Im komplexen Gelände sind diese Bedingungen oft nicht erfüllt, wodurch sich eine Messunsicherheit ergibt. Für die Quantifizierung dieser Unsicherheit und die Bewertung möglicher Korrekturmethode wurde innerhalb einer von der Energiewerkstatt geleiteten Arbeitsgruppe des Task 32 in den Jahren 2019 bis 2022 eine Vergleichsstudie durchgeführt. Als Basis dafür dienten Messdaten von Österreichischen alpinen Standorten. Die Ergebnisse dieser Studie wurden 2022 in dem Bericht „Comparative Exercise on Ground Based Lidar in Complex Terrain“ veröffentlicht. Eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse in deutscher Sprache bildet den Abschnitt 5.2.2 des vorliegenden Berichts.

2 Abstract

LiDAR („Light Detection And Ranging“) systems have been used for wind energy applications for more than a decade and have contributed significantly to a cost reduction in the last few years. Although the degree of maturity of the technology has risen to a high level, wind-LiDAR-devices are still not fully accepted in the wind energy industry.

To minimize the existing obstacles, the Task 32 of the IEA Wind TCP was launched in 2013 (since 2022: Task 52). Since then, Task 32 has been dealing with the possibilities and challenges of the application of LiDAR systems in Wind energy.

Due to the complex topography of many wind turbine sites, the topics of LiDAR in complex terrain and LiDAR availability at mountainous locations are particularly relevant for Austria. Accordingly, these two topics formed the focus of the Task 32 participation of Energiewerkstatt:

The first national focus in the framework of Task 32 was a comparative study of LiDAR availability at alpine locations. LiDAR measurements are based on the scattering of laser light at aerosols suspended in the air. In very clean air with little aerosols, the availability of the measurements is therefore often severely limited. To quantify this problem, the availability of wind measurements at alpine and lowland locations over the course of the year has been evaluated. The results confirmed a large difference in availability, which, especially in winter time, dropped to about 50% on average at mountainous locations. Since outside of Austria mountain locations at high altitudes are seldom used for wind energy, this issue was not apparent in this form in previous international experience with LiDAR wind measurements. The results of this evaluation are presented in Section 5.2.1 of the present document.

LiDAR measurements in complex terrain are the second focus of the Austrian participation in Task 32. For a wind-LiDAR-measurement, data from measuring beams in different directions must be combined to obtain a wind vector. For this so-called reconstruction of the wind speed, a constant and homogeneous flow is assumed. In complex terrain, this assumption is often not met, resulting in measurement uncertainty. In order to quantify this uncertainty and evaluate possible correction methods, a comparative study has been carried out from 2019 to 2022 by a working group led by Energiewerkstatt in the framework of Task 32. Measurement data recorded at Austrian alpine locations served as the basis for this study, the results of which were then published in 2022 in the report "Comparative Exercise on Ground Based Lidar in Complex Terrain". A summary of these results in German language is given in Section 5.2.2 of the present report.

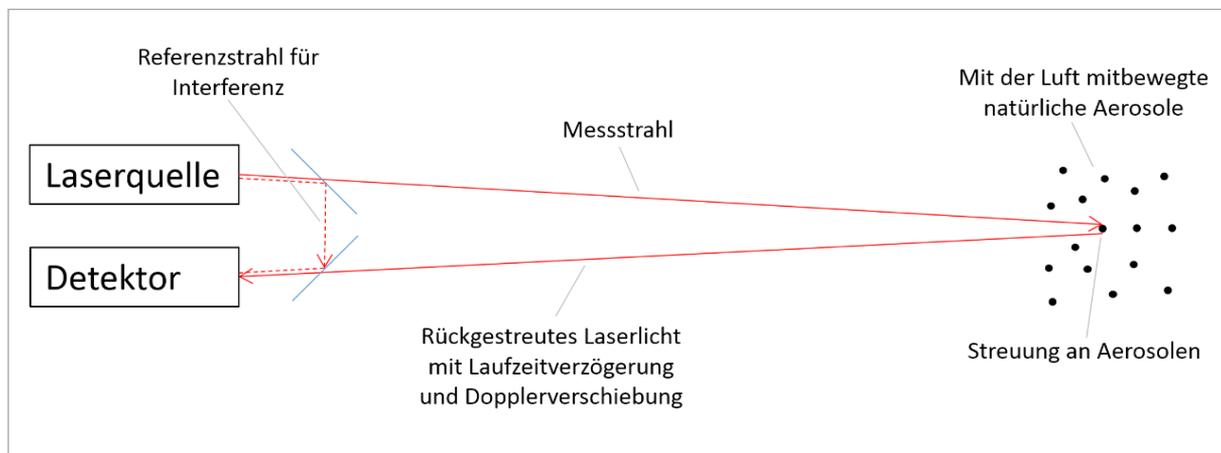
3 Ausgangslage

3.1. Windmessungen mit Wind-LiDAR

Wind-LiDAR (kurz für „Light Detection And Ranging“) ist eine Technologie, mit der eine Messung von Windgeschwindigkeiten mittels Laserstrahlen über größere Entfernungen hinweg möglich ist. Auf diese Weise können mit einem in Bodennähe aufgestellten Gerät Windgeschwindigkeiten bis in eine Höhe von mehreren hundert Metern über dem Boden gemessen werden. Aus diesem Grund sind Wind-LiDAR-Geräte eine sehr attraktive Technologie für Fragestellungen aus der Windenergie. Für manche Anwendungen in der Windenergie ist es somit auch möglich, aufwendig und teuer zu errichtende Windmessmasten durch bodenbasierte Wind-LiDAR-Messungen zu ersetzen.

Eine Wind-LiDAR-Messung basiert auf der Aussendung eines Laserstrahls in das zu vermessende Luftvolumen. Ein geringer Teil des Laserlichts wird an den in der Luft befindlichen Aerosolen gestreut. Die Streuung erfolgt grundsätzlich in alle Richtungen, aber ein – wiederum sehr kleiner – Teil der Streuung erfolgt zurück zum LiDAR-Gerät, das dieses zurückgestreute Laserlicht detektiert. Aus der Dopplerverschiebung des detektierten Signals kann man auf die Geschwindigkeit der Aerosole – bzw. der Luftströmung, die diese Aerosole transportiert – schließen. Die Bestimmung der Messentfernung zwischen LiDAR-Gerät und Luftvolumen kann entweder über eine optische Fokussierung erfolgen oder aus einer Messung der Laufzeit des Laserlichts. Die Funktionsweise eines LiDAR-Gerätes ist in Abbildung 1 illustriert.

Abbildung 1: Messprinzip einer LiDAR Messung.



Gemäß dem beschriebenen Messprinzip, kann eine solche LiDAR-Messung immer nur die Windgeschwindigkeitskomponente entlang des Laserstrahls messen. Für die Erfassung des Windgeschwindigkeitsvektors müssen daher mehrere solcher Einzelmessungen kombiniert werden. Bei den hier betrachteten bodengebundenen „vertical profiling“ LiDAR-Geräten, wird die Messung in verschiedene Raumrichtungen durch ein Kippen des Laserstrahls, der an der Oberseite des Geräts durch ein Fenster austritt, aus der Vertikale in verschiedene Richtungen bewerkstelligt. Die Messungen in den unterschiedlichen Richtungen erfolgen in einer festgelegten Abfolge in einem Intervall von etwa einer Sekunde. Je nach einem Durchlauf dieses Abtastmusters können dann durch

Kombination der einzelnen Messwerte die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung rekonstruiert werden. Da in dieser Rekonstruktion Einzelmessungen an unterschiedlichen Orten (Strahlrichtungen) und an unterschiedlichen Zeitpunkten kombiniert werden müssen, muss man dazu Annahmen zu Struktur und Variabilität des Strömungsfeldes treffen, wobei in den allermeisten Fällen die einfachste Annahme einer homogenen, stationären Strömung verwendet wird.

Zusätzlich zu den erwähnten bodengebundenen „vertical profiling“ LiDAR-Geräten gibt es auch andere Einsatzmöglichkeiten von Wind-LiDAR in der Windenergie, bspw. auf den Gondeln von Windkraftanlagen montierte LiDAR-Geräte oder sogenannte „scanning LiDARs“, die mit einem oder mehreren Strahlen beliebig im Raum verteilte Messpunkte anpeilen. In dem gegenständlichen Projekt werden ausschließlich bodenbasierten „vertical profiling“ LiDAR Geräte betrachtet.

3.2. Herausforderungen in der Anwendung von Wind-LiDAR

Trotz der vielfachen Vorteile die Wind-LiDAR für Anwendungen in der Windenergie bietet, wird diese Technologie zwar stetig zunehmend, aber vielfach dennoch zögerlich übernommen. Für viele Anwendungen werden daher – gerade auch in Österreich – Messmasten, mit allen damit verbundenen Kosten und Nachteilen eingesetzt. Diese Zurückhaltung hat mehrere Gründe:

Einer der Hauptgründe ist die mangelnde Akzeptanz der Ergebnisse von LiDAR-Messungen bei verschiedenen Stakeholdern in der Windenergiebranche, die wiederum durch die bislang unvollständige Abbildung von LiDAR und allgemein „remote-sensing“ Messungen in Normen und Standards bedingt ist. Zwar gibt es auch in dieser Hinsicht Fortschritte, bspw. durch die Veröffentlichung der IEC 61400-50-2 (International Electrotechnical Commission 2022), aber insbesondere in Hinsicht auf Anwendungen wie Ertragsberechnungen und Leistungskurvenverifikation gibt es hier noch wesentliche Lücken.

Der Hintergrund dafür ist, neben den erheblichen Vorlaufzeiten in der Normenerstellung, auch eine prinzipiell ungenügende Basis an öffentlich zugänglichen Daten, um die technischen Fragestellungen abschließend und zufriedenstellend klären zu können. Hier kommt nun der IEA Wind Task 32 – und die Österreichischen Partizipation daran – ins Spiel. Als ersten Schritt gilt es durch internationalen Austausch von Daten und Erfahrungen eine Basis für Empfehlungen zusammenzutragen. In dem vorliegenden Projekt wurden zwei der wesentlichen offenen Fragestellungen zu Wind-LiDAR betrachtet; und zwar (1) die technische Verfügbarkeit bei geringen Aerosolkonzentrationen und (2) die Messunsicherheiten an Standorten im komplexen Gelände sowie geeignete Korrekturmethode dazu. Die erarbeiteten Empfehlungen können dann im Rahmen des Tasks veröffentlicht, an die LiDAR Anwender:innen kommuniziert, und in der Praxis umgesetzt und erprobt werden. Erst wenn auf diese Weise bezüglich der technischen Fragestellungen ein hinreichender Konsens hergestellt ist, kann sinnvoll eine Umsetzung in der Normung erfolgen.

Darüber hinaus gibt es aber auch noch andere Aspekte, die der Weiterverbreitung von Wind-LiDAR entgegenstehen. So beziehen sich historisch bedingt die Kriterien und Grenzwerte der WKA-Hersteller für die Bewertung von Turbulenzbedingungen an einem Standort zumeist auf eine Punktmessung mit einem Schalenanemometer. Eine solche Bewertung ist ein wesentlicher Teil der Standortqualifizierung eines Anlagentyps, da die Turbulenzen für die Ermüdungslasten (Dauerfestigkeit) vieler Anlagenkomponenten ausschlaggebend sind. Da sich Turbulenzdaten von Volums- und von Punktmessungen prinzipiell unterscheiden und auch nur schwer ineinander

umgerechnet werden können, ist die Messung von Turbulenzintensitäten ebenfalls einer der Gründe für die anhaltende Verwendung von klassischen (Punktmessungs-)Anemometern und Messmasten. Dennoch ist zu erwarten, dass die Weiterverbreitung von LiDAR zu einem graduellen Wechsel führen wird.

4 Projektinhalt

4.1. Der IEA Wind TCP Task 32

Der IEA Wind Task 32 hat es sich zur Aufgabe gemacht, durch internationalen Austausch von Erfahrungen und Informationen die bestehenden Hemmnisse für den Einsatz von LiDAR abzubauen, die Breitanwendung von Wind-LiDAR zu ermöglichen und die Vorteile dieser Technologie für die Windenergie nutzbar zu machen.

Der IEA Wind Task 32 wurde im Jahr 2013 ins Leben gerufen und obwohl es in diesem Jahrzehnt eine beeindruckende technische Entwicklung und eine Vervielfachung des Wind-LiDAR-Einsatzes in der Windenergie gegeben hat, sind weiterhin wichtige Fragestellungen offen. Die Abbildung von LiDAR in den für die Windenergie relevanten Normen und Standards lässt ebenfalls weiterhin zu wünschen übrig, was wiederum mit offenen technischen Detailfragen und der Verfügbarkeit von Vergleichsdaten zusammenhängt. Aus diesem Grund wird Wind-LiDAR auch in den kommenden Jahren durch den Task 52, dem Nachfolger des Task 32, weiterhin ein aktiver Schwerpunkt im IEA Wind TCP bleiben.

Der gegenständliche Bericht bezieht sich auf die Tätigkeitsperiode des IEA Wind TCP Task 32 von 2019 bis 2022. In dieser Periode waren die folgende Nationen im Task 32 vertreten: China, Deutschland, Dänemark, Frankreich, Japan, Kanada, Niederlande, Norwegen, Schweiz, Südkorea, USA, Vereinigtes Königreich und Österreich

Im Kontrast zu anderen Tasks des IEA Wind TCP, ist der Task 32 sehr offen organisiert. Bei den meisten Veranstaltungen ist eine sehr niederschwellige und einfache Teilnahme möglich, was sich regelmäßig in großen Teilnehmerzahlen und einer großen Öffentlichkeitswirkung äußert. Der IEA Wind Task 32 (bzw. Task 52) stellt daher im akademischen als auch kommerziellen Bereich eine ganz wesentliche Institution zum Themenbereich für LiDAR in der Windenergie dar.

4.2. Schwerpunkte im Österreichischen Teilprojekt

Die Österreichische Windenergie nimmt im internationalen Vergleich in mancherlei Hinsicht eine Sonderstellung ein. Viele Standorte in den flacheren Regionen Ostösterreichs sind geographisch und meteorologisch weitgehend vergleichbar mit Windparks anderer Länder, bspw. Deutschland. LiDAR Windmessungen an solchen Standorten sind aus technischer Hinsicht weitgehend Standard. Lediglich spezifische Fragen wie Turbulenzmessungen mit LiDAR sind hier noch ungeklärt.

Zusätzlich und als Besonderheit im internationalen Vergleich, gibt es in Österreich aber auch viele Windenergieprojekte an alpinen Standorten. Solche Standorte bringen vielerlei spezifische Herausforderungen für eine Windenergienutzung mit sich, angefangen von Erschließung und Transport bis zu einer geringen Luftdichte und komplexen Windströmungen. So sind auch Wind-LiDAR-Messungen an alpinen Standorten mit anderen und größeren Herausforderungen als an Flachlandstandorten konfrontiert. Demgemäß bilden diese Herausforderungen bei LiDAR-Messungen die Schwerpunkte der Österreichischen Aktivitäten zu Wind-LiDAR im Rahmen des IEA Wind Task 32.

4.2.1. Vergleichende Datenverfügbarkeit von LIDAR-Messkampagnen

Während Mastmessungen auch an Standorten in alpinen Lagen im Regelfall eine Datenverfügbarkeit von mehr als 95% erreichen, kann die technische Verfügbarkeit von LiDAR-Geräten an solchen Standorten durch umweltbedingte Einflüsse stark eingeschränkt sein. Neben widrigen meteorologischen Bedingungen (Niederschlag, Nebel) ist dabei auch eine zu geringe Aerosoldichte (d.h. eine zu „saubere“ Luft) eine wesentliche Ursache für Ausfälle in der Datenerfassung.

Für die Bewertung der möglichen Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Datenverfügbarkeit wurden von der Energiewerkstatt die Daten von zehn LiDAR-Messungen an Standorten mit unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten aufbereitet. Für den Vergleich von Standorten im flachen und offenen Gelände mit Standorten im Alpenen Raum wurden jeweils fünf Messungen von Standorten dieser beiden Kategorien ausgewählt. Dabei wurde zusätzlich darauf geachtet, dass die Messzeiträume für beide Kategorien möglichst den ganzen Jahresverlauf gleichmäßig abdecken. Auf diese Weise soll die Untersuchung von systematischen Verfügbarkeitsunterschieden zwischen Messungen im Winter (Dezember bis Februar) und Messungen in den restlichen Monaten möglich sein.

Bei einer LiDAR-Messung werden die in kürzeren Intervallen (etwa eine Sekunde) vorgenommenen Einzelmessungen jeweils auf einen Mittelungszeitraum von 10 Minuten aggregiert. Je nach Messbedingungen kann aber nur bei einem Teil der Einzelmessungen ein verwertbares Signal detektiert werden. Die Anzahl der Messwerte pro 10-Minuten Mittelungsintervall ist somit nicht konstant. Der prozentuale Anteil der detektierten zu den ausgesendeten Laserimpulsen wird als „Verfügbarkeit“ einer LiDAR-Windmessung bezeichnet und wird vom LiDAR-Gerät parallel zur Windgeschwindigkeit aufgezeichnet.

Um die mutmaßliche Ursache für eine verringerte Messverfügbarkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt zuzuordnen, wurden eine Reihe von zusätzliche Messparametern vom LiDAR-Gerät, von parallel betriebenen Mastmessungen sowie von ausgewählten ZAMG-Wetterstationen herangezogen. Bei der Auswahl der Wetterstationen war ausschlaggebend, dass sich diese einerseits in räumlicher Nähe zum LiDAR-Standort befinden und andererseits die Standortcharakteristiken (insbesondere in Bezug auf die Seehöhe) denen der Windmessung ähneln. Dabei wurden folgende Messparameter betrachtet:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Niederschlagsintensität
- Schneedeckenhöhe (eine Schneedecke reduziert die Aufwirbelung von Aerosolen vom Boden)
- Wischfrequenz des am Laserfenster des LiDAR-Geräts angebrachten Scheibenwischers
- Solare Globalstrahlung als Indikator für das Vorhandensein von Nebel oder Bewölkung

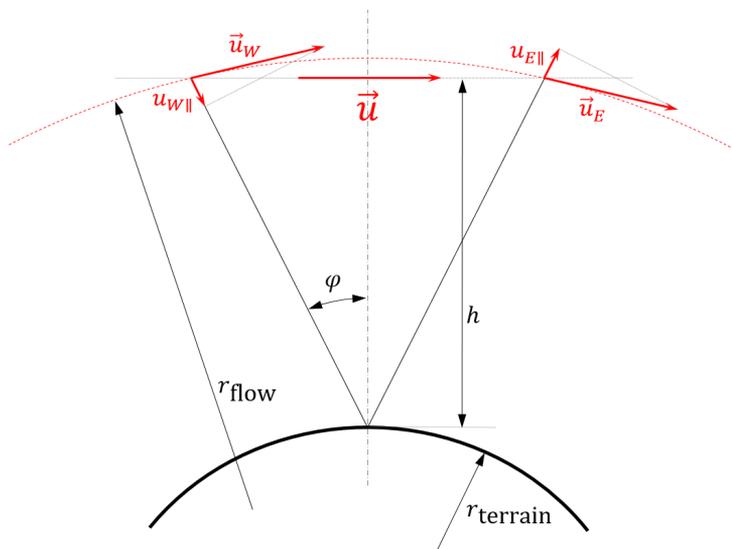
In der Auswertung wurden die beobachteten Verfügbarkeiten der LiDAR-Messungen mit diesen möglichen Einflussparametern korreliert und in statistischen Auswertungen bewertet.

4.2.2. Messgenauigkeit und Unsicherheiten von LiDAR-Messungen im komplexen Gelände

Komplexes Gelände und komplexe Strömungen sind wesentliche Herausforderungen für Wind-LiDAR-Messungen, insbesondere wenn keine parallele Mastmessung dazu betrieben wird (Clifton, Boquet, et al. 2015). Neben dem systematischen Unterschied zwischen einer Schalenanemometer-(Punkt-)Messung und einer LiDAR-(Volumen-)Messung, kann eine Wind-LiDAR-Messung im komplexen Gelände erheblich durch Strömungsinhomogenitäten beeinträchtigt sein, was eine zusätzliche Messunsicherheit mit sich bringt. Bis zu einem gewissen Grad ist es möglich, die im komplexen Gelände auftretenden Messabweichungen mit numerischen Strömungsmodellen zu korrigieren. Trotz positiver Berichte über Korrekturmethode für Wind-LiDAR im komplexen Gelände (Black, et al. 2020) bleibt die allgemeine Anwendbarkeit solcher Methoden – und von Wind-LiDAR im Allgemeinen – an Standorten im komplexem Gelände unklar. Eine der größten Herausforderungen bei der Beurteilung der Anwendbarkeit von Wind-LiDAR im komplexen Gelände ist die große Vielfalt der Standortbedingungen, einschließlich Geländeographie, Oberflächenrauheit, Vegetation und Strömungsschichtung, was es schwierig macht, Erfahrungen von einem Standort auf einen anderen zu übertragen.

Im komplexen Gelände wird die Windströmung von der Topographie beeinflusst und folgt – zumindest in den bodennahen Schichten – den Geländekonturen. Daher ist der Windvektor im Allgemeinen nicht horizontal und homogen, wie es in flachem Gelände der Fall wäre, sondern es gibt eine vertikale Komponente, die bei der Beschreibung des Windvektors berücksichtigt werden muss. Da die Messvolumina der einzelnen Strahlen einen horizontalen Abstand haben der in etwa der Messhöhe entspricht, kann diese vertikale Komponente für unterschiedlichen Strahlen unterschiedlich groß sein. In Abbildung 2 ist beispielhaft und auf zwei Dimensionen vereinfacht die der Geländekontur folgende Windströmung über eine Kuppe dargestellt.

Abbildung 2: Zweidimensionales Schema einer bodenbasierten LiDAR-Messung.



Aus der in Abbildung 2 illustrierten Geometrie einer bodenbasierten Wind-LiDAR-Messung kann man ablesen, dass die Horizontalkomponente der vom LiDAR gemessenen Windgeschwindigkeit $u_{x \text{ LiDAR}}$ (hier in Ost-West Richtung) folgendermaßen rekonstruiert werden kann:

$$u_{x \text{ LiDAR}} = \frac{u_{E\parallel} - u_{W\parallel}}{2 \sin \varphi}$$

Die Bedeutung der Variablen aus Abbildung 2 ist dabei:

h Messhöhe.

φ Winkel des Messstrahls aus der Vertikalen.

$\vec{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$ Windgeschwindigkeitsvektor an der Messposition mit den Komponenten in den Richtungen Ost-West (x), Nord-Süd (y), und der Vertikalkomponente (z).

\vec{u}_W Windgeschwindigkeitsvektor im linken (westlichen) Messvolumen.

\vec{u}_E Windgeschwindigkeitsvektor im rechten (östlichen) Messvolumen.

$u_{W\parallel}$ Komponente der Windgeschwindigkeit parallel zum linken (westlichen) Messstrahl.

$u_{E\parallel}$ Komponente der Windgeschwindigkeit parallel zum rechten (östlichen) Messstrahl.

r_{flow} Krümmungsradius der Windströmung an der Messposition.

r_{terrain} Krümmungsradius der Geländekontur an der Messposition.

Datensätze

Als Basis für diese Studie wurden fünf österreichische Windmessungen mit parallelen Daten aus einer bodenbasierten LiDAR Messung und einer unmittelbar benachbarten Mastmessung verwendet. Alle fünf Standorte liegen an Alpinen Standorten mit komplexen Geländeformen. Die nähere Umgebung um die Messpositionen ist jeweils mit von Nadelwäldern unterbrochenen, offeneren Flächen mit niedrigerer Vegetation geprägt. Insgesamt weisen daher alle Messstandorte eine hohe Oberflächenrauigkeit auf, die hohen Turbulenzintensitäten erwarten lässt.

Für den Vergleich zwischen LiDAR- und Mastmessungen wurden nur jene Zeiträume berücksichtigt, in denen parallele Daten vom LiDAR und vom Messmast vorliegen. Für die Angleichung an die Anemometerhöhen der Messmasten wurde eine lineare Interpolation der jeweils unmittelbar darüber- und darunterliegenden LiDAR-Messhöhen verwendet. Die Interpolation wurde für 10-Minuten-gemittelte Daten durchgeführt.

Messdaten mit möglicher Beeinflussung durch Anemometervereisung oder durch die Nachlaufströmung von Mast oder Blitzableiter, wurden aus dem Datensatz entfernt. Für die LiDAR-Daten wurde ein Verfügbarkeitssschwellenwert von 80 % (pro 10-Minuten Mittelungsintervall) verwendet. Da bei geringen Windgeschwindigkeiten die relativen Messabweichungen sehr groß

werden können und dieser Windgeschwindigkeitsbereich aus Windenergiesicht nicht relevant ist, wurde für die Auswertungen Windgeschwindigkeiten unter 2,5 m/s nicht berücksichtigt.

Korrekturmethode für die LiDAR-Messungen

Für die Rekonstruktion der Windgeschwindigkeit aus den Einzelmessungen entlang der Messstrahlen in Wind-LiDAR-Geräten wird im Regelfall von einer homogenen und stationären Strömung ausgegangen. Wenn im komplexem Gelände diese Annahme nicht erfüllt ist, hat das Messabweichungen und Messunsicherheiten zur Folge. Numerische Modellierung der Strömungsverhältnisse ist eine Methode solche Gelände-induzierte Messfehler zu identifizieren und um Korrekturfaktoren für die LiDAR-Messwerte zu berechnen. Eine vereinfachte Methode zur Schätzung des geländeabhängigen Messfehlers bietet der geometrische Ansatz von (Bingöl, Mann und Foussekis 2008) mit Erweiterungen von (Albers, Janssen und Mander 2010).

In dem gegenständlichen Projekt wurde eine Reihe unterschiedlicher numerischer Modellierungsansätze für die Beschreibung der Windströmung im komplexen Gelände angewendet und verglichen. Zusätzlich wurden unterschiedliche Eingangsdaten und Parametrisierungen für die Oberflächenrauheit, den Einfluss von Vegetation und Bewaldung und die atmosphärische Stratifikation verwendet. Im Folgenden sind die, von den jeweiligen Projektpartnern verwendeten Korrekturmethode, aufgelistet:

GPI (Green Power Investment), Japan: Large Eddy Simulation (LES) mit der Software RIAM-COMPACT (Uchida und Takakuwa 2020) (Uchida und Ohya 2011)

Ramboll, Deutschland: CFD Simulation mit der Software Meteodyn.

Vaisala (vormals Leosphere), Frankreich:

- (1) Das proprietäre, in den LiDAR-Geräten „Windcube“ implementierte Korrekturschema FCR (Flow Complexity Recognition).
- (2) eine Variante von FCR mit Berücksichtigung von bewaldeten Flächen.
- (3) Berechnungen mit der CFD Software Meteodyn.

Deutsche WindGuard (Deutschland): Eigens entwickeltes Korrekturschema basierend auf Strömungssimulationen mit der Software OpenFOAM.

Geometrische Korrektur nach (Bingöl, Mann und Foussekis 2008).

Eine detaillierte Beschreibung der numerischen Methoden, der verwendeten Eingangsdatensätze und der Parametrisierungen findet sich (in englischer Sprache) in dem umfassenden Bericht zu diesem Arbeitspaket (Stökl, et al. 2022).

5 Ergebnisse

5.1. Ergebnisse aus dem Task

Die gemeinsam im Rahmen des Task 32 erstellten Publikationen fallen in unterschiedliche Kategorien: Whitepapers sind an die breite Community von LiDAR-Anwendern gerichtete Publikationen, die jeweils den aktuellen Stand der Forschung zu einem Thema aufbereiten, praktische Hinweise geben und auf einschlägige Publikationen, Richtlinien und Standards verweisen. Auf diese Weise werden Forschungsergebnisse effizient an eine breitere Öffentlichkeit von LiDAR-Anwendern kommuniziert. Darüberhinausgehende und umfangreichere Publikationen sind die Empfehlungen des Task 32, in denen neben einer Aufbereitung eines Themas auch klare Empfehlungen, Handlungsanleitungen und Best Practices formuliert sind. Schließlich werden auch im Rahmen der meisten im Task 32 abgehaltenen Workshops Arbeitspapiere und Protokolle veröffentlicht.

Publikationen aus dem Task 32 in dessen Arbeitsperiode von 2019 bis 2021 umfassen u.a. folgende Dokumente:

Increasing the impact of wind lidar through digitalization, Clifton, A.; Vasiljevic, N.; Würth, I., 2019, <http://doi.org/10.5281/zenodo.3447756>

In diesem Whitepaper werden Möglichkeiten und Perspektiven für LiDAR Anwendungen durch Digitalisierung beschrieben und die notwendigen Schritte zu deren Umsetzung diskutiert. Dazu zählen vor allem die Möglichkeiten der digitalen Kommunikation und der Standardisierung von Datenformaten und Schnittstellen.

The OpenLidar Initiative for collaboration on wind lidar hardware and software, Clifton, A.; Vasiljevic, N.; Wuerth, I.; Raach S.; Haizmann, F.; Fürst, H., 2019, <http://doi.org/10.5281/zenodo.3414197>

In diesem Whitepaper wird die OpenLidar Initiative vorgestellt, welche die Zusammenarbeit von Anbietern von LiDAR-Hard- und Software fördern soll. Dafür soll eine modulare LiDAR Architektur mit klar definierten und dokumentierten Schnittstellen entworfen werden. Mögliche Module sind z.B. dabei Energieversorgung, photonische Einheit, Optik, Signalverarbeitung, Kommunikation, Datenspeicherung und Gehäuse.

A Review of Guidance for Using Ground-Based Vertically-Profiling Wind Lidar For Wind Resource Assessment, Andrew Clifton, Nicolas Jolin, **Alexander Stökl**, Paul Mazoyer, Peter Clive, 2020, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3862384>

Aktualisierte Empfehlungen des IEA WIND TCP Task 32 für die Verwendung von bodengebundenen LiDAR für die Ertragsbewertung von Windenergieprojekten. Diese Empfehlung baut auf der im Jahr 2013 veröffentlichten IEA Wind Recommended Practice RP 15 auf, und berücksichtigt die zwischenzeitliche technische Weiterentwicklung und die geänderten normativen Rahmenbedingungen durch die Neuauflage der IEC 16400-12-1 im Jahr 2017. Die in diesem Dokument aktualisierten Empfehlungen des IEA WIND TCP Task 32 gehen auf diese Änderungen ein und bieten damit weiterhin eine umfassende Orientierung für Anwender von bodenbasierten LiDAR Geräten.

Die Empfehlung wurde unter Mitarbeit der Energiewerkstatt, vertreten von Alexander Stökl,

erarbeitet. Gemäß der Österreichischen Expertise und des von Österreich geleiteten Subtasks, hat die Energiewerksatt hierbei die Praxiserfahrungen aus der Ertragsgutachtenerstellung und zum Thema von LiDAR im komplexen Gelände beigetragen.

IEA Wind Task 32 webinar summary: Approaches in filtering data from pulsed wind lidar, Alcayaga L., Floors R., and Santos P., ed. Clifton, A., 2020, <https://zenodo.org/record/3909488>

Zusammenfassung des Webinars "Filtering lidar data" vom 7 April 2020, bei dem es um geeignete Methoden und die Fehlervermeidung bei der Filterung von LiDAR-Messdaten ging.

Survey of Correction Techniques for Remote Sensing Devices in Complex Flow, Andrew Black, Paul Mazoyer, Scott Wylie, Mishu Debnath, Andrew Lammers, Taurin Spalding und Robert Schultz, 2020, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4302363>

Präsentation des Webinars "Survey of Correction Techniques for Remote Sensing Devices in Complex Flow" vom 8. Dezember 2020. Bei diesem Webinar im Rahmen des IEA Wind TCP Task 32 wurden Ergebnisse mehrerer Korrekturmethode für LiDAR im komplexen Gelände vorgestellt und verglichen. Zusätzlich zu den Ergebnissen ging dieses Webinar auch auf die Details zu den Datensätzen, der Geländeklassifizierung und den Korrekturmethode ein.

IEA Wind Task 32 Workshop Minutes: Workshop 16 - Digitalisation of Wind Lidar, Andrew Clifton, 2021, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4646945>

Protokoll zum Workshop zum Thema Digitalisierung von Wind-LiDAR der am 17. März 2021 abgehalten wurde. Bei diesem Workshop wurde die Bedeutung von Digitalisierung für LiDAR-Hard- und Software und für die Anwender und Stakeholder von Wind-LiDAR im Rahmen von Präsentationen, Gruppenarbeiten und Diskussionen ausgelotet.

5.2. Ergebnisse des Österreichischen Teilprojekts

5.2.1. Vergleichende Datenverfügbarkeit von LiDAR-Messkampagnen

Bei einer bodenbasierten Wind-LiDAR-Messung werden im Regelfall die Windgeschwindigkeiten in einer Reihe von unterschiedlichen Messhöhen erfasst. Diese Messhöhen werden jeweils beim Aufbau der Messung parametrisiert und weisen daher im Allgemeinen bei verschiedenen Messungen unterschiedliche Werte auf. Für die Vereinheitlichung des Vergleichs in diesem Projekt wurden aus den vorliegenden Messdaten vier unterschiedliche Messhöhen ausgewählt die, mit geringen vertikalen Abweichungen, in alle Messungen vertreten sind: Die niedrigsten Messungen fanden in einem Höhenbereich zwischen 40 m bis 60 m statt, der hier als „Höhe 1“ zusammengefasst wird. „Höhe 2“ beschreibt Messungen zwischen 75 m und 85 m und bildet den bei Windmessungen zumeist wichtigsten Höhenbereich ab. „Höhe 3“ und „Höhe 4“ decken die Bereiche von 135 m bis 145 m und von 180 m bis 200 m ab. Da LiDAR-Geräte auf eine Messhöhe von etwa 80 m optimiert sind, weisen LiDAR-Messungen in dieser Höhe (entspricht hier dem Höhenbereich „Höhe 2“) die beste Verfügbarkeit auf. In größeren Höhen (Höhe 3 & Höhe 4) nimmt die Verfügbarkeit aufgrund der geometrischen und atmosphärischen Schwächung des zurückgestreuten Lichts deutlich ab.

Eine Zusammenfassung der LiDAR-Datenverfügbarkeiten für die betrachteten Flachland- und Bergstandorte in den Sommer- und Wintermonaten findet sich in Tab. 2. Erwartungsgemäß sind in im Höhenbereich „Höhe 1“ die größten Verfügbarkeiten ausgewiesen. Die Alpinstandorte zeigen auf

allen Messhöhen deutlich niedrigere Verfügbarkeitswerte als jene im Flachland. Die Unterschiede betragen je nach Messhöhe bis zu 30%. Beispielsweise wird an den Flachlandstandorten auf Höhe 3 eine über das Jahr gemittelte Verfügbarkeit von 85% erreicht während Bergstandorte nur 55% aufweisen. Diese Auswertung bestätigt somit eine anfängliche, auf anekdotischen Hinweisen beruhende Vermutung, dass LiDAR-Messungen an Bergstandorten deutlich geringere Verfügbarkeitswerte aufweisen.

Die Aufteilung in Winter- und Sommermessungen verdeutlicht dieses Bild. So verringert sich die Verfügbarkeit bei Standorten im Flachland über die Wintermonate nur um wenige Prozent. Hingegen weichen die Datenverfügbarkeiten an den Alpinstandorten im Winter stark von den Messungen in den Sommermonaten ab. Zwar weisen Bergstandorte auch im Sommer um 15% bis 20% niedrigere Verfügbarkeiten als Messungen im Flachland auf, in den Wintermonaten verstärkt sich dieser Unterschied jedoch nochmals drastisch. Hier sind die Verfügbarkeiten um bis zu 60% niedriger als an Flachlandstandorten und überschreiten in keiner Messhöhe eine Verfügbarkeit von 50%. Die im Jahresdurchschnitt schlechteren Verfügbarkeiten an Bergstandorten können somit zu einem großen Anteil auf die Unterschiede in den Wintermonaten zurückgeführt werden. Die anekdotischen Erfahrungen werden somit auch in dieser Hinsicht durch die Auswertung der betrachteten Datensätze gut gestützt.

Tabelle 1: Vergleich der Datenverfügbarkeiten der betrachteten LiDAR-Messungen für unterschiedliche Messhöhen differenziert nach Standortsituierung und Jahreszeit.

	Höhe 1	Höhe 2	Höhe 3	Höhe 4
Flachland - Ganzjährig	94%	96%	85%	54%
Bergstandorte – Ganzjährig	65%	73%	55%	39%
Flachland - Sommer	96%	97%	86%	52%
Flachland - Winter	92%	94%	82%	56%
Berg - Sommer	80%	83%	66%	49%
Berg - Winter	32%	48%	30%	17%

Aus den in Tabelle 1 angeführten Zahlen für die Verfügbarkeit geht noch nicht hervor, welche Ursache damit jeweils in Zusammenhang steht. Im Allgemeinen lassen sich zwei Arten von Wetterbedingungen identifizieren, welche zu besonders geringen Verfügbarkeiten führen. Wenn sich zu wenig Aerosole in der Luft befinden, wird zu wenig von dem ausgestrahlten Laserstrahl zurückgestreut. Eine Messung ist dann aufgrund des zu schwachen Signals nicht möglich. Solche Bedingungen werden als „clean air“-Verhältnisse bezeichnet. Bei Nebel oder Niederschlag tritt eine gegenteilige Situation ein. In diesem Fall wird der ausgesandte Strahl so stark gestreut und absorbiert, dass eine Ausbreitung des Laserstrahls bis in die angestrebten Messhöhen nicht möglich ist. In beiden Fällen hat das zur Folge, dass kein oder zu wenig Messsignal vom LiDAR-Gerät empfangen wird. Rein aus messtechnischer Sicht lassen sich daher diese beiden möglichen Ursachen für eine geringe Verfügbarkeit nur sehr schlecht unterscheiden. Deshalb wurde versucht, aus

Korrelationen mit den zusätzlich betrachteten meteorologischen Größen eine Zuordnung zu diesen beiden möglichen Ursachen vorzunehmen. Bei keiner der betrachteten Größen (Niederschlag, Vorhandensein einer Schneedecke, Luftfeuchtigkeit, solare Strahlungsintensität und Lufttemperatur) konnten jedoch ein in dieser Hinsicht klarer Zusammenhänge gefunden werden. Eine Diskussion der einzelnen meteorologischen Größen unterbleibt daher an dieser Stelle. Diesbezüglich sei auf den entsprechenden Abschnitt in dem Ergebnisbericht zu dieser Auswertung (Energiewerkstatt 2022) verwiesen.

Ungeachtet der im Detail unklaren Korrelationen der meteorologischen Größen, ließen sich dennoch eine Reihe von Schlussfolgerungen aus den Datensätzen ableiten:

- Regen, allgemein Niederschlag, und Nebel tragen unbestritten zu einer geringen Verfügbarkeit bei. In einzelnen Ereignissen ist das auch klar in den Datensätzen nachvollziehbar.
- Niederschläge treten sowohl an Flachland- als auch an Bergstandorten über das ganze Jahr verteilt auf. Die größten Niederschlagsmengen fallen in Österreich in den Sommermonaten an. Abgesehen von spezifischen geographischen Gegebenheiten (bspw. Staulagen), sind keine großen systematischen Unterschiede in der Niederschlagshäufigkeit zwischen Berg- und Flachlandstandorte zu erwarten. Nebellagen sind hingegen vor allem in den kälteren Jahreszeiten zu erwarten. Inversions-Wetterlagen, als eine häufige Ursache für Bodennebel, können dabei nur Standorte im Flachland betreffen.
- Sowohl Niederschlag als auch Nebel können daher nicht die Ursache für die eklatanten Unterschiede in der Verfügbarkeit zwischen Berg- und Flachlandstandorten sein (siehe Tabelle 1).
- An Bergstandorten in den Wintermonaten liegt die Verfügbarkeit im Durchschnitt in keiner Höhe über 50% (siehe Tabelle 1). Nebel oder Niederschlag kommen als Ursache für eine Nicht-Verfügbarkeit über so lange Zeiträume nicht in Frage.
- Gemäß dem Ausschlussprinzip kann somit nur ein Mangel an Aerosolen die Ursache für die systematisch geringen LiDAR-Verfügbarkeiten an Berg-Standorten sein.

Diese Erklärung für die geringen LiDAR-Verfügbarkeiten ist aus meteorologischer Sicht sehr plausibel: Die allermeisten Aerosolquellen (Landwirtschaft, Bodenerosion, Verkehr, Industrie, Hausbrand, Seesalz) befinden sich in Bodennähe. Mischungsprozesse durch vertikalen Luftaustausch transportieren dann Aerosole in größere Höhen. Das Höhenprofil der Aerosolkonzentration ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen den vertikalen Mischungsprozessen und dem Absinken der Aerosole.

In den beobachteten LiDAR-Verfügbarkeiten spiegelt sich dieses Höhenprofil der Aerosolkonzentration durch eine systematisch geringere Verfügbarkeiten an Bergstandorten wieder. Eine in größerer Höhe gegen einen Berg anströmende Luftmasse bringt von Haus aus weniger Aerosole mit als eine bodennahe Grenzschichtströmung. Gerade in einer Grenzschicht, also im Bereich eines ausgeprägten Höhengradienten der Windgeschwindigkeit in Bodennähe, wird durch die Luftscherung Turbulenz erzeugt, die eine effiziente vertikale Durchmischung bewirkt.

Die jahreszeitlichen Unterschiede in der LiDAR-Verfügbarkeit an Bergstandorten ergeben sich zwanglos aus der stabileren atmosphärische Schichtung im Winter. Im Sommer sorgt die Sonneneinstrahlung für eine starke Erwärmung des Bodens und damit der bodennahen Schichten. Die bei überadiabatischen Temperaturgradienten einsetzende Konvektion („Thermik“) sorgt dann für eine effiziente vertikale Mischung bis in große Höhen. Im Winter hingegen entfällt dieser Mechanismus. Die Strahlungsbilanz ist überwiegend negativ, d.h. der Boden verliert mehr Energie

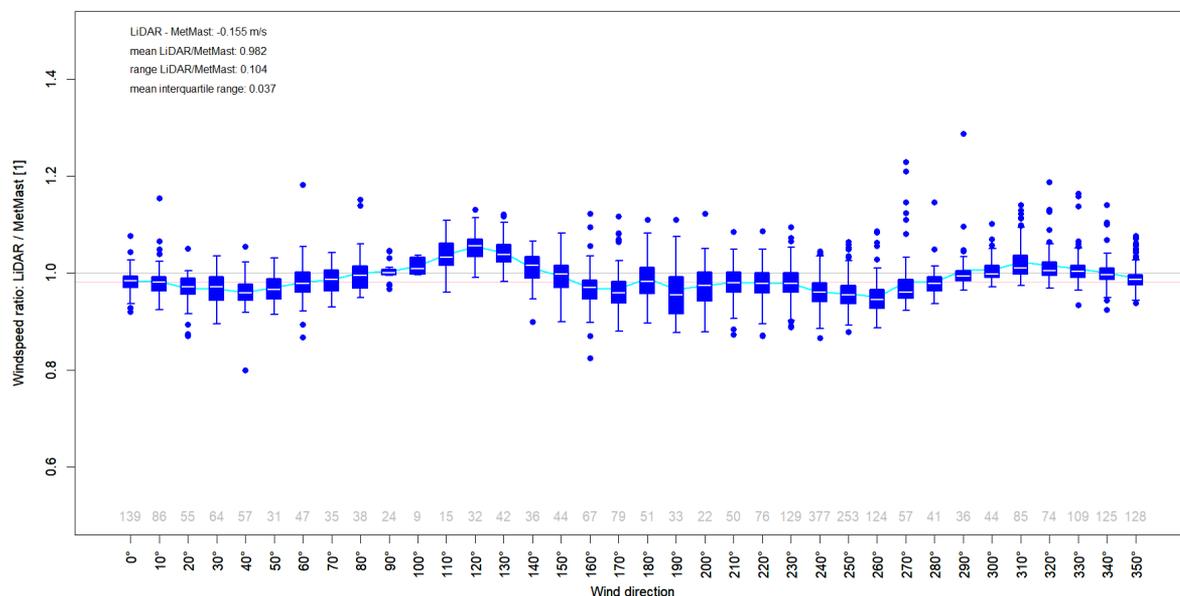
durch Abstrahlung als von der Sonne eingestrahlt wird. Das bedingt einen geringen (oder bei Inversionslagen sogar negativen) Temperaturgradienten und eine stabile atmosphärische Schichtung.

Dass an Flachlandstandorten die Verfügbarkeit auch im Winter auf einem hohen Niveau bleibt, lässt sich dadurch erklären, dass in der bodennahen Grenzschicht, wie oben beschrieben, die Windscherung laufend Turbulenz induziert, die, unabhängig von thermischer Instabilität, eine gute vertikale Durchmischung gewährleistet.

5.2.2. Messgenauigkeit und Unsicherheiten von LiDAR-Messungen im komplexen Gelände

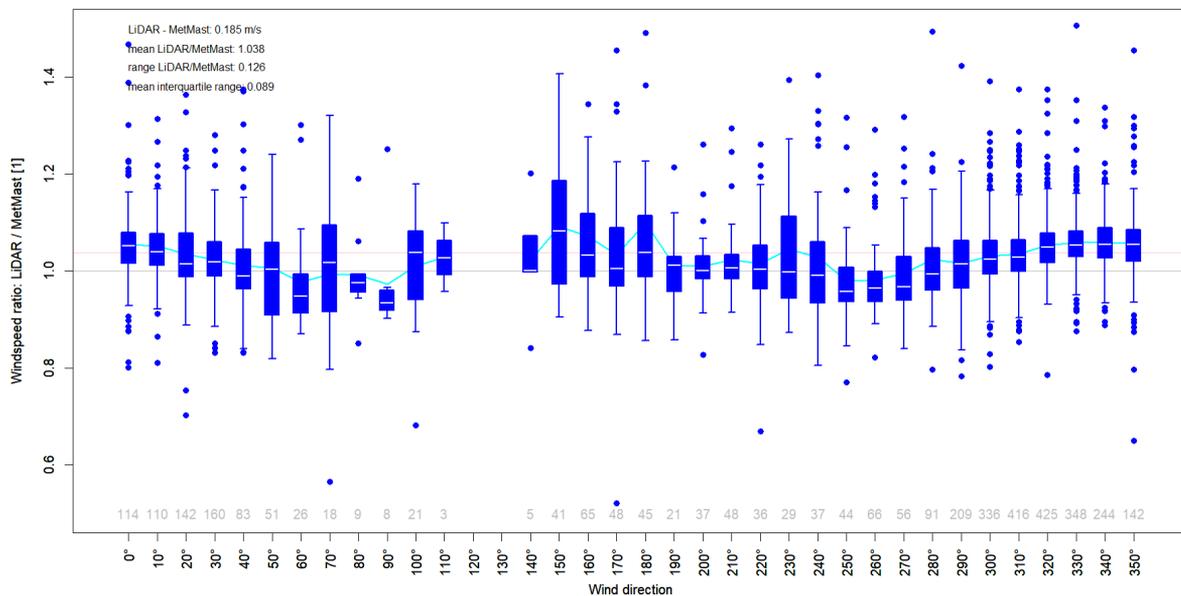
Für alle fünf betrachteten Standorte im komplexen Gelände ergab die Auswertung wesentliche systematische und stochastische Messabweichungen zwischen LiDAR- und Messmastmessung, wie beispielhaft in Abbildung 3 illustriert. Die Standorte werden hierbei alphabetisch von A bis E bezeichnet. In dieser Abbildung wird für jede Windrichtung in 10° Schritten die Verteilung des Verhältnisses von LiDAR- zu Mastmessung als Boxplot dargestellt. Dabei gibt der blaue Balken den Interquartilbereich, also den Bereich zwischen dem 25 %- und dem 75 %-Quantil, an. Die weiße, horizontale Markierung ist der Median der Verteilung. Die „Antennen“ ober- und unterhalb der Balken zeigen den Bereich mit Datenpunkten mit einer maximalen Länge des 1,5-fachen des Interquartilabstands. Datenpunkte außerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstands gelten als Ausreißer und werden separat als blaue Punkte dargestellt. Die grauen Zahlen an der horizontalen Achse geben die Anzahl der Datenwerte in jedem Bin an. Die mittlere Abweichung pro Bin wird als hellblaue Linie dargestellt. Die hellrote Linie ist die über alle Richtungen gemittelte Messabweichung.

Abbildung 3: Verhältnis zwischen LiDAR-Messung und Messmastmessung für Standort A.



Ein weiteres Beispiel, mit einer deutlich größeren Abweichung zwischen LiDAR und Messmast ist in Abbildung 4 illustriert.

Abbildung 4: Verhältnis zwischen LiDAR-Messung und Messmastmessung für Standort C.



Eine Interpretation der Abweichungen, wie in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt, erwies sich als überraschend schwierig, da hierbei eine Vielzahl von relevanten Einflussfaktoren und möglichen Fehlerursachen eine Rolle spielt. Dennoch ließen sich eine Reihe von allgemeinen Beobachtungen aus dem Vergleich der LiDAR- und Messmast-Windgeschwindigkeiten ableiten:

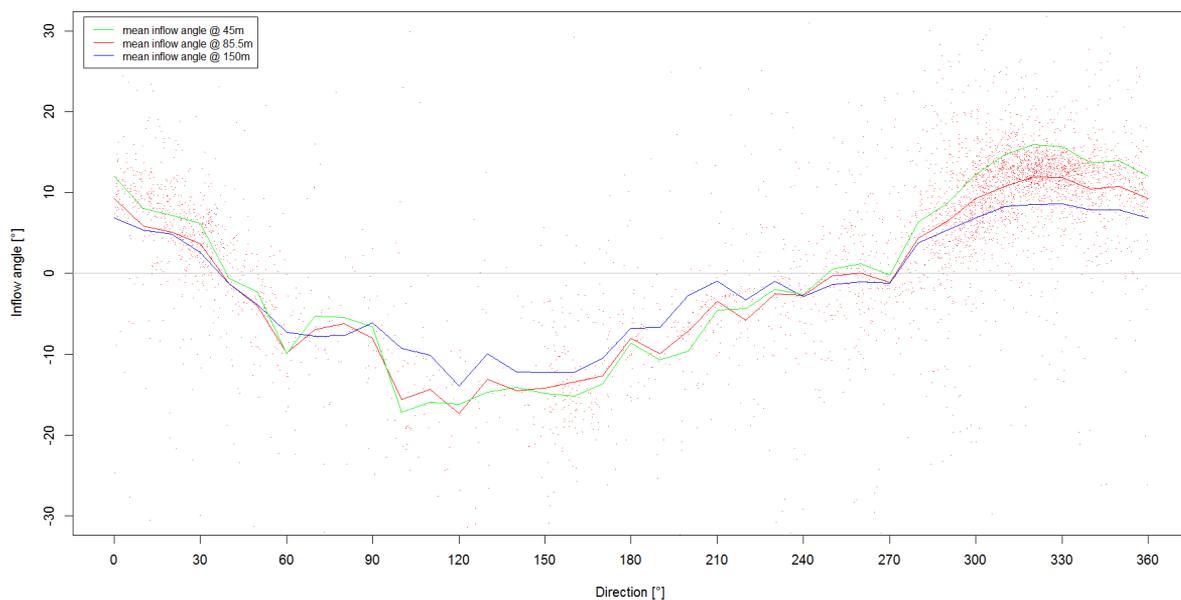
- Die Windgeschwindigkeitsverhältnisse zeigen eine systematische Variation mit der Windrichtung, die durch das unterschiedliche Geländere relief und die unterschiedlich komplexen Strömungsverhältnisse in den Windrichtungen erklärt werden kann.
- Das Verhältnis der durchschnittlichen LiDAR-Windgeschwindigkeit zur durchschnittlichen Messmast-Windgeschwindigkeit (d.h. die Größe „mean LiDAR/MetMast“) reicht nicht aus, um die Messabweichungen und die Genauigkeit der Wind-LiDAR-Messung zu beurteilen. In den einzelnen Windrichtungen können erhebliche Abweichungen auftreten, die sich dann aber bei einer Summierung über alle Windrichtungen wieder aufheben.
- Die Abweichung zwischen LiDAR und Messmast in einer bestimmten Windrichtung ist keine einfache Skalierung mit einem konstanten Faktor, sondern eine Verteilung von Messabweichungen mit einer gewissen Breite. Position, Breite und Form dieser Verteilungen hängen vom Standort und von der Windrichtung ab und weisen eine große Variabilität auf, wie beispielhaft Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen. Diese Verteilungen spiegeln sowohl Messfehler (sowohl der Mastmessung als auch des LiDARs) als auch durch das komplexe Gelände bedingte Abweichungen wider.
- Neben der systematischen, windrichtungsabhängigen Abweichung der mittleren Windgeschwindigkeiten, besteht auch eine systematische Abhängigkeit der Breite der Verteilung von der Windrichtung. Dies deutet auf einen Einfluss des Geländes auf Strömungscharakteristika wie Turbulenz, Scherung und Schräganströmung hin.
- Die Vergleiche zwischen LiDAR- und Messmastdaten waren alle durch eine große Komponente stochastischer Variabilität („Rauschen“) gekennzeichnet. Bei zwei der fünf in dieser Studie betrachteten Messmastmessungen wurden 3D-Ultraschallanemometer auf einer Höhe etwas unterhalb des Schalenanemometers in der Mastspitze eingesetzt. In diesen Fällen zeigte der Vergleich zwischen dem Schalen- und dem Ultraschallanemometer keine

solche hohe stochastische Abweichung. Dies deutet darauf hin, dass die Anemometerunsicherheit hier von nur untergeordneter Bedeutung ist und dass die beobachtete stochastische Variabilität tatsächlich durch die Inhomogenität und Variabilität der Strömung bedingt ist.

Schräganströmung

Alle fünf betrachteten Standorte liegen im komplexen Gelände und weisen daher – je nach Geländeprofil in der entsprechenden Windrichtung – nicht-horizontale Windvektoren auf. Unter den fünf Standorten sticht dabei Standort C durch seine ausgeprägte Hanglage heraus. Dies spiegelt sich in der Darstellung des Anströmwinkels in Abbildung 5 entsprechend wider, die einen Bereich vertikaler Anströmwinkel zwischen etwa -15° und $+15^\circ$ zeigt. Bei größeren Messhöhen nimmt der Einfluss des Geländeprofiles ab, was zu kleineren Extremwerten des vertikalen Anströmwinkels führt.

Abbildung 5: Neigung des Anströmungswinkels aus der Horizontalen am Standort C als Funktion der Windrichtung für die Bezugshöhen von 45 m, 85,5 m und 150 m.



Geländecharakterisierung

Der einfachste und direkteste Weg, die Komplexität eines Standorts einzuschätzen, sind Geländedaten wie digitale Geländemodelle, Daten zur Oberflächenrauheit und Vegetationshöhe sowie Position und Beschaffenheit von Hindernissen. Solche Informationen sind in der Regel auf Karten oder Luftaufnahmen – und damit im Vorhinein zu einer geplanten Messkampagne – verfügbar. Somit kann eine solche Einschätzung der Komplexität eines Standorts bereits in der Planungsphase einer Messkampagne herangezogen werden, um die Eignung eines Standorts für eine Wind-LiDAR-Messung und/oder die Notwendigkeit einer LiDAR-Korrektur abzuschätzen.

Ein wichtiger Parameter bei der Charakterisierung des Geländes um LiDAR-Messtandorte ist die Ausdehnung des Gebiets, das bei der Charakterisierung berücksichtigt wird. Der unmittelbare

Nahbereich wird dabei in der Regel einen größeren Einfluss haben als weiter entferntes Gelände, die Ausdehnung des relevanten Bereichs ist aber nicht uneindeutig und vermutlich von den standortspezifischen Bedingungen abhängig. Die Geometrie des Problems legt nahe, dass die Messhöhe eine nützliche Skalenlänge ist. Demnach wurden jeweils Bereiche mit vier unterschiedlichen Radien ($2 \cdot H$, $3 \cdot H$, $5 \cdot H$ und $10 \cdot H$) um die Messpositionen für die Geländecharakterisierungen herangezogen, wobei H eine typische oder interessierende „Referenzhöhe“ bezeichnet.

Um die Eignung möglicher Geländecharakteristiken in Hinsicht auf die Bewertung von LiDAR-Messungen zu erkunden, wurde eine ganze Reihe unterschiedlicher Geländecharakteristika betrachtet. Dazu zählten:

- Hangneigung
- Geländehöhe (Bereich der Seehöhe im betrachteten Bereich)
- Gelände­krümmung (Fit eines Krümmungsradius an die Gelände­kontur, bzw. den Gelände­schnitt, in verschiedenen Richtungen)
- Gelände-Rauigkeitsindex RIX, ein in der Software WASP verwendetes Kriterium für die Ablösung der Windströmung aufgrund von Gelände­komplexität
- Klassifizierung der Gelände­komplexität nach IEC 61400-1 (terrain slope index und terrain variation index)

All diese Gelände­charakteristika wurden jeweils für Bereiche unterschiedlicher Ausdehnung, mit Radien von $2 \cdot H$ bis $10 \cdot H$, ausgewertet und in die Analyse einbezogen.

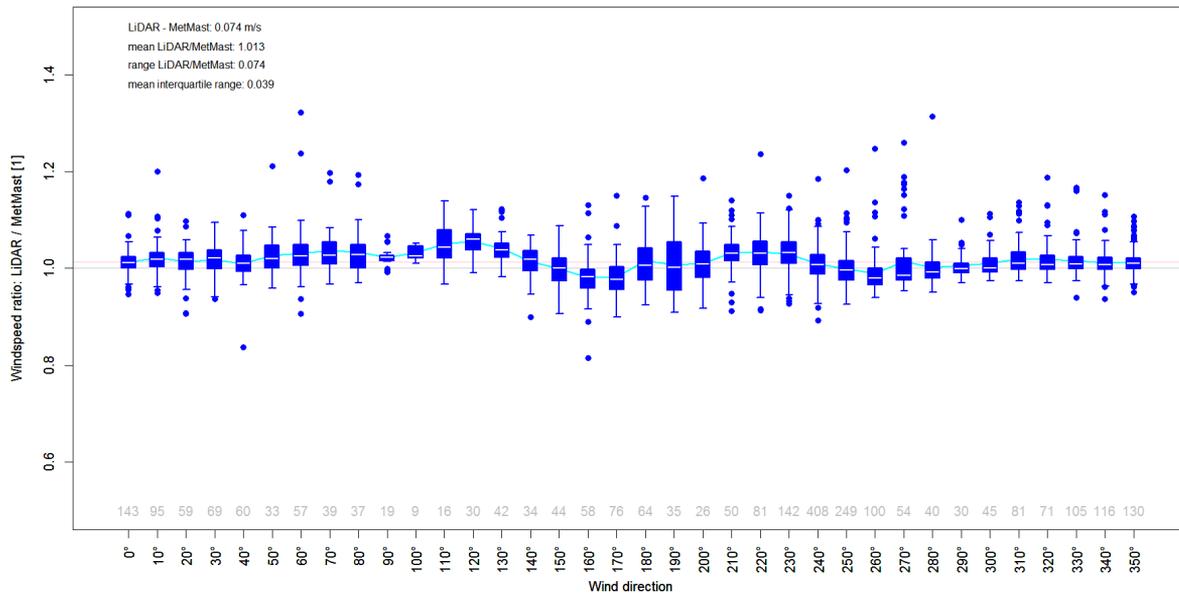
Korrekturmethode­n für LiDAR-Messungen im komplexen Gelände

Insgesamt wurden elf verschiedene Korrekturmethode­n für LiDAR-Messungen im komplexen Gelände auf die Messdaten angewandt. Der Vergleich mit den parallelen Messmastdaten erbrachte jedoch, dass keine dieser elf Varianten für die fünf betrachteten Standorte durchgehend konsistente und zuverlässige Korrekturen für LiDAR-Windgeschwindigkeiten liefern konnte. In einigen Fällen konnte zwar durch die Anwendung der berechneten LiDAR-Korrekturen eine deutliche Verbesserung der Übereinstimmung erzielt werden. Dennoch konnte keine Korrekturmethode für alle fünf betrachteten Datensätze eine konsistente, signifikante Verbesserung liefern.

Als Beispiel für die Verbesserung, die ein Korrekturschema erreichen kann, zeigt Abbildung 6 die verbleibenden Abweichungen von der gemessenen Mastreferenzwindgeschwindigkeit, nachdem eine Korrektur auf die LiDAR-Daten angewendet wurde. Für dieses Diagramm wurde ein gutes Beispiel für Korrekturfaktoren aus den elf verschiedenen Korrekturvarianten ausgewählt, die für Standort A berechnet wurden. Zum Vergleich sind die Abweichungen der unkorrigierten LiDAR-Daten von Standort A in Abbildung 3 dargestellt. Im dem in Abbildung 6 dargestellten Fall führt die Korrektur zu einer Überkorrektur der mittleren Windgeschwindigkeit um etwa 50 %, was dennoch zu einer leichten Verbesserung der mittleren Windgeschwindigkeiten (um etwa 0,08 m/s) im Vergleich zu den gemessenen Mastergebnissen führt. Generell zeigten alle verwendeten Korrekturmethode­n an allen fünf Standorten einen leichten Trend zur Überkorrektur.

Abgesehen von dieser leichten Verbesserung der mittleren Windgeschwindigkeit reduzierte die LiDAR-Korrektur in diesem Beispiel auch die Bandbreite des LiDAR/Messmast-Fehlers über die verschiedenen Windrichtungen. Ausgedrückt als Größe „range LiDAR/MetMast“ entspricht dies einer Reduzierung von 0,104 m/s auf 0,074 m/s.

Abbildung 6: Beispiel für korrigierte LiDAR-Daten für den Standort A.



Interpretation der Messabweichungen zwischen LiDAR und Messmast

Der Vergleich der LiDAR- und Messmastdaten zeigte, dass es unter den fünf betrachteten Datensätzen sowohl Beispiele für Über- als auch Unterschätzungen der Windgeschwindigkeiten durch die LiDAR-Messung gibt. Bei einer bodenbasierten LiDAR-Messung auf einem Hügel oder Bergrücken ist gemäß der negativen (d.h. nach unten gerichteten) Krümmung der Windströmung, die der Geländekontur folgt (siehe Abbildung 2), zu erwarten, dass das LiDAR die tatsächliche Windgeschwindigkeit unterschätzt. Dieser Fall konnte auch bei vier der fünf betrachteten Standorte beobachtet werden. Der verbleibende abweichende Standort illustriert jedoch, dass die Strömungsbedingungen an komplexen Geländestandorten sowohl positive als auch negative Abweichungen bei LiDAR-Messungen verursachen können. Potentiell kann das auch dazu führen, dass sich positive und negative Einflüsse aufheben und es so zu keinerlei Abweichungen in einer LiDAR Windmessungen kommt. Dieser Umstand ist ein Hinweis, dass eine Vorhersage der Amplitude des LiDAR Messfehlers alleine auf der Grundlage der Geländeeigenschaften nur schwer möglich ist.

Was jedoch durchaus möglich erscheint, ist die Identifizierung von Kriterien und geeigneten Geländecharakteristika als Indikatoren für das mögliche Auftreten von hohen Messabweichungen und -unsicherheiten bei LiDAR-Messungen. Auch zeigen die Messabweichungen in Abbildung 3 und Abbildung 4 eine systematische Abhängigkeit von der Windrichtung. Die offensichtliche Erklärung für diese Variabilität sind die unterschiedlichen Geländeprofile in den unterschiedlichen Windrichtungen, was wiederum eine Korrelation von LiDAR-Fehler mit den Geländeeigenschaften nahelegt.

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind für unterschiedliche Maße der Messabweichung zwischen LiDAR und Messmast Korrelationen mit Charakteristika der Strömung und des Geländes an den Messstandorten dargestellt. In diesen beiden Abbildungen wurden die fünf Standorte im komplexen Gelände um zwei zusätzliche Datensätze paralleler LiDAR- und Mastmessungen an Standorten in ebenem Gelände erweitert. Abbildung 7 und Abbildung 8 legen tatsächlich Korrelationen zwischen LiDAR-Messfehler und Geländeeigenschaften nahe. Eine strengere statistische Analyse ist jedoch angesichts der sehr begrenzten Datenbasis hier nicht sinnvoll und muss auf eine zukünftige Studie mit einer größeren Anzahl von Datensätzen verschoben werden.

Abbildung 7: Korrelation zwischen der LiDAR-/Messmast-Abweichung (ausgedrückt in der Größe „range LiDAR/MetMast“) und Charakteristika der Strömung und des Geländes am Messstandort.

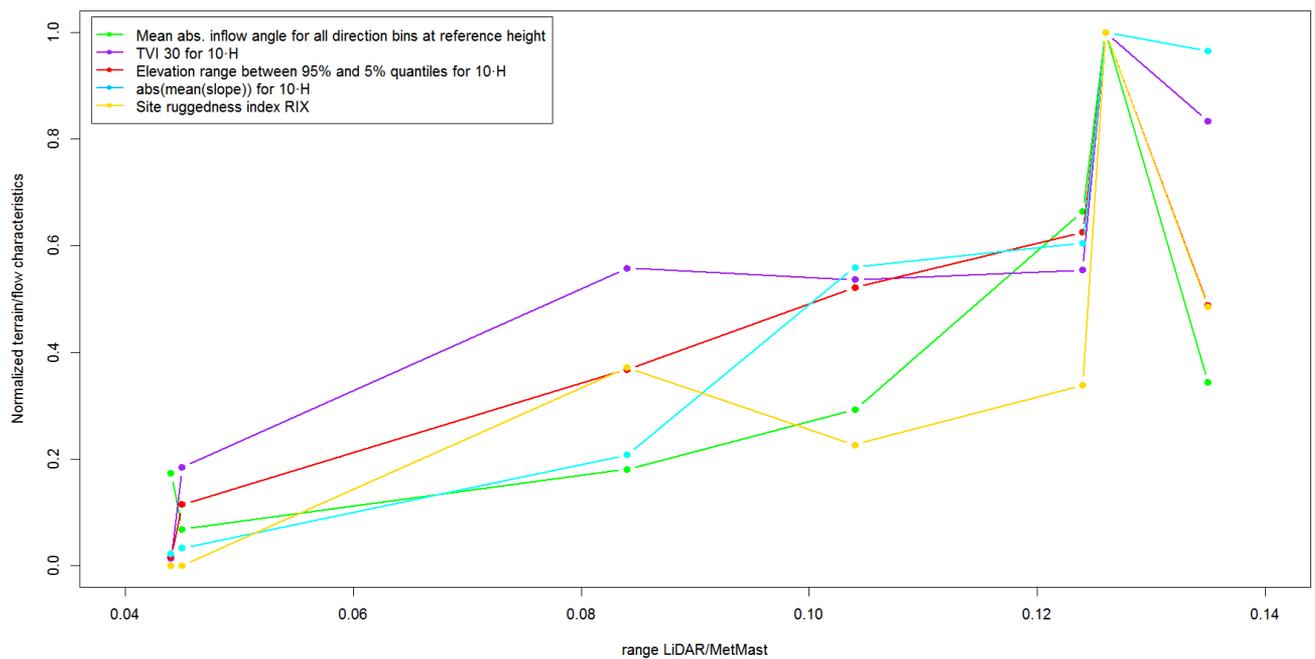
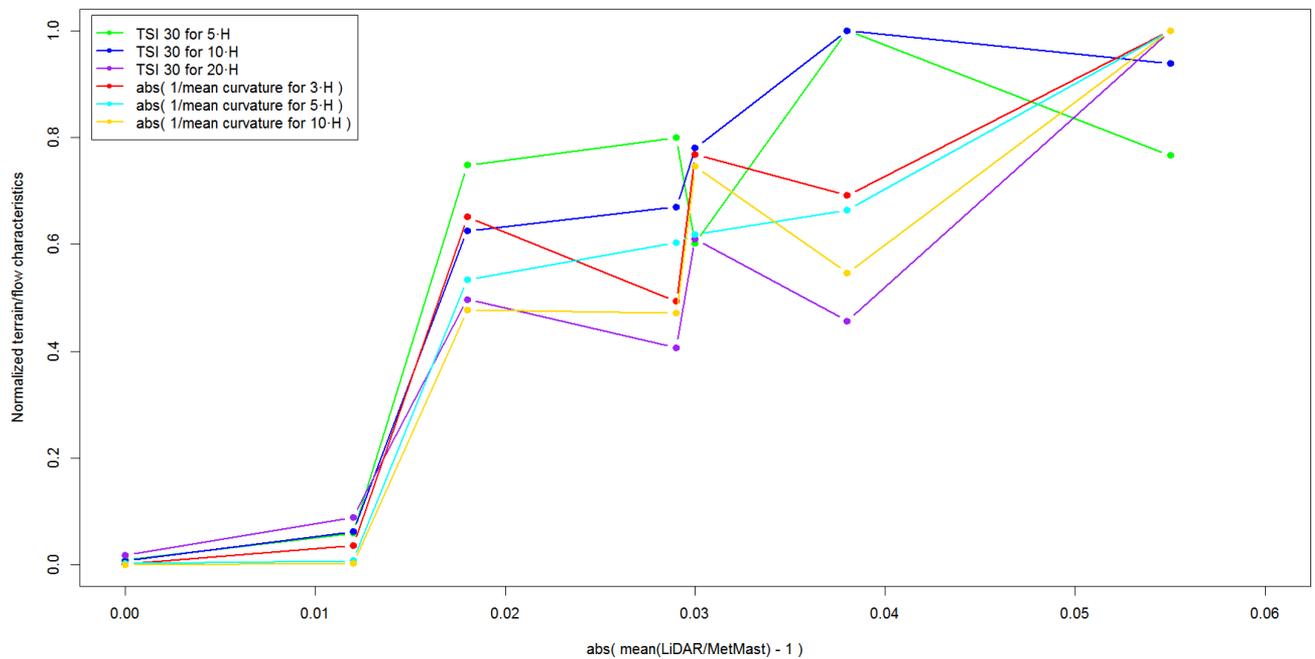


Abbildung 8: Korrelation zwischen der Abweichung von LiDAR zu Messmast und ausgewählten Geländecharakteristika der Messstandorte. Die horizontale Achse gibt die absolute Messabweichung von LiDAR- zu Mastmessung an.



Schlussfolgerungen

Auch wenn im Rahmen dieses Projekts noch keine geeigneten Kriterien für die Vorhersage der Messfehler bodenbasierter LiDAR-Messungen gefunden werden konnten, war diese Arbeit eine wichtige Grundlage für die Identifizierung möglicher Kandidaten unter der Vielzahl von betrachteten Geländecharakteristika. Zudem haben die Ergebnisse klargemacht, dass fundierte Schlussfolgerungen über die Auswirkungen von komplexem Gelände auf LiDAR-Messungen – und zu der Eignung von möglichen Korrekturmethode für solche Messungen – auf einer viel breiteren Datenbasis beruhen müssen. Eine Ermittlung robuster und allgemein anwendbarer Grenzwerte für den Einsatz von LiDAR in komplexem Gelände sowie von Korrekturmethode für LiDAR in komplexem Gelände sollte auf Daten basieren, die sowohl die Bandbreite geografischer Regionen und meteorologischer Bedingungen abdecken als auch ein breites Spektrum von Geländekomplexität.

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Der IEA Wind TCP Task 32 nimmt in der internationalen Gemeinschaft von akademischen und kommerziellen LiDAR-Anwendern und den LiDAR-Geräteherstellern eine zentrale Rolle ein. Alle wesentlichen Themen und Entwicklungen auf dem Gebiet von Windmessungen mit LiDAR sind daher auch im Task 32 abgebildet. Ein wichtiger Baustein dafür sind die offenen und niederschweligen Möglichkeiten der Beteiligung und Kommunikation im Task 32. Dazu zählen einerseits die Task Veranstaltungen wie die jährlichen General Meetings und zahlreiche zusätzliche Workshops, Seminare und Arbeitsgruppentreffen. Auch ist der Task 32 bei vielen wissenschaftlichen Konferenzen durch Vertreter:innen des Task präsent, die auch dort Ergebnisse aus dem Task verbreiten. Die meisten Protokolle, Berichte und Publikationen aus dem Task sind über die Task-Homepage (iea-wind.org/task32/t32-publications/) und die Zenodo Plattform des Task 32 (zenodo.org/communities/ieawindtask32) einfach und in der jeweils aktuellen Version verfügbar. Die für Österreich relevanten Ergebnisse aus dem Task sind zudem auch auf der Nachhaltig Wirtschaften Seite vertreten.

Ein ganz wesentlicher Teil der österreichischen, nationalen Dissemination war der mehrtägige, Task-übergreifende Disseminationsworkshop im Oktober 2022, bei dem neben dem Task 32 auch die übrigen IEA Wind Tasks mit österreichischer Beteiligung (Tasks 19, 36 und 41) vertreten waren. Diese Veranstaltung wurde im Rahmen und im Anschluss an die biennale Branchenplattform der IG Windkraft abgehalten, wodurch eine sehr zahlreiche Teilnahme von Vertreter:innen aus der österreichischen Windbranche möglich war. Zusätzlich zu diesem Disseminationsteil, bei dem in Vorträgen und in Diskussionen die Ergebnisse aus den aktuellen Forschungsprojekten der Tasks vermittelt wurden, gab es auch genügend Raum für die Vernetzung der internationalen Task-Teilnehmer:innen untereinander, als auch mit der österreichischen Windenergiebranche. In den folgenden Tagen hielten die Tasks 19, 32 und 41 parallel in Wien ihre Task-Meetings ab, in deren Rahmen es auch Task-übergreifende Sessions gab, bei denen Themen von gemeinsamen Interesse und Relevanz diskutiert werden konnten.

Die Ergebnisse, die konkret in der österreichischen Teilnahme am IEA Wind TCP Task 32 erarbeitet wurden, wurden zunächst laufend bei den regelmäßigen Task-Veranstaltungen verbreitet und diskutiert. Die von Österreich behandelten Themen, insbesondere LiDAR im komplexen Gelände, sind zentrale Fragestellungen im Bereich von Wind-LiDAR-Messungen und waren daher Tagesordnungspunkte bei allen allgemeinen Veranstaltungen des Task 32 (General Meetings, Spring Meeting). Die Ergebnisse, wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, wurden dann ebenfalls zunächst im Rahmen des Task 32 kommuniziert.

In Berichtsform wurden die Ergebnisse aus der Österreichischen Teilnahme am IEA Wind TCP Task 32 in zwei umfassenden Berichten veröffentlicht, in denen sich jeweils eine genauere Beschreibung der Methodik, der verwendeten Datensätze, der Ergebnisse und der Schlussfolgerungen findet:

- Bericht zur technischen Verfügbarkeit von LiDAR-Messungen an alpinen Standorten (Energiewerkstatt 2022).
- Bericht in englischer Sprache zu den Ergebnissen der von der Energiewerkstatt geleiteten Arbeitsgruppe im Task 32 zu LiDAR in komplexem Gelände (Stökl, et al. 2022).

Für eine weiterführende und detailliertere Diskussion der in Abschnitt 4.2 und Abschnitt 5.2 beschriebenen Forschungsaktivitäten, sei auf diese beiden Berichte verweisen.

Zu beiden, von der Energiewerkstatt betreuten Themenbereichen – LiDAR Verfügbarkeit an Bergstandorten und LiDAR im komplexen Gelände – sind weiterführende Forschungsaktivitäten geplant und teilweise auch schon begonnen, und zwar im Rahmen des Task 52 (dem Nachfolger des Task 32) als auch darüberhinausgehend. Die in diesem Bericht beschriebenen Ergebnisse aus der Task 32 Arbeitsperiode bis 2021 sind für diese laufenden Arbeiten eine essentielle Vorleistung und Ausgangspunkt.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Die zwei Schwerpunkte der österreichischen Beteiligung am Task 32 in dessen Arbeitsperiode von 2019 bis 2021 haben zwei sehr relevanten Themen aus dem Bereich der Wind-LiDAR-Messungen abgedeckt. Diese Relevanz bleibt auch weiterhin erhalten:

Das Thema der technischen Verfügbarkeit betrifft eine grundsätzliche physikalische Limitierung des Messprinzips. Insofern kann man diesem Problem nur in Form einer Vorabschätzung der Verfügbarkeit an einem bestimmten Standort und einer Planung eines ausreichend langen Messzeitraums begegnen, um, trotz der Beeinträchtigung durch geringe Verfügbarkeiten, die mit der Messung angestrebten Ziele zu erreichen.

Messabweichungen und -unsicherheiten von bodenbasiertem LiDAR im komplexen Gelände sind hingegen Themen, zu denen weiterer Forschungsbedarf besteht. Ziel dabei sollte es sein, anhand von a priori bekannten Größen, bspw. Charakteristika der Geländeform oder der Vegetation, die Auswirkungen auf eine LiDAR-Messung und damit verbundene Messunsicherheiten abzuschätzen. Beispielsweise könnte das die Form einer Liste mit Mindestkriterien in Hinsicht auf Hangneigung, Bodenrauigkeit, Hindernisse, etc. annehmen, bei derer Erfüllung eine gewisse Messgenauigkeit einer LiDAR-Messung vorausgesetzt werden kann. Um eine globale Gültigkeit unter unterschiedlichen meteorologischen und geographischen Bedingungen sicherzustellen, sollten solche Kriterien auf einer möglichst breiten Datenbasis stehen. Als Endpunkt dieser Entwicklungen könnte dann die Festlegung solcher Genauigkeitskriterien von bodenbasierten LiDAR-Messungen in einer Messnorm, bspw. im Rahmen der IEC 61400 stehen.

Der internationale Vergleich im Task 32 hat gezeigt, dass Österreich von den in diesem Bericht besprochenen Problemfeldern im besonderen Ausmaß betroffen ist. In Österreich gibt es eine Reihe von bestehenden und geplanten Windenergieprojekten im alpinen Raum auf Seehöhen bis über 2000 m. Direkt damit verbunden sind die Problematiken von zu geringen Konzentrationen von Luftaerosolen und anspruchsvolle, komplexe Geländeformen. Derartige Standorte sind in anderen Nationen entweder von Haus aus nicht gegeben (bspw. Niederlande, Dänemark) oder werden nur in sehr viel geringerem Maße für die Windenergie genutzt (bspw. Schweiz, Italien). Die Fortführung und Förderung von Forschungsaktivitäten in diesem Bereich sollte daher in Österreich weiterhin einen hohen Stellenwert haben.

Literaturverzeichnis

- Albers, A., A. W. Janssen, und J. Mander. „How to Gain Acceptance for Lidar Measurements.“ *Proceedings of German Wind Energy Conference, 2010*. 2010.
- Bingöl, F., J. Mann, und D. Foussekis. „Modelling conically scanning lidar error in complex terrain with WAsP Engineering Riso-R-Report, Riso-R-1664(EN).“ 2008.
- Black, A., et al. „Survey of Correction Techniques for Remote Sensing Devices in Complex Flow.“ *IEA Task 32 Webinar*. 8. December 2020.
- Clifton, Andrew, et al. „Remote Sensing of Complex Flows by Doppler Wind Lidar: Issues and Preliminary Recommendations.“ *Technical Report NREL/TP-5000-64634*. 2015.
- Clifton, Andrew, Sarah Barber, Alexander Stökl, Helmut Frank, und Timo Karlsson. „Research challenges and needs for the deployment of wind energy in hilly and mountainous regions.“ *Wind Energy Science* 7, 2022: 2231–2254.
- Energiewerkstatt. „Vergleichende Datenverfügbarkeit von LiDAR-Messkampagnen - Analyse und Bewertung im Rahmen der IEA Wind Task 32 Forschungskoooperation.“ 2022.
- Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien (FGW). „Technische Richtlinien für Windenergieanlagen, Teil 6 (TR6) Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen, Revision 11.“ 2021.
- International Electrotechnical Commission. „IEC 61400-12-1:2017 Wind power generation systems – Part 12-1: Power performance measurement of electricity producing wind turbines.“ 2017.
- International Electrotechnical Commission. „IEC 61400-50-2:2022 Wind energy generation systems – Part 50-2: Wind measurement – Application of ground-mounted remote sensing technology.“ 2022.
- Robey, Rachel, und Julie K. Lundquist. „Behavior and mechanisms of Doppler wind lidar error in varying stability regimes.“ *Atmospheric Measurement Techniques* 15, 2022: 4585–4622.
- Rosenbusch, Peter, Paul Mazoyer, Laurie Pontreau, Pierre Etienne Allain, und Jean-Pierre Cariou. „Wind speed reconstruction from mono-static wind lidar eliminating the effect of turbulence.“ *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 13, 2021: 063301.
- Stökl, Alexander, Sara Koller, Johannes Cordes, Oliver Grüning, Andrew Black, und Atsushi Yoshimura. „IEA Wind TCP Task 32: Comparative Exercise on Ground Based Lidar in Complex Terrain.“ 2022.
- Uchida, Takanori, und Susumu Takakuwa. „Numerical investigation of stable stratification effects on wind resource assessment in complex terrain.“ *Energies, Vol. 13, No. 24*, 2020.
- Uchida, Takanori, und Yuji Ohya. „Latest Developments in Numerical Wind Synopsis Prediction Using the RIAM-COMPACT® CFD Model-Design Wind Speed Evaluation and Wind Risk (Terrain-Induced Turbulence) Diagnostics in Japan.“ *Energies, Vol. 4, No. 3*, 2011.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messprinzip einer LiDAR Messung.	9
Abbildung 2: Zweidimensionales Schema einer bodenbasierten LiDAR-Messung.	14
Abbildung 3: Verhältnis zwischen LiDAR-Messung und Messmastmessung für Standort A.	21
Abbildung 4: Verhältnis zwischen LiDAR-Messung und Messmastmessung für Standort C.	22
Abbildung 5: Neigung des Anströmungswinkels aus der Horizontalen am Standort C als Funktion der Windrichtung für die Bezugshöhen von 45 m, 85,5 m und 150 m.....	23
Abbildung 6: Beispiel für korrigierte LiDAR-Daten für den Standort A.	25
Abbildung 7: Korrelation zwischen der LiDAR-/Messmast-Abweichung (ausgedrückt in der Größe „range LiDAR/MetMast“) und Charakteristika der Strömung und des Geländes am Messstandort....	26
Abbildung 8: Korrelation zwischen der Abweichung von LiDAR zu Messmast und ausgewählten Geländecharakteristika der Messstandorte. Die horizontale Achse gibt die absolute Messabweichung von LiDAR- zu Mastmessung an.	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Datenverfügbarkeiten der betrachteten LiDAR-Messungen für unterschiedliche Messhöhen differenziert nach Standortsituierung und Jahreszeit.	19
--	----

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)