

# DIPLOMARBEIT

## UNTERSUCHUNG DER MESSUNGSICHERHEITEN BEI MULTI-LIDAR- WINDMESSUNGEN ZUR BESTIMMUNG DER WINDRESSOURCE

Vorname und Name der Verfasserin:	Tabea Hildebrand
Geburtsdatum und -ort:	28.11.1994 in Bardowick
Matrikelnummer:	4542033
Hochschullehrer:	Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel
Wissenschaftlicher Betreuer:	Dipl.-Ing. Adrian Schubert
Zweitbetreuer:	Dr. rer. nat. Tobias Klaas
Termin der Abgabe:	15. März 2021





### **Aufgabenstellung für die Diplomarbeit**

Name: cand. ing. Tabea Hildebrand

Matrikel-Nr.: 454 2033

Vertiefung: ohne Vertiefung

---

**Thema: Untersuchung der Messunsicherheiten bei Multi-Lidar-Windmessungen für die Bestimmung der Windressource.**

(Evaluation of measurement uncertainty of multi-lidar wind measurements for wind resource estimation)

#### **Zielsetzung:**

Für die genaue Abschätzung der zu erwartenden Erträge von Windparks ist eine zuverlässige Winddatenbasis notwendig. Für die Windmessung stehen neben den konventionellen, mastbasierten Sensoren (z.B. Schalensternanemometer) seit einigen Jahren auch Lidar-Fernmessverfahren zur Verfügung. Mittels sogenannter „Multi-Lidar-Verfahren“ ist eine präzise und flexible Erfassung der Windbedingungen auch an topographisch komplexen Standorten und über große Distanzen möglich.

Der Schwerpunkt der Diplomarbeit liegt auf einer systematischen Untersuchung der dabei auftretenden Messunsicherheiten. Dies sind beispielsweise Unsicherheiten aufgrund der Positionierung der Messgeräte oder der Ausrichtung des Lasers.

Im Rahmen einer Literaturstudie soll ein Überblick über die Lidar-Windmesstechnik und ihre verschiedenen Anwendungsgebiete erarbeitet werden. Insbesondere sollen relevante Messunsicherheiten zusammengetragen und beschrieben werden. Des Weiteren sollen die auftretenden Unsicherheiten quantifiziert werden, so dass durch Kombination der Teilunsicherheiten die Berechnung einer Gesamtunsicherheit möglich wird. Ausgewählte Teilunsicherheiten sollen auf Basis vorhandener Messdaten untersucht werden.

Für die Untersuchung der Teilunsicherheiten und die Berechnung der Gesamtunsicherheit sollen in Python geeignete Funktionen und Algorithmen implementiert werden, so dass im Anschluss die Einbindung der Unsicherheitsberechnung in vorhandene Tools am Fraunhofer IEE möglich wird.

**Arbeitsumfang:**

Im Rahmen der Ausarbeitung sollen die folgenden Punkte bearbeitet werden:

1. Literaturstudie zu Unsicherheiten bei der Windmessung mit Lidar-Verfahren, u.a. Messung im flachen und komplexen Gelände oder in urbaner Umgebung.
2. Quantifizierung der relevanten Teilunsicherheiten und der resultierenden Gesamtunsicherheit.
3. Implementierung von Funktionen und Algorithmen für die Unsicherheitsberechnung in Python.
4. Statistische Untersuchung und Evaluierung einer ausgewählten Teilunsicherheit auf Basis vorhandener Multi-Lidar-Messdaten.

Wissenschaftlicher Betreuer:

Dipl.-Ing. Adrian Schubert  
Institut für Bauinformatik  
Technische Universität Dresden

Mentor / Zweitbetreuer:

Dr. rer. nat. Tobias Klaas  
Fraunhofer-Institut für  
Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik

Verantwortlicher Hochschullehrer:

Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel  
Institut für Bauinformatik  
Technische Universität Dresden

Ausgehändigt am:

02.10.2020

Einzureichen am:

02.02.2021

Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel  
Verantwortlicher Hochschullehrer

## SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsinstitution vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Kassel, den 14.03.2021

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'T' followed by a horizontal line and a small 'H'.

Tabea Hildebrand



## DANKSAGUNG

Ich bin dankbar für die tollen Menschen, denen ich auf meinem Weg durch das Studium begegnet bin. Dankbar bin ich für die spannenden Fächer, die ich belegen durfte, unter anderem weil es möglich war ohne Vertiefung zu studieren und ich so in genau den Bereichen lernen konnte, die mich begeistern. Und ich bin dankbar für die Erfahrungen, die ich durch mein Studium in Bezug auf wissenschaftliche Herausforderungen sammeln durfte.

Ich freue mich, dass ich diese Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IEE in Kassel und dem Bauinformatik Institut der TU Dresden schreiben konnte. Das wurde mir dadurch ermöglicht, dass ich mit Professor Menzel und Adrian Schubert einen betreuenden Hochschullehrer und einen wissenschaftlichen Betreuer gefunden habe. Danke, dass Sie sich die Zeit genommen haben meine Arbeit zu betreuen und mir so ermöglicht haben dieses tolle Thema in einer spannenden neuen Umgebung zu schreiben. Danke an Adrian Schubert für die vielen Anmerkungen, auf deren Basis ich Aussagen präziser formulieren und an Inhalt und Form feilen konnte.

Ich danke meinem Betreuer Tobias Klaas vom Fraunhofer IEE. Das Arbeiten mit ihm und den Messunsicherheiten ist sehr lehrreich. Sein Input und seine Nachfragen waren hilfreich und haben meiner Arbeit eine gute Richtung gegeben. Ein Dank auch an die anderen Teammitglieder vom Fraunhofer IEE für Antworten auf meine vielen Fragen.

Felipe Trolldenier möchte ich dafür danken, dass er mir seine Implementierung der Fehlerfortpflanzung zur Verfügung gestellt hat und als mein mathematischer Berater fungiert.

Ein großer Dank geht an meine Korrekturleser Ingrid Hildebrand, Tina Köthemann und Christoph Zink. Dank euch stehen Kommata an den richtigen Stellen und die Sätze sind aufpoliert.

Ich schätze mich glücklich, dass ich so eine vielfältige Unterstützung von verschiedenen Seiten erhalten habe. Allen voran von meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und mir den Raum gegeben haben, eigenständige Entscheidungen zu treffen, innerlich zu wachsen und gleichzeitig da sind, wenn ich sie brauche. Ich danke euch beiden aus tiefstem Herzen. Auch möchte ich Christoph Zink danken, der mit seiner Geduld bei statistischen Diskussionen und seiner Begeisterung im Allgemeinen meine Zeit in Kassel und das Schreiben meiner Diplomarbeit mit Leichtigkeit gefüllt hat.



## KURZFASSUNG

Meteorologische Daten werden erst seit etwa 30 Jahren im Hinblick auf eine technische Nutzung des Windes für die Windenergie gesammelt. Daraus haben sich über die Jahre verschiedene Windmessmethoden entwickelt. Das schnelle Wachstum der Windenergie-Branche wurde insbesondere durch die Messung der Windressource mit Schalensternanemometern ermöglicht. Dabei handelt es sich um Messgeräte, die an Messmasten angebracht sind. Der Aufbau von Messmasten ist jedoch mit großem Aufwand verbunden. Hinzu kommt, dass mit dieser Methode die horizontale Windgeschwindigkeit nur an einem Messpunkt ermittelt werden kann. Um die Windgeschwindigkeit und -richtung auch in großen Höhen messen zu können, hat sich in den frühen 2000ern eine Fernerfassungs-Technologie entwickelt, die Lidar-Windmessung. Lidar steht für „Light Detection and Ranging“. Lidar-Systeme arbeiten mit einer dem Radar verwandten Methode und können über die Reflektion von Laserlicht an Partikeln in der Luft die Windgeschwindigkeit und -richtung ableiten. Es gibt zwei Lidar-Verfahren, auf die in dieser Arbeit eingegangen wird. Sie werden in Kapitel 2.1.1.1 erklärt. Die verbreitetere Lidar-Technologie ist das Profiling Lidar. Dieses Verfahren hat bereits Einzug in die national geltende Norm zur Bestimmung der Windressource erhalten. Das zweite Lidar-Verfahren basiert auf einem Scanning Lidar. Die Methode mehrere Scanning Lidar-Geräte zu koppeln, ist unter dem Namen Multi-Lidar-Verfahren bekannt. Mit dieser Scan-Methode können mehrere Standorte für Windenergieanlagen in einem Windpark mit einem einzigen Messaufbau vermessen werden. Es können virtuelle Messmasten aufgestellt werden, indem die Laserstrahlen der verschiedenen Geräte auf einen Messpunkt gerichtet werden. Im Gegensatz zu dem Profiling Lidar-Verfahren ist diese Technologie noch nicht in den nationalen Richtlinien zur Bestimmung der Windressource enthalten. Die Erforschung der bei diesem Verfahren auftretenden Messunsicherheiten ist elementar, um die Technologie als gängiges Messverfahren zu etablieren.

Die Vorgehensweise bei Multi-Lidar-Windmessungen wird zu Beginn dieser Arbeit erläutert. Zusammen mit den Grundlagen von Messunsicherheiten legt dieses Thema den Grundstein für die folgenden Kapitel. Diese Diplomarbeit hat das Ziel, die bei Multi-Lidar-Windmessungen auftretenden Messunsicherheiten aufzuzeigen, zu quantifizieren und eine Gesamtunsicherheit zu berechnen. Dafür wird ein Python-Tool entwickelt, welches die Teilunsicherheiten mittels Algorithmen berechnet. Es wird ein konkretes Fallbeispiel betrachtet, bei dem mit zwei oder drei Geräten an zehn potenziellen Lidar-Standorten gemessen werden sollen. Mit der

Unsicherheitseinschätzung können die 165 Gerätekombinationen miteinander verglichen werden. Die geringste Messunsicherheit ergibt sich bei einer Gerätekombination mit drei Lidar-Geräten. Ebenso sind der Mittelwert und die Standardabweichung bei den Kombinationen mit drei Geräten geringer.

In einem zweiten Teil wird eine bestimmte Teilunsicherheit anhand von Messdaten statistisch untersucht. Dabei handelt es sich laut Stawiarski et al. um die Eingangsgröße mit dem größten Einfluss auf die Messunsicherheit. Bei dieser Eingangsgröße handelt es sich um die sogenannte Return Time. Es wird der Fragestellung nachgegangen, ob die Formel zur Berechnung der Teilunsicherheit nach Kristensen et al. den Unsicherheitsbeitrag ausreichend genau berechnen kann. In der Analyse werden Messdaten aus einer Messkampagne mit den Ergebnissen aus der Berechnungsformel verglichen. Obwohl die Abweichungen zwischen den Ergebnissen der zwei Ansätze zum Teil relativ groß sind, wird der Trend der Entwicklung der Unsicherheitsgröße bei zunehmenden Geschwindigkeiten durch diese Untersuchung zum großen Teil bestätigt. Die Formel wird zur Quantifizierung der Unsicherheit aus Return Time in dem Unsicherheitsmodell verwendet. Diese Diplomarbeit geht mit der Quantifizierung der Gesamtunsicherheit bei Multi-Lidar-Windmessung einen ersten Schritt in Richtung der Realisierung einer Optimierung von Messkampagnen zur Bestimmung der Windressource.

## ABSTRACT

The assessment of the wind resource for a potential wind farm bases on the evaluation of air flow. Aerosols are particles in the atmosphere that are assumed to move with the wind velocity. The horizontal wind velocity is crucial for the evaluation of a wind farm site. Originally, measurements were taken with an anemometer, which was attached to a measurement mast. In the early 2000s the development of remote sensing devices, namely the lidar technology evolved. The abbreviation stands for "light detection and ranging". The technology is comparable with a radar. However, instead of emitting radio waves, the Doppler lidar emits laser light and analyzes the backscattered signal. The backscatter tells the gauging person the wind velocity and direction. A multi lidar system uses two or more devices to measure the wind speed by intersecting the beams at a specific point.

This Diploma thesis explores the uncertainty of multi lidar wind measurements. Basic research regarding the influencing uncertainty parameters is conducted and described in detail. Literature and existing models, as well as the development of own algorithms quantify the magnitudes of occurring uncertainties. The developed uncertainty model calculates values of error for 165 combinations of ten possible lidar locations measuring with two or three devices. The calculations imply that the most favorable measurement set up consists of three devices and that the standard deviation and mean value of the uncertainty is slightly reduced when comparing three-device combinations with a two-device set up. Another focal point of the thesis is the statistical analysis of one specific uncertainty, namely the return time. The time interval in which a laser comes back to one measurement point (after having scanned other points) characterizes the return time. The investigations imply that an equation from Kristensen et al. approximates the uncertainty values for higher return times quite well. Therefore, the equation is used in the uncertainty calculations to quantify the return time uncertainty.

The intention of this diploma thesis is the quantification of uncertainty of multi lidar systems for wind measurements. With the implementation of the uncertainty assessment, the initial step towards a tool also made for optimization of multi lidar measurement campaigns is completed.

# INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung .....	I
Abstract .....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis .....	X
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
Übersetzungsverzeichnis .....	XIII
Symbolverzeichnis .....	XV
1 Einleitung .....	1
1.1 Windenergie .....	1
1.1.1 Überblick .....	1
1.1.2 Messtechnik .....	3
1.2 Motivation und Ziel.....	4
1.3 Methodik.....	5
1.4 Struktur der Arbeit .....	6
2 Theoretische Grundlagen .....	8
2.1 Multi-Lidar-Windmessung .....	8
2.1.1 Lidar-Messverfahren und das Lidar-Gerät.....	8
2.1.1.1 Lidar-Verfahren .....	9
2.1.1.2 Long-range WindScanner .....	10
2.1.2 Funktionsprinzip der Lidar-Windmessung.....	11
2.1.2.1 Emission des Laserpulses .....	12
2.1.2.2 Ansteuerung der Motoren zur Ausrichtung des Scanner-Kopfes .....	14
2.1.2.3 Erfassung des rückgestreuten Lichts .....	14
2.1.2.4 Analyse der Messdaten .....	16

---

2.1.2.5 Beispielwerte von zwei Laserpuls-Arten .....	19
2.1.3 Weiterverarbeitung .....	20
2.1.3.1 Wahl der Filtergrenzen .....	21
2.1.3.2 Zeitliche Mittelung der Messwerte .....	21
2.1.4 Rekonstruktion des Windvektors .....	21
2.2 Standortbewertung mit Multi-Lidar-Systemen .....	23
2.2.1 Hemmnisse bei der Anwendung in flachem und schwierigem Gelände.....	23
2.2.2 Urban Wind .....	26
2.3 Grundlagen und Terminologie der Unsicherheitseinschätzung .....	27
3 Unsicherheiten bei Multi-Lidar-Windmessungen .....	31
3.1 Teilunsicherheiten bei radialer Geschwindigkeitsmessung.....	32
3.1.1 Messgerät .....	33
3.1.1.1 Ermittlung der radialen Geschwindigkeit aus rückgestreutem Licht.....	33
3.1.1.2 Steuerung der Laserstrahl-Ausrichtung.....	34
3.1.1.3 Distanzmessung .....	38
3.1.2 Single-Lidar-Messung.....	39
3.1.2.1 Return Time .....	40
3.1.2.2 Akkumulationszeit.....	40
3.1.2.3 Volumenmittelung .....	41
3.1.2.4 Winkel zwischen Windrichtung und Laserstrahl.....	42
3.1.3 Umgebungsbedingungen.....	44
3.1.4 Versagen des Equipments.....	45
3.2 Gesamtunsicherheit bei Rekonstruktion des 2D Windvektors.....	45
3.2.1 Multi-Lidar-Messung .....	46
3.2.1.1 Kreuzungswinkel der Laserstrahlen .....	46
3.2.1.2 Räumliche Synchronisation der Geräte .....	47

3.2.1.3 Zeitliche Synchronisation der Geräte .....	48
3.2.2 Fehlerfortpflanzung .....	49
3.3 Unsicherheitsermittlung.....	50
4 Unsicherheitsberechnung in Python.....	53
4.1 Verwendung von Python .....	53
4.2 Implementierung.....	54
4.2.1 Vorgehen .....	55
4.2.2 Vorbereitung der Berechnung.....	55
4.2.2.1 Wahl der Gerätestandorte und Messpunkte .....	56
4.2.2.2 Kombinatorik Geräteaufstellung .....	58
4.2.2.3 Berechnung Azimut, Elevation und Distanz .....	58
4.2.3 Funktionen zur Berechnung der Teilunsicherheiten und der Gesamtunsicherheit .....	58
4.3 Ergebnisse .....	60
4.4 Grenzen des Modells zur Unsicherheitsbestimmung .....	62
5 Statistische Untersuchung der Unsicherheit bei verschiedenen Return Times.....	64
5.1 Theorie und Methodik .....	65
5.2 Ergebnisse .....	69
5.2.1 Größe der Unsicherheit.....	69
5.2.2 Korrelationsuntersuchung.....	74
5.2.3 Zusammenfassung der statistischen Untersuchung.....	76
6 Zusammenfassung .....	77
6.1 Ergebnisse .....	77
6.1.1 Modell zur Berechnung einer Gesamtunsicherheit .....	77
6.1.2 Statistische Untersuchung der Return Time.....	78
6.2 Fazit .....	79
6.3 Ausblick .....	79

---

7 Literaturverzeichnis .....	80
Anlagenverzeichnis .....	i
Anlage 0 .....	ii
Anlage 1 .....	iii
Anlage 2 .....	iv
Anlage 3 .....	v
Anlage 4 .....	vi
Anlage 5 .....	xi
Anlage 6 .....	xvi
Anlage 7 .....	xxi
Anlage 8 .....	xxiv

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2 Theoretische Grundlagen .....	8
Bild 2.1 Definitionen der Ausrichtung wenn <i>vradial</i> gemessen wird a) Azimutwinkel $\theta$ ; b) Elevationswinkel $\varphi$ .....	9
Bild 2.2 Skizze von Multi-Lidar (ML) und Doppler Beam Swinging (DBS) Messungen, Aufbau neben einem Messmast mit Ultraschall Anemometer (Pauscher et al. 2016, S. 4) .....	9
Bild 2.3 Longe-range WindScanner, Darstellung von Leosphere, S. 19 übersetzt und Maße eingefügt .....	11
Bild 2.4 Schematische Darstellung der Funktion eines Longe-range WindScanner (LRWS) aus Vasiljević (2014, S. 38) .....	12
Bild 2.5 Erklärung zur Emission: a) Laserpuls mit der Sendeimpulsdauer $T_{pulse}$ ; b) Impulsfolgeperiode $TS$ bei der die Pulse durch das c) Trigger-Signal ausgelöst werden (Vasiljević 2014, S. 37) .....	13
Bild 2.6 Funktion eines Scanning Lidar-Gerätes, eigene Darstellung nach Leosphere .....	15
Bild 2.7 Ermittlung der radialen Geschwindigkeit: a) ein Sample Point von Dirac-Rückstreuung; b) ein Sample Point bei gaußscher Rückstreuung; c) $M$ Sample Points bei gaußscher Rückstreuung (Vasiljević 2014, S. 44) .....	17
Bild 2.8 Akkumulationsmethode (Vasiljević 2014, S. 46) .....	18
Bild 2.9 Ausgerichtet an der Lage des kartesischen Koordinatensystems a) der Windvektor; b) der Azimutwinkel; c) der Elevationswinkel .....	22
Bild 2.10 Messunsicherheitsermittlung anhand der GUM-Methode (JCGM 104:2009, S. 21) .....	30
3 Unsicherheiten bei Multi-Lidar-Windmessungen .....	31
Bild 3.1 Kategorisierung der Unsicherheiten in der Literatur und dieser Arbeit .....	31
Bild 3.2 Kategorien-Einteilung der Teilunsicherheiten bei radialer Geschwindigkeitsmessung.	32
Bild 3.3 Der erwartete Messpunkt P aufgrund von Toleranzen $\Delta\varphi$ und $\Delta\theta$ und Fehlern in der Erfassungsstrecke $\Delta D$ liegt an Punkt P' (Vasiljević 2014, S. 82) .....	35
Bild 3.4 Visualisierung der Abweichung aus Toleranz des Elevationswinkels $\Delta\varphi$ vom eigentlichem Messpunkt P mit dem Elevationswinkel ist $\varphi$ (keine maßstäbliche Darstellung) ..	37

Bild 3.5 Unsicherheit aus Kreuzungswinkel $\Delta\chi$ der Laserstrahlen mit zwei Geräten (links) (Stawiarski et al. 2013, S. 2053) und drei Geräten (rechts) (Jäger et al. 2019).....	46
Bild 3.6 Ishikawa Diagramm (allgemein).....	50
Bild 3.7 Ishikawa Diagramm I: Unsicherheit bei Ermittlung der radialen Windgeschwindigkeit	51
Bild 3.8 Ishikawa Diagramm II: Unsicherheit bei der Rekonstruktion des Windvektors durch Fehlerfortpflanzung .....	51
4 Unsicherheitsberechnung in Python .....	53
Bild 4.1 Kombiniertes Ishikawa Diagramm zeigt die Bestimmung der Gesamtunsicherheit bei der Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors .....	55
Bild 4.2 Mögliche Gerätestandorte (hellblau), geplante Windturbinenstandorte (grau) in UTM-Koordinaten .....	57
Bild 4.3 Einfluss der Single-Lidar Teilunsicherheiten bei der Verwendung von zwei und drei Lidar-Geräten.....	61
5 Statistische Untersuchung der Unsicherheit bei verschiedenen Return Times .....	64
Bild 5.1 Erklärung Return Time, Winkel in $^\circ$ , Zeit in s, die Winkelgeschwindigkeit beträgt $30^\circ/\text{s}$ (Jäger et al. 2020).....	66
Bild 5.2 Szenario 4: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die horizontale Windgeschwindigkeit bei den Return Times 5 s, 10 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s (auf der y-Achse) in Bezug auf 1-s-Return Time (x-Achse).....	70
Bild 5.3 Experimenteller Ansatz zur Berechnung des RMSE abhängig von der Windgeschwindigkeit mit den Messdaten von 1 s Return Time als Basiswert; die Windgeschwindigkeiten sind in $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ breite Windgeschwindigkeitsklassen eingeteilt .....	71
Bild 5.4 Theoretisch berechneter RMSE in Abhängigkeit von allen gemessenen Windgeschwindigkeiten; die Varianz wird aus der Gesamtheit der Messdaten je Return Time berechnet .....	72
Bild 5.5 Theoretisch berechneter RMSE in Anhängigkeit von $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ breiten Windgeschwindigkeitsklassen; die Varianz ist aus der Gesamtheit der Messdaten berechnet .	73
Bild 5.6 Korrelation aufeinanderfolgender Messungen bei Return Times 30 s, 60 s, 90 s, 120 s	75

## TABELLENVERZEICHNIS

2 Theoretische Grundlagen .....	8
Tabelle 2.1 Laserpuls-Typen (Vasiljević 2014, S. 36).....	19
4 Unsicherheitsberechnung in Python.....	53
Tabelle 4.1 Die Höhen ü. NN für die Aufstellorte 0 bis 9 der Lidar-Geräte sind gezeigt.....	57
Tabelle 4.2 Höhen ü. NN sind für die Windturbinen mit den Nummern 10 bis 19 und die Messpunkt-Höhen ( $HG + 160\text{ m}$ ) enthalten .....	58
5 Statistische Untersuchung der Unsicherheit bei verschiedenen Return Times.....	64
Tabelle 5.1 Übersicht der Szenarien 2, 4 und 5 der Messkampagne Drantum in Dänemark.....	65
Tabelle 5.2 Szenario 4: Informationen zu den Scannern 57, 58 und 59; Winkel des Lasers bleiben bei der Messung konstant.....	65
Tabelle 5.3 Vergleich statistischer Werte aus den Szenarien 2, 4 und 5; [Werte von 5-s- und 120-s-Return Time] .....	74

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AOM	Akusto-optischer Modulator
CW	Continuous Wave
DBS	Doppler Beam Swinging
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
engl.	Englisch
EU	Europäische Union
FWHM	Full Width Half Maximum
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEE	Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik
kWh	Kilowattstunde
Lidar	Light Detection and Ranging
LOS	Line of Sight
LRWS	Long-range WindScanner
ML	Multi-Lidar
MP	Messpunkt
NN	Normalnull
PPM	Parts per Million

PRF	Pulse Repetition Frequency
RMSE	Root Mean Square Error
ROS	Remote Operation Station
RSD	Remote Sensing Device
SNR	Signal-zu-Rauschverhältnis in dB
SRWS	Short-range WindScanner
VCS	Version Control System
WEA	Windenergieanlagen

## ÜBERSETZUNGSVERZEICHNIS

Accuracy	Richtigkeit / Präzision
Acquisition Board	Erfassungseinrichtungs-Platine
Azimuth Angle	Azimutwinkel
Beam	Laserstrahl
Bias	Systematischer Fehler
Complex Terrain	Schwieriges Gelände (Hau 2014, S. 606)
Continuous Wave Laser	Dauerstrichlaser
Digital Surface Model	Digitales Oberflächenmodell
Digital Terrain Model	Digitales Geländemodell
Display Range Resolution	Darstellungs-Bereich-Auflösung
Elevation Angle	Elevationswinkel
Feedback Loop	Rückkopplungsschleife
Full Width Half Maximum	Spektrale Halbwertsbreite (Beuth 2017, S. 25)
Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
Hard Target Mapping	Kartierung undurchlässiger Gegenstände
Home-Position	Scanner-Kopf-Ausgangsposition
International Electrotechnical Commission	Internationale Elektrotechnische Kommission
Light Detection and Ranging	Methode zur Entfernung- und Geschwindigkeitsmessung
LOS (Line of Sight) / Radial Wind Speed	Radiale Windgeschwindigkeit

LOS Speed Retrieval Uncertainty	Unsicherheit bei Schätzung der radialen Geschwindigkeit aus rückgestreutem Licht
Maximum Likelihood Estimator	Maximum-Likelihood-Schätzer
Motor Shaft	Motorwelle / Antriebswelle
Pointing Uncertainty	Richtungsfehler
Power Law	Hellman´sche Potenzgesetz
Pulse Repetition Frequency	Frequenz der Pulswiederholungen
Random Error	Zufälliger Fehler
Ranging Uncertainty	Distanzunsicherheit
Remote Sensing Device	Fernerfassungsgerät
Return Times	Abtastrate
Root Mean Square Error	Standardabweichung
Rotary Encoder	Drehgeber
Signal to Noise Ratio	Signal-zu-Rauschverhältnis
Systematic Error	Systematischer Fehler
Temporal Undersampling	Wenige Messdaten im Messungs-Zeitintervall
Wind Shear Exponent	Windscherungs-Exponent

## SYMBOLVERZEICHNIS

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	-	Windscherungs-Exponent
$\theta$	°	Azimutwinkel
$\varphi$	°	Elevationswinkel
$c$	m·s <sup>-1</sup>	Lichtgeschwindigkeit
$d$	m	Messdistanz
$f_0$	Hz	Frequenz des Lichts, das vom AOM zum EDFA geht
$f_{AOM}$	Hz	vom Lidar-Gerät ausgesandte Frequenz des Lichts
$f_{bslight}$	Hz	Frequenz des rückgestreuten Lichts
$f_{CW}$	Hz	vom CW-Laser ausgesandte Frequenz
$f_{MLE}$	Hz	Maximum Likelihood Estimator Frequenz
$\Delta f$	Hz	Dopplerverschiebung, Frequenzverschiebung
$\lambda$	m	Wellenlänge
$M$	-	Sample Points
$M_r$	Hz	Messrate
$N_m$	-	Anzahl der ausgesandten Signale in Akkumulationszeit
$N$	V	Störleistung
PRF	Hz	Pulse Repetition Frequency
$S$	V	Signalleistung
$\Delta t$	s	Return Time

$T$	s	Länge der gesamten Messung
$T_A$	s	Akkumulationszeit
$T_{Abtast}$	s	Periodendauer der Signalabtastung
$T_{FFT}$	s	Observationszeit
$T_{pulse}$	s	Sendeimpulsdauer
$T_s$	s	Impulsfolgeperiode
$\tau$	s	Korrelationszeit
$u$	$m \cdot s^{-1}$	Windkomponente in Richtung Osten
$V_h$	$m \cdot s^{-1}$	Horizontale Windgeschwindigkeit
$v$	$m \cdot s^{-1}$	Windkomponente in Richtung Norden
$v_{radial}$	$m \cdot s^{-1}$	Radiale Windgeschwindigkeit
$V_{Wind}$	$m \cdot s^{-1}$	Dreidimensionaler Windvektor
$w$	$m \cdot s^{-1}$	Vertikale Windkomponente

# 1 EINLEITUNG

Windenergie ist im Jahr 2020 erneut die stärkste Energiequelle der öffentlichen Nettostromerzeugung<sup>1</sup> in Deutschland. Damit liegt der Anteil an erneuerbaren Energien erstmals bei über 50 % der öffentlichen Nettostromerzeugung. Das ist auf gute Windbedingungen und eine hohe Zahl an Sonnenstunden zurückzuführen (Fraunhofer ISE 2021). Um Standorte mit günstigen Windbedingungen auswählen zu können, ist die Bestimmung der Windressource elementar. Zu Beginn eines jeden Projektes für Windenergieanlagen (WEA) steht somit die Beschaffung zuverlässiger Winddaten.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit einem Teilbereich der Windmessung, genauer der Bestimmung der Unsicherheiten bei einem bestimmten Messverfahren. In dem Kapitel 1.1 wird kurz in das Thema Windenergie eingeführt, da die Grundlagen der Windenergie eng mit der Bestimmung der Windressource verflochten sind. In Kapitel 1.2 werden die Motivation zur Forschung in diesem Themenbereich und ein klares Ziel formuliert. Kapitel 1.3 erklärt die Herangehensweise der Bearbeitung anhand der Methodik und in Kapitel 1.4 wird die Struktur der Arbeit vorgestellt.

## 1.1 WINDENERGIE

Wind bezeichnet bewegte Luftmassen in der Atmosphäre. Die Entstehung ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Die ungleichförmige Erwärmung der Erdatmosphäre ist die bedeutendste davon. Die Wärmeabsorptionen von Oberflächen wie z. B. Wasser, Land und Wald sind ungleichförmig. Auch absorbieren die tropischen Regionen mehr Sonnenenergie als die Pole. Das verursacht Unterschiede in der Atmosphäre in Bezug auf die Dichte, den Druck und die Temperatur. Die dadurch entstehenden Kräfte bewegen die Luftmassen (Hau 2014, S. 540–541).

### 1.1.1 Überblick

Der Däne Poul La Cour war 1891 der Erste, der Windkraft zur Stromerzeugung nutzbar machte. Er baute eine Experimental-Windkraftanlage, die einen Dynamo antrieb. Das Design war einer Windmühle nachempfunden mit einem vierflügeligen Rotor. Die nächsten Windkraftanlagen dieses Typs konnten in verschiedenen Größen mit Leistungen von 10 bis 35 kW und einem Rotordurchmesser bis zu 20 m gebaut werden (Hau 2014, S. 24–25). Die Windenergie gewann

---

<sup>1</sup> Die Nettostromerzeugung ist die Differenz zwischen der Bruttostromerzeugung und dem Eigenverbrauch eines Kraftwerks (Fraunhofer ISE 2021).

durch die Energiekrise 1973 an Bedeutung, da westliche Industrieländer ihre Abhängigkeit von dem Rohstoff Öl verringern wollten. In Deutschland wurden deshalb Arbeiten zur Entwicklung der Windenergie ab 1974 gefördert (Hau 2014, S. 44–46). Zu Beginn dieser industrialisierenden Phase betrug die Nennleistung der in Deutschland gebauten WEA-Konzepte in etwa 200 bis 600 kW bei einem Rotormesser um die 50 m (Hau 2014, S. 53–54). Die 2018 gebauten WEA haben eine durchschnittliche Nennleistung von circa 3,3 MW und einen durchschnittlichen Rotordurchmesser von 118 m (Fraunhofer IEE 2018).

Politisch gesehen ist im Dezember 2019 die Relevanz der Weiterentwicklung der erneuerbaren Energien erneut durch den Grünen Deal der Europäischen Union (EU) in den Fokus gerückt worden. Der Grüne Deal ist eine Strategie, mit der innerhalb der EU eine ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft entstehen soll, in der im Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden. Die „Versorgung mit sauberer, erschwinglicher und sicherer Energie“ ist ein Element dieser Strategie (Europäische Kommission 2019). Im Jahr 2019 leistete die Windenergie mit 51,6 % den größten Beitrag zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Das entspricht einer Strommenge von 126 Mrd. kWh, die mit Windenergie auf Land und See erreicht wurde (Umweltbundesamt 2020, S. 8–9).

Es gibt bestimmte Windgeschwindigkeitsbereiche, in der eine Anlage Leistung erbringen kann. Ist der Wind zu schwach oder zu stark, wird kein Strom generiert. Die WEA vom Typ Enercon E-115 ist die im Jahr 2018 am häufigsten installierte WEA. Das Datenblatt dieses Modells besagt, dass bei Windgeschwindigkeiten ab  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  bereits eine geringe Leistung von 3 kW entnommen werden kann. Die Nennleistung von 3.000 kW erreicht diese WEA bei Windgeschwindigkeiten zwischen 12 und  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Die Abregelgeschwindigkeit beträgt nach Herstellerangaben 28 bis  $34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (ENERCON 2015, S. 26–27). Bei der Enercon E-115 ist eine sogenannte Sturmregelung integriert, um die Abregelung zu steuern. Statt bei einem 3-Minuten-Mittelwert von  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  bzw. bei einem 15-Sekunden-Mittelwert von  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  die Anlage zu stoppen, ermöglicht die Sturmregelung einen Betrieb, der in einem anlagenspezifischen Windgeschwindigkeitsbereich die Nenndrehzahl linear reduziert. Beträgt der 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit  $34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , stoppt die Anlage. So können zahlreiche Stoppvorgänge vermieden werden, die zu Ertragsverlusten führen würden (ENERCON 2015, S. 34). Die Abschaltgeschwindigkeit wird durch die festigkeitsmäßige Auslegung der Struktur der WEA bestimmt (Hau 2014, S. 110). Da es sich bei diesen Werten um Angaben des Herstellers handelt, sollten sie mit Bedacht weiterverwendet werden. Um ein Gefühl für die Größenordnungen von Windgeschwindigkeiten zu bekommen, sind die Werte jedoch hilfreich. So wird eine Basis für die Interpretation von Größenordnungen der Unsicherheiten geschaffen.

Für die Windenergie ist insbesondere die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe von Bedeutung. Die Windgeschwindigkeit in unmittelbarer Bodennähe wird durch die Reibung der bewegten Luftmassen an der Erdoberfläche auf null abgebremst. In großer Höhe ist der Wind ungestört von einer derartigen Einwirkung. In dem Bereich dazwischen steigt die Windgeschwindigkeit folglich mit der Höhe an (Hau 2014, S. 556). Bei der Windenergie gilt, dass die entnehmbare Leistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ansteigt (Hau 2014, S. 542). Somit hat die Nabenhöhe<sup>2</sup> einen bedeutenden Einfluss auf die Effizienz der WEA. Im Jahr 2018 liegt die durchschnittliche Nabenhöhe bei 133 m. Die Steigerung der Effizienz mit der Höhe erklärt die Entwicklung zu größeren Anlagen und begründet die Notwendigkeit für validierte Fernmessverfahren.

### 1.1.2 Messtechnik

Meteorologische Daten sind in der Vergangenheit nicht mit dem Hintergrund einer technischen Nutzung des Windes durch WEA gesammelt worden. Aussagekräftige Messdaten bezüglich der Windeigenschaften bis 150 m Höhe mit Informationen zur Veränderung der Windgeschwindigkeit über die Höhe oder über geländeabhängige Windverhältnisse werden erst seit etwa 35 Jahren erfasst (Hau 2014, S. 539). In den Anfängen der Windmessungen für Windenergie und auch heutzutage wird hauptsächlich mit an Messmasten angebrachten Schalensternanemometern gemessen. Ein Schalensternanemometer besteht aus einem rotierenden Körper, der mit drei Halbkugelschalen verbunden ist. Der übliche Durchmesser derartiger Geräte beträgt in etwa 25 cm. Aufgrund der Größe der Messgeräte sind die Winddaten allerdings nur für ein relativ kleines Luftvolumen repräsentativ. Hinzu kommt, dass die Windrichtung und vertikale Windgeschwindigkeit bei diesem Verfahren nicht gemessen werden kann (Emeis et al. 2007, S. 337). Da Kenntnisse über die Genauigkeit von Anemometer-Messungen für die rasante Entwicklung der Windindustrie notwendig waren, sind die bei diesem Verfahren auftretenden Unsicherheiten gut erforscht (Vasiljević et al. 2020). Eine dem Schalensternanemometer verwandte Methode zur Messung des Windes ist das Ultraschall Anemometer. Mittels eines akustischen Messprinzips können die sich schnell verändernden Windgrößen wie Böen- und Spitzenwerte, mit hoher Präzision ohne Unsicherheit durch Trägheit, gemessen werden. Bei der Verwendung eines Sternschalenanemometers beeinflusst die Wirkung der Massenträgheit der Schalen die Windmessung.

---

<sup>2</sup> Die Nabenhöhe ist die Höhe der Rotormitte über der Geländeoberfläche (TR 6).

Es gibt weitere Messmethoden, die kontaktlos messen und sich im Laufe der Jahre entwickelt haben. Seit den frühen 2000ern sind im Bereich der Windenergie die ersten kommerziellen Lidar-Systeme zur Windmessung verfügbar (Emeis et al. 2007, S. 342). Lidar steht für „Light Detection and Ranging“ und ist eine dem Radar verwandte Methode. Durch das Aussenden von Laserpulsen und der Betrachtung der empfangenen Rückstreuung kann die Windgeschwindigkeit und Windrichtung ermittelt werden (Hau 2014, S. 576). Eine Lidar-Geräteklasse, die sogenannten Profiling Lidar-Geräte, werden für die Windmessung bereits verwendet. Für die Messung mit einem Profiling Lidar wird jedoch eine Homogenitätsannahme für das Windfeld getroffen, die insbesondere in bewaldeten oder hügeligem Gelände eine Ungenauigkeit in die Messung einbringt. Mit dem Ziel Unsicherheiten bei derartigen Messungen zu verringern werden Messungen mit einer anderen Lidar-Geräteklasse untersucht. Die Scanning Lidar-Geräte erfordern keine derartige Annahme von Homogenität im Windfeld.

Die Genauigkeit der Bestimmung der Windressource mit mehreren Lidar-Geräten ist abhängig von den auftretenden Messunsicherheiten. In dieser Diplomarbeit wird der Fragestellung nachgegangen, welche Unsicherheiten auftreten und wie groß der Einfluss der jeweiligen Teilunsicherheit ist. Eine Teilunsicherheit wird ausgewählt und statistisch untersucht.

### **1.2 MOTIVATION UND ZIEL**

In den letzten Jahrzehnten ist die Entwicklung der Windindustrie rasch vorangeschritten. Die Größe, Leistung und Anzahl der Windturbinen sind gewachsen, woraus der Bedarf nach adäquaten Messverfahren zur Bestimmung der Windressource entsteht. Höhere Nabenhöhen und größere Rotordurchmesser der Turbinen bedeuten höhere Messmasten und damit einen hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand für Herstellung, Installation und Instandhaltung. Die Weiterentwicklung von Fernmessverfahren und das Wissen über deren Genauigkeit sind wichtige Beiträge zur Validierung dieser Messstrategie und ein erster Schritt, um eine Veränderung der Norm herbeizuführen.

Laut Hasager et al. (2013) können bei großen Offshore Windparks in einer Zeitspanne von 25 Jahren Einsparungen von etwa 11 Mio. EUR pro Jahr erreicht werden, wenn die Unsicherheit der vorhergesagten mittleren Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe um  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  reduziert werden kann. Einsparungen in dieser Größenordnung begründen die Relevanz der Auseinandersetzung mit der Thematik Unsicherheiten bei Multi-Lidar-Windmessungen. Die Verringerung von Kosten zur Nutzung der Windenergie als erneuerbare Energiequelle ist wichtig für die Wettbewerbsfähigkeit mit anderen Stromproduzenten. Das Fraunhofer-Institut für

Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) forscht derzeit im MILIA-Projekt. Hinter diesem Pseudonym verbirgt sich der Begriff „Technische Weiterentwicklung von Multi-Lidar-Messkampagnen für Ertragsprognose und Performance Verification“. Im Rahmen dieses Projektes soll der bislang fehlende Nachweis für die Eignung von Multi-Lidar-Systemen für die Ertragsprognose und für die Standortkalibrierung erbracht werden, sodass das Verfahren Einzug in die derzeit geltenden IEC-Normen und Technischen Richtlinien erhält. Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, einen Teil der dafür notwendigen Messunsicherheitsabschätzung durchzuführen. Darüber hinaus sollen im MILIA-Projekt die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Windpotenzials und der Windströmung reduziert werden. Damit sollen die technischen Voraussetzungen und Verfahren geschaffen werden, WindScanner als virtuelle Messmasten einzusetzen (Fraunhofer IEE).

Die Norm IEC 61400-12-1:2017 für Windenergieanlagen wird von der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (International Electrotechnical Commission, IEC) veröffentlicht. Nach IEC-Norm müssen bestimmte Messanordnungen für die Bestimmung der Windgeschwindigkeit eingehalten werden. Die derzeitige Vorschrift ermöglicht es nicht, ausschließlich mit einer Fernerfassungseinrichtung (Remote Sensing Device, RSD) zu messen. Stattdessen muss in jedem Fall ein Messmast zur Überwachung des Verhaltens des RSD aufgebaut werden (Norm IEC 61400-12-1:2017). In den nationalen Vorschriften, den Technischen Richtlinien für Windenergieanlagen Teil 6: Bestimmung von Windpotenzial und Energieträgen (TR 6), wird die Verwendung von Profiling Lidar-Geräten zur Bestimmung der Windressource anerkannt. Dennoch gibt es auch keine Regelungen für die Verwendung von Scanning Lidar-Geräten. Damit sich ein Messverfahren etabliert ist eine umfangreiche Untersuchung der auftretenden Messunsicherheiten notwendig. Die Bestimmung einer Unsicherheit bei Multi-Lidar-Windmessungen ist dafür ein elementarer Schritt.

### 1.3 METHODIK

Um die Gesamtunsicherheit bei Multi-Lidar-Windmessungen einzuschätzen, wird das Verfahren nach dem „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (JCGM 104:2009) angewendet. Die Unsicherheit gibt die Streuung der Werte an, die der Messgröße auf der Grundlage genutzter Informationen beigeordnet ist. Deshalb ist es eine geeignete Methode, um die Übereinstimmung zwischen einem gemessenen und einem wahren Wert zu beurteilen (JCGM 104:2009). Das Vorgehen ist wie folgt: Zuerst werden Größen gesucht, die die Messung beeinflussen können. Es sollten Fehler aus allen Quellen (systematischen und zufälligen) zur Einschätzung der Unsicherheit berücksichtigt werden (JCGM 104:2009). Die betrachteten Größen sind die Teilunsicherheiten, die

in Kapitel 3 aufgeführt sind. Sie werden aus der Literatur und den Herstellerangaben zusammengestellt und erklärt. Dann werden die Eingangsgrößen einzeln mithilfe von Formeln, Annahmen und basierend auf der Literatur quantifiziert. Diese Werte werden anschließend miteinander kombiniert, um eine Gesamtunsicherheit zu erhalten. Die Berechnungen dafür werden in der Programmiersprache Python realisiert, indem geeignete Funktionen und Algorithmen implementiert werden.

Eine im August 2020 veröffentlichte Arbeit beschäftigt sich mit der Quantifizierung von Unsicherheiten bei Multi-Lidar-Windmessungen. Mithilfe eines Python Programmcodes kann die Unsicherheit eines Dual-Doppler-Systems berechnet werden. Es handelt sich dabei um das Python-Tool YADDUM von Nikola Vasiljević (Vasiljević 2019). Die dazugehörige Abhandlung (Vasiljević et al. 2020) ist in Zusammenarbeit mit Courtney und Pedersen entstanden. In dem Projekt werden zwei synchronisierte Geräte zur Unsicherheitseinschätzung betrachtet. Der Unterschied zu den Implementierungen, die im Rahmen dieser Arbeit gemacht werden, besteht darin, dass auch die Möglichkeit für die Nutzung von drei synchronisierten Lidar-Geräten in der Berechnung gegeben ist. Deswegen ist es nicht möglich, die Funktionen aus YADDUM zu übernehmen.

Das Fraunhofer IEE verfügt bereits über ein Tool zur Berechnung von optimierten Lidar-Standorten und Messdauern für Profiling Lidar-Geräte. Aufgrund der verschiedenen Scan-Strategien von Profiling und Scanning Lidar-Systemen müssen die Skripte zur Berechnung der Unsicherheit für ein Scanning Lidar-Gerät neu entwickelt werden. Diese werden als eine Erweiterung in das bestehende Tool eingepflegt. Auf Grundlage der Ermittlung einer Gesamtunsicherheit von Scanning Lidar-Geräten kann das existierende Tool so verändert und erweitert werden, dass eine Optimierung von Standorten und Dauer der Messungen mit Scanning Lidar-Geräten durchgeführt werden kann. Dieser nächste Schritt ist ausdrücklich kein Bestandteil dieser Arbeit. Mit diesem Handwerkszeug können Messkampagnen so geplant werden, dass die Messdaten möglichst geringe Unsicherheiten beinhalten. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen insofern die Basis für eine erfolgreiche Optimierung der Ertragsprognose. In Kapitel 1.2 wurde bereits dargelegt, dass dies positive Auswirkungen auf die Kosten eines Projektes haben kann.

## **1.4 STRUKTUR DER ARBEIT**

Die Arbeit ist, neben der Einleitung in diesem Kapitel, in fünf weitere Teile gegliedert. Das zweite Kapitel leitet in die Thematik der Multi-Lidar-Windmessung im Rahmen einer Literaturstudie ein. Zuerst wird erklärt, wie die Multi-Lidar-Windmessung funktioniert. Es werden Anwendungsgebiete von Multi-Lidar-Systemen in flachem und schwierigem Gelände sowie urbanen Gegenden

vorgelegt. Außerdem wird ein Überblick über die Terminologie und die Grundlagen der Unsicherheitseinschätzung gegeben. In Kapitel 3 werden Unsicherheiten von Multi-Lidar-Windmessungen erklärt und zum Teil quantifiziert. Das darauffolgende Kapitel beschreibt die Implementierung dieser Teilunsicherheiten in einem Python-Skript, sodass eine Gesamtunsicherheit ermittelt werden kann. In Kapitel 5 wird anhand von Messdaten statistisch der Einfluss einer Teilunsicherheit auf die Größe der Unsicherheit untersucht. Kapitel 6 bildet den Schluss dieser Arbeit. Es fasst die Ergebnisse zusammen und gibt ein Fazit sowie einen Ausblick für das Thema Unsicherheiten in der Multi-Lidar-Windmessung.

## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Dieses Kapitel dient im Allgemeinen als Einleitung in die Grundlagen der Lidar-Windmessung und der Unsicherheitseinschätzung. In Kapitel 2.1 wird die Windmessung mit mehreren Geräten (Multi-Lidar, ML) erklärt und es wird beschrieben, wie eine ML-Windmessung funktioniert. Das Kapitel 2.2 gibt einen Überblick über die Verwendung von ML-Systemen für die Standortbewertung in flachem und schwierigem Gelände sowie im urbanen Raum. Auch die Hemmnisse für einen flächendeckenden Einsatz des ML-Verfahrens werden kurz erklärt. Kapitel 2.3 behandelt Grundlagen und Terminologie für die Unsicherheitsberechnung, denn das Thema Messunsicherheit nimmt eine zentrale Rolle bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit ein.

### 2.1 MULTI-LIDAR-WINDMESSUNG

Ein mögliches Verfahren, um Winddaten für die Energieertragsermittlung von Windparks zu erhalten, ist die Lidar-Windmessung, dabei steht Lidar für „Light Detection and Ranging“. Diese Windgeschwindigkeitsmessungen basieren auf der Aussendung von Laserstrahlen und der Analyse des rückgestreuten Signals. Multi-Lidar-Windmessungen sind Messungen der Windgeschwindigkeit mit zwei oder mehreren Lidar-Geräten. Das Vorgehen bei der Messung wird detailliert erläutert. In Kapitel 2.1.1 wird zuerst ein Überblick über zwei Lidar-Messverfahren und das Lidar-Gerät gegeben. In Kapitel 2.1.2 werden das Funktionsprinzip der Lidar-Windmessung, in 2.1.3 die Weiterverarbeitung der Messdaten und in 2.1.4 die Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors erklärt.

#### 2.1.1 Lidar-Messverfahren und das Lidar-Gerät

Die folgenden Erklärungen zum Lidar-Gerät und dem Messverfahren, setzen die Kenntnis über die Definitionen der Winkel zur Laserstrahl-Ausrichtung voraus. Es gibt zwei Winkel, mit denen der Laserstrahl auf die Messpunkte gerichtet wird. In Bild 2.1 sind die Definitionen dieser Winkel gezeigt.

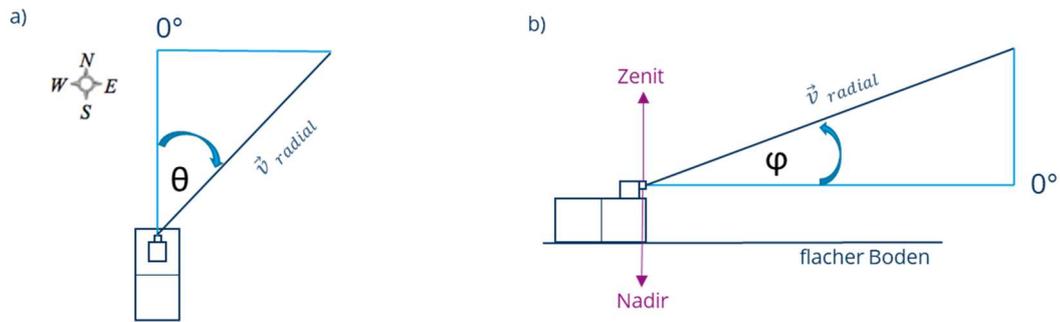


Bild 2.1 Definitionen der Ausrichtung wenn  $v_{radial}$  gemessen wird a) Azimutwinkel  $\theta$ ; b) Elevationswinkel  $\varphi$

Der Azimutwinkel  $\theta$  ist der Winkel zwischen dem auf die Horizontale projizierten Laserstrahl und dem geographischen Norden. Er umfasst die Winkel von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ , wobei  $0^\circ$  der Norden und  $90^\circ$  der Osten sind. Der Elevationswinkel  $\varphi$  liegt zwischen dem Laserstrahl und der horizontalen Ebene. Dieser Winkel kann Werte von  $-90^\circ$  bis  $90^\circ$  annehmen. Die  $90^\circ$  sind dabei der Zenit,  $-90^\circ$  der Nadir und die  $0^\circ$  liegen somit auf der Horizontalen.

### 2.1.1.1 Lidar-Verfahren

Das in dieser Arbeit behandelte Messverfahren mit mehreren Scanning Lidar-Geräten wird Multi-Lidar-Messung genannt und in Bild 2.2 von dem klassischen Profiling Lidar-Verfahren abgegrenzt. Wind Profiling Lidar-Geräte nutzen eine Scan-Strategie, die auf einem kegelförmigen Scan basiert und auch Doppler Beam Swinging (DBS) genannt wird (in Bild 2.2 rechts).

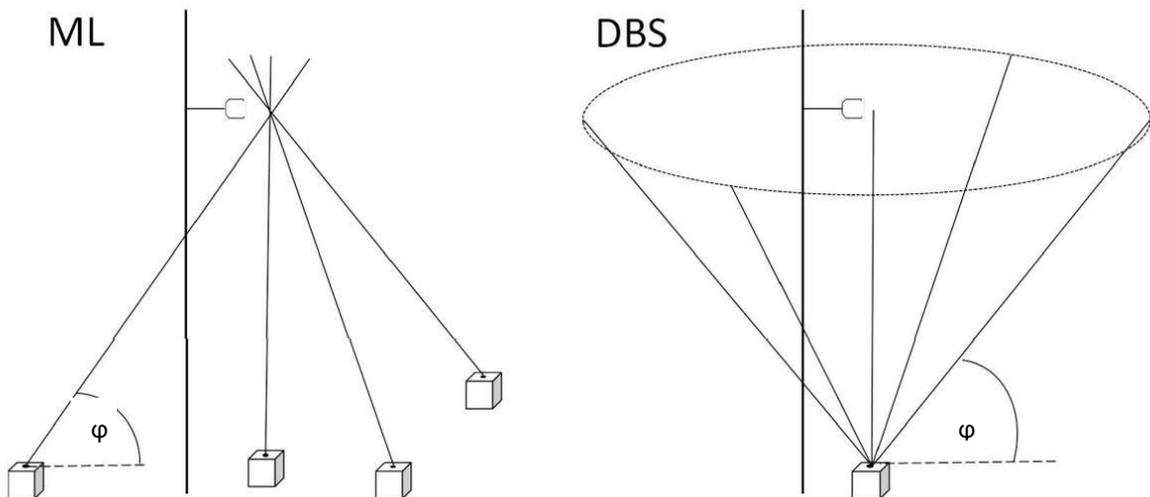


Bild 2.2 Skizze von Multi-Lidar (ML) und Doppler Beam Swinging (DBS) Messungen, Aufbau neben einem Messmast mit Ultraschall Anemometer (Pauscher et al. 2016, S. 4)

Bei dem DBS-Scan wird der Laserstrahl auf vier Messpunkte mit gleichem Elevationswinkel  $\varphi$  und  $90^\circ$  auseinanderliegenden Azimutwinkeln gesteuert. Mit der Annahme, dass die horizontale Windströmung in dem Bereich homogen ist, wird aus den vier Messpunkten die Geschwindigkeit

direkt über dem Lidar-Gerät abgeleitet. Die vertikale Geschwindigkeit wird durch einen fünften Messpunkt mit einem gegen den Zenit gerichteten Laserstrahl vermessen (Pauscher et al. 2016, S. 4).

Im linken Bereich von Bild 2.2 ist die Multi-Lidar-Scan-Strategie abgebildet. Um zwei Komponenten des Windvektors zu messen, werden zwei synchronisierte Lidar-Geräte benötigt. Drei Geräte sind notwendig, um einen dreidimensionalen Windvektor abzuleiten (Stawiarski et al. 2013, S. 2044). Die Laserstrahlen der verschiedenen Geräte werden auf denselben Messpunkt gelenkt, um die Windgeschwindigkeit zu messen. Tatsächlich wird bei dem Verfahren nicht nur an einem Punkt, sondern innerhalb einer sogenannten Range Gate gemessen. Die Range Gate ist ein entlang des Laserstrahls orientiertes Messvolumen. Durch Kreuzung der Messvolumina der verschiedenen WindScanner können virtuell Messmasten aufgestellt werden, was eine Alternative zu physischen Messmasten darstellt. Die Reichweite und Flexibilität in der Scanner-Kopf-Ausrichtung ermöglicht die Vermessung mehrerer Standorte im geplanten oder realisierten Windpark mit einem einzigen Messaufbau (Fraunhofer IEE).

Die Verwendung mehrerer Scanner hat im Allgemeinen den Vorteil, dass großräumige Turbulenz vom Multi-Lidar-Verfahren akkurat aufgezeichnet werden kann (Pauscher et al. 2016, S. 20). Das wird möglich durch die Mehrzahl von synchronisierten Lidar-Geräten, die aus verschiedenen Richtungen messen. Aufgrund der Scan-Methode muss die Annahme eines homogenen Windfeldes nicht getroffen werden (Pauscher et al. 2016, S. 4). Insbesondere in schwierigem Gelände ist das von Bedeutung, da hier vermehrt inhomogene Strömungen auftreten. In schwierigem Gelände kommt es bei Messungen mit Profiling Lidar-Geräten aufgrund der Scan-Methode zu einem prinzipbedingten Messfehler. Grund dafür ist die aus vier Messpunkten abgeleitete horizontale Windgeschwindigkeit. Abhängig von der Messhöhe und dem Elevationswinkel können diese Punkte relativ weit auseinanderliegen. Somit ist es wahrscheinlich, dass in schwierigem Gelände die Homogenitäts-Annahme nicht gültig ist und die Geschwindigkeiten deutlich voneinander abweichen. Im Vergleich dazu werden bei der Verwendung eines Multi-Lidar-Messverfahrens bedeutend bessere Korrelationen der Messergebnisse mit den Werten von Ultraschall Anemometern erreicht (Pauscher et al. 2016).

### 2.1.1.2 Long-range WindScanner

Es gibt zwei Arten von Scanning Lidar-Geräten mit unterschiedlichen Reichweiten. Long-range WindScanner (LRWS) senden gepulste Laserstrahlen aus und haben große Reichweiten von 8 km. Short-range WindScanner (SRWS) senden kontinuierliche Lichtwellen aus und sind in kürzeren

Distanzen insbesondere für Messungen von Turbulenz geeignet (Mann et al. 2017). In dieser Arbeit werden ausschließlich die LRWS betrachtet. In Bild 2.3 ist der LRWS WINDCUBE 200s der Firma Leosphere abgebildet.

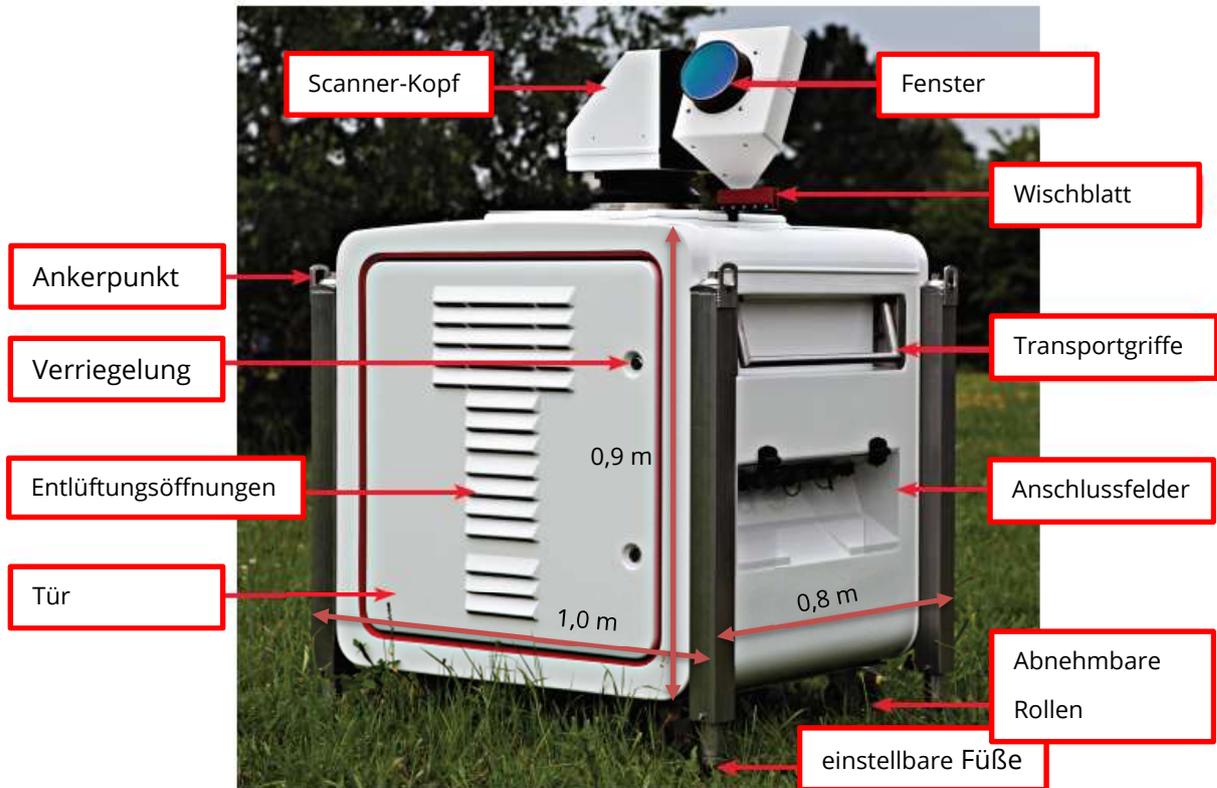


Bild 2.3 Longe-range WindScanner, Darstellung von Leosphere, S. 19 übersetzt und Maße eingefügt

Das Gerät hat AußenmaÙe von etwa 1 m x 0,8 m x 0,9 m und ein Gesamtgewicht von 232 kg (Leosphere, S. 25–30). Der Scanner-Kopf und die einstellbaren FüÙe sind Komponenten, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit von Bedeutung sind. Die restlichen Beschriftungen dienen der allgemeinen Orientierung.

### 2.1.2 Funktionsprinzip der Lidar-Windmessung

Nach Vasiljević (2014, S. 35) besteht die Messung aus vier Prozessen: (i) Die Emission des Laserpulses, (ii) die Steuerung der Laserpulse in die Atmosphäre durch Rotation des Scanner-Kopfes, (iii) die Erfassung des rückgestreuten Lichts und (iv) die Analyse des rückgestreuten Lichts (Vasiljević 2014, S. 34–35). Der Aufbau des Gerätes ist in Bild 2.4 dargestellt. Anhand des Aufbaus wird im Folgenden die Funktionsweise beschrieben.

Die ersten drei Prozesse Emission, Steuerung und Erfassung werden von einer einzigen und damit zentralisierten Hardware-Komponente gesteuert: dem Motion-Controller (in Bild 2.4 unten rechts).

Der Motion-Controller sendet sogenannte „Trigger“-Signale aus, um die weiteren Komponenten wie Azimut- und Elevationswinkelmotoren und den Puls-Generator zu steuern. Sobald der Puls-Generator das Trigger-Signal erhält, erfolgt die Emission und Erfassung eines Laserpulses. Um eine korrekte Messung durchzuführen, muss es eine eindeutige Zeitkontrolle bei der Steuerung geben (Vasiljević).

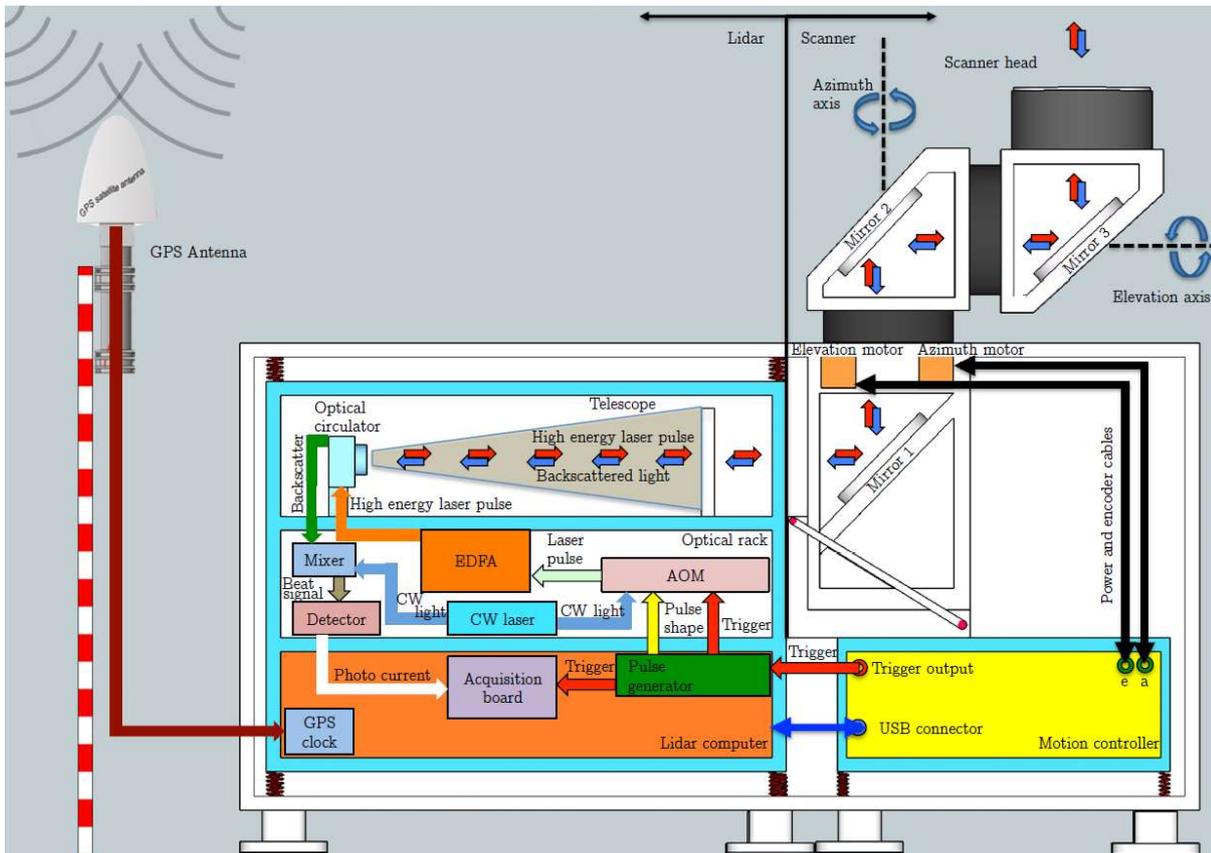


Bild 2.4 Schematische Darstellung der Funktion eines Longe-range WindScanner (LRWS) aus Vasiljević (2014, S. 38)

### 2.1.2.1 Emission des Laserpulses

Um die Emission des Laserpulses auszulösen, sendet der Motion-Controller ein Trigger-Signal an den Puls-Generator. Jeder Laserpuls hat eine charakteristische gaußsche Form, die in Bild 2.5 a gezeigt wird. Die Pulse haben eine Sendepulsdauer  $T_{\text{pulse}}$ , einen Energiegehalt  $E$  und die Wellenlänge  $\lambda$ . Die pro Sekunde ausgesendeten Pulse werden mit der Pulse Repetition Frequency (PRF) in der Einheit Hertz [ $1 \cdot s^{-1}$ ] angegeben. Der Kehrwert der PRF ergibt die Impulsfolgeperiode  $T_s$ .

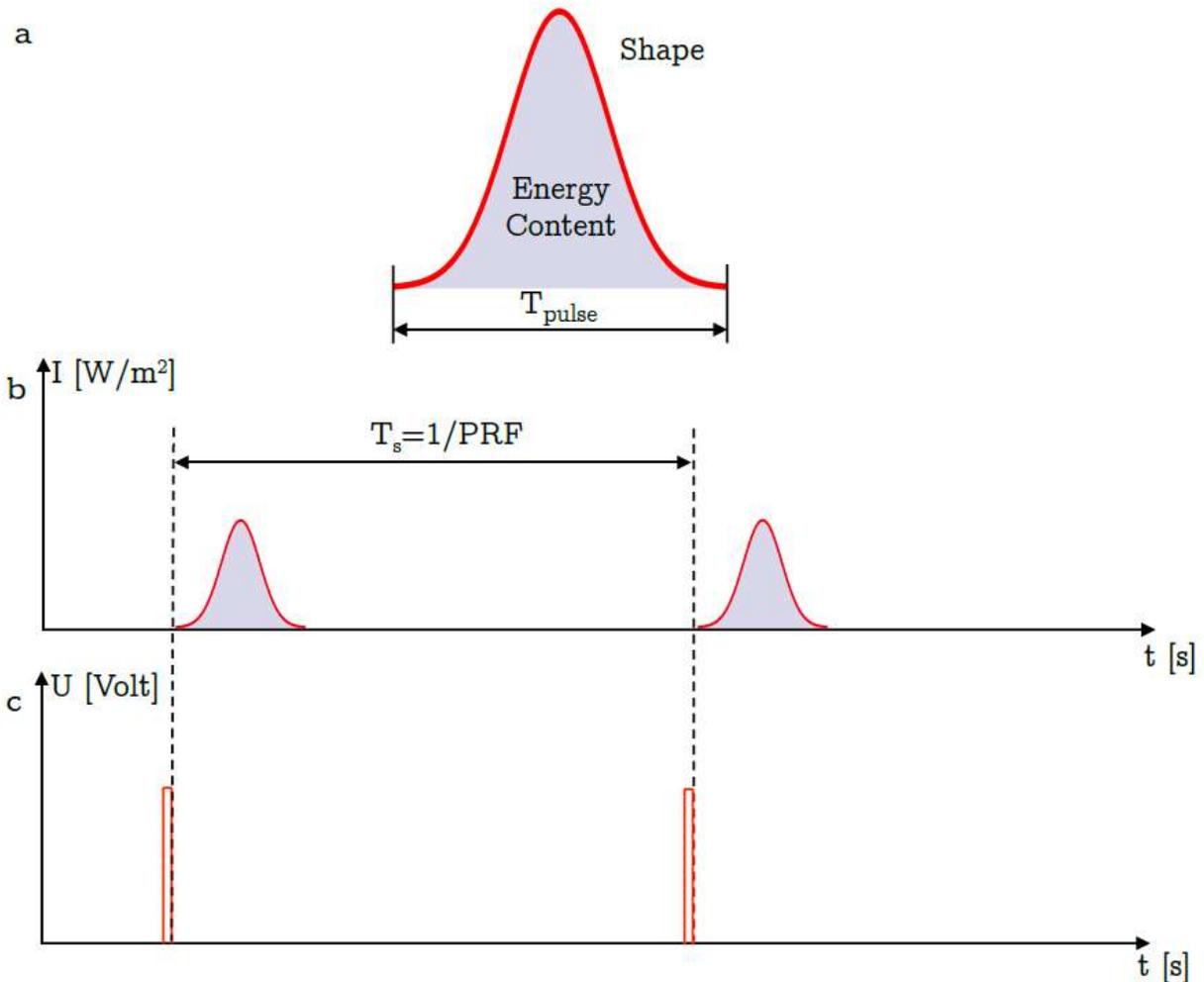


Bild 2.5 Erklärung zur Emission: a) Laserpuls mit der Sendeimpulsdauer  $T_{\text{pulse}}$ ; b) Impulsfolgeperiode  $T_s$  bei der die Pulse durch das c) Trigger-Signal ausgelöst werden (Vasiljević 2014, S. 37)

Der Puls-Generator sendet ein analoges Signal der Puls-Form sowie eine Kopie des Trigger-Signals an den Akusto-optischen Modulator (AOM). Ein AOM kann die Intensität, Frequenz und Richtung von Laserpulsen modulieren (Technische Universität Darmstadt 2020). Der AOM formt basierend auf den vom Puls-Generator zugesandten Informationen und dem energiearmen Laserlicht eines CW-Lasers<sup>3</sup> einen energiearmen Laserpuls, abgebildet in Bild 2.5 b. Der Prozess wird ausgelöst durch das Trigger-Signal, das in Bild 2.5 c abgebildet ist. Die Laserpuls-Frequenz des CW-Lasers  $f_{cw}$  wird nach Gleichung 2.1 verändert.

Gleichung 2.1 
$$f_0 = f_{cw} + f_{AOM}$$

Sobald der energiearme Laserpuls mit der Frequenz  $f_0$  geformt ist, wird dieser zu dem EDFA<sup>4</sup> gegeben, der den Energiegehalt des Laserpulses verstärkt. Dort wird der Hochenergie-Laserpuls

<sup>3</sup> Continuous Wave (CW)-Laser sind Dauerstrichlaser. Diese emittieren kontinuierlich Laserlicht.

<sup>4</sup> EDFA steht für Erbium-doped Fiber Amplifier und heißt auf Deutsch Erbium-dotierte Faserverstärker.

geformt. Anschließend geht der Hochenergie-Laserpuls zum sogenannten „Optical Circulator“. In Bild 2.4 wird ersichtlich, dass dieser die Richtungen „ausgesandter Laserstrahl“ und „rückgestreuter Laserstrahl“ unterscheidet. Das ermöglicht, dass sowohl der Sender als auch der Empfänger des Laserlichtes den gleichen optischen Pfad nutzen können. Das Teleskop hat die Aufgabe, den betrachteten Bereich zu vergrößern und fokussiert den Strahl auf einen bestimmten Distanzbereich. Dies reduziert die Strahldivergenz<sup>5</sup> in der Ferne. Als nächstes trifft der Laserpuls auf Spiegel, die das Laserlicht auf den zu untersuchenden Bereich richten (Vasiljević 2014, S. 36–38).

### 2.1.2.2 Ansteuerung der Motoren zur Ausrichtung des Scanner-Kopfes

Bei LRWS wird die Ausrichtung des Laserpulses üblicherweise von sich bewegenden Spiegeln gesteuert. Es gibt drei Spiegel in dem Gerät. Einer ist an dem feststehenden Gerät und zwei weitere sind in dem beweglichen Scanner-Kopf montiert. Der Scanner-Kopf hat zwei Freiheitsgrade in der Rotation und kann somit um die Azimut- und die Elevationsachse rotieren. Diese zwei Achsen sind zueinander rechtwinklig. Die Rotation des Scanner-Kopfes wird durch eine Rückkopplungs- und Vorschubkontrolle des Motion-Controllers überwacht. Die Rückkopplungsschleife basiert auf den Informationen eines Drehgebers<sup>6</sup>, der an der Motorwelle angebracht ist. Die Auflösung dieser Sensoren beträgt  $0.0001^\circ$  und entspricht somit der kleinsten ansteuerbaren Bewegung. Die maximale Winkelgeschwindigkeit, die für die Steuerung erreicht werden kann, beträgt  $50^\circ/\text{s}$  (Vasiljević 2014, S. 39–40).

### 2.1.2.3 Erfassung des rückgestreuten Lichts

Der Laserpuls wird in die Atmosphäre entlang der von Azimut- und Elevationswinkel vorgegebenen Richtung, auch Line of Sight (LOS) genannt, ausgesendet. Da angenommen wird, dass die Aerosolgeschwindigkeit der Windgeschwindigkeit entspricht, gibt die Interaktion des Laserstrahls mit den Aerosolpartikeln Aufschluss über die Windgeschwindigkeit (Vasiljević 2014, S. 40). Das Bild 2.6 zeigt schematisch, wie die Messung der radialen Windgeschwindigkeit, also der Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung, erfolgt.

---

<sup>5</sup> Strahldivergenz ist die Zunahme des Strahldurchmessers mit der Entfernung.

<sup>6</sup> Ein Drehgeber ist ein Sensor um Drehwinkel zu erkennen (engl. Rotary Encoder).

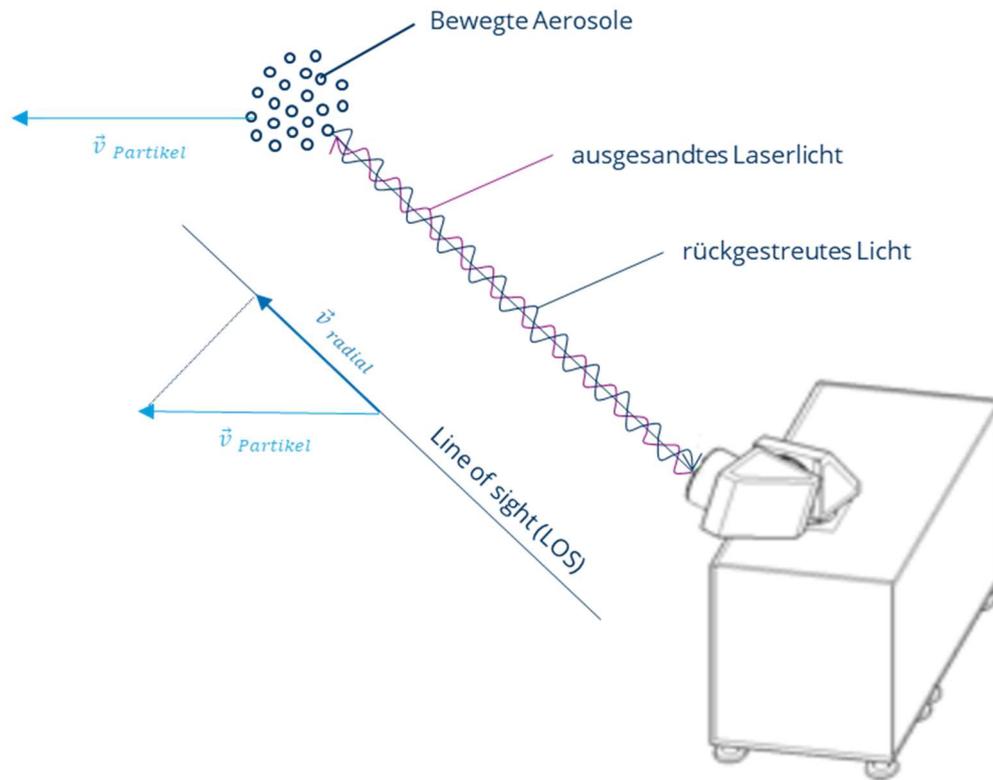


Bild 2.6 Funktion eines Scanning Lidar-Gerätes, eigene Darstellung nach Leosphere

Der Laserstrahl wird von Aerosolpartikeln reflektiert. Bei der Interaktion zwischen Partikel und dem Laserpuls wird ein kleiner Anteil des Laserpulses von den bewegten Partikeln zurück zum Lidar-Gerät gesendet, und es erfolgt eine Frequenzverschiebung aufgrund des optischen Doppler-Effektes. Das rückgestreute Licht hat folglich eine veränderte Frequenz, die mit  $f_{\text{bslight}}$  bezeichnet wird. In Gleichung 2.2 ist zu sehen, wie die Frequenz  $f_{\text{bslight}}$  von der Windgeschwindigkeit abhängt (Vasiljević 2014, S. 40–41).

Gleichung 2.2 
$$f_{\text{bslight}} = f_0 \left( 1 + 2 \cdot \frac{v_{\text{radial}}}{c} \right) = f_0 + \Delta f$$

Die Ausgangs-Frequenz  $f_0$  wird von der zweifachen radialen Windgeschwindigkeit  $v_{\text{radial}}$  geteilt durch die Lichtgeschwindigkeit  $c$  verschoben. Der Anteil  $\Delta f$  bildet diese Frequenzverschiebung ab, die auch Dopplerverschiebung genannt wird.

Aufgrund der Ausbreitung des Laserpulses durch die Atmosphäre erhält der Empfänger kontinuierlich rückgestreute Signale aus verschiedenen Entfernungen. Mit der sogenannten „Range Gate-Technik“ erfolgt eine Zuordnung der Signale in verschiedene Entfernungsgruppen. Diese Technik basiert darauf, die Zeit zwischen Aussenden des Pulses und Wiedereintreffen zur Ermittlung der Distanz zu nutzen.

Wenn das Rückstreu-Signal den Scanner erreicht, folgt es dem Pfad des ausgesandten Strahls zurück zum Optical Circulator. Wie in Bild 2.4 erkennbar ist, geht das rückgestreute Licht in den sogenannten „Mixer“ und wird mit dem energiearmen Laserlicht aus dem CW-Laser vermischt. Das energiearme Laserlicht entspricht der Form des Laserlichts, welches an den AOM gesendet wurde und ist somit als eine Arte Kopie des Signals zu verstehen. Die Vermischung der Kopie mit dem rückgestreuten Licht führt zu der Entstehung eines Klopf-Signals. Die Amplitude des Klopf-Signals entspricht der Differenz der zwei Signalfrequenzen (Rückstreu-Signal und CW-Signal). Dieses Klopf-Signal wird auf einen Photodetektor <sup>7</sup> fokussiert, der das Licht-Signal in ein analoges Signal umwandelt. Dieses Signal wird vom „Aquisition Board“ <sup>8</sup> mit einer Abtastrate  $f_s$  von 250 MHz in ein digitales Signal umgewandelt. Das in das Lidar eingebaute Aquisition Board bestimmt die Abtastrate. Da die Periodendauer dem Kehrwert der Frequenz entspricht, beträgt die Periodendauer der Signalabtastung  $T_{Abtast}$  4 ns. Jedes Mal, wenn ein Trigger-Signal von dem Motion-Controller ausgesandt wird, wandelt das Aquisition Board die Ausgabe des Photodetektors in ein digitales Signal um. Die Anzahl an Sample <sup>9</sup> Points in dem digitalisierten Signal bestimmt die maximale Distanz, in der die radiale Geschwindigkeit erfasst werden kann. Sample Points sind die Anzahl an Werten, die in der Zeit  $T_{Abtast}$  abgetastet werden (Vasiljević 2014, S. 39–43).

#### 2.1.2.4 Analyse der Messdaten

Die radiale Geschwindigkeit in einer Entfernung  $d$  kann von der Rückstreuung eines einzelnen Laserpulses mittels der Schätzung der mittleren Dopplerverschiebung  $\Delta f$  von  $M$  Sample Points der dazugehörigen digitalen Ausgabe des Photodetektors ermittelt werden. Die Sample Points bestimmen nach Gleichung 2.3 zusammen mit der Periodendauer der Signalabtastung  $T_{Abtast}$  die Observationszeit  $T_{FFT}$ .

Gleichung 2.3 
$$T_{FFT} = M \cdot T_{Abtast}$$

Die Sample Points, von denen das Licht zurückgestreut wird, liegen innerhalb eines Entfernungsbereiches, der mit  $[d - \Delta d/2, d + \Delta d/2]$  und dem Mittelpunkt in der Entfernung  $d$  als Zentrum definiert werden kann. Das nachfolgende Bild 2.7 zeigt, wie die Sendeimpulsdauer  $T_{Pulse}$  und die Observationszeit  $T_{FFT}$  mit dem Entfernungsbereich, von dem die Rückstreuung ausgewertet wird, zusammenhängen (Vasiljević 2014, S. 43–44). Dafür wird in Bild 2.7 a zuerst die Rückstreuung eines Dirac-Laserpulses dargestellt. Der Dirac-Oszillator ist die relativistische

---

<sup>7</sup> Absorbiert ein Photodetektor Licht, entsteht elektrischer Strom bzw. eine Photospannung (Paschotta).

<sup>8</sup> Ein Analog-Digital-Wandler wandelt analoge Signale in digitale Signale um, die von einem Prozessor interpretiert werden können (Measurement Computing).

<sup>9</sup> In der Statistik meint Sample eine repräsentative Stichprobe.

Verallgemeinerung für einen harmonischen Oszillator<sup>10</sup>. Zeigt eine charakteristische Größe in einem physikalischen System, wie z. B. die Koordinate eines Teilchens eine sinusförmige Zeitabhängigkeit, so handelt es sich um einen harmonischen Oszillator (Moshinsky und Szczepaniak 1989, L817; ETH Zürich). Die Rückstreuung bei der Verwendung eines Dirac-Lasers kommt aus einer Entfernung  $d$  und nicht aus einem Entfernungsbereich  $\Delta d$ .

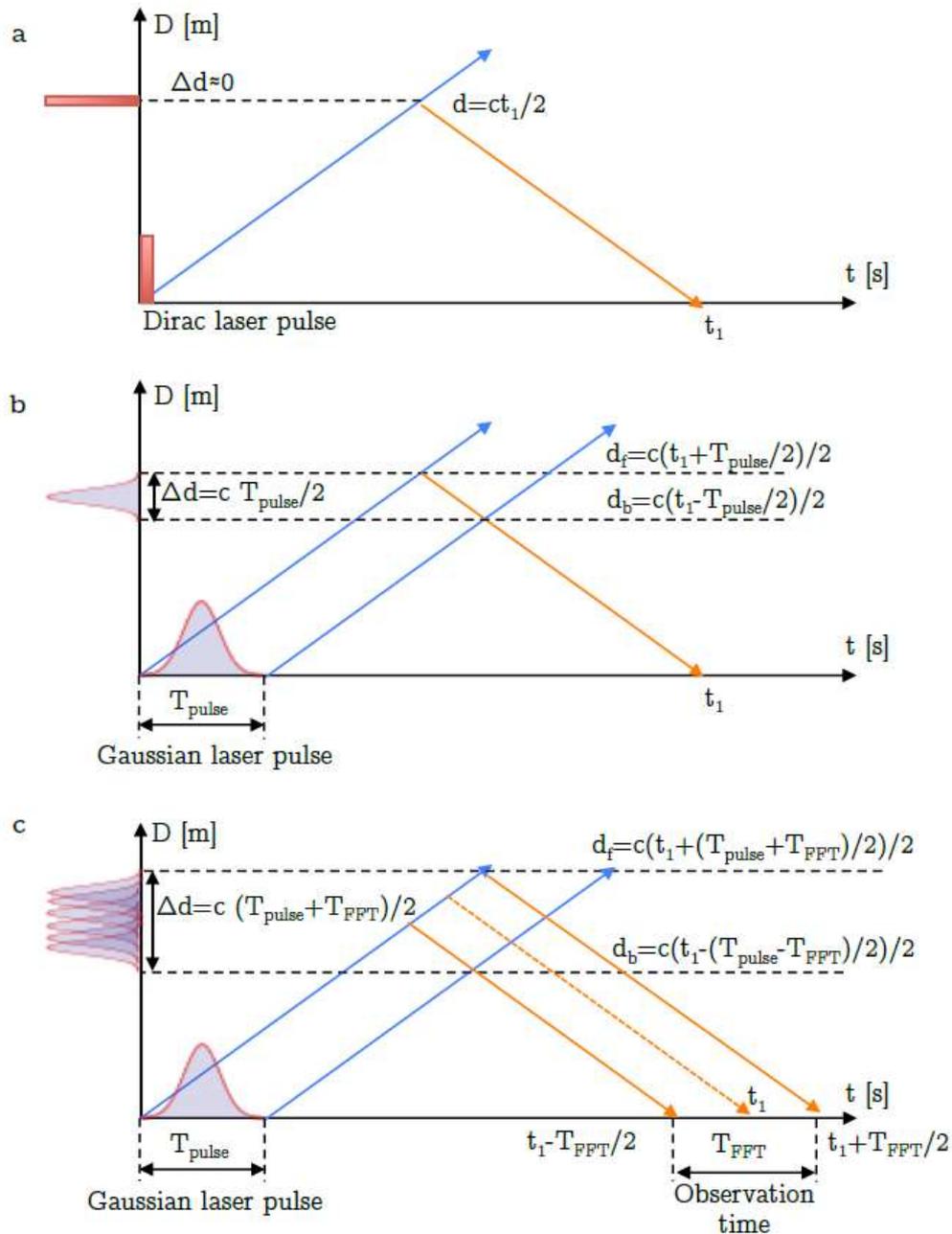


Bild 2.7 Ermittlung der radialen Geschwindigkeit: a) ein Sample Point von Dirac-Rückstreuung; b) ein Sample Point bei gaußscher Rückstreuung; c)  $M$  Sample Points bei gaußscher Rückstreuung (Vasiljević 2014, S. 44)

<sup>10</sup> Ein Oszillator ist ein Gerät zur Erzeugung von Schwingungen.

Für Abbildungen b und c wird die Rückstreuung hingegen aus einem Entfernungsbereich  $\Delta d$  erfasst (Vasiljević 2014, S. 43–45). Die Erfassung der Rückstreuung aus diesem Entfernungsbereich erfolgt innerhalb der Observationszeit  $T_{FFT}$ . Das Lidar-Verfahren basiert auf der in Bild 2.7 c dargestellten Variante. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt somit nicht an einem Punkt, sondern durch Mittelung der Messwerte innerhalb eines Probevolumens.

Das rückgestreute, diskrete Signal von  $M$  Sample Points in Bild 2.7 c wird in die Frequenzebene mittels einer Fast Fourier-Transformation (FFT) übertragen, einem Algorithmus zur effizienten Berechnung der diskreten Fourier-Transformation. Mit ihr kann ein zeitdiskretes Signal<sup>11</sup> analysiert werden, indem es in seine Frequenzanteile zerlegt wird (Vasiljević 2014, S. 44–46).

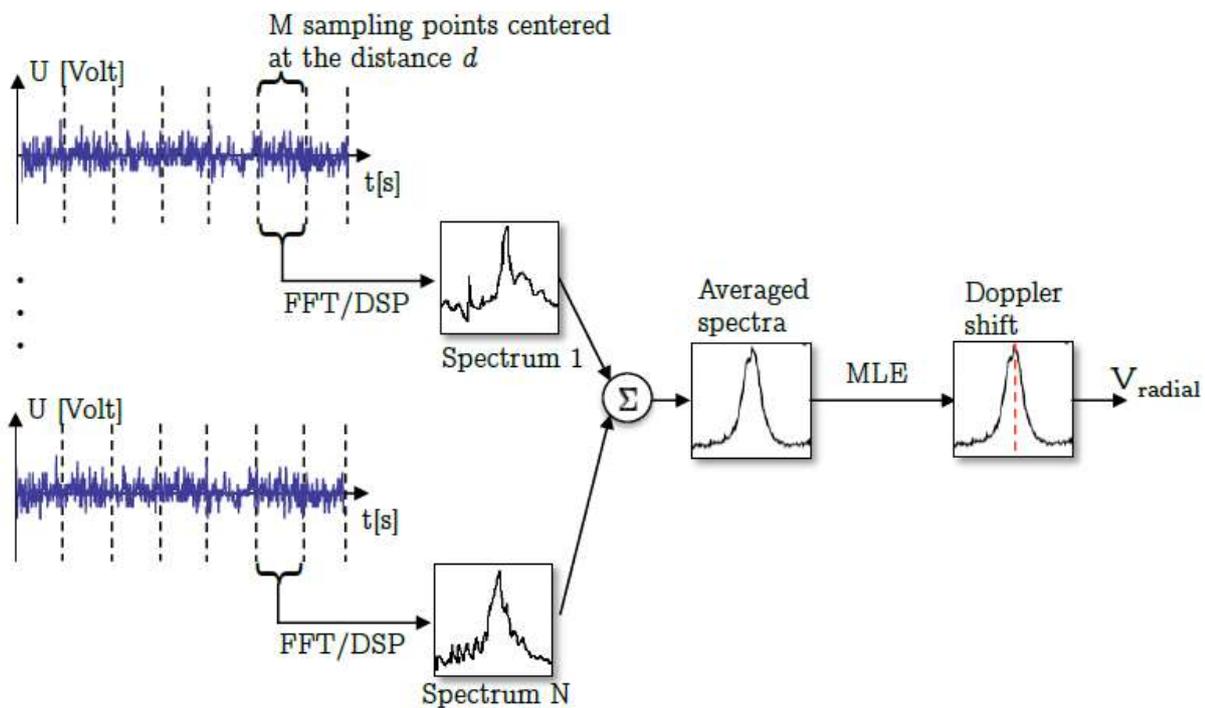


Bild 2.8 Akkumulationsmethode (Vasiljević 2014, S. 46)

Das Spannungs-Zeit-Diagramm in Bild 2.8 zeigt, dass das erfasste Signal verschiedenen, um die Distanzen  $d$  zentrierten  $M$  Sample Points, zugeordnet werden kann (vertikale gestrichelte Linien). Für jeden Distanzbereich  $[d - \Delta d/2, d + \Delta d/2]$  wird ein Spektrum 1 des transformierten Signals berechnet. Dieser Vorgang wiederholt sich für die Signale aus den nächsten Impulsfolgeperioden. Das letzte Signal in der Akkumulationszeit wird in das N-te Spektrum für den Distanzbereich transformiert. Aus den berechneten Spektren des Distanzbereiches wird ein gemitteltes Spektrum gebildet. Anschließend wird ein Maximum-Likelihood-Schätzer (Maximum Likelihood Estimator,

<sup>11</sup> Ein zeitdiskretes Signal ist ein diskontinuierliches Signal, ein üblicherweise in gleichmäßigen Abständen abgetastetes Signal.

MLE) auf das gemittelte Spektrum angewendet und die Frequenz des Höhepunktes des Spektrums geschätzt. Um die mittlere Dopplerverschiebung  $\Delta f$  des Distanzbereiches zu erhalten, wird die AOM-Frequenz von der MLE-Frequenz  $f_{MLE}$  abgezogen.

$$\text{Gleichung 2.4} \quad \Delta f = f_{MLE} - f_{AOM}$$

Die mit Gleichung 2.4 berechnete Dopplerverschiebung  $\Delta f$  bezieht sich ausschließlich auf die Rückstreuung aus einem Bereich  $[d - \Delta d/2, d + \Delta d/2]$  mit der Distanz  $d$  als Zentrum. Neben der Dopplerverschiebung berechnet der MLE u. a. das Signal-zu-Rauschverhältnis aus dem Spektrum.

Um das Signal von  $M$  Sample Points in einem Spektrum auszudrücken, sollte die Observationszeit  $T_{FFT}$  länger sein als die Korrelationszeit  $\tau$  des Rückstreu-Signals, die mit der Länge der Sendeimpulsdauer  $T_{pulse}$  angenommen werden kann. Je enger das Spektrum ist, desto mehr Sample Points werden genutzt, um das Spektrum abzuleiten und desto größer ist der Entfernungsbereich  $[d - \Delta d/2, d + \Delta d/2]$ . Da jede Frequenzklasse im Spektrum in diesem Fall durch einen kleineren Frequenzbereich definiert ist, wird eine verbesserte Geschwindigkeits-Auflösung erreicht. Die Konsequenz ist eine vergrößerte Auflösung der Range<sup>12</sup>, da aus einem größeren Entfernungsbereich Sample Points gemessen werden. Es muss ein Kompromiss zwischen der Geschwindigkeits- und der Range-Auflösung eingegangen werden. Häufig wird die Observationszeit  $T_{FFT}$  der Sendeimpulsdauer  $T_{pulse}$  gleichgesetzt, um sicherzustellen, dass eine unabhängige Ermittlung der radialen Geschwindigkeit stattfindet (Vasiljević 2014, S. 43–46).

#### 2.1.2.5 Beispielwerte von zwei Laserpuls-Arten

Es gibt bei LRWS zwei Arten von Laserpulsen: einen Langeren Puls und einen Mittleren Puls. Obwohl es sich bei beiden Arten um Laserpulse von Long-range WindScanner handelt, unterscheiden sie sich in der Reichweite. Der Lange Puls hat Reichweiten von bis zu 8 km, während der Mittlere Puls bei einer doppelt so hohen Auflösung in bis zu 4 km Entfernung messen kann (Vasiljević 2014, S. 36). In Tabelle 2.1 sind diese zwei Arten mit der jeweiligen Pulse Repetition Frequency (PRF) gezeigt.

Tabelle 2.1 Laserpuls-Typen (Vasiljević 2014, S. 36)

Typ	Wellenlänge $\lambda$ [nm]	Sendeimpulsdauer $T_{pulse}$ [ns]	Gerät	Energiegehalt $E$ [ $\mu$ J]	PRF [kHz]
Langer Puls	1543	400	Leosphere 400	100	10
Mittlerer Puls	1543	200	Leosphere 300	50	20

<sup>12</sup> Die Range entspricht dem Entfernungsbereich. Wird die Range-Auflösung größer, bedeutet das ein größeres  $\Delta d$ .

Bei der Verwendung eines Langen Puls-Lasers sind die PRF geringer, der Energiegehalt doppelt so hoch und die Sendeimpulsdauer doppelt so lang. Letzteres hat zur Folge, dass die Aerosolpartikel dem Laserlicht in jeder Entfernung länger ausgesetzt sind. Das Signal-zu-Rauschverhältnis (Signal to Noise Ratio, SNR) setzt die Signalleistung  $S$  und Störleistung  $N$  miteinander ins Verhältnis und gibt so die Güte des Signals an (Gryning und Floors 2019). Bei schwachen Signalpegeln sinkt das SNR (ZHAW 2008, S. 2). Aerosolpartikel, die dem Licht länger ausgesetzt sind, erzeugen ein höheres SNR. Das bedeutet, dass die maximal erreichbare Distanz größer wird. Die Range Gate kann bei dem WINDCUBE 200s auf 25 m, 50 m, 75 m oder 100 m und bei dem WINDCUBE 400s auf 75 m, 100 m, 150 m oder 200 m eingestellt werden. Diese Längen geben den Entfernungsbereich an, in dem gemessen wird. Die minimale Entfernung  $d$  entspricht dem Zweifachen der kleinsten Range Gate (Leosphere, S. 29). Der Nachteil bei der Verwendung von Langen Pulsen ist, dass die Auflösung der Range zweimal größer ist als bei Mittleren Pulsen. Das bedeutet, dass Turbulenzen, die kleiner als die Range-Auflösung sind, herausgefiltert werden (Vasiljević 2014).

Der FFT-Algorithmus, der in dem Leosphere-System genutzt wird, um die Rückstreu-Signale in Frequenzbereiche zu übersetzen, arbeitet ausschließlich mit einer Anzahl  $M$  von Sample Points, die sich aus einer Zweierpotenz ergibt. Die entsprechenden minimalen Observationszeiten  $T_{FFT}$  für Mittlere und Lange Laserpulse sind folglich 256 und 512 ns. Das bedeutet eine minimale FFT Größe von 64 Punkten bei Mittleren und 128 Punkten bei Langen Laserpulsen. Das Zeitintervall der Akkumulationszeit kann im Allgemeinen nicht kleiner als 100 ms sein, da die WindScanner Client Software für eine Verarbeitung der erfassten Rückstrahlung in Echtzeit entwickelt wurde. Daraus ergibt sich eine minimale Anzahl an Akkumulationen  $N$  von 2000 und 1000 für Mittlere und Lange Laserpulse. Für beide Laserpuls-Typen beträgt die maximale Messrate 10 Hz (Vasiljević 2014, S. 45–46). Die Zusammenhänge sind mit Formeln und einer Beispielrechnung der Anlage 1 zu entnehmen.

### 2.1.3 Weiterverarbeitung

Der Schritt der Weiterverarbeitung erfolgt zwischen der Messung der radialen Geschwindigkeit und der Rekonstruktion des Windvektors. Dabei werden die Messdaten gefiltert und es werden Mittelwerte von festgelegten Intervallen gebildet. Der Mittelungszeitraum ist meist größer als die Messrate. Dieses Vorgehen ist erfahrungsgemäß ausreichend genau für die Bestimmung der Windressource.

### 2.1.3.1 Wahl der Filtergrenzen

Lidar-Messungen haben grundsätzlich einen hohen Anteil von Signalrauschen (Lenschow et al. 2000). Das Signal-zu-Rauschverhältnis sinkt bei schwachen Signalpegeln (ZHAW 2008, S. 2). Die Güte des Signals lässt sich somit aus dem SNR ablesen (Gryning und Floors 2019). Fehlerhafte Werte, sogenannte „Ausreißer“, entstehen z. B., wenn ein feststehender Gegenstand mit der Geschwindigkeit  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  gescannt wird oder fälschlicherweise Rückstreuung als übermäßig hohe Geschwindigkeiten aufgefasst werden. Um das Ergebnis nicht zu verfälschen werden diese Daten aus dem Datensatz herausgefiltert. Damit soll sichergestellt werden, dass die Messdaten genau sind. Es kann allerdings gleichzeitig zu einer geringen Datenverfügbarkeit führen, da teilweise eine erhebliche Anzahl an Messwerten herausgefiltert wird. Messrauschen kann herausgefiltert werden, indem ein minimaler Grenzwert festgelegt wird. SNR-Werte, die über einem festgelegten maximalen Grenzwert liegen, werden herausgefiltert, weil sie beispielsweise feststehende Gegenstände repräsentieren, die dann wie eine Windgeschwindigkeit von  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wirken (Stawiarski et al. 2013, S. 2051; Vasiljević 2014; Davoust et al. 2014, S. 3). Zur Einordnung gibt Davoust et al. (2014, S. 3) eine Größenordnung für minimale und maximale Grenzwerte. Bei der Messkampagne in Colorado, USA, wurden Messwerte außerhalb des Bereiches  $-19 \text{ dB}$  bis  $10 \text{ dB}$  herausgefiltert. Die Werte für den SNR-Filter können individuell festgelegt werden und beeinflussen somit die Datenverfügbarkeit und die Qualität der Messdaten. Sie sollten so gewählt werden, dass ausschließlich sinnvolle Messdaten verwendet werden und gleichzeitig ausreichend gemessene radiale Geschwindigkeiten verfügbar sind, um einen aussagekräftigen Mittelwert bilden zu können.

### 2.1.3.2 Zeitliche Mittelung der Messwerte

Bei hochfrequenten Messungen wird jede Sekunde ein Messwert an jedem Range Gate ermittelt. Mit einer solchen Menge an Daten umzugehen, ist aufwendig und bedeutet lange Rechenzeiten. Durch die zeitliche Mittelung der radialen Windgeschwindigkeiten wird der Schritt der Rekonstruktion des Windvektors erheblich beschleunigt. In der Windenergie findet häufig das Standard-Zeitintervall von 10 Minuten Anwendung (Pauscher et al. 2016, S. 782).

### 2.1.4 Rekonstruktion des Windvektors

Aus der radialen Windgeschwindigkeit kann der Windvektor abgeleitet werden. Dazu wird die Richtung des Laserstrahls in Abhängigkeit von dem Azimutwinkel  $\theta$  und dem Elevationswinkel  $\varphi$  in einem kartesischen Koordinatensystem beschrieben. So kann ein Vektor erstellt werden, der die

radiale Windgeschwindigkeit mit den Komponenten  $u$ ,  $v$  und  $w$  ins Verhältnis setzt. Die Winkel sind dafür, wie in der folgenden Abbildung gezeigt, definiert.

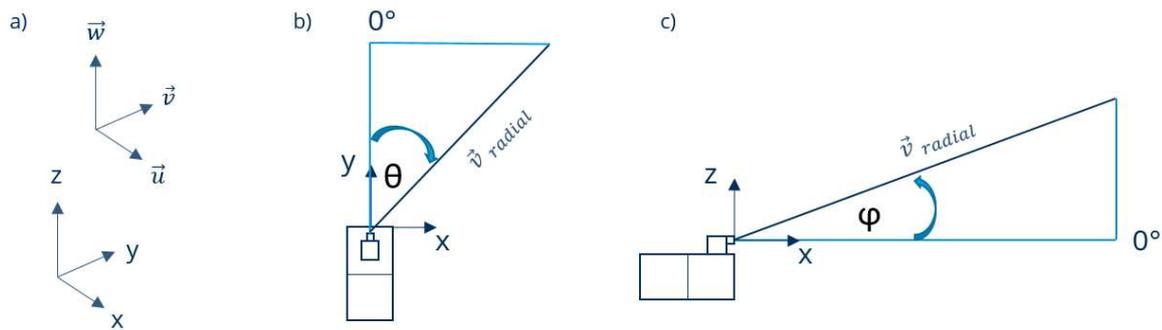


Bild 2.9 Ausgerichtet an der Lage des kartesischen Koordinatensystems a) der Windvektor; b) der Azimutwinkel; c) der Elevationswinkel

Das Bild 2.9 a gibt Auskunft über die Lage des Windvektors im kartesischen Koordinatensystem. Unter Berücksichtigung der Achsenbeschriftung  $x$ ,  $y$  und  $z$  wird aus Bild 2.9 b und c ersichtlich, in welche Richtung jeweils die  $0^\circ$  des Azimut- und des Elevationswinkels zeigen und um welche Achse die Verdrehungen der Winkel definiert sind. Die  $0^\circ$  des Azimutwinkels sind nach Norden ausgerichtet, sodass die  $v$ -Komponente gen Norden und die  $u$ -Komponente gen Osten zeigen.  $w$  ist die vertikale Windkomponente.

Es ergibt sich für die radiale Windgeschwindigkeit folgende Abhängigkeit der Komponenten des Windvektors von dem Azimut- und dem Elevationswinkel (Vasiljević und et al. 2017, S. 3480):

$$\text{Gleichung 2.5} \quad v_{\text{radial}} = n \cdot V_{\text{Wind}} = \begin{pmatrix} \sin(\theta) \cos(\varphi) \\ \cos(\theta) \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

Zur akkuraten Bestimmung des dreidimensionalen Windvektors  $V_{\text{Wind}}$  ist die Verwendung von mindestens drei Geräten erforderlich. Der Einheitsvektor  $n$  beschreibt die Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls in Abhängigkeit von dem Azimutwinkel  $\theta$  und dem Elevationswinkel  $\varphi$ . Die Formel zur Berechnung des dreidimensionalen Windvektors ist im Anhang der Veröffentlichung von Vasiljević und et al. (2017) gegeben. Werden die Annahmen getroffen, dass Elevationswinkel klein ( $\varphi < 5^\circ$ ) und vertikale Windgeschwindigkeiten gering sind ( $w < 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), kann die Gleichung 2.5 vereinfacht werden, sodass nur die horizontalen Komponenten  $u$  und  $v$  berechnet werden (Vasiljević und et al. 2017, S. 3480). Da für die Ertragsberechnung nach derzeitigem Standard nur die horizontale Windgeschwindigkeit erforderlich ist, kann diese Vereinfachung sinnvoll sein. Im Rahmen dieser Arbeit werden die oben angeführten Vereinfachungen ebenfalls verwendet, sodass die Gleichung 2.5 auf das Folgende reduziert werden kann (Vasiljević et al. 2020, S. 7):

Gleichung 2.6 
$$v_{radial} = \begin{pmatrix} \sin(\theta)\cos(\varphi) \\ \cos(\theta)\cos(\varphi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

Werden zwei Geräte zur Messung genutzt, kann zur Berechnung des zweidimensionalen Windvektors die Gleichung 2.7 verwendet werden (Vasiljević und et al. 2017, S. 3480).

Gleichung 2.7 
$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\theta_1)\cos(\varphi_1) & \cos(\theta_1)\cos(\varphi_1) \\ \sin(\theta_2)\cos(\varphi_2) & \cos(\theta_2)\cos(\varphi_2) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{radial1} \\ v_{radial2} \end{pmatrix}$$

Da bei der Ertragsprognose die horizontale Windgeschwindigkeit von Bedeutung ist, werden die rekonstruierten Komponenten  $u$  und  $v$  in die horizontale Windgeschwindigkeit  $V_h$  mit der Gleichung 2.8 umgerechnet.

Gleichung 2.8 
$$V_h = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Die ermittelte horizontale Windgeschwindigkeit kann dann für die Bestimmung der Windressource verwendet werden.

## 2.2 STANDORTBEWERTUNG MIT MULTI-LIDAR-SYSTEMEN

Zur Beurteilung der Windressource werden in den letzten Jahren vermehrt Lidar-Systeme verwendet. Auch im Bereich der meteorologischen Forschung, also der Untersuchung von Grenzschichten oder Variationen im Windfeld mit der Ausdehnung von hunderten von Kilometern, findet die Lidar-Technologie Anwendung (Liu et al. 2019, S. 12–20). Die Verwendung dieser vielfältig einsetzbaren Technologie in der Standortbewertung für Windenergieanlagen hat sich bis heute allerdings noch nicht vollständig etabliert. Die Hemmnisse, die einen flächendeckenden Einsatz der Multi-Lidar-Windmessung zur Ertragsermittlung verhindern, werden im Kapitel 2.2.1 präsentiert. In dem Abschnitt geht es vorwiegend um die Anwendung in flachem und schwierigem Gelände. Das darauffolgende Kapitel 2.2.2 gibt einen groben Überblick über das Thema Urban Wind sowie bisherigen Anwendungen der Technologie im städtischen Raum.

### 2.2.1 Hemmnisse bei der Anwendung in flachem und schwierigem Gelände

Um eine effiziente Erzeugung von Windenergie zu ermöglichen, sind präzise Winddaten für die Energieertragsermittlungen notwendig. Vor der Errichtung eines Windparks wird eine eingehende Analyse des Standortes mit Kurzzeitwinddaten und Langzeitkorrekturen durchgeführt. Dazu gehören u. a. Windmessungen und Langzeitdatenquellen (Norm IEC 61400-12-1:2017). In flachem Gelände ist dies durch tendenziell vorhandene homogene Strömungen vereinfacht. In den Technischen Richtlinien für Windenergieanlagen Teil 6 gibt es Vorgaben, wie die Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen durchzuführen ist (TR 6).

In der Norm IEC 61400-12-1:2017 ist neben einem Verfahren zur Messung des Leistungsverhaltens von WEA unter anderem auch eine Bewertung der Unsicherheitsquellen und die Auswirkung durch deren Kombination enthalten (Norm IEC 61400-12-1:2017). Der Anhang L der Norm thematisiert die Anwendung von Fernerfassungstechnik. Bei Messungen mit Lidar-Geräten tritt in der Regel eine Streuung der Ergebnisse auf. Diese entstehen oft durch die unterschiedliche Ansprechempfindlichkeit der Fernerfassungseinrichtung auf Umgebungsparameter wie den Windgradienten. Zur quantitativen Ermittlung dieser Messunsicherheiten ist eine Klassifikationsprüfung vorgesehen. Zusätzlich muss das Verhalten der Fernerfassungseinrichtung mittels einer Nachweisprüfung auf Tauglichkeit untersucht werden. Es handelt sich dabei um eine Kalibrierungsprüfung, die eine Gesamtunsicherheit ermittelt (Norm IEC 61400-12-1:2017). In diesen Richtlinien liegt das Hauptaugenmerk jedoch auf der Verwendung von Profiling Lidar-Geräten.

Die Nutzung von Lidar-Systemen für die Standortbewertung zielt darauf ab, Wind- und Wetterbedingungen zu quantifizieren. Die Parameter Windgeschwindigkeit, Turbulenzintensität<sup>13</sup>, Böen, Windrichtungen in unterschiedlichen Höhen, Temperatur, Druck und Niederschlag werden dafür an einem potentiellen Windpark-Standort gemessen. Damit können passende Turbinen ausgewählt, die Anordnung dieser in dem Windpark geplant und dann eine Abschätzung der Stromerzeugung gemacht werden (Clifton et al. 2018).

Forschungen haben ergeben, dass die Messungen mit einem Profiling Lidar-Scanner in flachem Gelände ausreichend für eine Standortbewertung sind. Die Windströmungen sind dort nahezu homogen. In schwierigem Gelände hingegen kommt es durch die Topographie und damit entstehende inhomogene Strömungen zu großen Abweichungen. Fehler von Messungen mit Profiling Lidar-Geräten in schwierigem Gelände können bis zu 10 % betragen (Bingöl et al. 2009). Die Verwendung eines Multi-Lidar-Systems erreicht im Vergleich dazu laut Pauscher et al. (2016) bessere Korrelationen mit einem Ultraschall Anemometer.

Die International Energy Agency (IEA) beschäftigt sich u. a. mit der Sicherung einer stabilen Energieversorgung. Im Bereich Wind gibt es verschiedene Themenfelder, die sogenannten Tasks. Der IEA Wind Task 32 beschäftigt sich mit Lidar-Systemen für den Einsatz in der Windenergie. Ein Projektbericht (Clifton et al. 2018) zu dem IEA Wind Task 32 präsentiert die Ergebnisse zur Identifikation und Abmilderung der Hemmnisse zur Verwendung von Wind-Lidar-Technologie.

---

<sup>13</sup> Die Turbulenzintensität entspricht der Standardabweichung der mittleren Windgeschwindigkeit geteilt durch die mittlere Windgeschwindigkeit.

Dem Bericht nach gelten viele der Hemmnisse auch für das einfache Gelände (Clifton et al. 2018, S. 4).

1. Strömungsmodelle sollten verwendet werden, um die Messdaten innerhalb eines modellierten Windfeldes anzupassen. So kann die Windfeld-Rekonstruktion verbessert werden.
2. Derzeitige Ansätze zur Quantifizierung der Messunsicherheit berechnen den „Root Mean Square Error“ (RMSE) basierend auf Anemometer-Messdaten als „wahren“ Wert. Der RMSE gibt an, wie weit ein Wert von einem als richtig angenommenen Wert oder einer Modellvorhersage entfernt ist. Der Ansatz setzt voraus, dass Schalensternanemometer die „wahre“ Windgeschwindigkeit messen können. Das würde bedeuten, dass sie auf nichts Anderes als auf die Windgeschwindigkeit reagieren oder dass alle auf die Messung einwirkenden Faktoren bekannt und quantifizierbar sind.
3. Es fehlen Richtlinien für Applikationen, die zur Durchführung einer Windmessung prinzipiell möglich wären. Die Standards sind somit nicht vollständig bzw. irreführend, da nicht eindeutig geklärt ist, wie bei Messungen im schwierigen Gelände vorgegangen werden soll.
4. Die Nutzung der ML-Technologie erfordert Training und Erfahrung. Fehlende Expertise bei der Aufstellung und Bedienung der Wind Lidar-Geräte ist als eine weitere Herausforderung zu betrachten. Dieser Aspekt widerspricht einer häufigeren Verwendung und führt zu erhöhten Kosten.

Die aufgeführten Punkte sind nach Clifton et al. (2018, S. 4) Gründe dafür, dass die Scanning Lidar-Technologie zur Standortbewertung noch kein validiertes Verfahren ist. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, die sich aus dem 2. Punkt ergibt. Die Messunsicherheit soll unabhängig von anderen Messsystemen, die ebenfalls Unsicherheiten beinhalten, quantifiziert werden. Damit soll der Grundstein für eine Veränderung der Norm gelegt werden. Eine detaillierte Betrachtung der Beziehung zwischen skalarer Mittelung bei Messungen mit dem Anemometer und einer vektoriellen Mittelung bei LOS Messungen wird in Clive (2008, S. 5) weiter diskutiert.

Die in diesem Unterkapitel betrachteten Regelungen und Herausforderungen bei der Standortbewertung mit Multi-Lidar-Systemen sind auch bei der Einschätzung von Windressourcen in der Stadt relevant.

### 2.2.2 Urban Wind

Der Begriff Urban Wind bezeichnet die Nutzung von Windenergie-Technik in der bebauten Umwelt (Stathopoulos et al. 2018). Es fallen die Bereiche der erneuerbaren Energien darunter, die auf innerstädtische Kleinapplikationen für Wind ausgerichtet sind. Es stellt sich die Frage, ob dieser Bereich ein weiteres Anwendungsgebiet für Multi-Lidar-Windmessungen darstellt. Bei der Errichtung von Anlagen im urbanen Bereich gibt es ähnliche Herausforderungen wie bei großen WEA. Es geht vorrangig darum, einen geeigneten Standort zu finden, kostengünstig zu messen und so die Windverhältnisse zu analysieren (Krenn 2016). Eine österreichische Studie zu Kleinwindkraftanlagen ergibt, dass der spezifische Ertrag (kWh pro überstrichender Rotorfläche und Jahr) von Windkraftanlagen im urbanen Raum nur etwa ein Zehntel der großen Anlagen erreicht. Die kleinere Rotorfläche wirkt sich zusätzlich auf die Wirtschaftlichkeit aus (Krenn 2016). Die o. a. Herausforderungen verschärfen sich aufgrund der geringeren Wirtschaftlichkeit bei Kleinwindkraftanlagen im Vergleich mit großen WEA.

Es gibt diverse Messkampagnen, die im urbanen Raum mit Lidar-Geräten durchgeführt worden sind. Scanning Lidar-Geräte erlauben es, nicht nur punktuell zu messen, sondern orts aufgelöste Messungen von größeren Gebieten durchzuführen (Wood et al. 2013). Derartige Messungen sind somit auch im urbanen Bereich von Interesse. Häufiger ist hierbei Literatur zu Messverfahren zu finden, die nicht auf dem ML-Scan basieren. Es wurden u. a. von Lane et al. (2013) zur Bewertung einer Profiling Lidar-Methode Messdaten von einem Lidar mit einem Anemometer verglichen. Die Autoren schreiben, dass es zu der Zeit relativ wenig Messkampagnen im urbanen Raum gab, wobei diese zur Bestimmung von Windlasten auf große Gebäude sowie der Vorhersage der lokalen Luftqualität sinnvoll sein würden. Das Ergebnis war, dass das Lidar-Gerät in der Größenordnung von etwa  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  leicht höhere Geschwindigkeiten als das Anemometer gemessen hat. Im Allgemeinen ist dies eine gute Übereinstimmung. Mit einem Profiling Lidar-Gerät haben Drew et al. (2013) eine Messkampagne über acht Monate im Großraum von London durchgeführt und ebenfalls gute Übereinstimmungen mit den Messungen eines Ultraschall Anemometers erhalten (Abweichung von  $0-0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Im Bereich der Multi-Lidar-Messkampagnen gibt es die Veröffentlichung von Davies et al. (2005). Das Ziel des Experiments war es, Turbulenzmessungen mit zwei Lidar-Systemen auf Fehler zu analysieren. Die Autoren fassen zusammen, dass die Verwendung von zwei synchronisierten Lidar-Geräten sehr gute Ergebnisse für die horizontale Windgeschwindigkeit im urbanen Raum erreicht und das Verfahren unter bestimmten Bedingungen ebenfalls zur Bestimmung von vertikalen Windprofilen geeignet ist (Davies et al. 2005, 288).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Messungen mit Lidar-Geräten und im Speziellen mit mehreren Geräten im urbanen Raum möglich sind. Die Messdaten bei den o. a. Veröffentlichungen stimmen gut mit Referenzwerten überein. Dennoch ist es wichtig zu erwähnen, dass ML-Windmessungen bereits bei großen WEA kostenintensiv sind und sich noch nicht als gängige Methode etabliert haben. Es lässt sich somit für den derzeitigen Status schlussfolgern, dass ML-Messkampagnen im städtischen Raum für Kleinapplikation der Windenergie nicht wirtschaftlich sind. Um diesbezüglich eine Veränderung zu erreichen, müssten die Technologie und die Verwendung dieser bedeutend günstiger werden.

## 2.3 GRUNDLAGEN UND TERMINOLOGIE DER UNSICHERHEITSEINSCHÄTZUNG

Da es in dieser Arbeit um die Untersuchung von Messunsicherheiten geht, ist es wichtig, die Begriffe der Unsicherheitseinschätzung einheitlich zu verwenden. Im Bereich der Unsicherheitseinschätzung ist die Basis dafür die Norm zu Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen ISO 5725 Teil 1 (ISO 5725-1:1994). Auch der „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (JCGM 104:2009), abgekürzt GUM, dient als Grundlage zur Ermittlung der Gesamtunsicherheit. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe erklärt und voneinander abgegrenzt.

Die **Messgröße** ist diejenige physikalische Größe, die durch eine Messung untersucht werden soll. In dieser Arbeit ist die Windgeschwindigkeit (Schnelligkeit der Aerosole in der Atmosphäre) die zu messende Größe. Der **Messwert** ist ein Größenwert, der das Messergebnis repräsentiert (JCGM 100:2008, S. 4). Da keine Messung absolut genau ist, kann der **wahre Wert** nicht mit hundertprozentiger Sicherheit bestimmt werden. In der Praxis ergibt deshalb der Mittelwert der Messwerte den **Schätzwert** für den wahren Wert (JCGM 104:2009, S. 9). Bei Lidar-Windmessungen werden die Messwerte von Anemometern als Referenzmessung genommen.

Eine **Messabweichung** beschreibt den Unterschied zwischen Messungen und wahren Werten der Messgröße. Auch das Wort **Fehler** wird synonym für Messabweichung verwendet. Üblicherweise setzt sich die Messabweichung aus einem systematischen und einem zufälligen Anteil zusammen. Die **systematische Messabweichung** beschreibt die Tatsache, dass über eine gewisse Anzahl an Messungen der Durchschnittswert konstant verlagert oder verändert wird und somit zumindest näherungsweise berechenbar ist. Die **zufällige Messabweichung** bildet den Teil des Gesamtfehlers, der sich über eine größere Anzahl von Messungen in unvorhersehbarer Weise verändert. Deswegen ist es nicht oder nur kaum möglich, eine Korrektur hierfür durchzuführen. Die Verteilung der zufälligen Messabweichung wird durch die Standardabweichung beschrieben

und als Maß für die Präzision verwendet. Die **Präzision** zeigt an, wie groß die Übereinstimmung zwischen unabhängigen Messungen einer Messgröße ist und gibt somit Auskunft über die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messung (JCGM 104:2009, S. 9–12).

Die **Unsicherheit** ist der nichtnegative Parameter, der die Streuung der Messwerte kennzeichnet. Unsicherheitseinschätzungen sollten Fehler aus allen möglichen Quellen (systematischen und zufälligen) berücksichtigen. Das ist die geeignetste Methode, um die **Genauigkeit**, also die Übereinstimmung zwischen einem gemessenen und einem wahren Wert, einzuschätzen. Die Begrifflichkeiten Messabweichung und Unsicherheit sind wie folgt voneinander zu unterscheiden: die Messabweichung ist die Differenz zwischen einem Messergebnis und dem wahren Wert, während die Unsicherheit die Spannweite von Werten charakterisiert, in der der wahre Wert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt.

Ist die zu untersuchende Größe nicht direkt messbar, wird eine Fehlerfortpflanzung vorgenommen (IDP Münster). Es gibt verschiedene Arten der Fehlerfortpflanzung. Die, in dieser Arbeit verwendete Variante ist die gaußsche Fehlerfortpflanzung. Sie wird genutzt, um statistisch ermittelte Fehler zu verarbeiten. Es gilt die Annahme, dass sich die statistisch ermittelten Streuungen der Messwerte kompensieren können. Diese Variante der Fehlerfortpflanzung steht im Gegensatz zur linearen Fehlerfortpflanzung. Diese wird oft verwendet, wenn Größen nur einmal gemessen werden und die maximale Abweichung des Messwertes vom wahren Wert von Interesse ist (KIT, S. 2–3).

Für den gaußschen Ansatz gilt folgendes: Besteht die Unsicherheit einer Eingangsgröße  $\Delta x_1$  aus mehreren Anteilen  $\Delta x_{11}$  bis  $\Delta x_{1n}$ , müssen diese nach Gleichung 2.9 miteinander kombiniert werden (IDP Münster). Dabei wird vorausgesetzt, dass die Beiträge  $\Delta x_{1i}$  voneinander unabhängig sind.

Gleichung 2.9 
$$\Delta x_1 = \sqrt{\Delta x_{11}^2 + \dots + \Delta x_{1n}^2}$$

Die Unsicherheit der Ergebnisgröße kann anschließend mittels der gaußschen Fehlerfortpflanzung nach Gleichung 2.10 bestimmt werden (IDP Münster).

Gleichung 2.10 
$$\Delta y_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2}$$

Das  $\frac{\partial y}{\partial x_i}$  steht dabei für die partielle Ableitung der Funktion  $y$  nach der Variablen  $x_i$ . Die Funktion  $y$  beschreibt, wie sich die Ausgangsgröße aus den Eingangsgrößen zusammensetzt. Die Unsicherheiten  $\Delta x_1$  bis  $\Delta x_n$  der einzelnen Eingangsgrößen können mit der Gleichung 2.10 fortgepflanzt werden. So kann der Einfluss der Unsicherheit bei der Bestimmung der Windgeschwindigkeit berücksichtigt werden, da diese nicht direkt gemessen wird.

Die Unsicherheitsbetrachtung nach GUM unterscheidet sich zu dem klassischen gaußschen Verfahren lediglich in der initialen Festlegung der Eingangsgrößen. Die von den Nationalen Metrologischen Staatsinstituten entwickelten Leitlinien GUM (JCGM 104:2009) versuchen ein einheitliches Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten zu etablieren. Bei dem gaußschen Konzept werden ausschließlich Unsicherheiten untersucht, die aus zufälligen Messabweichungen resultieren. Mit der Gleichung 2.9 werden diese Unsicherheiten kombiniert. Im Gegensatz dazu werden bei der GUM-Methode auch die systematischen Messabweichungen betrachtet. Die Unsicherheiten der Eingangsgrößen werden dabei durch die Untersuchung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bestimmt. Bei dem gaußschen Ansatz wird hingegen angenommen, dass die Eingangsgrößen mit einer Unsicherheit  $\Delta x_i$  behaftet sind. In der Berechnungsphase gleichen sich das gaußsche Verfahren und die GUM-Methode. Die Fehlerfortpflanzung erfolgt bei beiden Verfahren mit partiellen Ableitungen und der Summe der Quadrate (IDP Münster).

Der Prozess der Messunsicherheitsermittlung nach GUM wird in Formulierungs- und Berechnungsphase unterteilt. In der ersten Phase werden die Ausgangsgröße  $Y$  (die Messgröße) definiert und die Eingangsgrößen  $X_i$ , von denen die Messgröße abhängt, festgelegt. Bei Windmessungen ist die Ausgangs- und Messgröße die Windgeschwindigkeit. Die Festlegung der Eingangsgrößen, ist in Kapitel 3 zu finden. In der zweiten Phase, also der Berechnungsphase, werden die Teilunsicherheiten quantifiziert und für eine Gesamtunsicherheit miteinander verrechnet. In Kapitel 4 wird ein Modell zur Berechnung der Messunsicherheiten in Python entwickelt. Die Methode des GUM zur Ermittlung eines Schätzwertes  $y$  von der zu untersuchenden Ausgangsgröße und der zum Schätzwert gehörigen Standardunsicherheit ist in Bild 2.10 schematisch abgebildet.

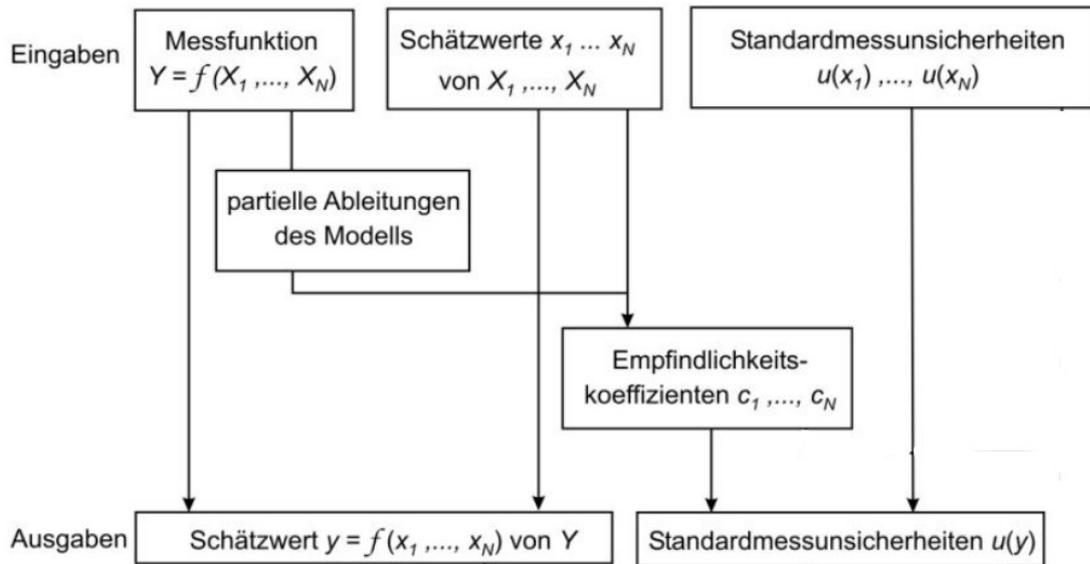


Bild 2.10 Messunsicherheitsermittlung anhand der GUM-Methode (JCGM 104:2009, S. 21)

Demnach soll mit den besten Schätzwerten  $x_i$  der Eingangsgröße  $X_i$ , den  $x_i$  beigeordneten Standardunsicherheiten  $u(x_i)$ , und Empfindlichkeitskoeffizienten  $c_i$  ein Schätzwert  $y$  der Ausgangsgröße sowie eine beigeordnete Standardunsicherheit  $u(y)$  ermittelt werden (JCGM 104:2009, S. 16–18). Die Schätzwerte der Eingangsgrößen stammen unter anderem aus Herstellerangaben, Berichten und Auswertung von Messdaten (JCGM 104:2009, S. 11).

Nach Bild 2.10 kann, wenn ein konkretes Szenario betrachtet wird, mit absoluten Schätzwerten  $x_1, \dots, x_N$  direkt ein Schätzwert  $y$  berechnet werden, ohne Empfindlichkeitskoeffizienten zu bestimmen. In dieser Diplomarbeit wird ein konkretes Szenario betrachtet, welches detailliert in Kapitel 4 erläutert wird.

### 3 UNSICHERHEITEN BEI MULTI-LIDAR-WINDMESSUNGEN

Zur Quantifizierung einer Gesamtunsicherheit bei Windmessungen mit mehreren Lidar-Geräten müssen die einzelnen Teilunsicherheiten der Messung betrachtet werden. Dies ist ein relevanter Schritt, um die Messdaten korrekt zu interpretieren. In diesem Kapitel werden die Teilunsicherheiten in Kategorien eingeteilt, erklärt und quantifiziert. Die Berechnung der Messunsicherheiten erfolgt in Kapitel 4 auf Basis von einem Messszenario. Deshalb werden keine allgemeingültigen Formeln hergeleitet, sondern Ansätze zur Berechnung von Teilunsicherheiten in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  gegeben. Die Bestimmung der Windgeschwindigkeit mit Lidar-Geräten lässt sich in zwei Schritte aufteilen.

1. Durch die Frequenzverschiebung des rückgestreuten Laserstrahls kann mittels eines Signalverarbeitungs-Algorithmus die radiale Windgeschwindigkeit gemessen werden.
2. Der zweidimensionale Windvektor wird aus den Messdaten rekonstruiert.

Die Teilunsicherheiten dieser zwei Schritte werden unabhängig voneinander in den Kapiteln 3.1 und 3.2 betrachtet. Kapitel 3.3 gibt eine Zusammenfassung über die auftretenden Unsicherheiten.

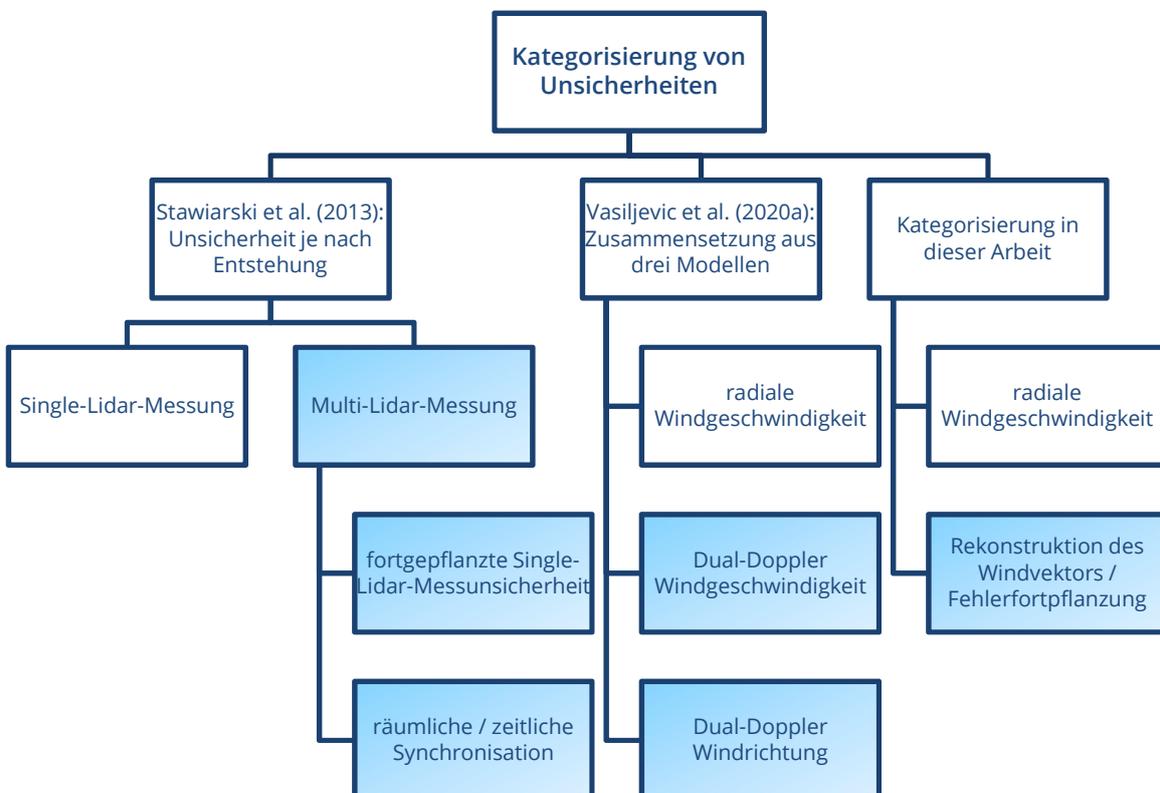


Bild 3.1 Kategorisierung der Unsicherheiten in der Literatur und dieser Arbeit

Bisherige Arbeiten zu diesem Thema zeigen verschiedene Möglichkeiten, Unsicherheiten einzuordnen. In Bild 3.1 ist eine Übersicht der Kategorisierungen aus Stawiarski et al. (2013) und Vasiljević et al. (2020) im Vergleich zu der Kategorisierung in dieser Arbeit zu finden. Stawiarski et al. ordnen die Unsicherheiten je nach Entstehung Single- oder Multi-Lidar-Messunsicherheiten zu. Bei der Verwendung mehrerer Geräte setzt sich die Messunsicherheit aus der Fehlerfortpflanzung der Single-Lidar-Fehler sowie der Fehler aus einer räumlichen und zeitlichen Synchronisation zwischen den einzelnen Geräten zusammen. In Vasiljević et al. wird eine Gesamtunsicherheit aus drei Modellen berechnet. Die Modelle betrachten den Unsicherheitsbeitrag der radialen Windgeschwindigkeitsmessung, Dual-Doppler Windgeschwindigkeit und Dual-Doppler Windrichtung. Der Begriff Dual-Doppler bezieht sich darauf, dass zwei Geräte mit Lidar-Technologie verwendet werden, die auf dem Doppler-Effekt beruhen. Die in dieser Diplomarbeit gewählte Kategorisierung ist an die Unterteilung aus beiden Veröffentlichungen angelehnt. Die Betrachtung von Unsicherheiten bei der radialen Windgeschwindigkeitsmessung entspricht in etwa den Inhalten der jeweils ersten Kategorie aus Stawiarski et al. und Vasiljević et al., also der Single-Lidar-Messunsicherheit. Die Unsicherheit bei der Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors entsteht aus der Nutzung mehrerer Lidar-Geräte und orientiert sich an der Struktur der Multi-Lidar-Messunsicherheiten aus Stawiarski et al. (2013). Bei den Autoren Vasiljević et al. (2020) werden die Unsicherheiten, die bei der Rekonstruktion des Windvektors entstehen, mit den Modellen Dual-Doppler Windgeschwindigkeit und Dual-Doppler Windrichtung betrachtet. Die räumliche Synchronisation wird in Vasiljević et al. allerdings nicht thematisiert, da die Autoren von einer Punktmessung ausgehen und es somit keine Probevolumina gibt. Eine separate Beurteilung der Unsicherheiten aus der radialen Geschwindigkeitsmessung und der Windvektor-Rekonstruktion ermöglicht eine systematische Optimierung im Rahmen von Messkampagnen.

### 3.1 TEILUNSICHERHEITEN BEI RADIALER GESCHWINDIGKEITSMESSUNG

Die Teilunsicherheiten der radialen Geschwindigkeitsmessung sind, wie in Bild 3.2 dargestellt, in vier Kategorien unterteilt.



Bild 3.2 Kategorien-Einteilung der Teilunsicherheiten bei radialer Geschwindigkeitsmessung

Die Kategorien Messgerät und Messstrategie der Messdaten werden in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 weiter in die einzelnen Teilunsicherheiten aufgeschlüsselt. Das bereitet die spätere Implementierung der Berechnung einer Gesamtunsicherheit vor. Die beiden letzten Kategorien

Umgebungsbedingungen in Kapitel 3.1.3 und Versagen des Equipments in Kapitel 3.1.4 sind in der Praxis zu beachtende Beiträge, die in dieser Arbeit allerdings nur qualitativ beurteilt werden. Beim Fraunhofer IEE wird mit dem Lidar Leosphere WINDCUBE 200s gearbeitet. Deshalb beziehen sich die gegebenen Werte auf die Toleranzen und die Genauigkeit dieses Geräte-Typs.

### 3.1.1 Messgerät

Die Eingangsgrößen in dieser Kategorie entstehen z. B. aus den Grenzen der Genauigkeit der Mechanik oder den Signalverarbeitungssystemen. Im Folgenden werden die Eingangsgrößen im Detail erläutert.

#### 3.1.1.1 Ermittlung der radialen Geschwindigkeit aus rückgestreutem Licht

Eine Unsicherheit entsteht daraus, dass die radiale Geschwindigkeit auf Basis der Frequenz des rückgestreuten Lichts rekonstruiert wird und keine Messung absolut genau ist (Vasiljević et al. 2020; JCGM 104:2009). Die Frequenzverschiebung wird von dem Lidar-Gerät indirekt gemessen. Ein Referenzstrahl des ursprünglichen Lasers wird mit der empfangenen dopplerverschobenen Welle, also dem vom Aerosol rückgestreuten Signal, überlagert (Aitken et al. 2012, S. 348; Beuth 2017, S. 32; Paschotta). Die Unsicherheit der radialen Geschwindigkeit hängt, wie aus der Gleichung 2.2 für die Frequenz des rückgestreuten Lichts ersichtlich wird, von der Genauigkeit der Bestimmung der Frequenzverschiebung  $\Delta f$  ab. Die Atmosphäre, Lidar-Spezifikationen und die Signalverarbeitung haben Einfluss auf die Größe der Unsicherheit (Vasiljevic 2018). Nach Pearson und Collier (1999) kann die Messabweichung mit Gleichung 3.1 beschrieben werden.

$$\text{Gleichung 3.1} \quad \Delta V_r \approx \frac{0,2V_{max}}{N_m^{1/2}SNR} \left( \left( \frac{T_s}{T_{pulse}} \right)^3 \left( \frac{1}{M} \right) \right)^{1/2} \left( 1 + 1,42 \frac{T_{pulse}SNR}{T_s} \right)$$

Dabei ist  $V_{max}$  die maximal zu erreichende Doppler-Verschiebung in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zur Berechnung werden weiterhin die Pulslänge  $T_{pulse}$ , der Abstand zwischen den ausgesandeten Pulsen  $T_s$ , die Anzahl der kumulierten Messungen  $N_m$ , das Signal-zu-Rauschverhältnis  $SNR$  und die Anzahl  $M$  der Messpunkte in der Range Gate benötigt. Ohne a priori Wissen über das Windfeld kann somit eine theoretische Messabweichung berechnet werden (Pearson und Collier 1999, S. 2707). Damit eine Unsicherheitsberechnung auch ohne vorherige Festlegung und Berechnung der Parameter aus Gleichung 3.1 funktioniert, wird eine Annahme zur Quantifizierung dieser Teilunsicherheit getroffen. In Vasiljević et al. (2020) wird der Wert  $u_{est}$ , der die Unsicherheit bei der Ermittlung der radialen Windgeschwindigkeit aus rückgestreutem Licht repräsentiert, mit  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  angenommen. Dieser Wert geht aus Experimenten hervor. In Ermangelung genauerer Verfahren wird die ermittelte radiale Geschwindigkeit mit Messungen von einem Schalensternanemometer

verglichen. Aus dem Grund ist die damit ermittelte Unsicherheit auf die Genauigkeit des Anemometers begrenzt. Der Beitrag der Teilunsicherheit aus Ermittlung der radialen Geschwindigkeit aus rückgestreutem Licht  $u_{est}$  wird basierend auf Vasiljević et al. (2020) bei dieser Unsicherheitseinschätzung auf  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  festgelegt.

#### 3.1.1.2 Steuerung der Laserstrahl-Ausrichtung

Die Ursachen für das Auftreten dieser Unsicherheiten sind zulässige Toleranzen bei der Ansteuerung der Elevations- und Azimutwinkel sowie eine ungenaue Korrektur eines schrägen Geräteaufbaus. Zuerst genannte Toleranzen werden aus fertigungstechnischen Gründen bei der Produktion der Geräte zugelassen (Vasiljević 2014).

Beim Aufstellen des Gerätes wird mit einem Kompass die Nordausrichtung sichergestellt. Beim Fraunhofer IEE werden mit einer digitalen Wasserwaage oder einem externen Inklinometer die Füße unter dem Gerät so eingestellt, dass das Gerät möglichst eben steht. Steht das Gerät schräg müssen, zusätzlich Pitch (Verdrehung um die Nord-Süd-Achse) und Roll (Verdrehung um die Ost-West-Achse) eingestellt werden. Während der Messung wird durch einen Neigungsmesser die Richtigkeit der Ausrichtung überprüft. Es gibt Warnmeldungen, sobald Pitch oder Roll größer als  $\pm 5^\circ$  werden. Eine automatische Korrektur kann durch das System nicht erfolgen (Leosphere).

Es gibt ein Verfahren, um die Ausrichtung nach der Einstellung von Pitch und Roll zu kontrollieren. Es handelt sich dabei um das Kartieren von undurchlässigen Gegenständen (Hard Target Mapping). Das Lidar-Gerät erkennt die Stärke des Signal-zu-Rauschverhältnisses (SNR) (Vasiljević 2014), das ein Maß für die Güte des empfangenden Signals darstellt (Mann et al. 2017). Daraus können die Standorte der undurchlässigen Gegenstände abgeleitet werden. Die tatsächliche Position der Gegenstände wird als Referenzposition vermessen und mit den Positionen aus dem Lidar-Gerät abgeglichen. Mittels der erhaltenen Werte kann die Ausrichtung korrigiert werden. Das Verfahren ist in Vasiljević et al. (2016, S. 15–18) ausführlich erklärt. Durch das Mapping-Verfahren kann zwar eine Korrektur der Home-Position vorgenommen werden, es besteht jedoch weiterhin eine Unsicherheit der Ausrichtung aufgrund von Anteilen aus dem erwarteten und dem tatsächlichen Winkel (Vasiljević 2014, S. 103).

In diesem Unterkapitel wird eine Beispielrechnung durchgeführt, um die Größenordnung der Unsicherheit abzuschätzen und den Ansatz der Quantifizierung zu erläutern. Toleranzen in der Ansteuerung der Winkel werden im Azimut mit  $\Delta\theta$  und in der Elevation mit  $\Delta\varphi$  benannt. In Bild 3.3 sind die Auswirkungen dieser ungenauen Ansteuerungen der Winkel und die Unsicherheit aus der Messdistanz  $\Delta D$  zu sehen.

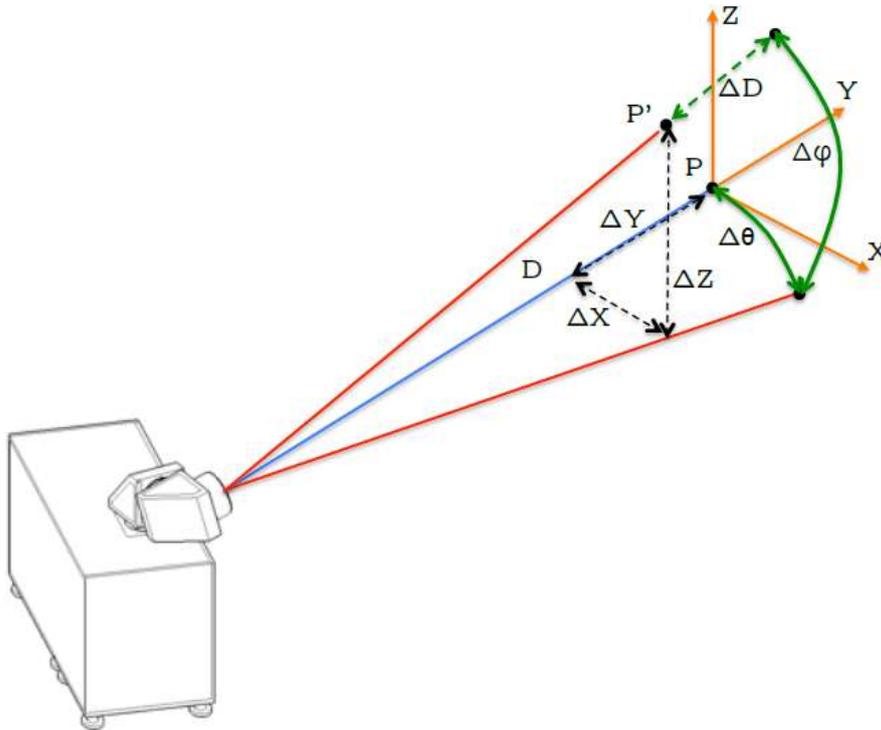


Bild 3.3 Der erwartete Messpunkt P aufgrund von Toleranzen  $\Delta\varphi$  und  $\Delta\theta$  und Fehlern in der Erfassungsdistanz  $\Delta D$  liegt an Punkt P' (Vasiljević 2014, S. 82)

Zusätzlich zu den Toleranzen  $\Delta\varphi$  und  $\Delta\theta$  bei der Ansteuerung der Winkel muss folglich die Messabweichung  $\Delta D$  in der Erfassungsdistanz berücksichtigt werden. Diese wird in Kapitel 3.1.1.3 thematisiert. Im Endeffekt wird an der Position P', anstatt an dem erwarteten Punkt P, gemessen (Vasiljević 2014). Im kartesischen Koordinatensystem bilden  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  und  $\Delta Z$  das Pendant zu  $\Delta\theta$ ,  $\Delta D$  und  $\Delta\varphi$  und sind zur Veranschaulichung abgebildet.

Laut den Herstellerangaben von Leosphere können Azimut- und Elevationswinkel beim WINDCUBE zu einer Genauigkeit von  $0,1^\circ$  eingestellt werden (Leosphere). Es hat einen gewissen Einfluss, ob ein Messgerät starr an einem Messpunkt misst oder während der Messung verschiedene Messpunkte ansteuert und das Gerät somit Erschütterungen aus der Bewegung erfährt. Stawiarski et al. (2013, S. 2051) schreiben, dass sich die Ungenauigkeit bei der Nutzung von sich wiederholenden Scanner-Bewegungen nicht akkumuliert. In dieser Arbeit wird deshalb angenommen, dass der Fehler aus der Dynamik des Scanner-Kopfes vernachlässigbar ist, auch weil das Szenario, das untersucht wird, die verschiedenen Messpunkte anfährt, anhält und erst dann misst.

Die Unsicherheit beim erwarteten Winkel entsteht aus der Genauigkeit des GPS (Globales Positionsbestimmungssystem)  $u_{GPS}$  mit 0,02 m für jede Koordinate. Die tatsächliche Abweichung aus der Auflösung des CNR-Kartierungs-Verfahrens wird in Vasiljević (2014) mit einer Auflösung von  $\pm 0,001^\circ$  angegeben. Die Wurzel aus der Summe der Quadrate von der erwarteten Winkelunsicherheit  $u_{expected}$  und der tatsächlichen  $u_{actual}$  ergibt die kombinierte Unsicherheit für  $\Delta\theta$  und  $\Delta\varphi$  (Vasiljević 2014, S. 103). Wie in Kapitel 2.3 erklärt wird, gilt die Gleichung 2.9 nach JCGM 104:2009, S. 15, wenn die Eingangsgrößen als unabhängig voneinander gelten. Die Voraussetzung der Unabhängigkeit der Unsicherheitsbeiträge ist hier erfüllt, sodass Gleichung 3.2 gilt.

$$\Delta\theta = \Delta\varphi = \sqrt{u_{expected}^2 + u_{actual}^2} =$$

Gleichung 3.2

$$\sqrt{\left(\arcsin \frac{\sqrt{2} u_{GPS}}{\sqrt{2u_{GPS} + d^2}}\right)^2 + 0,001^2} \approx \arcsin \frac{\sqrt{2} u_{GPS}}{d}$$

Bei Distanzen  $d$  von mehr als 200 m zwischen dem Messpunkt und dem WindScanner liegt die Unsicherheit für die Ausrichtung von Azimut- und Elevationswinkel nach Gleichung 3.2 unter  $\pm 0,01^\circ$  (Vasiljević 2014). Laut dem Hersteller Leosphere beträgt die maximale Auflösung der Winkel  $0,01^\circ$ . Das stimmt mit dem von Vasiljević berechneten Wert überein. Die relative Ausrichtungsgenauigkeit beträgt nach Herstellerangaben  $0,1^\circ$  (Leosphere, S. 28). Der Unterschied zwischen den beiden Werten ist darin begründet, dass sich die  $0,1^\circ$  auf in der Praxis erreichbare Genauigkeiten ohne SNR-Mapping beziehen. Die  $0,01^\circ$  Auflösung der Winkel zeigt die von dem Gerät vorgegebene Genauigkeit.

Die Auswirkungen auf die mittlere Windgeschwindigkeit bei Abweichungen im Elevationswinkel ist höher als beim Azimutwinkel. Das ist darauf zurückzuführen, dass Messungen in verschiedenen Höhen deutlicher voneinander abweichen, als Messungen, die auf derselben Höhe genommen wurden (Vasiljević et al. 2020). Das Hellmann'sche Potenzgesetz ist ein Hilfsmittel, um die Windgeschwindigkeiten auf zwei verschiedenen Höhen miteinander ins Verhältnis zu setzen. Sind zwei Windgeschwindigkeiten bekannt, kann der Windscherungs-Exponent mit dem Potenzgesetz bestimmt werden. Üblicherweise wird ein Windscherungs-Exponent beispielsweise zwischen den Höhen 80 und 100 m bestimmt, um dann die Windgeschwindigkeit in 140 m zu extrapolieren. In diesem Fall wird ausgehend von einer Windgeschwindigkeit, die zweite Windgeschwindigkeit nach Gleichung 3.3 extrapoliert (Emeis und Turk 2007).

Gleichung 3.3

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^\alpha$$

$v_1$  und  $v_2$  sind die Windgeschwindigkeiten auf der Referenzhöhe  $Z_1$  und der zweiten Höhe  $Z_2$ . Die beiden Höhen sind in Bild 3.4 dargestellt. Das vertikale Windprofil ist von  $\alpha$  abhängig. Der Windscherungs-Exponent  $\alpha$  beschreibt den Einfluss der physikalischen Prozesse auf das

Windprofil. Empirisch kann er von Messungen auf zwei verschiedenen Höhen abgeleitet werden (Basse et al. 2020, S. 1091). Um  $\alpha$  zu schätzen, muss seine Abhängigkeit von der atmosphärischen Stabilität und Beschaffenheit der Oberfläche beachtet werden. Diese bedeuten eine Standortabhängigkeit und jährliche bis tägliche Veränderungen des Wertes. Es ist somit im Allgemeinen anerkannt, dass es sich bei dem Hellmann'schen Potenzgesetz um eine Näherung mit diversen Defiziten handelt (Basse et al. 2020, S. 1091). Da diese Extrapolation trotzdem als verlässlichste Art der Berechnung für das vertikale Windprofil gilt und häufig angewandt wird (Basse et al. 2020), ist die Verwendung der Formel auch in dieser Arbeit legitim.

Des Weiteren ist für die Beispielrechnung die Kleinwinkelnäherung relevant. Sie besagt, dass  $\tan(\varphi) \approx \varphi$  und  $\sin(\varphi) \approx \varphi$  in rad gilt (Müller und Müller 2020). Bei einem Winkel von z. B.  $\frac{\pi}{36}$  rad ( $\approx 5^\circ$ ) betragen die maximalen Abweichungen der Winkelfunktionen 0,12 % beim Sinus und 0,25 % beim Tangens. Bei einem Winkel von  $0,1^\circ$  sind die Fehler kleiner als  $1 \cdot 10^{-4}$  %. Der Fehler ist klein genug, sodass  $\tan(\varphi) \approx \sin(\varphi)$  gilt. Somit können die Differenzen zwischen den Distanzen  $d_0$ ,  $d_1$  und  $d_2$  in Bild 3.4 vernachlässigt werden. Es ist bei den folgenden Berechnungen unerheblich, um welche Distanz es sich handelt:  $d_0$  als horizontaler Abstand zwischen Scanner Messpunkt,  $d_1$  als Abstand zwischen Scanner und Messpunkt P oder  $d_2$  als Abstand zwischen Scanner und Messpunkt P'.

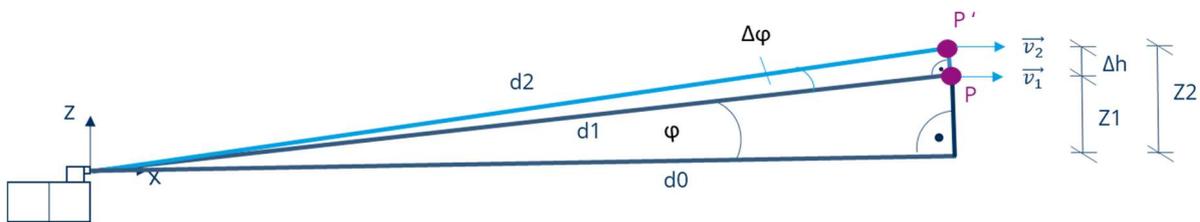


Bild 3.4 Visualisierung der Abweichung aus Toleranz des Elevationswinkels  $\Delta\varphi$  vom eigentlichem Messpunkt P mit dem Elevationswinkel ist  $\varphi$  (keine maßstäbliche Darstellung)

Der eigentlich Messpunkt P wird mit dem Elevationswinkel  $\varphi$  angesteuert. Es folgt eine beispielhafte Berechnung der Auswirkung der Toleranz im Elevationswinkel von  $\Delta\varphi = 0,1^\circ$  bei einer Messung in 3 km Entfernung auf einer erwarteten Messhöhe von 160 m mit einer Geschwindigkeit von  $6,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Die potenzielle Höhenabweichung kann nach der Kleinwinkelnäherung mit  $\sin(0,1^\circ) \cdot 3000 \text{ m} \approx 5 \text{ m}$  errechnet werden. In 3 km Entfernung führt die Toleranz im Elevationswinkel zu  $\pm 5 \text{ m}$  Abweichung vom eigentlichen Messpunkt in der Höhe. Die obere Höhe liegt folglich auf 165 m. Der Windscherungs-Exponent wird mit 0,2 angenommen, da dies bei normalen Windbedingungen nach Hau (2014, S. 200) ein repräsentativer Wert ist. Mit der Gleichung 3.3 ergibt das eine Windgeschwindigkeit von  $6,94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und weicht somit um  $0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

von der Ausgangsgeschwindigkeit ab. Die Abweichung kann mit dem Faktor  $\left(\frac{Z2}{Z1}\right)^\alpha$  zu 0,62 % der mittleren Windgeschwindigkeit berechnet werden.

Um diese Teilunsicherheit im Rahmen der Implementierung quantifizieren zu können, wird zuerst die Gleichung 3.2 verwendet, um für die verschiedenen Distanzen zwischen den Messgeräten und den Messpunkten die Genauigkeit der Ausrichtung zu bestimmen. Es wird eine horizontale Homogenität des Windfeldes im Bereich der Größenordnung von Ansteuerungstoleranzen (in etwa 5 m) angenommen. Folglich führt eine Toleranz im Azimutwinkel rechnerisch zu keiner Abweichung in der Windgeschwindigkeit und kann somit vernachlässigt werden. Es wird ausschließlich die Unsicherheit aus der Toleranz bei der Ansteuerung des Elevationswinkels berechnet. Dafür wird von einer Punktmessung ausgegangen und die Volumenmittelung vernachlässigt. Die absolute Abweichung zwischen der Windgeschwindigkeit  $v_1$  auf der anvisierten Höhe  $Z1$  und der Windgeschwindigkeit  $v_2$  auf der Höhe  $Z2$  wird für jede Messgerät-Windturbine-Kombination nach Gleichung 3.3 berechnet. Festgelegt sind folgenden Werte: die Referenzgeschwindigkeit  $v_1 = 6,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (ABO Wind) und der Windscherungs-Exponent  $\alpha = 0,2$ . Die Messabweichungen werden für die Gerätekombinationen nach Gleichung 2.9 miteinander verrechnet.

### 3.1.1.3 Distanzmessung

Zur Bestimmung der Distanz zwischen Messpunkt und Lidar-Gerät wird die Zeit berechnet, die der Lichtimpuls benötigt, um zur anvisierten Messposition und wieder zurück zum Messgerät zu gelangen. In Bild 3.3 wird neben  $\Delta\theta$  und  $\Delta\phi$  auch die Abweichung in der Distanz  $\Delta D$  dargestellt. Vasiljević (2014, S. 105–106) erklärt, wie das Kartieren von undurchlässigen Gegenständen zur Korrektur dieser Abweichung genutzt werden kann. Mit dem Wissen über Referenzstandorte kann ein Fehler in der Distanzbestimmung festgestellt und zur Korrektur genutzt werden. Die Unsicherheit ergibt sich somit aus Genauigkeit des GPS  $u_{GPS}$  mit 0,02 m sowie der Auflösung des SNR-Mapping-Verfahrens  $u_{SNRmapper}$  mit 0,6 m (Vasiljević 2014, S. 106). Die kombinierte Unsicherheit wird nach Gleichung 2.9 durch die Summe der Quadrate gebildet, sodass sich Gleichung 3.4 ergibt.

$$\Delta D = \sqrt{u_{GPS\_res}^2 + u_{SNRmapper\_res}^2} =$$

Gleichung 3.4

$$\sqrt{\left(\sqrt{(0,02 \text{ m})^2 + (0,02 \text{ m})^2}\right)^2 + \left(\frac{0,6 \text{ m}}{2}\right)^2} \approx \frac{0,6 \text{ m}}{2} = 0,3 \text{ m}$$

Bei der Distanzmessung steht  $u_{GPS\_res}$  für die Unsicherheit, die aus der Genauigkeit des GPS resultiert. Der Term  $\sqrt{(0,02 \text{ m})^2 + (0,02 \text{ m})^2}$  für  $u_{GPS\_res}$  stellt die entsprechende Messabweichung in der Distanz dar. Die Wurzel wird aus der quadrierten Genauigkeit  $u_{GPS}$  für die x- und y-Richtung

gezogen, da die Diagonale maßgebend ist. Für die Kombination der Unsicherheiten aus GPS und SNR-Mapping werden beide Terme quadriert. Bei der GPS-Genauigkeit wird der Wert damit so klein, dass er komplett vernachlässigt werden kann. Die Gleichung 3.4 kann auf die Genauigkeit des SNR-Mappers reduziert werden. Hier wird die sogenannte „Half Digit/Scale Resolution“ verwendet. Die resultierende Unsicherheit aus dem SNR-Mapper  $u_{\text{SNRmapper\_res}}$  beträgt deshalb die Hälfte der Auflösung des Instruments (Hogan 2016). In Gleichung 3.4 ist ersichtlich, dass sich dadurch sowohl  $u_{\text{SNRmapper\_res}}$  als auch  $\Delta D$  zu 0,3 m ergibt (Vasiljević 2014). Für die GPS-Auflösung wird mit der sogenannten „Full Digit/Scale Resolution“ gerechnet. Im Gegensatz zum SNR-Mapper wird davon ausgegangen, dass der Auflösungswert als Ganzes die Messunsicherheit bestimmt. Bei digitalen Messverfahren gilt, dass die Full Digit/Scale Resolution zu verwenden ist, wenn die letzte Ziffer der Auflösung (die Ziffer ganz rechts) gezählt wird. Beim Runden der letzten Ziffer ist der Auflösungswert durch zwei zu teilen, also die Half Digit/Scale Resolution zu nutzen (Hogan 2016).

Zur Berechnung der Unsicherheit wird die Genauigkeit der Distanzbestimmung von 0,3 m verwendet. Die Quantifizierung der Teilunsicherheit erfolgt wie auch in Kapitel 3.1.1.2 mit der absoluten Abweichung der Windgeschwindigkeit in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , durch den Vergleich von zwei Höhen mit dem Hellmann'schen Potenzgesetz. Eine Überschlagsrechnung zeigt, dass selbst bei einem Elevationswinkel  $\varphi = 6^\circ$  die maximale Abweichung in der Höhe 0,031 m beträgt. Der Fehler, der bei dieser geringen Höhendifferenz nach dem Hellmann'schen Potenzgesetz entsteht, kann mit dem Faktor  $\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha$  zu 0,004 % bestimmt werden. Da bereits der absolute Fehler aus Steuerung der Laserstrahl-Ausrichtung in Kapitel 3.1.1.2 bei der Kombination der Unsicherheit der Geräte bei Messung an allen Messpunkten keine deutlichen Unterschiede einbringt, kann die Teilunsicherheit aus Distanzmessung für alle Messgerät-Windturbine-Kombinationen ohne Einfluss der Distanz berechnet werden. Die Anzahl der Geräte ist bei der Quantifizierung dieser Teilunsicherheit entscheidend. Um die kombinierte Unsicherheit für die Gerätekombinationen zu bilden, wird, wie in Gleichung 2.9 gezeigt, die Summe der Quadrate gebildet. Für 2-Gerätekombinationen ergibt sich eine Unsicherheit von  $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und für 3-Gerätekombinationen eine Unsicherheit von  $0,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 3.1.2 Single-Lidar-Messung

Unsicherheiten, die aus der Durchführung der Messung mit einem Single-Lidar entstehen, treten, wie auch die Abweichungen, die in Kapitel 3.1.1 Messgerät beschrieben sind, prinzipiell bei jeder Messung auf. Allerdings variiert die Unsicherheit, abhängig von der Planung der Messkampagne, stärker. Je nach eingestellter Return Time und Akkumulationszeit, dem gewähltem Bereich für die

Volumenmittelung und Winkel zwischen Windrichtung und Laserstrahl verändert sich die Gesamtunsicherheit.

#### 3.1.2.1 Return Time

Die sogenannte „Return Time“ beschreibt das Zeitfenster, in dem der Scanner-Strahl zu einem Messpunkt zurückkehrt. Wird an vielen Messpunkten gemessen, vergrößert sich die Return Time.  $\Delta t$  wird als Formelzeichen für die Return Time, die auch Scan-Intervall genannt wird, festgelegt. Einen großen Einfluss auf die Unsicherheit hat laut Stawiarski et al. (2013, S. 2053) der folgende Aspekt: Bei dem Anfahren von mehreren Messpunkten während des festgelegten Scan-Intervalls  $\Delta t$  ergeben sich zu kurze Messzeiten für einen repräsentativen Scan-Wert. Das bedeutet, dass eine zu geringe Anzahl an Geschwindigkeitsmessungen den über die gesamte Dauer von  $\Delta t$  repräsentativen Wert ergeben soll (engl. Temporal Undersampling). Diese Tatsache erfordert eine Optimierung hinsichtlich der Return Time  $\Delta t$  (Stawiarski et al. 2013, S. 2056). In Kapitel 5 werden die Auswirkungen auf die Unsicherheit dieses Aspekts anhand von Messdaten und einer statistischen Analyse eingehend betrachtet. Die nach Stawiarski et al. erforderliche Optimierung wird in dieser Arbeit nicht diskutiert, da der Fokus auf der Quantifizierung von Messunsicherheiten, nicht aber auf der Optimierung der Messkampagne liegt. Das Ziel der statistischen Analyse ist es, herauszufinden, wie viel Zeit zwischen den Messungen vergehen darf, ohne dass die Unsicherheit der Messwerte an den einzelnen Punkten zu sehr steigt. Die statistische Untersuchung der Messdaten soll eine sinnvolle Integration als Eingangsgröße zur Berechnung der Gesamtunsicherheit ermöglichen. Bei der Verwendung von Lidar-Messdaten im Bereich der Windenergie werden bei der Weiterverarbeitung meist 10-minütige Mittelwerte gebildet (Pauscher et al. 2016, S. 782). Es ist deshalb möglich, dass der Einfluss von längeren oder kürzeren Messzeiten an einem Messpunkt und höheren Return Times gegebenenfalls sehr gering sein kann. Quantifiziert wird die Größe der Teilunsicherheit aus der Return Time mittels dem in Kapitel 5 vorgestellten theoretischen Ansatz von Kristensen et al. (2002).

#### 3.1.2.2 Akkumulationszeit

In dem folgenden Absatz ist der Einfachheit halber von einem Messpunkt die Rede, obwohl in der Realität mehrere hintereinanderliegende Messbereiche entlang der LOS vermessen werden. Die Grundlagen für diese Thematik wurden bereits in Kapitel 2.1.2 detailliert erklärt. Die Akkumulationszeit  $T_A$  definiert die Messdauer an einem Punkt. Laut dem WINDCUBE-Hersteller kann die Akkumulationszeit im Bereich von 10 ms bis 10 s eingestellt werden. Empfohlen wird aufgrund der Erfassungstechnik eine minimale Akkumulationszeit von 100 ms (Leosphere, S. 40).

An dieser Stelle wird auf die Anlage 1 verwiesen. Darin sind die Zusammenhänge zwischen Messrate, Akkumulationszeit, PRF und Anzahl der ausgesandten Signale pro Messpunkt übersichtlich dargestellt.

Ein relevanter Wert bei der Wahl der Messrate ist das Signal-zu-Rauschverhältnis, was die Güte des Signals beschreibt (Gryning und Floors 2019). Das SNR sinkt bei schwachen Signalpegeln (ZHAW 2008, S. 2). Bei der 10-Hz-Messrate steigt der Wert von nicht korreliertem Rauschen bei einem SNR von -2 dB stark an. Bei der 1-Hz-Messung wird das Rauschen erst bei einem geringeren SNR von -8 dB größer (Stawiarski et al. 2013, S. 2050). Das Rückstreusignal der 1-Hz-Messung ist folglich besser, da nicht korreliertes Rauschen erst bei einem kleineren SNR auftritt. Dieses Phänomen steht für eine geringere Unsicherheit, was auf die längere Akkumulationszeit zurückzuführen ist.

Die Größe der Unsicherheit und die Akkumulationszeit sind somit anti-proportional zueinander. Bei einer langen Akkumulationszeit ist die Unsicherheit geringer und bei einer kurzen Akkumulationszeit ist die Unsicherheit größer. Zur Quantifizierung dieser Teilunsicherheit wird basierend auf den Untersuchungen von Stawiarski et al. (2013, S. 2051) ein Fehler von  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  für eine 10-Hz-Messung und auf 1-Hz-Messung auf  $0,065 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  festgelegt. Dazwischen kann linear interpoliert werden, sodass die Gleichung 3.5 die Unsicherheit in Abhängigkeit von der Akkumulationszeit näherungsweise beschreibt.

Gleichung 3.5 
$$u_{acc}(T_A) = 0,015 \cdot T_A + 0,05$$

### 3.1.2.3 Volumenmittelung

In der Fernerfassungstechnik gibt es bei jeder Scanning-Strategie eine Unsicherheit aus der Volumenmittelung. Es gibt verschiedene Definitionen für das Messvolumen in der Literatur. Für nicht-fokussierte, und damit meistens auch für gepulste Systeme, gilt, dass die Schnittmenge von Sende- und Empfangsvolumen entsprechend gewichtet als Begrenzung gilt. Eine klassische Zylinderdefinition ist nicht unbedingt bezeichnend: bei vorgegebenem Radius und vorgegebener Länge besteht die Möglichkeit, dass die Gebiete mit einer gewissen minimalen Intensität der Partikel nicht vollständig erfasst werden (Beuth 2017). Eine treffendere Definition ist nach Beuth insofern wie folgt: Das Messvolumen kann in alle Richtungen mit der Hälfte der maximalen Intensität um den Brennpunkt beschrieben werden. Spektrale Halbwertsbreiten (FWHM) sind ein übliches Maß zur Bestimmung einer solchen Größe (Beuth 2017, S. 87–89).

Die Unsicherheit aus Volumenmittelung beruht darauf, dass die gemessene radiale Geschwindigkeit immer ein gewichteter Durchschnitt der Aerosolgeschwindigkeiten innerhalb des

Messvolumens ist. Scanning Lidar-Geräte messen die radiale Windgeschwindigkeit nicht nur an dem erwarteten Messpunkt in der Entfernung  $D$ , sondern auch innerhalb der Range Gate, die einen bestimmten Bereich entlang des Laserstrahls definiert. Mithilfe einer Gewichtungsfunktion werden die rückgestreuten Signale aus dem gesamten Messvolumen zur radialen Windgeschwindigkeit verrechnet (Stawiarski et al. 2013, S. 2045–2047). Turbulenz in einem Maßstab, die kleiner als das Probevolumen ist, kann nicht akkurat gemessen werden (Newmann und et al. 2016, S. 2242). Zur Messung atmosphärischer Turbulenz wird bevorzugt ein Anemometer genutzt, da dieses nahezu an nur einem Punkt misst (Mann et al. 2008, S. 2). Da es sich bei der Lidar-Messung um eine vektorielle Mittelung innerhalb eines Messvolumens und bei Anemometern um eine skalare Mittelung der mittleren Windgeschwindigkeit handelt, muss mit Bedacht vorgegangen werden, wenn die beiden Methoden als äquivalent für die Berechnung der Windressource betrachtet werden (Clive 2008, S. 1). Diese Herausforderung wurde bereits in Kapitel 2.2.1 mit dem Punkt 2 der IEA Wind Task 32 angeführt. In Clive (2008, S. 4) wird die Größenordnung dieser Unsicherheit mit dem Verhältnis aus den Ergebnissen der Volumenmittelung und Punktmessung ermittelt.

$$\text{Gleichung 3.6} \quad \beta_{\log,z} = \frac{\langle u_z \rangle}{u_z} = \left( \frac{z}{g} \ln \frac{z + 0,5g}{z - 0,5g} + \ln \frac{\sqrt{z^2 - (0,5g)^2}}{z_0} - 1 \right) \left( \ln \frac{z}{z_0} \right)^{-1}$$

Das Verhältnis von  $\langle u_z \rangle$  als der mit Volumenmittelung berechneten Geschwindigkeit zu dem Referenzwert einer Punktmessung  $u_z$  auf der Höhe  $z$  gibt die Größenordnung des Fehlers aus Volumenmittelung an. Die Gleichung 3.6 ist abhängig von der Höhe, die als Messpunkt anvisiert wird, der Rauigkeitslänge  $z_0$ , die mit 0,1 m angenommen werden kann, und  $g$ , was der Range Gate Länge entspricht (Clive 2008, S. 4–6). Diese Teilunsicherheit wird folglich auf Basis einer Annahme für die einzustellende Range Gate Länge quantifiziert. Die absolute Abweichung der Windgeschwindigkeit aus Volumenmittelung kann für eine gewählte mittlere Geschwindigkeit berechnet werden. Dafür wird die gewählte Geschwindigkeit mit  $\beta_{\log,z}$  multipliziert und von der Ausgangs-Geschwindigkeit abgezogen. Damit ergibt sich Gleichung 3.7 zur Quantifizierung der Unsicherheit aus der Volumenmittelung  $u_{va}$ .

$$\text{Gleichung 3.7} \quad u_{va} = u_z - \langle u_z \rangle = u_z - u_z \cdot \beta_{\log,z}$$

#### 3.1.2.4 Winkel zwischen Windrichtung und Laserstrahl

Lidar-Systeme sind dadurch limitiert, dass sie bei der Messung mit nur einem Gerät entlang des Laserstrahls keine dreidimensionale Abbildung der tatsächlichen Windverhältnisse erreichen. Genauso wie ein Zyklop nicht dreidimensional sehen kann, ist die Messung eines dreidimensionalen Windvektors mit nur einem Lidar-Gerät nicht möglich. Dieses Problem ist auch unter dem Namen „Zyklopendilemma“ bekannt (Schlipf et al. 2011, S. 2).

In Vasiljević et al. (2020, S. 9) wird unter anderem die Abhängigkeit der radialen Windgeschwindigkeit von Windrichtung zur Laserstrahl-Richtung betrachtet. Dazu können die partiellen Ableitungen der radialen Windgeschwindigkeit nach Elevationswinkel, Azimutwinkel und Distanz betrachtet werden. Die folgenden drei Gleichungen sind aus Vasiljević et al. (2020, S. 9) entnommen. Sie zeigen die partiellen Ableitungen von  $v_{radial}$  nach Elevationswinkel, Azimutwinkel und Distanz in den Gleichungen 3.8, 3.9 und 3.10. In allen drei Formeln ist ein rot markierter Term  $\cos(\theta-\omega)$  oder  $\sin(\theta-\omega)$  enthalten, wobei der Azimutwinkel  $\theta$  die Verdrehung zu Nord und  $\omega$  die Windrichtung darstellt.

$$\frac{\partial v_{radial}}{\partial \phi} = -\frac{\alpha}{H_{ref}} R \cos(\theta-\omega) \cos(\varphi)^2 V_{href} \left( \frac{R \sin(\varphi) + (H_l - H_g)}{H_{ref}} \right)^{\alpha-1} +$$

Gleichung 3.8

$$\cos(\theta-\omega) \sin(\varphi) V_{href} \left( \frac{R \sin(\varphi) + (H_l - H_g)}{H_{ref}} \right)^{\alpha}$$

$$\frac{\partial v_{radial}}{\partial \theta} = \sin(\theta-\omega) \cos(\varphi) V_{href} \left( \frac{R \sin(\varphi) + (H_l - H_g)}{H_{ref}} \right)^{\alpha}$$

Gleichung 3.9

$$\frac{\partial v_{radial}}{\partial R} = -\frac{\alpha}{H_{ref}} \cos(\theta-\omega) \cos(\varphi) \sin(\varphi) V_{href} \left( \frac{R \sin(\varphi) + (H_l - H_g)}{H_{ref}} \right)^{\alpha-1}$$

Gleichung 3.10

Die partiellen Ableitungen der Unsicherheit der radialen Windgeschwindigkeit nach Elevationswinkel, Azimutwinkel und Distanz zeigen die Änderungsraten der Funktionswerte an einer Stelle  $(x_0, y_0)$ . Wenn die Richtung des Lasers mit der Windrichtung übereinstimmt, erreicht der Wert in Gleichung 3.8 einen maximalen Wert. Sind Laserstrahl und Windrichtung orthogonal zueinander, wird der Term gleich Null. Die Gleichung 3.10 ist nach der Distanz abgeleitet und erreicht ebenfalls einen maximalen Wert, wenn die Richtung des Lasers gleich der Windrichtung ist. In der nach dem Azimutwinkel partiell abgeleiteten Funktion in Gleichung 3.9 erreicht der Term mit Sinus sein Maximum, wenn der Winkel zwischen Laserstrahl und Windrichtung  $90^\circ$  beträgt. Gleichungen 3.8 und 3.9 erreichen ihre Maxima bei den jeweils entgegengesetzten Winkeln zwischen Windrichtung und Laserstrahl. Dies liegt daran, dass die Projektion des Windvektors zur radialen Windgeschwindigkeit die größte Unsicherheit innehat, wenn Windrichtung und Laserstrahl orthogonal zueinanderstehen. Die Tatsache entsteht aus dem Zyklpendilemma. Die partielle Ableitung der Distanz erreicht ein Maximum, für parallel-verlaufenden Strahl und Windrichtung (Vasiljević et al. 2020, S. 9).

Die erläuterte Abhängigkeit der Unsicherheit vom Winkel zwischen Laserstrahl und Windrichtung wird im Rahmen des MILIA-Projektes in einem allgemeingültigen Modell im Rahmen der Fehlerfortpflanzung wie in Vasiljević et al. (2020) untersucht. Das MILIA-Modell ermöglicht allerdings die Verwendung von drei Lidar-Systemen, was auch in die zu entwickelnden Formeln

integriert werden muss. Mit den festgelegten Standorten und einer bekannten vorherrschenden Windrichtungsverteilung kann diese Teilunsicherheit im Unsicherheitsmodell untersucht werden. Stehen die Windrichtung und der Laserstrahl senkrecht aufeinander, so kann die radiale Geschwindigkeit nicht gemessen werden und die Unsicherheit liegt bei 100 %. Je flacher der Kreuzungswinkel wird, desto kleiner sind die Unsicherheiten bei der Geschwindigkeitsmessung. Diese Abhängigkeit der Unsicherheit von dem Winkel zwischen Windrichtung und Laserstrahl wird im Rahmen der Fehlerfortpflanzung in Kapitel 3.2.2 betrachtet. Da selten nur genau eine Windrichtung vorherrscht, wird zur Berechnung dieser Teilunsicherheit eine Windgeschwindigkeitsverteilung betrachtet. Diese gibt die relativen Häufigkeiten der Windrichtungen an. Die Richtungen von 0° bis 360° sind dafür in 10 Windrichtungsklassen eingeordnet.

#### 3.1.3 Umgebungsbedingungen

Das Wetter, also der kurzzeitige Zustand der Atmosphäre bezogen auf einen bestimmten Ort, beeinflusst die Messungen bzw. die Verfügbarkeit der Daten erheblich. Die Rückstreuung durch Aerosole beeinflusst die Güte des Signals und damit die Genauigkeit des Lidar-Gerätes (Davoust et al. 2014). In welchem Umfang eine Rückstreuung des Lichts durch Aerosole stattfindet, wird durch tiefhängende Wolken, Nebel und die Aerosolkonzentration beeinflusst. Davoust et al. (2014, S. 3) untersuchen mittels Simulation und einer Messkampagne in den Vereinigten Staaten in Boulder, Colorado, die Datenverfügbarkeit von Lidar-Geräten. Regen beeinflusst, den Untersuchungen zur Folge nach, nicht die Datenverfügbarkeit. Hingegen führen starker Nebel, Schnee sowie eine geringe Aerosolkonzentration in einer klaren Atmosphäre zu schlechteren Datenverfügbarkeiten (Davoust et al. 2014, S. 3–4; Aitken et al. 2012, S. 351).

Nach Herstellerangaben kann der WINDCUBE von Leosphere bei Temperaturen von -25°C bis +45°C und einer Luftfeuchte zwischen 10 % und 100 % operieren (Leosphere). Im Rahmen von Untersuchungen für Klassifikationsberichte werden Sensitivitäten von verschiedenen Parametern untersucht. Für den WINDCUBE V2 wurde in diesem Zuge der Einfluss u. a. von Turbulenz, Windrichtung, Windscherung, Temperatur und dem Temperaturgradienten untersucht (WindGuard 2013, S. 15). Die Ergebnisse zeigen, dass es legitim ist, die Windscherung, Turbulenzintensität und Windrichtung als einzige bedeutende und unabhängige Parameter zu behalten. Der Einfluss der Temperatur auf die Messung ist folglich vernachlässigbar.

Die Durchführung einer Messung bei tiefhängenden Wolken, Nebel und Hochnebel kann einen negativen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Messdaten haben. Insbesondere in den

Wintermonaten treten diese Wetterverhältnisse häufiger auf und sind daher kritisch für die derzeit erforderliche zwölf-monatige Messperiode, die in den TR-6 vorgeschrieben sind (Rösner et al. 2020, S. 7). Die Eingangsgrößen der Kategorie Umgebungsbedingungen sind insbesondere relevant für die Datenverfügbarkeit einer Messung mit Lidar-Geräten. Die Anwesenheit von Nebel und Wolken oder Abwesenheit von Aerosolen haben Auswirkung auf die Bestimmung eines Jahresmittelwerts. Auf den betragsmäßigen Wert der Unsicherheit der Messung haben sie allerdings einen zu vernachlässigenden Einfluss. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Bestimmung der horizontalen Windgeschwindigkeit und deren Unsicherheit liegt, wird der Einfluss der Umgebungsbedingungen in diesem Unterkapitel 3.1.3 erwähnt und im weiteren Verlauf nicht betrachtet.

#### 3.1.4 Versagen des Equipments

Bei der Anwendung der Lidar-Geräte können Stromausfall, Hardware- oder Softwarefehler auftreten. Die unvollständigen Messdaten bilden dann gegebenenfalls keine ausreichende Datenbasis, sodass die komplette Messung wiederholt werden muss. Verlässliche Infrastruktur und aktuelle Versionen der Geräte und ihrer Software sind wichtige Voraussetzungen für eine reibungslose Durchführung der Messung. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass die für die Messung verantwortliche Person sich mit Hard- und Software des Gerätes gut auskennen sollte, sodass der Faktor Mensch die Funktion des Equipments nicht einschränkt. In der Praxis beeinflussen diese Aspekte als wichtige Eingangsgrößen die Datenverfügbarkeit der Messung. Ursachen sind u.a. Stromausfall und Fehler durch Handhabung des Gerätes. In dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch auf der Ermittlung der betragsmäßigen Unsicherheit bei der Windgeschwindigkeitsmessung und nicht auf der Datenverfügbarkeit. Daher wird das Versagen des Equipments in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Ferner wird angenommen, dass das Personal ausreichend geschult ist und die örtlichen Gegebenheiten, wie dem Vorhandensein einer lückenlosen Stromversorgung, eine vollständige Messung ermöglichen.

### 3.2 GESAMTUNSICHERHEIT BEI REKONSTRUKTION DES 2D WINDVEKTORS

Die Berechnung der Gesamtunsicherheit bei der Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors aufgrund der Verwendung eines Multi-Lidar-Systems wird erläutert. Der Windvektor wird aus den gemessenen, radialen Geschwindigkeiten mehrerer Geräte ermittelt. In dem Kapitel 3.2.1 geht es um die Vorstellung der Teilunsicherheiten, die als ein „direkter“ Einfluss des Multi-Lidar-Verfahrens zu betrachten sind. Bei der Kombination der Messdaten aus verschiedenen Geräten haben die in Kapitel 3.1 erläuterten Teilunsicherheiten somit einen „indirekten“ Einfluss auf die Gesamtunsicherheit des Windvektors. Beispielsweise muss eine kombinierte

Ausrichtungsunsicherheit berechnet werden, da die Ausrichtungsunsicherheit jedes einzelnen Gerätes zur Gesamtunsicherheit beiträgt. Das Kapitel 3.2.2 stellt das Thema Fehlerfortpflanzung und den „indirekten“ Einfluss auf die Gesamtunsicherheit vor, der aus den Single-Lidar-Unsicherheiten entsteht.

### 3.2.1 Multi-Lidar-Messung

Der Kategorie Multi-Lidar-Messung können drei Teilunsicherheiten zugeordnet werden. Diese Unsicherheitsbeiträge entstehen aus der Verwendung mehrerer Geräte (Multi-Lidar). Einen Einfluss auf die Gesamtunsicherheit haben dabei die Kreuzungswinkel der Laserstrahlen sowie die räumliche und zeitliche Synchronisation der Geräte. Die Angabe von absoluten Werten für die Unsicherheit ist in diesem Kapitel nicht möglich, da die Zahlenwerte von den Standorten der Geräte und Lage der Messpunkte abhängig sind. Die Quantifizierung dieser Teilunsicherheiten anhand von beispielhaften Gerätestandorten und Messpunkten erfolgt in einem Python-Skript und wird in Kapitel 4 näher erläutert.

#### 3.2.1.1 Kreuzungswinkel der Laserstrahlen

Der Winkel, in dem sich die Laserstrahlen von mehreren Lidar-Geräten kreuzen, beeinflusst die Unsicherheit des Ergebnisses maßgeblich. Der Fehler ist verhältnismäßig klein, wenn die Laserstrahlen in etwa einen  $90^\circ$  Winkel zueinander haben. Liegt dieser Winkel bei ungefähr  $180^\circ$  entstehen große Fehler (Jäger et al. 2020). Die nachstehenden Abbildungen zeigen die Unsicherheitsverteilung der Kreuzungswinkel für den Fall von zwei bzw. drei aufgestellten Lidar-Geräten.

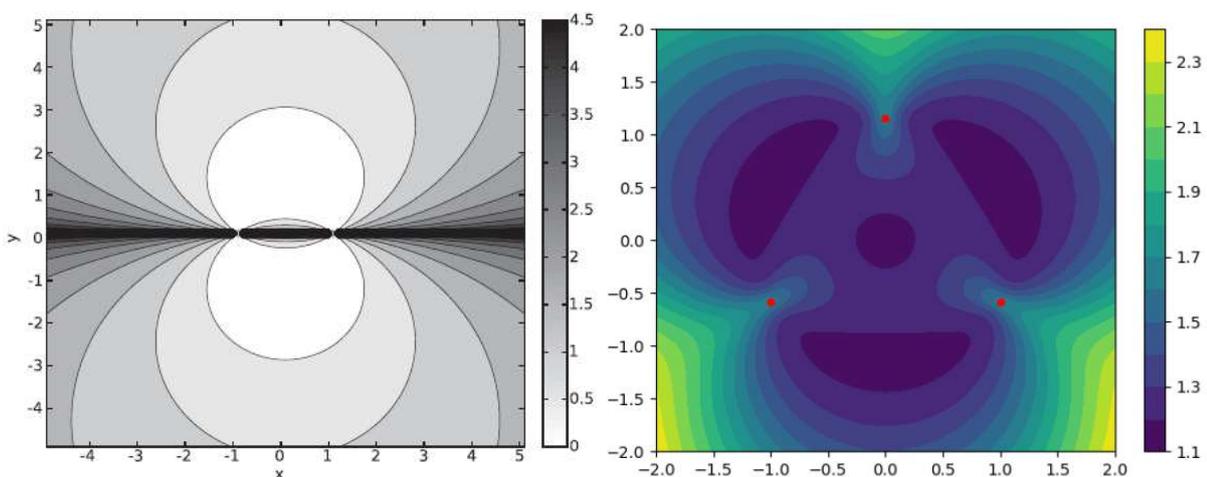


Bild 3.5 Unsicherheit aus Kreuzungswinkel  $\Delta\chi$  der Laserstrahlen mit zwei Geräten (links) (Stawiarski et al. 2013, S. 2053) und drei Geräten (rechts) (Jäger et al. 2019)

In der linken Abbildung von Bild 3.5 ist auf der Skala der fehlervergrößernde Faktor  $\log(1/|\Delta\chi|)$ , abhängig vom Kreuzungswinkel der Laserstrahlen  $\Delta\chi$  abgebildet (Stawiarski et al. 2013). Zwei Lidar-Geräte sind an den Positionen (1,0) und (-1,0) aufgestellt. Je heller ein Bereich eingefärbt ist, desto kleiner ist der Fehler und desto günstiger ist die Messposition für den jeweiligen Anwendungsfall. Dunklere Bereiche stehen für eine verhältnismäßig große Unsicherheit bezüglich der Messwerte. Ist ein Bereich schwarz, so divergiert der Vorfaktor dort (Stawiarski et al. 2013, S. 2053). In der rechten Graphik sind die drei Lidar-Standorte mit roten Punkten gekennzeichnet. Die Abbildung zeigt den fehlervergrößernden Faktor auf einer Messhöhe von 0,2 m. In Bild 3.5 auf der rechten Seite stehen hellere Bereiche für größere Fehler aus dem Kreuzungswinkel der Laserstrahlen (Jäger et al. 2019). Die Messwerte haben bei der Verwendung von mehreren Geräten eine vergleichsweise hohe Sicherheit. Das ist darauf zurückzuführen, dass der günstige Kreuzungswinkel von  $90^\circ$  bei drei Geräten eher erreicht und gleichzeitig ein  $180^\circ$  Kreuzungswinkel vermieden wird. Es wird deutlich, dass die Kreuzungswinkel bei mehreren Geräten zu geringeren Unsicherheiten führen. Innerhalb des Python-Skriptes wird die Unsicherheit aus dem Kreuzungswinkel der Laserstrahlen durch einen Term in der Fehlerfortpflanzung berücksichtigt. Diese Formeln wurden im Rahmen einer anderen Abschlussarbeit entwickelt. Auf die Thematik der Fehlerfortpflanzung wird weiterführend in Kapitel 3.2.2 eingegangen.

#### 3.2.1.2 Räumliche Synchronisation der Geräte

Die in Kapitel 3.1.2.3 beschriebene Volumenmittelung tritt natürlicherweise bei Messungen mit einem Lidar-Gerät auf. Werden die radialen Windgeschwindigkeiten mehrerer Geräte miteinander kombiniert, entsteht daraus eine Unsicherheit aus der räumlichen Synchronisation der Messgeräte. Der erwartete Messpunkt ist für alle Geräte der Gleiche. Jedes Gerät misst allerdings nicht nur an diesem Punkt, sondern mittelt die radiale Windgeschwindigkeit über die gesamte Range Gate-Länge. Da sich dieser Bereich entlang des Laserstrahls ausbreitet, sind die Probevolumina aufgrund unterschiedlicher Ausrichtungen der Laserstrahlen nicht identisch. Insbesondere bei starken Geländeneigungen oder ausgeprägter Windscherung können Unsicherheiten in die Messung kommen, da sich das Windgeschwindigkeitsfeld schnell verändert und die Messvolumina mehrerer Scanner verschiedene Turbulenz-Phänomene beinhalten könnten (Stawiarski et al. 2013, S. 2054–2055).

Nach Stawiarski et al. (2013, S. 2054) ist der Einfluss dieser Unsicherheit bei hohen zeitlichen Auflösungen sehr groß. Wenn das Zeitintervall der Messung allerdings lang genug ist, heben sich die Unsicherheiten auf. Auch wenn die räumliche Mittelung nicht zu einem systematischen Fehler

in der Geschwindigkeitsmessung führt, so werden dennoch durch die Dämpfung von Turbulenz kleiner Ausdehnung reale Werte unterschätzt (Stawiarski et al. 2013, S. 2054; Mann et al. 2010).

Die Berechnung der Größe der Unsicherheit mit einer Annahme einer Range Gate Länge nach Stawiarski et al. (2013, S. 2055) führt zu relativ großen absoluten Messabweichungen. Abhängig von der gewählten Range Gate Länge von 25 m, 50 m, 75 m oder 100 m liegt die Fehlergröße zwischen  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und  $0,075 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Stawiarski et al. 2013, S. 2055). Der Fehler aus räumlicher Synchronisation ist bei der Verwendung von drei Geräten tendenziell größer als bei der Verwendung von zwei Geräten, da die Messvolumina sich stärker unterscheiden. Im Python-Skript wird diese Teilunsicherheit indirekt berücksichtigt, da sowohl die Messabweichung aus der Volumenmittelung sowie die Kreuzungswinkel der Laserstrahlen in die Fehlerfortpflanzung eingehen.

#### 3.2.1.3 Zeitliche Synchronisation der Geräte

Laut Stawiarski et al. (2013, S. 2053) sind Fehler aus der zeitlichen Mittelung mehrerer Geräte dadurch definiert, dass Messdaten nicht für das gleiche Zeitintervall oder über den gesamten Zeitraum einer Datenabfrage vorhanden sind. Diese Messabweichungen werden bei sich kreuzenden Laserstrahlen weniger relevant, je länger das Zeitintervall der Messung ist.

In Vasiljević (2014, S. 72–79) werden Ansätze zur zeitlichen Synchronisation mehrerer Scanner beschrieben. Quarzoszillatoren sind für eine präzise Zeitmessung verantwortlich. Der erste Ansatz empfiehlt, den verwendeten Quarzoszillator auszutauschen. Stattdessen kann eine temperaturgeregelte Variante genutzt werden. Der Unterschied bei der Verwendung von beheizten und unbeheizten Quarzoszillatoren wird von Vasiljević (2014) untersucht. Der Quarzoszillator hat eine Frequenz von 20 MHz und eine Genauigkeit von  $\pm 50$  parts per million (PPM). Die Abweichung nach zwei Stunden kontinuierlichem Scannen bei Verwendung dieses Zeitrechners beträgt bis zu  $\pm 720$  ms. Wird hingegen ein beheizter Quarzoszillator mit einer Genauigkeit besser als 0,05 PPM verwendet, so beträgt die Abweichung nach einer 24-stündigen Messung nur 10 ms. Der zweite Ansatz beschreibt die Möglichkeit, die Scans über einen Mastercomputer zu synchronisieren (Vasiljević 2014). Auch Stawiarski et al. (2013, S. 2049) empfehlen eine Synchronisation der Geräte mittels eines Kontrollprogramms, welches auf einer Remote Operation Station (ROS) läuft. Damit können Verzögerungen auf einen Grenzwert beschränkt werden. Wird der festgelegte Wert erreicht, kann durch Echtzeit-Steuerung der Versatz auf null zurückgebracht werden (Vasiljević 2014, S. 77).

Wie oben bereits angeführt, ist der Fehler aus zeitlicher Synchronisation nach Stawiarski et al. (2013, S. 2053) gering, wenn das Zeitintervall der Messung ausreichend lang ist. Die Unsicherheit aus zeitlicher Synchronisation ist bei der Verwendung eines zentralen Kontrollprogramms in einer ROS vernachlässigbar (Stawiarski et al. 2013, S. 2053).

### 3.2.2 Fehlerfortpflanzung

Bei der Fehlerfortpflanzung handelt es sich, wie bereits in Kapitel 2.3 erklärt, nicht um eine eigene Teilunsicherheit. Wenn eine Messgröße nicht direkt gemessen, sondern aus anderen gemessenen Größen abgeleitet wird, müssen die Messunsicherheiten im Rahmen einer gaußschen Fehlerfortpflanzung betrachtet werden. Die in Kapitel 3.1 aufgeführten Unsicherheiten aus der Messung mit einem Gerät müssen bei der Verwendung mehrerer Geräte entsprechend kombiniert werden (Stawiarski et al. 2013, S. 2050–2053).

Bisher beziehen sich umfangreiche Modelle zur Berechnung einer Gesamtunsicherheit bei Multi-Lidar-Windmessungen nur auf zwei Geräte (Stawiarski et al. 2013; Vasiljević et al. 2020). Holtom und Brooms (2020) haben zwar Formeln für die Fehlerfortpflanzung bei drei Geräten entwickelt. Diese berechnen allerdings ebenfalls die Unsicherheit der vertikalen Windgeschwindigkeit. Da das MILIA-Projekt den Fokus auf die horizontale Windgeschwindigkeit legt, ist es nicht sinnvoll, den Ansatz von Holtom und Brooms zu verwenden. In Stawiarski et al. und Vasiljević et al. wird die modellbegrenzende Annahme von geringen Vertikalgeschwindigkeiten und kleinen Elevationswinkeln getroffen. Auch in dem MILIA-Projekt gibt es diese Vereinfachungen. Im Rahmen des MILIA-Projektes stellt sich allerdings zusätzlich die Frage, ob bei der Verwendung eines dritten Lidar-Gerätes die Gesamtunsicherheit bei der Bestimmung der horizontalen Windgeschwindigkeit verringert werden kann. Hierfür wird im Rahmen des MILIA-Projektes ein allgemeingültiges Modell nach gaußscher Fehlerfortpflanzung entwickelt.

Zur Implementierung der Fehlerfortpflanzung werden in dieser Diplomarbeit Formeln verwendet, die im Rahmen einer anderen Abschlussarbeit entwickelt worden sind. In diese Formeln geht die Unsicherheit aus der radialen Windgeschwindigkeitsmessung mit einem Gerät ein. Ebenso beeinflussen die Unsicherheit aus dem Winkel zwischen Windrichtung und Laserstrahl sowie die Kreuzungswinkel der Laserstrahlen das Ergebnis. Die beiden letztgenannten Aspekte wurden bereits in den Unterkapiteln 3.1.2.4 und 3.2.1.1 diskutiert. Die Zuordnung zu den Kategorien Single-Lidar-Messung und Multi-Lidar-Messung ist auf den Ursprung dieser beiden Unsicherheiten zurückzuführen. Ebenso wie beispielsweise die Unsicherheit aus der Volumenmittelung kann die Unsicherheit „Winkel zwischen Windrichtung und Laserstrahl“ jedem einzelnen Gerät zugeordnet

werden. Der „Kreuzungswinkel zwischen den Laserstrahlen“ entsteht durch die Verwendung mehrerer Lidar-Geräte. In dem Unsicherheitsmodell wird der Einfluss dieser zwei Teilunsicherheiten im Rahmen der Fehlerfortpflanzung betrachtet.

### 3.3 UNSICHERHEITSERMITTLUNG

Zur Ermittlung einer Gesamtunsicherheit bei der Multi-Lidar-Windmessung müssen die Teilunsicherheiten aus den Kapiteln 3.1 Radiale Geschwindigkeitsmessung und 3.2 Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors betrachtet werden.

Ishikawa Diagramme, auch Ursache-Wirkungs-Diagramme genannt, sind eine Möglichkeit, Messunsicherheiten übersichtlich darzustellen (Mieke, S. 6). Bild 3.6 zeigt die Struktur dieser Diagramme sowie deren Grundbestandteile.

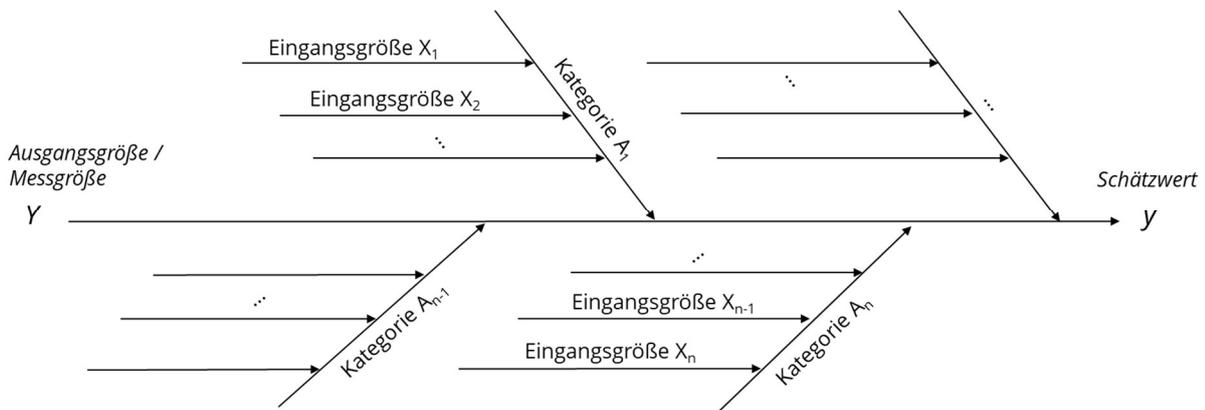


Bild 3.6 Ishikawa Diagramm (allgemein)

Von der Ausgangsgröße  $Y$  kann durch den Einfluss der Eingangsgrößen  $X_1$  bis  $X_n$  ein Schätzwert  $y$  ermittelt werden. Durch den Vergleich von Schätzwert und Ausgangsgröße kann die Messabweichung bestimmt werden. Die Ausgangsgröße entspricht bei einer Messung der Messgröße, also diejenige physikalische Größe, die durch die Messung ermittelt werden soll. Auf den horizontalen Pfeilen sind die Eingangsgrößen aufgetragen. Diese werden auch Beiträge zur Unsicherheit genannt. Jede Eingangsgröße ist einer Kategorie zugeordnet, welche auf den diagonalen Pfeilen steht und wird durch Teilunsicherheiten quantifiziert. Es ist prinzipiell möglich, mehrere Ausgangsgrößen zusammen in einem Diagramm aufzuführen. Zur Verdeutlichung, wie sich die Gesamtunsicherheit bei Multi-Lidar-Windmessungen aus den Teilunsicherheiten von (i) Messung der radialen Geschwindigkeit und (ii) Rekonstruktion des Windvektors zusammensetzt, wurden zwei Diagramme verwendet.

Das erste Ishikawa Diagramm in Bild 3.7 zeigt die Teilunsicherheiten aus der Messung der radialen Geschwindigkeit. Die Ausgangsgröße  $Y$  ist in diesem Fall die radiale Windgeschwindigkeit. Die

Eingangsgrößen  $X_1$  bis  $X_{13}$  sind die Beiträge zur Unsicherheit. Sie stehen auf den horizontalen Pfeilen und sind den Kategorien Messgerät, Messstrategie Single-Lidar, Umgebungsbedingung und Versagen des Equipments auf den diagonalen Pfeilen zugeordnet. Durch die Betrachtung des Einflusses der Teilunsicherheiten kann ein Schätzwert  $y$  von der Ausgangsgröße  $Y$ , der radialen Windgeschwindigkeit, bestimmt werden.

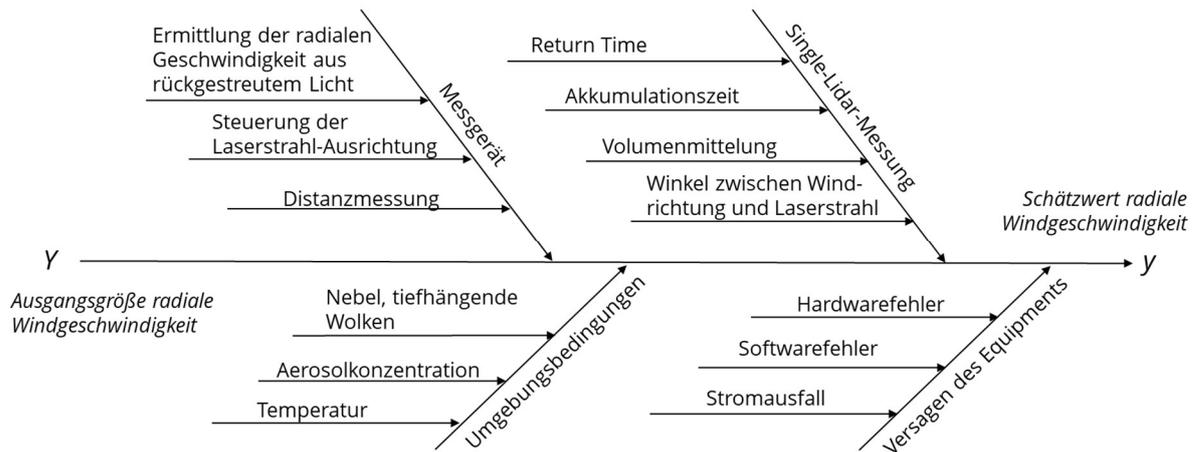


Bild 3.7 Ishikawa Diagramm I: Unsicherheit bei Ermittlung der radialen Windgeschwindigkeit

Die Eingangsgrößen der Kategorie **Messgerät** entstehen aus technischen Grenzen des Gerätes. In der Kategorie **Single-Lidar-Messung** werden Teilunsicherheiten betrachtet, die von Einstellungen des Lidar-Gerätes und der Kampagnenplanung beeinflusst werden. Die **Umgebungsbedingungen** fassen orts- und zeitspezifische Aspekte zusammen. Die Kategorie **Versagen des Equipments** hängt hauptsächlich von der Qualität der Infrastruktur und der Systeme ab.

Das zweite Ishikawa Diagramm in Bild 3.8 zeigt die Teilunsicherheiten aus der Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors. Die Ausgangsgröße  $Y$  ist in diesem Fall der zweidimensionale Windvektor.

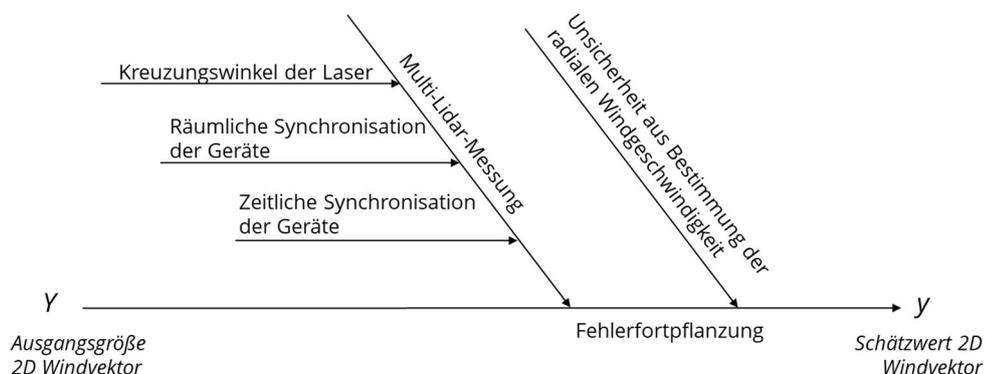


Bild 3.8 Ishikawa Diagramm II: Unsicherheit bei der Rekonstruktion des Windvektors durch Fehlerfortpflanzung

Um den Schätzwert  $y$  des Windvektors zu erhalten, muss neben den Teilunsicherheiten aus der Kategorie **Multi-Lidar-Messung** die Unsicherheit aus dem Ishikawa Diagramm I einbezogen werden. Das ist darauf zurückzuführen, dass die gemessene radiale Windgeschwindigkeit, wie in Kapitel 3.2.2 erläutert, die Basis der Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors bildet. Der Einfluss dieser Komponenten ist auf dem rechten diagonalen Pfeil mit der Bezeichnung **Unsicherheit aus Bestimmung der radialen Windgeschwindigkeit** zu finden. Im Rahmen einer Fehlerfortpflanzung werden diese Aspekte betrachtet und der Schätzwert des zweidimensionalen Windvektors kann ermittelt werden. Die Messabweichung kann mit dem Schätzwert im Vergleich zur Ausgangsgröße abgeleitet werden. Aus dem Schätzwert  $y$  des zweidimensionalen Windvektors wird die horizontale Windgeschwindigkeit abgeleitet, welche die Grundlage für die Bestimmung von Windpotenzial und Energieertragsberechnung bildet (TR 6). Am Ende der Unsicherheitseinschätzung stehen somit Werte der absoluten Messabweichungen, für die Messung der horizontalen Windgeschwindigkeit. Die Unsicherheitseinschätzung ist somit ein wichtiger Schritt zur Validierung der Messergebnisse.

Mit den zwei Ishikawa Diagrammen können die Eingangsgrößen strukturiert dargestellt werden. Die Größe des Einflusses einzelner Eingangsgrößen wird aus den Diagrammen allerdings nicht ersichtlich. Die Gesamtunsicherheit für ein konkretes Fallbeispiel kann mit einem Algorithmus bestimmt werden. Dieser bezieht die Lidar-Gerätstandorte mit ein, um beispielsweise aus den Kreuzungswinkeln der Laserstrahlen eine Unsicherheit zu berechnen. Die Ishikawa Diagramme geben somit einen Überblick über die Eingangsgrößen zur Unsicherheitsberechnung. Die Ansätze zur Quantifizierung sind bereits in diesem Kapitel erfolgt. Die Implementierung in Python wird im Kapitel 4 vorgestellt und diskutiert.

## 4 UNSICHERHEITSBERECHNUNG IN PYTHON

In diesem Kapitel geht es um die Quantifizierung und Implementierung der in Kapitel 3 erläuterten Unsicherheiten. Auch wenn die Teilunsicherheiten Umgebungsbedingungen aus dem Kapitel 3.1.3 und Versagen des Equipments aus Kapitel 3.1.4 in dieser Diplomarbeit nicht mit betrachtet werden, soll mit den restlichen Eingangsgrößen eine umfassende Betrachtung einer Gesamtunsicherheit möglich sein. Ein Python-Skript zur Berechnung der Gesamtunsicherheit bei dem Multi-Lidar-Verfahren wird in eine bereits bestehende Architektur eines Tools zur Planung von Messkampagnen integriert. Der Fokus in diesem Kapitel liegt nicht auf der Erläuterung des Programmcodes oder dem Aufbau des kompletten Tools, hauptsächlich sollen das für die Unsicherheitseinschätzung erforderliche Szenario und die Ergebnisse vorgestellt werden. Die Kapitel 4.1 und 4.2 geben ein Überblick über die Verwendung von Python bei der Implementierung des Unsicherheitsmodells und beschreiben Schlüsselstellen bei dem Vorgehen der Implementierung. In Kapitel 4.3 werden die Ergebnisse der Unsicherheitseinschätzung vorgestellt. Um ein sinnvolles Modell zur Unsicherheitsberechnung zu erstellen, werden Modell-Annahmen getroffen. Die Grenzen des Modells, die sich daraus ergeben, werden in Kapitel 4.4 diskutiert. Das Skript, das die Berechnung der Gesamtunsicherheit enthält, wird dieser Arbeit vollständig als digitale Anlage beigelegt.

### 4.1 VERWENDUNG VON PYTHON

Die Unsicherheitseinschätzung wird in der Skriptsprache Python implementiert. Wie in Kapitel 1.3 bereits erwähnt, wird die Unsicherheitseinschätzung als Erweiterung eines bereits bestehenden Tools vom Fraunhofer IEE entwickelt. Da mehrere Personen gleichzeitig an diesem Projekt arbeiten, wird Gitlab als Versionsverwaltung verwendet. PyCharm von dem Unternehmen JetBrains ist die verwendete Entwicklungsumgebung. Ein Vorteil von PyCharm ist, dass ein Version Control System (VCS) in dieser Entwicklungsumgebung bereits integriert ist.

Es folgt ein kurzer Überblick über die in dem Skript verwendeten Module. Das `sys`-Modul enthält Tools, die in Verbindung mit dem Interpreter stehen. Das Modul bietet außerdem Zugriff auf einige Umgebungskomponenten wie z. B. die Kommandozeile (Lutz 2014). Um einige Tools der Standardbibliothek von C für die Verwendung in Python zu exportieren, gibt es das `math`-Modul. Neben der Zahl Pi, die dadurch verwendbar wird, werden die Funktionen `cos`, `sin`, `asin`, `sqrt` sowie `radians` und `degrees` importiert. Letztere sind für die Umwandlung von Winkeln zwischen Bogenmaß und Grad vorgesehen (Lutz 2014, S. 240). `NumPy` ist ein Akronym für „Numerisches Python“. Diese Bibliothek umfasst verschiedene Datentypen und Funktionen für numerische Berechnungen. Mit

dem *Pandas*-Modul können Tabellendaten einfach verarbeitet werden (Klein). Die Verwendung dieses Moduls ist für die vielschichtige Berechnung der Unsicherheit sinnvoll, da beim Arbeiten mit Tabellendaten Zwischenergebnisse übersichtlich dargestellt werden. Das Modul *itertools* kann Iteratoren erzeugen und bearbeiten (Klein) und ist aus dem Grund zur Erstellung von Kombinationen verschiedener Standorte geeignet. Die *Proj*-Klasse kann kartographische Transformationen durchführen. So können Breiten- und Höhengrade in ein Koordinatensystem mit der Einheit Meter übersetzt werden. Für die Unsicherheitsberechnung werden zwei weitere bereits bestehende Elemente verwendet, die beide vom Fraunhofer IEE entwickelt wurden. Dabei handelt es sich um die Klasse *GeoMap* und die Funktion *calculate\_leo\_angles()*. Bei dieser Implementierung wird die *GeoMap*-Klasse zum Ablesen von Höheninformationen aus tiff-Dateien verwendet. Mit der *calculate\_leo\_angles()*-Funktion können durch Eingabe von Messgerätestandorten und Messpunkten die Azimut- und Elevationswinkel sowie Distanzen zwischen beiden Punkten berechnet werden. Diese Informationen sind für die Implementierung einiger Teilunsicherheiten erforderlich.

## 4.2 IMPLEMENTIERUNG

Die Genauigkeit der Ermittlung der horizontalen Windgeschwindigkeit wird in einem Skript anhand der Teilunsicherheiten in absoluten Werten in der Einheit  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  berechnet. Unsicherheiten, die aus den Messungen mit zwei Geräten hervorgehen, hat Vasiljević in einem Python Tool mit dem Namen YADDUM (Vasiljević 2019) quantifiziert und implementiert. Bei der Implementierung im Rahmen dieser Diplomarbeit wird für das MILIA-Projekt zusätzlich betrachtet, wie ein drittes Gerät die Gesamtunsicherheit verändert. Diese Berechnungen werden für ein konkretes Fallbeispiel durchgeführt. Das entwickelte Skript berechnet die Unsicherheit für verschiedene Kombinationen von Lidar-Gerätpositionen mit zwei und drei Geräten. Die Kombination der Gerätestandorte, die den kleinsten Wert bei der Unsicherheitseinschätzung generiert, kann für die Planung der Messkampagne bzw. als Ausgangspunkt der Optimierung genutzt werden. Folgende Annahmen werden für die Implementierung der Unsicherheitseinschätzung getroffen: Es gibt ausschließlich kleine Elevationswinkel  $< 5^\circ$  und geringe vertikale Geschwindigkeiten  $< 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Für das vertikale Windprofil gilt das Hellmann'sche Potenzgesetz. Außerdem wird für die Berechnung der Unsicherheit aus Steuerung der Laserstrahl-Ausrichtung in Kapitel 3.1.1.2 und der Distanzmessung in Kapitel 3.1.1.3 ein in der Horizontalen homogenes Windfeld sowie eine Punktmessung angenommen.

### 4.2.1 Vorgehen

In Bild 4.1 sind die zu betrachtenden Teilunsicherheiten aus den Ishikawa Diagrammen I und II abgebildet. Die aufgeführten Eingangsgrößen werden bei der Implementierung berücksichtigt.

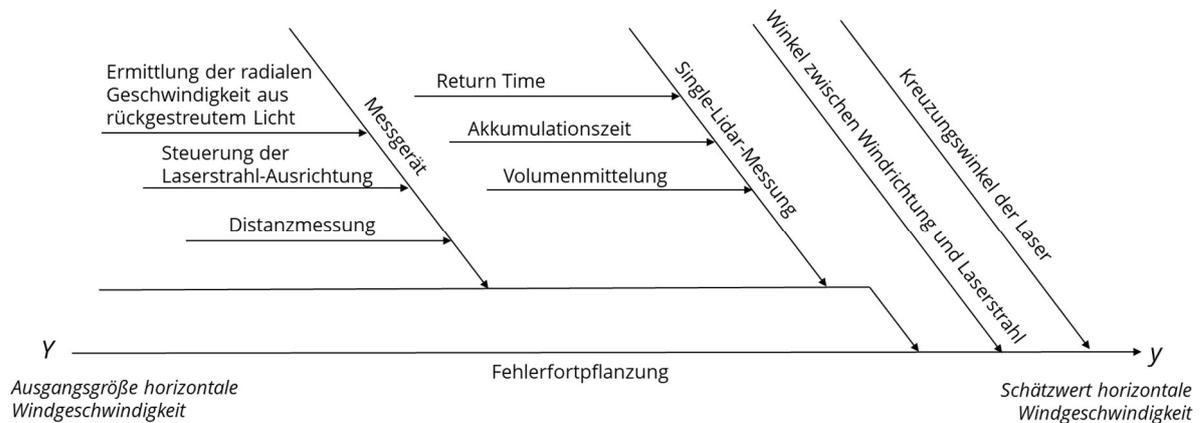


Bild 4.1 Kombiniertes Ishikawa Diagramm zeigt die Bestimmung der Gesamtunsicherheit bei der Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors

Bei den Unsicherheiten aus der Bestimmung der radialen Windgeschwindigkeit sind die Kategorien Umgebungsbedingungen und Versagen des Equipments nicht mit aufgeführt. Das ist darauf zurückzuführen, dass diese Fehlerquellen hauptsächlich die Datenverfügbarkeit einschränken und somit Unsicherheiten bei der Bildung von Jahresmitteln einbringen. Bei einer Unsicherheitseinschätzung zur Ermittlung der mittleren Windgeschwindigkeit sind sie jedoch vernachlässigbar. Zwei Unsicherheiten der Kategorie Multi-Lidar-Messung werden bei der Implementierung nicht berücksichtigt. Das Kapitel 3.2.1.2 beschäftigt sich mit der Unsicherheit aus der räumlichen Synchronisation. Diese wird durch die Volumenmittelung und Kreuzungswinkel der Laserstrahlen indirekt berücksichtigt. Die zeitliche Synchronisation der Geräte ist bei der Verwendung adäquater Technologie, wie in Kapitel 3.2.1.3 bereits erläutert, vernachlässigbar. Zur Bestimmung der Unsicherheit bei der Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors werden die Teilunsicherheiten, die bei der Ermittlung der radialen Windgeschwindigkeit auftreten, fortgepflanzt. Diese gaußsche Fehlerfortpflanzung ist in den Kapiteln 2.3 und 3.2.2 erläutert.

### 4.2.2 Vorbereitung der Berechnung

Es gibt drei Aspekte, die vor der Implementierung der Funktionen zur Bestimmung der Größe einer Teilunsicherheit zu betrachten sind: (i) Mögliche Standorte für die Geräte und die Messpunkte müssen gewählt werden. (ii) Die Geräte-Positionen müssen miteinander kombiniert werden, sodass alle möglichen Kombinationen bei der Verwendung von zwei und drei Geräten bekannt

sind. (iii) Anschließend werden die anzusteuern Azimut- und Elevationswinkel sowie die Distanzen zwischen Messgeräten und Messpunkten berechnet.

#### 4.2.2.1 Wahl der Gerätestandorte und Messpunkte

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird als Fallbeispiel die Gahrenberg-Region gewählt. Der Gahrenberg liegt in Nordhessen und ist in etwa 472 m hoch (ABO Wind). Dort wurden bereits Messungen für einen geplanten Windpark durchgeführt, sodass Informationen zu Geländehöhe und Windrichtungen vorliegen. Die Wahl der Gerätestandorte geht den Berechnungen voraus, da in der Praxis aufgrund der erforderlichen Infrastruktur (Stromanschluss) und Sichtbarkeit (kein Verdecken durch Bäume oder Topographie) üblicherweise nur eine geringe Anzahl an Aufstellorten in Frage kommt. Im Vergleich zu einer Unsicherheitseinschätzung ohne vorherige Festlegung der Gerätestandorte kann der Rechenaufwand deutlich verringert werden. Die Messpunkte werden auf 160 m über Grund der geplanten Windturbinenstandorte festgelegt. Die 160 m entsprechen der geplanten Nabenhöhe. Deshalb ist die Bestimmung der horizontalen Windgeschwindigkeit insbesondere an den gewählten Messpunkten von Interesse.

Bild 4.2 bezieht sich auf UTM-Koordinaten. UTM-Abbildung ist die Abkürzung für die Universale Transversale Mercator-Abbildung. Diese bildet die Erdoberfläche mit 6° breiten Meridianstreifen auf einen Zylinder ab. Die sich für die 360° Erde ergebenden 60 Meridianstreifen werden durchnummeriert und jeweils durch Breitenkreise mit 8° Abstand in Breitenbänder geteilt. Den Breitenbändern wird jeweils ein Buchstabe zugeordnet. In einer ebenen Abbildung geben die Koordinaten den Rechtswert E (East) und Hochwert N (North) an. Die Bezugsachse für den Rechtswert ist der jeweilige Mittelmeridian. Dadurch, dass jeder Mittelmeridian den Rechtswert E 500 000 m erhält, werden negative Rechtswerte vermieden. Rechtswerte unter E 500 000 m befinden sich westlich vom Mittelmeridian. Ist der Wert über E 500 000 m, handelt es sich um östlich des Mittelmeridians liegende Orte (Bayrische Vermessungsverwaltung).

Um die implementierte Unsicherheitseinschätzung anhand eines Szenarios zu berechnen, sind die Gerätestandorte für diese Arbeit exemplarisch gewählt. Das Bild 4.2 zeigt die gewählten Gerätestandorte und Messpunkte in der betrachteten Region um den Gahrenberg. Die hellblauen Punkte repräsentieren mögliche Aufstellungsorte für die Lidar-Geräte und sind von 0 bis 9 durchnummeriert. Die grauen Punkte markieren die gewählten Messpunkte (und somit Standorte der geplanten Windturbinen) und tragen die Nummern von 10 bis 19. Die x- und y-Achse stellen die Rechts- und Hochwerte in UTM-Koordinaten dar. Die Gahrenberg-Region befindet sich im Zonenfeld 32U.

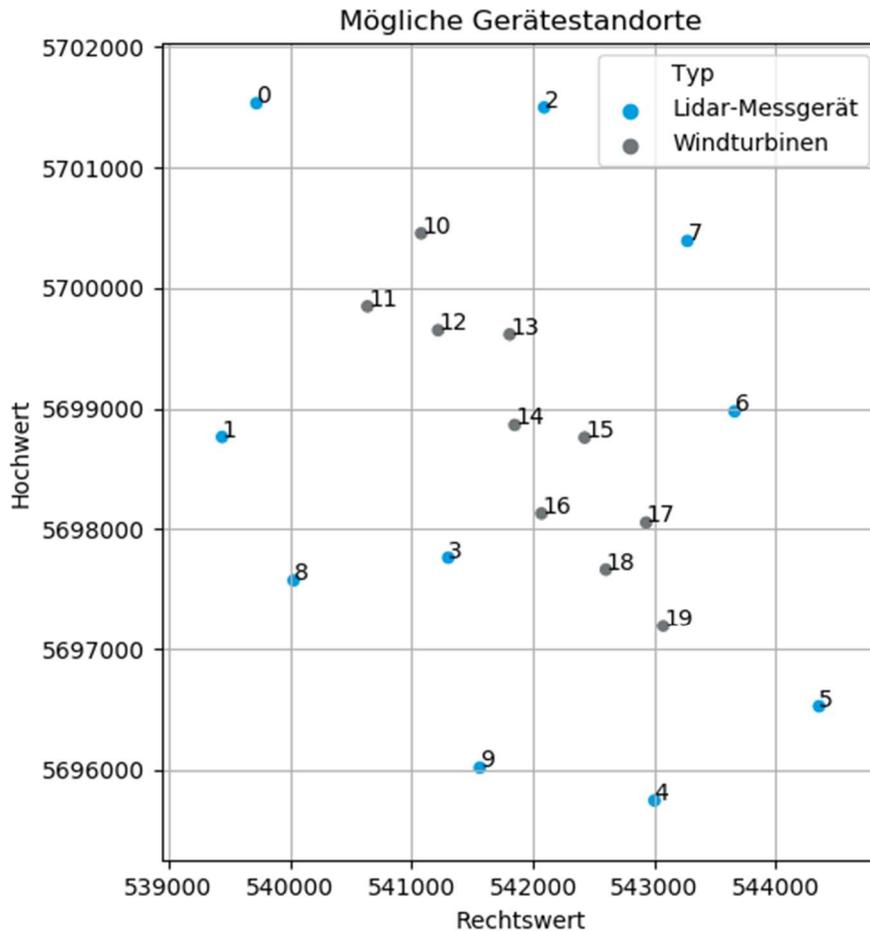


Bild 4.2 Mögliche Gerätestandorte (hellblau), geplante Windturbinenstandorte (grau) in UTM-Koordinaten

Eine Karte mit den Höhen über Normalnull (NN) der Region um den Gahrenberg und den eingezeichneten Standorten 0 bis 19 ist der Anlage 2 zu entnehmen. Die Tabelle 4.1 enthält die Höhen über Normalnull der Lidar-Gerätestandorte für das gewählte Beispiel in der Gahrenberg-Region.

Tabelle 4.1 Die Höhen ü. NN für die Aufstellorte 0 bis 9 der Lidar-Geräte sind gezeigt

Lidar-Gerät	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z ü. NN [m]	379	385	260	338	286	261	234	299	346	269

Die Geländehöhe  $H_G$  über Normalnull an den geplanten Windturbinenstandorten sowie die Höhe der Messpunkte  $H_{MP}$  sind in der Tabelle 4.2 gegeben. Die Abkürzung MP im Index steht für Messpunkt. Eine Nabenhöhe von 160 m ist geplant. Aus dem Grund kann die Messpunkthöhe mit der Gleichung 4.1 berechnet werden.

Gleichung 4.1 
$$H_{MP} = H_G + 160 \text{ m}$$

Tabelle 4.2 Höhen ü. NN sind für die Windturbinen mit den Nummern 10 bis 19 und die Messpunkt-Höhen ( $H_G + 160\text{ m}$ ) enthalten

Windturbine	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$H_G$ ü. NN [m]	388	395	378	374	374	371	333	311	324	314
$H_{MP}$ ü. NN [m]	548	555	538	534	534	531	493	471	484	474

#### 4.2.2.2 Kombinatorik Geräteaufstellung

Für die Unsicherheitsberechnung werden zehn mögliche Standorte als Input-Daten gegeben. So können die Aufstellungs-Kombinationsmöglichkeiten mit zwei und drei Geräten ermittelt werden. Der Grund für diese Betrachtung ist, dass anschließend für jede Kombinationsmöglichkeit die Gesamtunsicherheit berechnet wird, um die Geräteaufstellung mit den geringsten Unsicherheiten für die Messkampagne auszuwählen.

In der Kombinatorik ist diese Betrachtung in den Bereich der Kombinationen einzuordnen. Das ist auf drei Aspekte zurückzuführen: (i) Die Anzahl der Standorte ist ungleich der Geräteanzahl. (ii) Die Aufstellungs-Reihenfolge der zwei oder drei Geräte ist bei dieser Betrachtung unerheblich. (iii) Ebenso gibt es keine Wiederholungen, da die Standorte nicht von mehreren Geräten gleichzeitig belegt sein können. Daher gilt  $\binom{n}{k}$  für die Berechnung der Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten (Deutsche Mathematiker-Vereinigung). Die Gesamtanzahl der Objekte  $n$  ist in diesem Fall die Anzahl der möglichen Positionen, während  $k$  die Anzahl der Geräte darstellt. Da  $\binom{10}{2} = 45$  und  $\binom{10}{3} = 120$  ergibt, beläuft sich die Anzahl der Möglichkeiten bei zehn potenziellen Positionen mit zwei und drei Geräten auf 165. Die Liste an Kombinationsmöglichkeiten wird in Python mit der Funktion `combinations()` aus dem Modul `itertools` berechnet. In Anlage 4 sind die Kombinationen tabellarisch aufgelistet.

#### 4.2.2.3 Berechnung Azimut, Elevation und Distanz

Mit der Funktion `calculate_leo_angles()` aus dem bereits bestehenden `geometry.py` Skript können die erforderlichen Azimut- und Elevationswinkel sowie die Distanz zwischen dem Lidar-Gerät und dem anvisierten Messpunkt berechnet werden. Diese Größen werden zum Teil für die Funktionen zur Berechnung der Teilunsicherheiten benötigt.

#### 4.2.3 Funktionen zur Berechnung der Teilunsicherheiten und der Gesamtunsicherheit

Die Teilunsicherheiten aus dem kombinierten Ishikawa Diagramm in Bild 4.1 werden mittels Funktionen im Python-Skript implementiert. Das Kapitel 3 zeigt Ansätze zur Quantifizierung der Teilunsicherheiten auf, die in dem Python-Skript implementiert werden sollen. Die

Teilunsicherheiten, denen aufgrund ihrer kombinations-abhängigen Unsicherheit bisher keine absoluten Werte zugewiesen werden konnten, sind mit Berechnungsformeln im Skript integriert, die verschiedene Aufstellorte beachten. Die Tabelle in der Anlage 3 gibt eine Übersicht über die im Python-Skript implementierten Funktionen zur Unsicherheitseinschätzung. In den digitalen Anlagen befindet sich außerdem ein Aktivitätsdiagramm, das die Abläufe in dem Skript zur Unsicherheitsberechnung übersichtlich darstellt. Aktivitätsdiagramme sind Teil der Modellierungssprache UML <sup>14</sup> und insbesondere geeignet zur Darstellung von Abläufen.

Die Formel für die Fehlerfortpflanzung wurden im Rahmen einer anderen Abschlussarbeit entwickelt. Der Zweck dieser Formeln ist es, eine Gesamtunsicherheit der Rekonstruktion des zweidimensionalen Windvektors zu bestimmen. Dafür müssen die Abweichungen, die bei der Messung der radialen Windgeschwindigkeit auftreten, fortgepflanzt werden, da der zweidimensionale Windvektor nicht direkt gemessen wird. Dieses Verfahren ist anwendbar, weil angenommen wird, dass es sich um voneinander unabhängige Eingangsgrößen handelt. Die Fehlerfortpflanzung ermöglicht es, die Kombinationsmöglichkeiten in Bezug auf die absolute Größe der Gesamtunsicherheiten in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  miteinander zu vergleichen. Damit kann die optimale Kombinationsmöglichkeit mit zwei und drei Geräten ermittelt werden. Die Funktion zur Durchführung der Fehlerfortpflanzung besteht aus vielen Wiederholungen und Fallunterscheidungen. Aus diesem Grund ist dieser Teil der Unsicherheitsbetrachtung separat in einem Aktivitätsdiagramm in den digitalen Anlagen gezeigt. Die Formeln für die Fehlerfortpflanzung, die aus einer anderen Abschlussarbeit übernommen wurden, sind im Quellcode als solche gekennzeichnet. In dem Aktivitätsdiagramm sind diese Berechnungen nur als Aktivitätsknoten mit dem Namen „error\_propagation()“ aufgeführt und nicht weiter erläutert.

Zur Berechnung werden einige Annahmen bezüglich der Messung getroffen. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt  $6,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  auf 160 m Höhe. Die Range Gate Länge wird auf 50 m, die Return Time auf 60 s und die Akkumulationszeit auf 1 s eingestellt. Das Mittelungsintervall zur Weiterverarbeitung wird auf 10 min festgelegt. Es liegt eine Windrichtungsverteilung für die Gahrenberg-Region vor, die für die Berechnung einer Gesamtunsicherheit für jede Kombinationsmöglichkeit verwendet wird. Mit diesen Werten ergeben sich die folgenden Ergebnisse.

---

<sup>14</sup> Die Unified Modeling Language (UML) standardisiert die graphische Notation zur einheitlichen Beschreibung von Softwaresystemen (Fowler 2004).

### 4.3 ERGEBNISSE

Die Berechnung der Unsicherheit erfolgt mit einem Fallbeispiel in der Gahrenberg-Region. Die zehn möglichen Lidar-Gerätestandorte werden in Bezug auf die auftretenden Messunsicherheiten bei der Vermessung von zehn WEA-Standorten betrachtet. Die berechnete Unsicherheit stellt ein Mittelwert über alle zehn Messpunkte dar. Es wird dafür angenommen, dass sowohl zwei als auch drei Geräte für die Messung verwendet werden können. Daraus ergeben sich 165 mögliche Standortkombinationen. Die Unsicherheitsbeiträge von dem Single-Lidar werden berechnet, anschließend wird eine Gesamtunsicherheit für jede Gerätekombination mittels Fehlerfortpflanzung bestimmt.

Die Quantifizierung kann in vier Arten unterschieden werden. Es gibt einen pauschalen Wert, der für alle Kombinationen gleich ist. Dabei handelt es sich um die Unsicherheit aus der Ermittlung der radialen Geschwindigkeit aus rückgestreutem Licht. Die zweite Art der Quantifizierung geschieht in Abhängigkeit von gewählten Einstellungen wie der Akkumulationszeit. Die dritte Art unterscheidet, ob es sich um eine Gerätekombination mit zwei oder drei Geräten handelt. Ein Beispiel dafür ist die Unsicherheit aus der Distanzmessung. Die komplexeste der Quantifizierungsarten ist die vierte: abhängig von den Gerätestandorten, die zu einer der 165 Gerätekombinationen gehören, verändert sich geometriebedingt die Unsicherheitsgröße. Auf diese Art und Weise ist die Unsicherheit aus der Steuerung der Laserstrahl-Ausrichtung implementiert. Die Abweichungen der Windgeschwindigkeit bei der Vermessung der zehn WEA-Standorte mit unterschiedlichen Elevationswinkeln sind allerdings sehr gering. Bei der Kombination der Single-Lidar-Unsicherheiten ergeben sich ausschließlich Unterschiede, die von der Anzahl der verwendeten Geräte abhängig sind, nicht aber von der Kombination.

Die absolute Unsicherheit der Single-Lidar bei der Verwendung von drei Geräten ist größer. Hier geht beispielsweise die Unsicherheit aus Steuerung der Laserstrahl-Ausrichtung dreifach ein, während sie bei zwei Geräten dementsprechend zweifach eingeht.

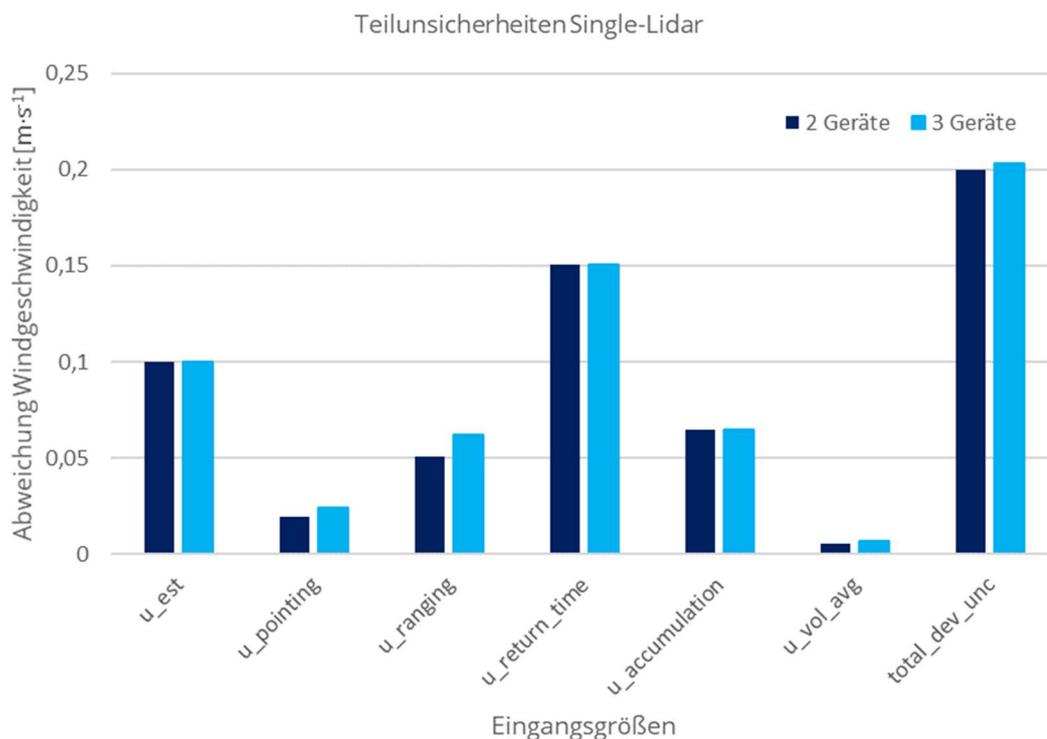


Bild 4.3 Einfluss der Single-Lidar Teilunsicherheiten bei der Verwendung von zwei und drei Lidar-Geräten

Das Bild 4.3 zeigt den Einfluss der Single-Lidar-Messunsicherheiten bei der Verwendung von zwei und drei Lidar-Geräten. Die zwei Balken auf der rechten Seite zeigen die aufsummierten Single-Lidar-Messunsicherheiten. Den größten Einfluss der Teilunsicherheiten hat die Return Time. Die Reihenfolge der Größenordnung der Teilunsicherheiten bei zwei und drei Geräten ist gleich. Jedoch werden die Abweichungen in der Windgeschwindigkeit bei den von den Geräten abhängigen Teilunsicherheiten  $u_{\text{ranging}}$  und  $u_{\text{pointing}}$  bei der Verwendung von drei Geräten minimal größer. Das basiert auf der Annahme, dass sich die Unsicherheiten mehrerer Geräte bei der Ausrichtung des Laserstrahls und der Distanzmessung addieren. Im Gegensatz dazu ist es bei Unsicherheiten wie Volumenmittelung oder Return Time unerheblich, wie viele Geräte messen, da dieser Fehler für 2- und 3-Gerätekombinationen als gleich angenommen wird und sich nur einmal auswirkt. Die Unsicherheit aus der Return Time ist, mit absteigendem Einfluss, gefolgt von den Unsicherheiten aus der Ermittlung der radialen Windgeschwindigkeit aus dem rückgestreuten Licht, Akkumulationszeit, Distanzmessung, Ausrichtungsunsicherheit und Volumenmittelung. Diese Messabweichungen können alle dem Single-Lidar zugeordnet werden und müssen, wie in Kapiteln 2.3 und 3.2.2 erklärt, im Rahmen der gaußschen Fehlerfortpflanzung betrachtet werden. In den Gerätespezifikationen vom WINDCUBE der Firma Leosphere ist angegeben, dass die gemessene radiale Windgeschwindigkeit um weniger als  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vom tatsächlichen Wert abweicht (Leosphere). Dieser Wert liegt höher, als der im theoretischen Modell bestimmte Wert.

Das liegt daran, dass es sich bei der Angabe der Firma um pauschale Werte für alle Entfernungen und Messeinstellungen handelt. In diesen Unsicherheitsberechnungen liegt die absolute Single-Lidar-Unsicherheit für zwei und drei Geräte bei  $0,1998 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  und  $0,2035 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Obwohl die Werte sehr nah beieinanderliegen, ist die Tendenz einer größeren Single-Lidar-Unsicherheit bei der Verwendung mehrerer Geräte erkennbar.

Die verschiedenen Kombinationen beeinflussen das Ergebnis, sobald die Fehlerfortpflanzung durchgeführt wird und somit auch die Winkel zwischen Windrichtung und Laserstrahl und der Einfluss der Kreuzungswinkel betrachtet werden. Eine Übersicht mit berechneten Unsicherheitswerten für die 165 Kombinationen ist in Anlage 4 beigefügt. Die günstigste Kombination ist Nr. 105 mit den drei Lidar-Geräten 2, 6 und 9. Die Unsicherheit berechnet sich für diesen Fall zu  $0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass die Windrichtung und die Laserstrahlen orthogonal zueinanderstehen sowie die Wahrscheinlichkeit, dass die Kreuzungswinkel der Laserstrahlen in etwa  $180^\circ$  betragen, ist bei der Verwendung von drei Geräten reduziert. Folglich ergeben sich geringere Unsicherheiten. Bei den zwei Gerätekombinationen schneidet die Kombination Nr. 16 am besten ab. Der Unsicherheitswert ergibt sich bei der Verwendung der Geräte 1 und 9 zu  $0,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Die Kombination Nr. 9 mit den Geräten 1 und 2 ergibt einen sehr hohen Unsicherheitswert von  $73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dies ist ein theoretischer Wert und darauf zurückzuführen, dass sich bei einer ungünstigen Ausrichtung der Laserstrahlen aufgrund der Fehlerfortpflanzungsformel, mathematisch eine unendlich hohe Unsicherheit ergeben kann. Dieser Wert ist zur weiteren Betrachtungen herausgefiltert, um Ergebnisse sinnvoll miteinander vergleichen zu können. Der Mittelwert der Unsicherheit bei der Verwendung von zwei Geräten liegt mit  $0,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in etwa 3 % über dem Mittelwert der Unsicherheit bei der Verwendung von drei Geräten mit  $0,64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Die Standardabweichung der Unsicherheit ist bei zwei Geräten ebenfalls größer und beträgt  $0,87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Für die Standardabweichung ergibt sich bei der Verwendung von drei Geräten  $0,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Die Fehlerfortpflanzung mit der Beachtung des Winkels zwischen Windrichtung und Laserstrahl sowie der Kreuzungswinkel der Laser hat somit einen entscheidenden Einfluss. Dadurch werden geringere Unsicherheitswerte für die Kombinationen mit drei Geräten erreicht.

#### **4.4 GRENZEN DES MODELLS ZUR UNSICHERHEITBESTIMMUNG**

Die Aufgabe eines Modells ist es, die Wirklichkeit vereinfacht abzubilden. Durch die getroffenen Annahmen werden Fehler in das Modell zur Bestimmung einer Gesamtunsicherheit eingebracht. Ein Beispiel hierfür ist die horizontale Homogenität des Windfeldes. Eine Veränderung der Windgeschwindigkeit durch Toleranzen im Azimutwinkel wird deswegen beispielsweise nicht betrachtet. Die Annahme, dass kleine Elevationswinkel verwendet werden, kann bei einer

entsprechenden Wahl der Standorte im Rahmen der Durchführung der Messung zu großen Teilen eingehalten werden. Die vertikalen Windgeschwindigkeiten sind dadurch sehr klein und die Annahme der Größenordnung von  $< 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  durchaus realistisch. Dennoch können diese beiden Annahmen eine Unsicherheit mit einbringen. Das gilt insbesondere für Messungen in schwierigem Gelände, wo vermehrt inhomogene Strömungen auftreten. Zur Validierung dieser Unsicherheitseinschätzung ist der Vergleich von Ergebnissen der theoretischen Berechnung mit experimentell ermittelten Unsicherheitswerten aus der Gahrenberg-Region erforderlich. Dieser Schritt sollte Bestandteil zukünftiger Forschung sein.

Eine freie LOS ist elementar für eine Messung an einem bestimmten Messpunkt und wird mit dem Begriff Sichtbarkeit verbunden. Die Sichtbarkeit wird bei dieser Unsicherheitseinschätzung zum derzeitigen Stand nicht betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass alle zehn Standorte, die vorab ausgewählt werden, eine freie LOS zu den geplanten Messpunkten hat. Das Tool könnte in Hinblick auf die Sichtbarkeit erweitert werden. Digitale Geländemodelle (DTM) oder auch digitale Oberflächenmodelle (DSM) können das Tool erweitern, indem eine Überprüfung der Sichtlinien vom Gerät zu den Messpunkten implementiert wird. Es kann sinnvoll sein, dafür sowohl die Geländeoberfläche, die tendenziell nicht veränderbar ist, als auch Informationen zur Oberfläche in Bezug auf Bepflanzung oder Bebauung zu kennen (Sadeghi et al. 2016). Mit den Informationen zum Gelände kann eine Abfrage gemacht werden, ob in der LOS opake Flächen liegen.

Die in Kapitel 4.2.3 eingeführten Modell-Annahmen bestimmen die Genauigkeit des Modells. Trotz dieser Annahmen können die ermittelten Gesamtunsicherheiten der verschiedenen Geräte-kombinationen als richtungsweisend für günstige Aufstellorte verwendet werden.

## 5 STATISTISCHE UNTERSUCHUNG DER UNSICHERHEIT BEI VERSCHIEDENEN RETURN TIMES

Die Return Time ist die Zeit, die vergeht, bis der Laserstrahl wieder an einem Messpunkt eintrifft. Sie wurde bereits in Kapitel 3.1.2.1 erklärt. In diesem Kapitel 5 wird die Teilunsicherheit aus der Return Time statistisch auf Basis von Messdaten einer Messkampagne untersucht. Die Ergebnisse werden diskutiert. Diese Diskussion bildet dann die Grundlage der Bewertung des Ansatzes zur Quantifizierung der Teilunsicherheit aus der Return Time.

Die Ausgangssituation für die Programmierung im Rahmen dieser Aufgabe lässt sich wie folgt beschreiben: Aus den Messdaten vom Standort Drantum sind bereits künstlich Messdaten auf Basis verschiedener Return Times erzeugt worden. Das Wort „künstlich“ bezieht sich auf die Tatsache, dass Messdaten, die nicht in der Messdauer  $t_{meas}$  eines Messpunktes liegen, eliminiert worden sind. Die weiterzuverarbeitenden Messdaten sind 10-Minuten-Mittelwerte, die Rekonstruktion des Windvektors ist erfolgt und auch die horizontale Windgeschwindigkeit  $V_h$  ist bereits in den Datensätzen enthalten. Im Rahmen dieser Arbeit werden statistische Untersuchungen durchgeführt. Die Messdaten von verschiedenen Return Times werden mit den Messdaten von 1-s-Return Time in einer Regressionsanalyse verglichen. Es werden außerdem die Messabweichungen der verschiedenen Return Times aus Messdaten berechnet und mit den Ergebnissen aus einem theoretischen Ansatz verglichen. So kann die Formel zur theoretischen Berechnung der Unsicherheit bei Veränderung der Return Time für die Nutzung in einem Unsicherheitsmodell validiert werden. Abschließend wird eine Korrelationsuntersuchung durchgeführt.

Die Messdaten vom Standort Drantum in Dänemark werden für die Analyse verwendet. Die dortige Messkampagne ist in sechs Szenarien aufgeteilt. Die Szenarien unterscheiden sich in Messzeitraum und Einstellungen u. a. von Sendeimpulsdauer und Range Gate. Es werden drei Lidar-Geräte verwendet, die den Nummern 57, 58 und 59 zugeordnet sind. In dieser Arbeit werden drei der sechs Szenarien betrachtet. Die jeweiligen Start- und Enddaten sind in der Tabelle 5.1 aufgeführt, ebenso wie die FFT-Größe, die Sendeimpulsdauer  $T_{pulse}$  und das Range Gate Minimum und Maximum.

Tabelle 5.1 Übersicht der Szenarien 2, 4 und 5 der Messkampagne Drantum in Dänemark

Szenario	Start-	End-	FFT-Größe	Sendeimpulsdauer	Range Gate	Range Gate
	Datum	Datum		$T_{\text{pulse}}$ [ns]	Min [m]	Max [m]
2	31.01.2019	02.03.2019	64	200	100	8000
4	10.04.2019	06.05.2019	128	400	200	2500
5	07.05.2019	21.05.2019	64	200	200	2500

Da die drei Lidar-Geräte in den drei Szenarien jeweils am gleichen Standort installiert sind und außerdem nahezu identische Azimut- und Elevationswinkel haben (maximale Abweichung von  $0,4^\circ$ ), zeigt die nachfolgende Tabelle 5.2 die Informationen zu den drei Scannern nur für das Szenario 4.

Tabelle 5.2 Szenario 4: Informationen zu den Scannern 57, 58 und 59; Winkel des Lasers bleiben bei der Messung konstant

Scanner	Start Zeit	End Zeit	Azimut	Elevation	Latitude	Longitude	Höhe (z)
	[UTC]	[UTC]	konst.	konst.	(y)	(x)	[m]
57	16:48	10:07	332,8	4,21	55,8940	9,0676	46
58	16:55	15:10	148,74	6,06	55,8933	9,0868	53
59	16:55	15:20	301,8	6,16	55,9070	9,0711	43

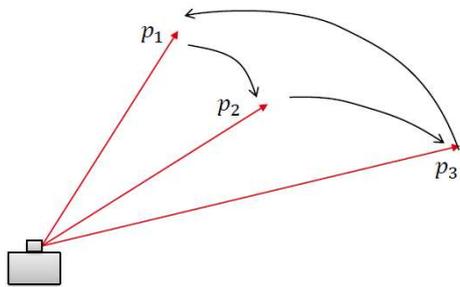
Kommt es bei den Start- und End-Zeiten der drei Geräte zu Abweichungen, werden die Messdaten so gefiltert, dass nur die Messungen für die Zeiten verwendet werden, für die Ergebnisse von allen Geräten vorliegen.

## 5.1 THEORIE UND METHODIK

Im Allgemeinen bringt die statistische Analyse von Messdaten aus meteorologischen Experimenten Herausforderungen mit, die sich gegenüber denen aus Laborexperimenten stark unterscheiden. Dafür gibt es zwei Hauptgründe: Zum einen gibt es keine Garantie, dass zwei aufeinanderfolgende Experimente tatsächlich unabhängig voneinander sind. Außerdem kann in der Realität nur eine gewisse endliche Anzahl an Experimenten durchgeführt werden (Kristensen et al. 2002, S. 301). Auch die statistische Analyse der Return Time unterliegt diesen Herausforderungen.

In dem Bild 5.1 ist die Return Time erklärt. Sie beschreibt das Zeitintervall von Beginn der Messung an einem Punkt (z. B.  $p_1$ ) inklusive der Zeit, die das Gerät für die Bewegung zu den anderen Punkten und für die Messungen dort benötigt. Der Laserstrahl befindet sich zum Ende der Return Time wieder an Punkt  $p_1$ , er ist also „zurückgekommen“ (engl. Return). Die erste Messung  $X(t)$  an  $p_1$

erfolgt somit erneut nach Ablauf der Return Time  $\Delta t$ . Deshalb gilt, dass  $X(t + \Delta t)$  die benachbarte Observationszeit von  $X(t)$  ist.



	$\Delta\varphi$	$\Delta\theta$	$t_{meas}$	$t_{move}$	$t_{total}$
$p_1$	15	15	1	0.5	1.5
$p_2$	15	30	1	1	2
$p_3$	30	45	1	1.5	2.5
Return time:					6

Bild 5.1 Erklärung Return Time, Winkel in  $^\circ$ , Zeit in s, die Winkelgeschwindigkeit beträgt  $30^\circ/s$  (Jäger et al. 2020)

In dem gezeigten Beispiel gibt es drei Messpunkte. In den ersten beiden Spalten der Tabelle auf der rechten Seite in Bild 5.1 sind die erforderlichen Veränderungen der Elevations- und Azimutwinkel zum Erreichen des nächsten Messpunktes eingetragen. Die Messfrequenz beträgt 1 Hz, es wird also einmal pro Sekunde gemessen. Die Messdauer  $t_{meas}$  an jedem Messpunkt beträgt eine Sekunde. Die Zeit  $t_{move}$  berechnet sich aus dem  $\Delta\varphi$  und  $\Delta\theta$  mit der Winkelgeschwindigkeit von  $30^\circ/s$ . Somit kann jedem Messpunkt für Messdauer und Drehung ein  $t_{total}$  zugeordnet werden. Die Summe der  $t_{total}$  aller Messpunkte ergibt die Return Time  $\Delta t$  (Jäger et al. 2020). Abhängig von  $t_{meas}$  und der Länge des gesamten Messintervalls  $T$  kann eine maximale Anzahl an Messpunkten bestimmt werden.

In Stawiarski et al. (2013, S. 2053–2056) wird die Herausforderung, die sich aus der Abweichung von  $t_{meas}$  und der Return Time  $\Delta t$  ergibt, „Temporal Undersampling“ genannt. Dabei geht es darum, dass  $\Delta t$  die Zeit für alle Messpunkte eines Messintervalls repräsentiert, die Messung hingegen an einem Punkt nur in der Zeit  $t_{meas}$  genommen und trotzdem dem gesamten  $\Delta t$  zugeordnet wird. Dadurch können kleinmaßstäbliche Prozesse im Windfeld zu Abweichung zwischen gemessener, radialer Windgeschwindigkeit und der tatsächlichen führen. Den Autoren nach ist die durch diesen Umstand eingebrachte Abweichung der größte Unsicherheitsbeitrag bei Scans in der Ebene. Bei Experimenten wurden absolute durchschnittliche Abweichungen der Windgeschwindigkeit von  $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  bei der Windgeschwindigkeit festgestellt (Stawiarski et al. 2013, S. 2053).

Lineare Regressionen können durchgeführt werden, um statistische Größen zu ermitteln. Dazu gehören Werte für Slope, Intercept und  $R^2$ . Die Neigung (engl. Slope) der Regressionsgerade sowie der Schnittpunkt mit der y-Achse (engl. Intercept) werden im Rahmen der linearen Regression ermittelt.  $R^2$  ist das Bestimmtheitsmaß und zeigt, wie gut das Regressionsmodell auf die Daten passt. Dieser Wert verdeutlicht, welcher Anteil der Streuung der Messwerte durch das

Regressionsmodell abgebildet wird (Josef Brüderl 2007, S. 30–31). Eine weitere Methode, um die Unsicherheiten zu bestimmen, ist die Berechnung von absoluten Abweichungen. Die Berechnung erfolgt entweder auf einer Messdatenbasis, also mit tatsächlichen Werten, oder auf Basis eines Modells, das die Unsicherheit abbilden soll. Eine mittlere Abweichung (Mean Square Error, MSE) kann berechnet werden, indem das Quadrat der Differenz zwischen Messwert und der „Modellvorhersage“ bestimmt wird. Wird die Wurzel aus dem MSE gezogen, so ergibt das den RMSE-Wert (Root Mean Square Error), der in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  angegeben wird und direkt in die Größe der Unsicherheit übersetzt werden kann.

Ein relevanter Wert der Statistik ist die Varianz  $\sigma^2$ , welche die Streuung der Daten um einen Mittelwert angibt. Die Varianz wird mit Gleichung 5.1 berechnet.

$$\text{Gleichung 5.1} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}$$

$x_i$  ist dabei der  $i$ -te Messwert und  $\mu$  der Erwartungswert. In Kristensen et al. (2002) wird ein theoretischer Ansatz zur Bestimmung für ein Maß der Streuung der gemessenen mittleren Windgeschwindigkeit um einen „wahren“ Wert, abhängig von der Return Time  $\Delta t$  im Windfeld, untersucht. Dieser Ansatz basiert auf klassischer Theorie zu der spektralen Verteilung der Turbulenzelemente in der atmosphärischen Grenzschicht. Nach Kristensen et al. (2002, S. 308) kann das Maß der Streuung  $V[\mu(\Delta t)]$  für den gemessenen Mittelwert  $\mu$  in Abhängigkeit von der Return Time mit Gleichung 5.2 theoretisch bestimmt werden (Kristensen et al. 2002, S. 308).

$$\text{Gleichung 5.2} \quad V[\mu(\Delta t)] = \sigma^2 \frac{\Delta t}{T} \coth\left(\frac{\Delta t}{2\tau}\right)$$

Dabei ist  $\sigma^2$  die Varianz der horizontalen Windgeschwindigkeit im Windfeld,  $\Delta t$  die Return Time,  $T$  die Länge des Messintervalls (über das gemittelt wird) und  $\tau$  die integrale Zeitskala. Der zuletzt genannte Wert gibt die Zeitspanne an, in der sich ein Messwert an den vorher genommenen Messwert „erinnert“. Je länger dieses Zeitintervall ist, desto deutlicher ist die Korrelation zwischen den Messwerten. Wenn die Messungen bei benachbarten Observationszeiten  $X(t)$  und  $X(t + \Delta t)$  hingegen keine Abhängigkeit zeigen, heißt das, dass die Messdaten nicht korrelieren.

Für die Anzahl der Messungen  $N_m$  nach Gleichung 5.3 gilt, dass das Vertrauen in die statistische Auswertung gut ist, wenn die Messungen wirklich unabhängig voneinander sind  $\tau \ll \Delta t$ . Wenn für aufeinanderfolgende Messungen  $\Delta t \ll \tau$  gilt, korreliert diese Messungen. Die vorherige Messung wird also „erinnert“.

$$\text{Gleichung 5.3} \quad N_m = \frac{T}{\Delta t}$$

Wenn die Korrelation nicht mit einberechnet wird, ist die geschätzte Varianz des berechneten Mittels im Allgemeinen zu klein (Kristensen et al. 2002, S. 301). Das bedeutet, dass die Gleichung 5.2 streng genommen nur gilt, wenn  $\tau \ll \Delta t$  ist (Kristensen et al. 2002). Eine Verbesserung der Ergebnisse ist nach Kristensen et al. (2002, S. 308) aus statistischer Sicht nicht in bedeutendem Umfang möglich, sobald die Schwelle von  $6\tau \lesssim \Delta t$  erreicht ist. Die beste Näherung für den Wert der integralen Zeitskala ist laut Kristensen et al. der in Gleichung 5.4 gezeigte Ansatz. Dabei ist  $z$  die Höhe über dem Grund und  $V_h$  die horizontale Windgeschwindigkeit.

Gleichung 5.4 
$$\tau = \frac{z}{V_h}$$

Die Methodik kann in einen experimentellen und theoretischen Ansatz aufgliedert werden. Im Rahmen des experimentellen Ansatzes wird eine Regressionsanalyse und eine RMSE-Berechnung durchgeführt. Die Return Times von 5 s, 10 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s werden bei der Regressionsanalyse mit den Messdaten von 1-s-Return Time verglichen. Die RMSE-Berechnung beruht auf der Einteilung der Windgeschwindigkeit in Klassen mit der Breite von  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Für jede Windgeschwindigkeitsklasse wird der MSE zwischen den Geschwindigkeiten einer bestimmten Return Time und der 1-s-Return Time berechnet. Die RMSE-Werte werden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für alle Return Times in einem Diagramm dargestellt.

Im Rahmen des theoretischen Ansatzes werden verschiedene RMSE-Berechnungen durchgeführt. Die Berechnung kann entweder mit allen vorhandenen Windgeschwindigkeiten durchgeführt oder eine Einteilung in Windgeschwindigkeitsklassen vorgenommen werden. Die Varianz wird dabei auf Basis aller Windgeschwindigkeiten einmalig ermittelt. Die Gleichung 5.2 liegt allen theoretischen Berechnungen in diesem Kapitel zugrunde und bestimmt das Maß der Streuung. Da die Messgeräte am Standort Drantum in etwa in der Höhe  $z = 100 \text{ m}$  angebracht sind, wird die Korrelationszeit nach Gleichung 5.4 mit  $\frac{100 \text{ m}}{V_h}$  abgeschätzt. Die Windgeschwindigkeit  $V_h$  nimmt dabei entweder die tatsächlich gemessenen Windgeschwindigkeiten oder den Mittelwert der verschiedenen Windgeschwindigkeitsklassen an.

Mit  $V[m_\tau(\Delta t)]$  aus der Gleichung 5.2 kann der MSE berechnet werden. Dafür wird das Maß der Streuung der Modellvorhersage (also der 1-s-Return Time als Referenz) von dem Maß der Streuung einer bestimmten Return Time, wie in Gleichung 5.5 gezeigt, abgezogen.

Gleichung 5.5 
$$\text{MSE} = V[m_\tau(\Delta t)] - V[m_\tau(1s)]$$

Es ist sinnvoll, die 1-s-Return Time Messung als Referenzwert zu nehmen, da mittels dieser Berechnung die Größe der Unsicherheit bestimmt werden soll, die aus der Erhöhung der Return Time entsteht. Um den RMSE-Wert zu erhalten, wird die Wurzel aus dem MSE-Wert gezogen.

Gleichung 5.6 
$$\text{RMSE} = \sqrt{\overline{MSE}}$$

Abschließend können die berechneten Werte mit den Ergebnissen aus dem experimentellen Ansatz verglichen werden. Auf diese Weise kann eine Bewertung der Güte des theoretischen Modells von Kristensen et al. erfolgen.

Zur Übersicht werden die durchgeführten Untersuchungen stichpunktartig aufgeführt:

1. Experimentell: Eine lineare Regression der Windgeschwindigkeiten je Return Time im Vergleich zu 1-s-Return Time, um Bestimmtheitsmaße zu ermitteln.
2. Experimentell: RMSE aus Messdaten vom Standort Drantum für alle Return Times mit Einteilung in Windgeschwindigkeitsklassen von  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
3. Theoretisch: Berechnung des RMSE für alle Windgeschwindigkeiten. Die Varianz  $\sigma^2$  wird für die gesamten Messdaten je Return Time berechnet.
4. Theoretisch: Berechnung des RMSE mit Einteilung in Windgeschwindigkeitsklassen von  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , die Varianz  $\sigma^2$  wird für die gesamten Messdaten je Return Time berechnet

Die Analysen werden mit allen drei Szenarien durchgeführt. In dem Unterkapitel 5.2 werden exemplarisch die Ergebnisse für das Szenario 4 diskutiert. Die Ergebnisse der Szenarien 2 und 5 sind in den Anlagen 5 und 6 beigefügt. Die nachfolgende Analyse betrachtet, in welchen zeitlichen Abständen die Messungen an einem Punkt erfolgen können, ohne dass die Unsicherheit der Messergebnisse signifikant steigt. Außerdem wird untersucht, inwiefern die Berechnung der RMSE-Werte mit der Gleichung 5.2 mit experimentell ermittelten Werten übereinstimmen.

## 5.2 ERGEBNISSE

Die statistische Analyse wird mit einem Jupyter-Notebook vorgenommen. Der Quellcode ist dem digitalen Anhang der Diplomarbeit zu entnehmen.

### 5.2.1 Größe der Unsicherheit

Die Regressionsanalyse vermittelt einen ersten Eindruck der Unsicherheiten bei verschiedenen Return Times. Die Abbildungen in Bild 5.2 sind nach aufsteigender Return Time sortiert.

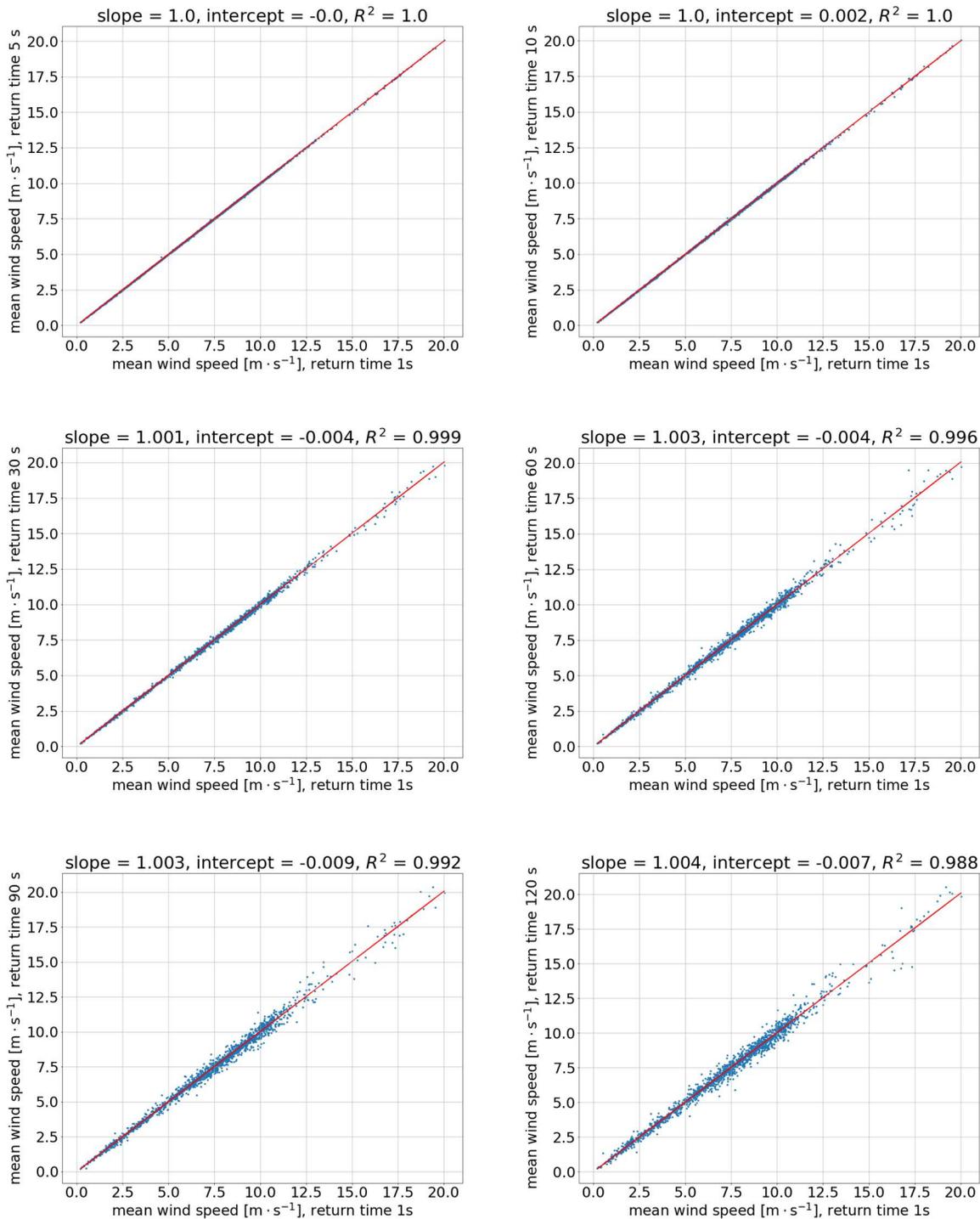


Bild 5.2 Szenario 4: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die horizontale Windgeschwindigkeit bei den Return Times 5 s, 10 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s (auf der y-Achse) in Bezug auf 1-s-Return Time (x-Achse)

Bild 5.2 zeigt die Ergebnisse der linearen Regressionen von Szenario 4. Die Streuung der Messdaten bei den Return Times 5 s, 10 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s (jeweils auf der y-Achse) in Bezug auf 1-s-Messdaten (auf der x-Achse) wird untersucht. Je größer die Return Time ist, desto größer wird die Streuung. Das Ergebnis des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  spiegelt diese Tatsache wider. Das Regressionsmodell passt umso besser, je näher  $R^2$  an 1,0 liegt. Auffällig ist, dass

Windgeschwindigkeiten bis  $17,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wesentlich häufiger gemessen wurden, als die Geschwindigkeiten über  $17,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Bei hohen Geschwindigkeiten liegen die Messdatenpunkte weiter auseinander. Diese Tatsache kann bei Einteilung der Geschwindigkeiten in  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  breite Klassen, zu Lücken in den Graphen führen. Der Algorithmus zur Berechnung des RMSE vergleicht die Windgeschwindigkeiten aus dem Datensatz der zu betrachtenden Return Time mit dem Datensatz aus 1-s-Return Time. Wenn es innerhalb einer Windgeschwindigkeitsklasse von einem der beiden Datensätze keinen Eintrag gibt, fällt die Zeile bei der Berechnung heraus. Bei einer ungünstigen Verteilung von NaN-Werten<sup>15</sup> geht die komplette Geschwindigkeitsklasse nicht in die Analyse mit ein. Daraus resultieren Lücken in den Graphen der Return Times. Ein Beispiel dafür ist in Bild 5.3 bei der 60-s-Return Time in der Geschwindigkeitsklasse 18,0 bis 18,5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  zu sehen. Die sogenannten „Ausreißer“-Werte in Bild 5.3 sind auf große Differenzen der berechneten Streuung in der Geschwindigkeitsklasse zwischen den Datensätzen der betrachteten und der 1-s-Return Time zurückzuführen.

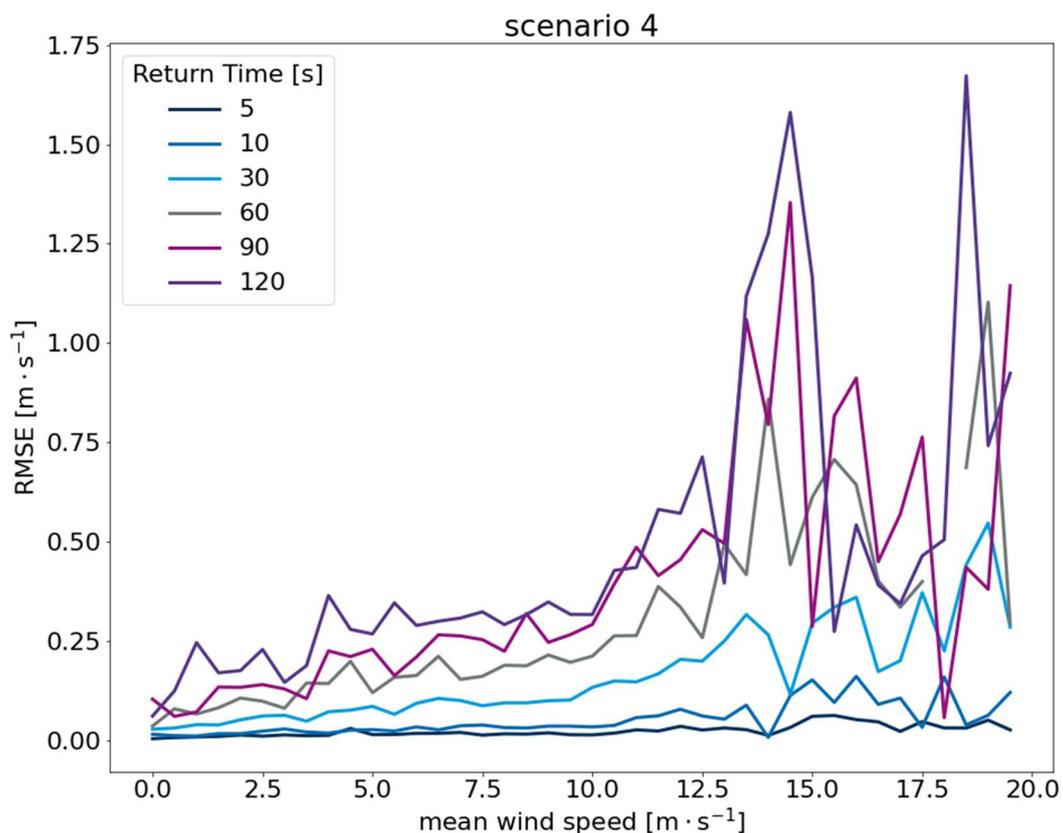


Bild 5.3 Experimenteller Ansatz zur Berechnung des RMSE abhängig von der Windgeschwindigkeit mit den Messdaten von 1 s Return Time als Basiswert; die Windgeschwindigkeiten sind in  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  breite Windgeschwindigkeitsklassen eingeteilt

<sup>15</sup> NaN (engl. „Not a Number“) zeigt an, dass es sich um einen nicht-darstellbaren Wert handelt

Das nachfolgende Bild 5.4 zeigt die nach Gleichung 5.2 theoretisch berechneten RMSE-Werte. Es wird deutlich, dass eine geringe Anzahl an RMSE-Werten in einer Geschwindigkeitsklasse, bei einer ungünstigen Verteilung der NaN-Werte auf die Zeilen in der Klasse, zu einer Elimination der gesamten Klasse führen kann. In Bild 5.4 sind bei dem Graph der Return Time von 60 s große Abstände zwischen den Messpunkten der Geschwindigkeitsklasse 18,0 bis 18,5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  zu sehen. Das Bild 5.5 zeigt dies als Lücke im Graph der 60-s-Return Time. Regionen mit wenigen RMSE-Werten deuten auf einen möglichen Verlust einer Geschwindigkeitsklasse hin.

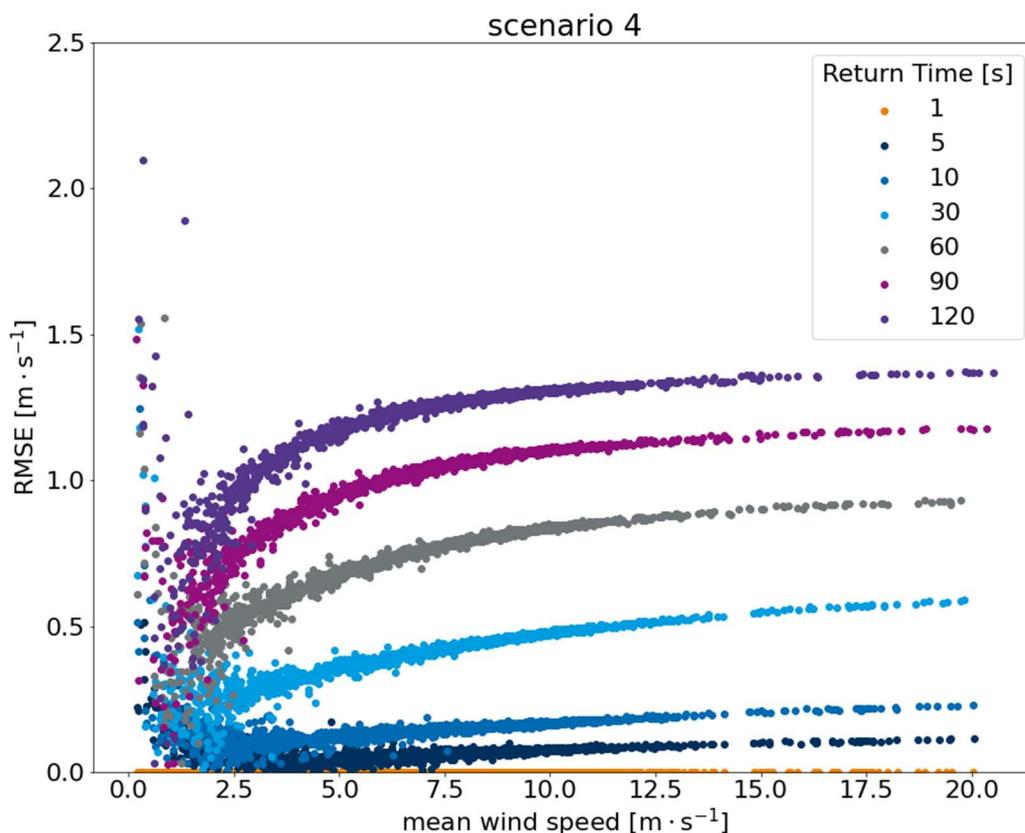


Bild 5.4 Theoretisch berechneter RMSE in Abhängigkeit von allen gemessenen Windgeschwindigkeiten; die Varianz wird aus der Gesamtheit der Messdaten je Return Time berechnet

In den Diagrammen in Bild 5.4 und Bild 5.5 ist eine hohe Streuung im Bereich niedriger Windgeschwindigkeiten von 0 bis  $1,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  erkennbar. Dafür ist der in Gleichung 5.2 vorkommende Kotangens Hyperbolicus verantwortlich. Dabei handelt es sich um eine Hyperbelfunktion, die bei kleinen x-Werten gegen Unendlich strebt. Daraus ergibt sich die starke Streuung bei geringen Windgeschwindigkeiten.

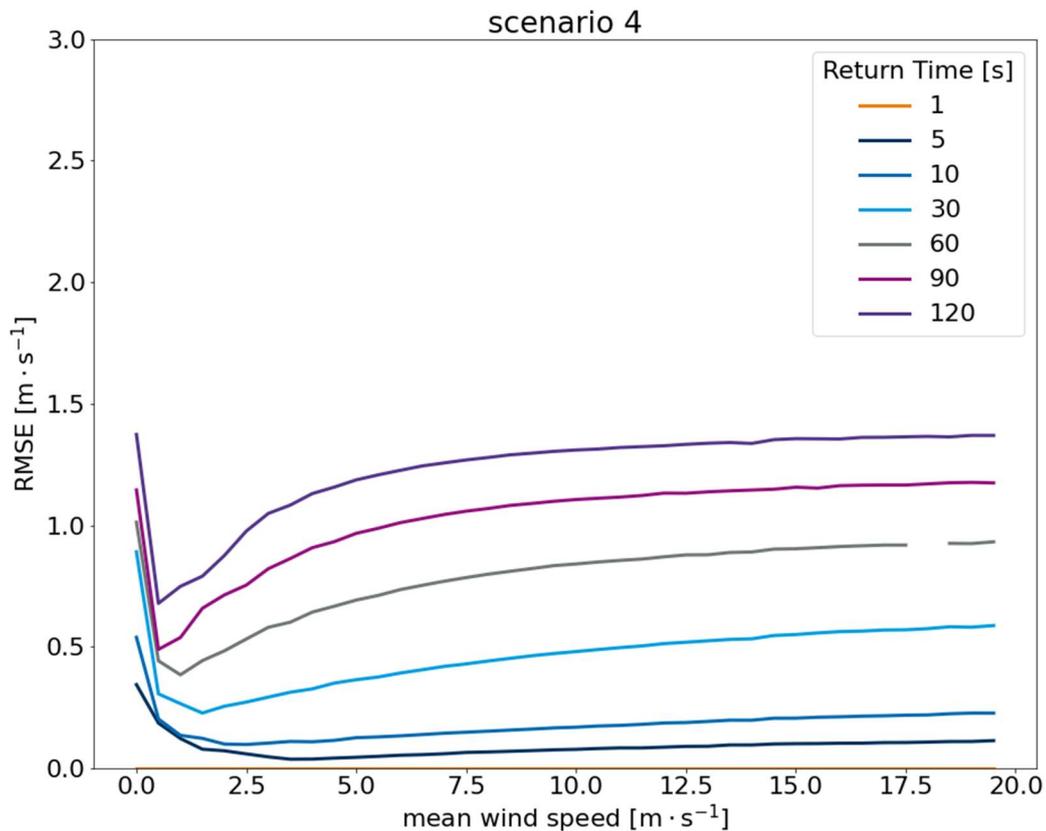


Bild 5.5 Theoretisch berechneter RMSE in Anhängigkeit von  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  breiten Windgeschwindigkeitsklassen; die Varianz ist aus der Gesamtheit der Messdaten berechnet

Dem Diagramm in Bild 5.5 liegt die theoretische RMSE-Berechnung mit Geschwindigkeitsklassen der Breite  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  zu Grunde. Die Varianz wird pro Szenario für jede Return Time einzeln mit allen Windgeschwindigkeiten ermittelt. Der Erwartungswert  $\mu$  aus der Gleichung 5.2 nimmt jeweils den Messwert der 1-s-Return Time an. Die RMSE-Graphen der gleichen Return Times in den verschiedenen Szenarien verlaufen nicht in gleicher Art und Weise. Das meint, dass beispielsweise der Graph von 60-s-Return Time in Szenario 4 einen anderen Verlauf hat, als der 60-s-Return Time Graph in Szenario 5. Das ist nicht auf den für jedes Szenario identischen Anteil  $\frac{\Delta t}{T}$  der Gleichung 5.2 zurückzuführen. Der Einfluss der beiden anderen Komponenten wird hier deutlich. Die Varianz  $\sigma^2$  wird bei dem theoretischen Ansatz auf Basis der gemessenen Windgeschwindigkeiten des jeweiligen Szenarios berechnet. Das resultiert in verschiedenen Ergebnissen der Varianz, abhängig von dem Szenario und der Return Time. Auch der Kotangens-Anteil  $\coth\left(\frac{\Delta t}{2\tau}\right)$  der Gleichung 5.2 beeinflusst den Verlauf der Graphen szenario-spezifisch. Das  $\tau$  im Nenner ist abhängig von den in gemessenen Windgeschwindigkeiten des Szenarios.

Zusammenfassend gibt die Tabelle 5.3 einen Überblick über die drei Szenarien mit markanten Werten zur Unsicherheit. Exemplarisch sind hier Werte aus der Windgeschwindigkeitsklasse von  $9,5$  bis  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  aufgeführt. Die obere Grenze des Bereiches von dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$

wird in allen drei Szenarien durch 1,0 bei einer Return Time von 5 s definiert. Erwartungsgemäß ergibt sich für eine Return Time von 120 s das niedrigste Bestimmtheitsmaß. Von den drei Szenarien schneidet Szenario 4 mit einem Wert von 0,988 bei einer Return Time von 120 s am besten ab. Für die RMSE-Werte gilt ebenfalls, dass untere Bereichsgrenzen von der 5-s-Return Time und obere von der 120-s-Return Time definiert werden.

Szenario	R <sup>2</sup>	Experim. RMSE bei 10 m·s <sup>-1</sup>	Theor. RMSE bei 9,75 m·s <sup>-1</sup>
2	[1,0 – 0,985]	[0,024 – 0,422] m·s <sup>-1</sup>	[0,091 – 1,395] m·s <sup>-1</sup>
4	[1,0 – 0,988]	[0,015 – 0,317] m·s <sup>-1</sup>	[0,078 – 1,310] m·s <sup>-1</sup>
5	[1,0 – 0,971]	[0,026 – 0,505] m·s <sup>-1</sup>	[0,050 – 0,801] m·s <sup>-1</sup>

Tabelle 5.3 Vergleich statistischer Werte aus den Szenarien 2, 4 und 5; [Werte von 5-s- und 120-s-Return Time]

Die experimentell berechneten RMSE-Werte zeigen auf, dass die Fehler bei Szenario 4 am geringsten sind, gefolgt von den Szenarien 2 und 5. Diese Reihenfolge entspricht den Ergebnissen zum Bestimmtheitsmaß aus der linearen Regression. Dort schneidet ebenfalls das Szenario 4 am besten ab. Bei der theoretischen Berechnung der RMSE-Werte der 5-s-Return Time ergibt sich die höchste Genauigkeit und gleichzeitig beste Übereinstimmung mit dem experimentellen RMSE bei Szenario 5. Die theoretisch berechneten RMSE-Werte der großen Return Times bei Szenario 5 liegen deutlich unter denen der anderen Szenarien. Das ist tendenziell darauf zurückzuführen, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten in Szenario 5 bei etwa 12 m·s<sup>-1</sup> liegen, während in den Szenarien 2 und 4 Windgeschwindigkeiten von bis zu 20 m·s<sup>-1</sup> erreicht werden. Diese Tatsache wird in den Diagrammen in Anlage 7 deutlich. Insgesamt überschätzen die absoluten RMSE-Werte in m·s<sup>-1</sup> aus der theoretischen Berechnung die aus den Experimenten berechneten Werten. Tabelle 5.3 zeigt, dass in Szenario 4 der theoretische RMSE der 5-s-Return Time das Fünffache von dem experimentell Ermittelten beträgt. Bei der 120-s-Return Time liegt der theoretische Wert bei dem Vierfachen des experimentellen Wertes. Die theoretische Berechnung ergeben folglich bei hohen Return Times genauere Werte.

### 5.2.2 Korrelationsuntersuchung

Die in Kapitel 5.1 eingeführte Fragestellung nach Korrelation der Messdaten wird an dieser Stelle diskutiert. Sobald die Bedingung  $6\tau \lesssim \Delta t$  erfüllt ist, handelt es sich um Messdaten, bei denen die aufeinanderfolgenden Messungen voneinander unabhängig sind. Abschließend ist somit zu untersuchen, ob der oben genannte Grenzwert eingehalten wird.

Die Untersuchungen ergeben, dass erst bei den Return Times von 60 s, 90 s und 120 s die oben aufgeführte Bedingung (zum Teil) eingehalten ist. Bei einer Return Time von 30 s in Bild 5.6

korrelieren die Messdaten in allen Windgeschwindigkeitsbereichen. Das bedeutet, dass die Gleichung 5.2 standardmäßig nur für die Messdaten verwendet werden sollte, die mit großen Return Times ermittelt worden sind. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen, dass die Messdaten bis zu einer bestimmten Windgeschwindigkeit korrelieren. Die Formel zur theoretischen Berechnung des RMSE dürfte eigentlich erst für die in den Abbildungen hellblau markierten Messpunkte angewendet werden.

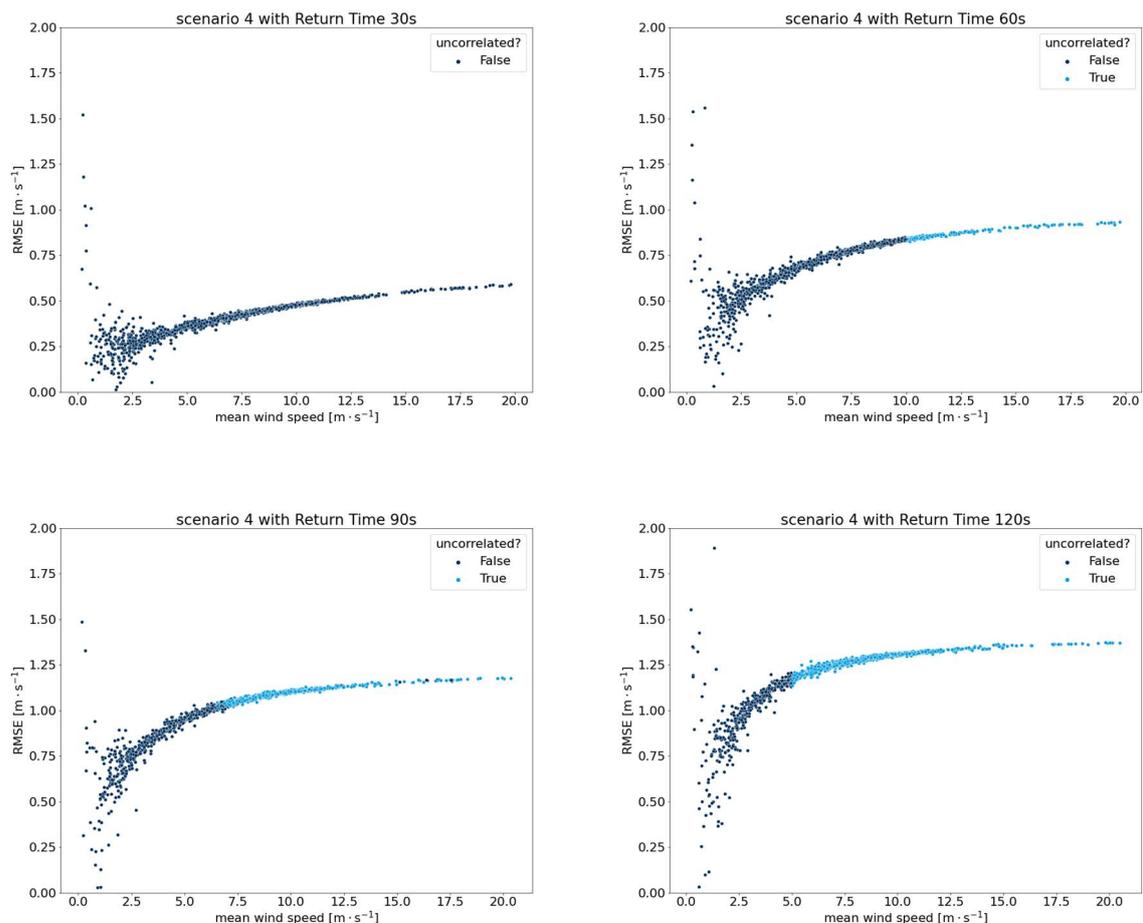


Bild 5.6 Korrelation aufeinanderfolgender Messungen bei Return Times 30 s, 60 s, 90 s, 120 s

In Ermangelung anderer Ansätze wird in diesem Kapitel dennoch auf die Gleichung 5.2 zurückgegriffen, da sie trotz der Einschränkungen eine erste Möglichkeit zur Quantifizierung der Unsicherheit aus der Return Time darstellt. Die Ergebnisse der Korrelationsuntersuchung für die Szenarien 2 und 5 sind in den Anlagen 5 und 6 zu finden. Dort sind die Return Times 60 s, 90 s und 120 s abgebildet. Die Return Time 30 s wird nicht gezeigt, da wie bei Szenario 4 mit der 30 s Return Time alle aufeinanderfolgenden Messungen korrelieren und die Abbildung somit keine weitere Erkenntnis bringt.

### 5.2.3 Zusammenfassung der statistischen Untersuchung

Das Szenario 4 schneidet bei den Regressionsmodellen und dem experimentell berechneten RMSE am besten ab. Das ist auf die halb so hohe Sendeimpulsdauer der Szenarien 2 und 5 zurückzuführen. Auch die verschiedenen Windverhältnisse haben einen Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit haben. Natürlicherweise schneiden beim Vergleich verschiedener Return Times die kleineren Return Times besser ab. Dadurch, dass bei kleineren Return Times in einer bestimmten Zeitspanne häufiger an einem Punkt gemessen wird, liegen die Messwerte näher an denen der Referenzmessung.

Bei den drei Szenarien liegen die RMSE zum Teil deutlich über den mit dem experimentellen Ansatz bestimmten Werten. Der theoretische Ansatz überschätzt die Größe der absoluten Abweichung aus Return Time im Vergleich mit dem experimentellen Ansatz insbesondere in den Szenarien 2 und 4. Einzig der theoretische RMSE in Szenario 5 liegt niedriger als bei anderen Szenarien. Das ist tendenziell auf die gemessenen geringeren Windgeschwindigkeiten in dem Szenario zurückzuführen. Dennoch wird in allen Szenarien der Trend mit steigender Windgeschwindigkeit und die Unterschiede zwischen den Return Times richtig abgebildet. Die theoretisch berechneten Werte des RMSE liegen bei größeren Return Times näher an den experimentell ermittelten Werten. Laut der Korrelationsuntersuchung kommen ebenfalls ausschließlich Return Times vom mehr als 60 s für die Nutzung der Gleichung 5.2 in Frage. Für eine Quantifizierung der Unsicherheit aus der Return Time ist die Gleichung 5.2 aus Kristensen et al. (2002) deshalb insbesondere für Return Times, die größer als 60 s sind, geeignet.

Das Modell, das dem Bild 5.5 zugrunde liegt, wird zur Quantifizierung der Unsicherheit aus der Return Time in Kapitel 3.1.2.1 verwendet. Für diesen theoretischen Ansatz zur Berechnung der Teilunsicherheit aus der Return Time sollte die Einschränkung gemacht werden, dass Ergebnisse erst ab einer Windgeschwindigkeit von  $1,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  gültig sind. Für die Berechnung der Unsicherheit werden vorläufig die Varianz mit  $1,3 (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^2$  und die Return Time mit 60 s angenommen. Im weiteren Verlauf des Projektes soll die Berechnung der Return Time in Abhängigkeit von den gewählten Gerätestandorten erfolgen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Berechnungen zu den Unsicherheiten und die statistische Untersuchung der Teilunsicherheit aus der Return Time zusammengefasst. Es wird ein abschließendes Fazit zu dem Thema Messunsicherheiten bei der Multi-Lidar-Windmessung sowie ein Ausblick für das MILIA-Projekt im Bereich der Bestimmung der Windressourcen gegeben.

### 6.1 ERGEBNISSE

#### 6.1.1 Modell zur Berechnung einer Gesamtunsicherheit

Die Berechnung einer Gesamtunsicherheit anhand eines konkreten Szenarios mit zehn möglichen Lidar-Gerätestandorten wurde implementiert. Aus den zehn potenziellen Gerätestandorten ergeben sich 165 mögliche Aufstellkombinationen, wenn Messungen mit zwei oder drei Lidar-Geräten betrachtet werden. Mittels implementierter Algorithmen können die Teilunsicherheiten für die Messung der Windgeschwindigkeit an zehn Windturbinenstandorten berechnet und kombiniert werden.

Einige Teilunsicherheiten ergeben absolute Unsicherheitswerte, die für jede Kombination gleich sind. Das ist insbesondere der Fall, wenn es sich um pauschale Annahmen handelt. Andere Teilunsicherheiten unterscheiden sich in den absoluten Werten, abhängig davon, ob es sich um eine Kombinationsmöglichkeit mit zwei oder drei Geräten handelt oder die Einstellungen für die Messungen gewählt werden. Durch die Fehlerfortpflanzung ergeben sich Unsicherheitswerte, die aufgrund von geometrischen Bedingungen für jede einzelne Geräte-Messpunkt-Kombination verschieden sind. Dann wird die Teilunsicherheit für jedes Gerät zu allen zehn Messpunkten im Mittel bestimmt und mit den Teilunsicherheiten der zur Aufstellungskombination gehörenden Geräte kombiniert. Die günstigste Gerätekombination kann mit diesem Skript ermittelt und für die Messkampagnenplanung zur weiteren Optimierung genutzt werden. Die Teilunsicherheiten, die von der Aufstellungsgeometrie abhängig sind, würden zu Unterschieden der Unsicherheitsgröße zwischen den 165 Gerätekombinationen führen. Die derzeit implementierte Funktion mit einer Abhängigkeit von der Aufstellungsgeometrie hat keinen sichtbaren Einfluss auf die Unsicherheitsberechnung, da die Auswirkung erst in einem Bereich hoher Nachkommastellen erkennbar ist. Dies bezieht sich auf die in Kapitel 3.1.1.2 erklärte Unsicherheit bei Steuerung der Laserstrahl-Ausrichtung. Durch die Fehlerfortpflanzung ergeben sich jedoch verschiedene Ergebnisse für die 165 Gerätekombinationen. Die günstigste Gerätekombination verwendet drei Geräte zur Messung und ergibt eine absolute Abweichung von  $0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Da mathematisch eine

unendlich hohe Unsicherheit möglich ist, ergibt sich ein Unsicherheitswert von  $73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dieser Wert wird herausgefiltert. Somit berechnet sich für die restlichen Ergebnisse eine um 3 % höhere Unsicherheit für die Gerätekombinationen mit zwei Geräten. Bei zwei Geräten liegt diese im Schnitt der 45 Kombinationen bei  $0,68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Für drei Geräte mit 120 Kombinationen liegt der Mittelwert bei  $0,64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Auch die Standardabweichung ist mit  $0,87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  bei zwei Geräten höher als bei drei Geräten mit  $0,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in diesem Fall die Verwendung mehrerer Geräte die Unsicherheit aufgrund der günstigeren Winkel zur Windrichtung und zwischen den Laserstrahlen reduzieren kann.

### 6.1.2 Statistische Untersuchung der Return Time

Die statistische Untersuchung der Unsicherheit bei verschiedenen Return Times ergibt Folgendes: Die theoretische Formel zur Berechnung der Messabweichung bei verschiedenen Return Times von Kristensen et al. (2002) bildet einen Trend in Bezug auf Return Time und Windgeschwindigkeit ab, der von den Messergebnissen aus Drantum in Dänemark bestätigt wird. Allerdings unterscheidet sich die Größenordnung der Ergebnisse zum Teil deutlich. Bei Szenario 4 liegt in der Geschwindigkeitsklasse von  $9,5$  bis  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  der theoretische RMSE-Wert beim Fünffachen des experimentellen, wenn die Return Time  $5 \text{ s}$  beträgt. Bei der  $120\text{-s}$ -Return Time sinkt dieser Faktor auf das Vierfache. Mit Ausnahme von Szenario 5 überschätzt das theoretische Modell die RMSE-Werte deutlich. Jedoch wird bei großen Return Times die Näherung durch das theoretische Modell genauer. Diese Ergebnisse empfehlen, dass insbesondere für große Return Times der theoretische Ansatz nach Kristensen et al. (2002) verwendet werden kann. Die Korrelationsuntersuchung ergibt das Gleiche und empfiehlt, dass die Formel ausschließlich zur Berechnung der Streuung bei Return Times ab  $60 \text{ s}$  geeignet ist. Folglich kann die Formel nach Kristensen et al. (2002) zur Berechnung der Unsicherheit aus der Return Time, insbesondere für größere Return Times verwendet werden. Diese Tatsache validiert die Nutzung Gleichung 5.2 für das Unsicherheitsmodell.

## 6.2 FAZIT

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführte Analyse der Teilunsicherheiten bei Multi-Lidar-Windmessungen zur Bestimmung der Windressource zeigt die auftretenden Messunsicherheiten und gibt Ansätze zur Quantifizierung. Im Gegensatz zu der bisher veröffentlichten Literatur wird die Unsicherheit der horizontalen Windgeschwindigkeitsmessung mit drei Geräten betrachtet. Die Quantifizierung einer Gesamtunsicherheit beim Multi-Lidar-Verfahren in der Region Gahrenberg zeigt, dass die Verwendung von drei Lidar-Geräten genauere Messergebnisse liefert. Die vorgestellte statistische Analyse der Teilunsicherheit Return Time zeigt, dass der theoretische Ansatz zur Bestimmung der Teilunsicherheit aus Return Time für das Unsicherheitsmodell verwendet werden kann um die Fehler näherungsweise einzuschätzen.

## 6.3 AUSBLICK

Mit dem entwickelten Skript zur Unsicherheitseinschätzung kann in Zukunft ein Tool zur Optimierung einer Messkampagnenplanung entwickelt werden. In diesem Tool werden verschiedene Messverfahren wie Profiling Lidar, Mastmessungen und Multi-Lidar-Verfahren miteinander verglichen und eine optimierte Messkampagne als Ergebnis ermittelt. Das in dieser Arbeit entwickelte Skript berechnet die Unsicherheit der horizontalen Windgeschwindigkeit bei der Verwendung von drei Lidar-Geräten. Da mit drei Geräten die Messung des dreidimensionalen Windvektors prinzipiell möglich ist, kann zukünftige Forschung beleuchten, wie sich die Messunsicherheit bei Betrachtung der vertikalen Windkomponente verhält. Außerdem kann statt einer angenommenen Return Time, die Unsicherheit mit der tatsächlichen Return Time bestimmt werden. Dafür kann das Skript um einen Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Return Time bei vorgegebenen Lidar-Gerätestandorten erweitert werden. Die Quantifizierung der Unsicherheiten, die beim Multi-Lidar-Verfahren auftreten, sowie die Integration in ein Kampagnenplanungs-Tool sind erste Schritte zur Validierung des ML-Systems und zur Etablierung dieses Messverfahrens.

Absolute Werte zur Quantifizierung einer Teilunsicherheit beruhen meist auf dem Vergleich einer Messung mit Anemometern. Die Kritik aus Clifton et al. (2018) an diesem Verfahren ist, dass dafür die vom Anemometer gemessene Geschwindigkeit als „wahrer“ Wert angenommen wird und unklar ist, ob diese Variante die geeignetste darstellt. Die Weiterentwicklung von Verfahren zur Windmessung kann dieser Fragestellung im Rahmen zukünftiger Forschung nachgehen.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

ABO Wind (Hg.): Windpark Gahrenberg. Online verfügbar unter <https://www.abo-wind.com/de/leistungen/windkraft/ausgewaehlte-projekte/windpark-gahrenberg/index.php>, zuletzt geprüft am 19.01.2021.

ISO 5725-1:1994: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results.

Aitken, Matthew L.; Rhodes, Michael E.; Lundquist, Julie K. (2012): Performance of a Wind-Profiling Lidar in the Region of Wind Turbine Rotor Disks. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 29 (3), S. 347–355. DOI: 10.1175/JTECH-D-11-00033.1.

JCGM 104:2009, 2009: Auswertung von Messdaten - Eine Einführung zum "Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen" und zu den dazugehörigen Dokumenten. Online verfügbar unter [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi2wKi\\_paPvAhVGwKQKHVwvDtUQFjAEegQIBxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.ptb.de%2Fcms%2Ffileadmin%2Finternet%2Ffachabteilungen%2Fabteilung\\_8%2F8.4\\_mathematische\\_modellierung%2F8.40%2FJCGM\\_104\\_2009\\_DE\\_2011-03-30.pdf&usq=AOvVaw0QL9oxgYAsaXlzTNRtmlgs](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi2wKi_paPvAhVGwKQKHVwvDtUQFjAEegQIBxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.ptb.de%2Fcms%2Ffileadmin%2Finternet%2Ffachabteilungen%2Fabteilung_8%2F8.4_mathematische_modellierung%2F8.40%2FJCGM_104_2009_DE_2011-03-30.pdf&usq=AOvVaw0QL9oxgYAsaXlzTNRtmlgs), zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Basse, Alexander; Pauscher, Lukas; Callies, Doron (2020): Improving Vertical Wind Speed Extrapolation Using Short-Term Lidar Measurements. In: *Remote Sensing* 12 (7), S. 1091. DOI: 10.3390/rs12071091.

Bayrische Vermessungsverwaltung (Hg.): UTM-Abbildung und UTM-Koordinaten. Online verfügbar unter <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjMp7Dv4Kv vAhUHjhQKHSdTBoQQFjABegQIAXAD&url=https%3A%2F%2Fwww.ldbv.bayern.de%2Ffile%2Fpdf%2F1910%2FUTM-Abbildung-und-Koordinaten.pdf&usq=AOvVaw0UOCKiwRMsUeQUfkKeHND5>, zuletzt geprüft am 12.03.2021.

Beuth, Thorsten (2017): Analyse und Optimierung von fokussierten LiDAR-Systemen für Windkraftanlagen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Fakultät für Elektro und Informationstechnik.

Bingöl, Ferhat; Mann, Jakob; Foussekis, Dimitri (2009): Conically scanning lidar error in complex terrain. In: *metz* 18 (2), S. 189–195. DOI: 10.1127/0941-2948/2009/0368.

- Clifton, Andrew; Clive, Peter; Gottschall, Julia; Schlipf, David; Simley, Eric; Simmons, Luke et al. (2018): IEA Wind Task 32: Wind Lidar Identifying and Mitigating Barriers to the Adoption of Wind Lidar. In: *Remote Sensing* 10 (3), S. 406. DOI: 10.3390/rs10030406.
- Clive, P. J. M. (2008): Compensation of vector and volume averaging bias in lidar wind speed measurements. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1 (1), S. 12036. DOI: 10.1088/1755-1315/1/1/012036.
- Davies, F.; Collier, C. G.; Bozier, K. E. (2005): Errors associated with dual-Doppler-lidar turbulence measurements. In: *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 7 (6), S280-S289. DOI: 10.1088/1464-4258/7/6/005.
- Davoust, S.; Jehu, A.; Bouillet, M.; Bardon, M.; Vercherin, B.; Scholbrock, A. et al. (2014): Assessment and Optimization of Lidar Measurement Availability for Wind Turbine Control. Preprint. Online verfügbar unter [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjlo57J-YbuAhUpCWMBHdSRCsEQFjADegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.nrel.gov%2Fdocs%2Ffy14osti%2F61332.pdf&usg=AOvVaw0bgM\\_gdNMEKoAhuhG15z7](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjlo57J-YbuAhUpCWMBHdSRCsEQFjADegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.nrel.gov%2Fdocs%2Ffy14osti%2F61332.pdf&usg=AOvVaw0bgM_gdNMEKoAhuhG15z7), zuletzt geprüft am 09.03.2021.
- Deutsche Mathematiker-Vereinigung: Kombinatorik. Hg. v. Deutsche Mathematiker-Vereinigung e.V. Online verfügbar unter <https://www.mathematik.de/algebra/96-erster-hilfe/stochastik/kombinatorik/1617-kombinatorik>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.
- Drew, Daniel R.; Barlow, Janet F.; Lane, Siân E. (2013): Observations of wind speed profiles over Greater London, UK, using a Doppler lidar. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 121, S. 98–105. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.07.019.
- Emeis, Stefan; Harris, Michael; Banta, Robert M. (2007): Boundary-layer anemometry by optical remote sensing for wind energy applications. In: *metz* 16 (4), S. 337–347. DOI: 10.1127/0941-2948/2007/0225.
- Emeis, Stefan; Turk, Matthias (2007): Comparison of Logarithmic Wind Profiles and Power Law Wind Profiles and their Applicability for Offshore Wind Profiles. In: Joachim Peinke, Peter Schaumann und Stephan Barth (Hg.): *Wind Energy. Proceedings of the Euromech Colloquium.* Berlin, Heidelberg, 2007. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 61–64.
- ENERCON (Hg.) (2015): ENERCON Produktübersicht. Online verfügbar unter <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiPobT6zjvuAhWR3OAKHSESAToQFjAAegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.enercon.de%2Ffileadmin%2FRedakteur%2FMedien->

Portal%2Fbroschueren%2Fpdf%2FENERCON\_Produkt\_de\_6\_2015.pdf&usg=AOvVaw0R0b36wF3KT1CBjn\_TEO0y, zuletzt geprüft am 08.03.2021.

ETH Zürich (Hg.): Kapitel 10 - Der quantenmechanische harmonische Oszillator. Buch Physik IV. Online verfügbar unter <https://qudev.phys.ethz.ch/static/content/science/BuchPhysikIV/PhysikIVch10.html>, zuletzt geprüft am 17.01.2021.

Europäische Kommission (Hg.) (2019): Der europäische Grüne Deal. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Ratm den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss un den Ausschuss der Regionen. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de), zuletzt geprüft am 07.01.2021.

JCGM 100:2008, 2008: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in Measurement. Online verfügbar unter [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjZo-WcuYXuAhWjQkEAHeQHcWoQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fncc.nesdis.noaa.gov%2Fdocuments%2Fdocumentation%2FJCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf&usg=AOvVaw0GN4h6rY4ZYIOgpPvwzeGZ](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjZo-WcuYXuAhWjQkEAHeQHcWoQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fncc.nesdis.noaa.gov%2Fdocuments%2Fdocumentation%2FJCGM_100_2008_E.pdf&usg=AOvVaw0GN4h6rY4ZYIOgpPvwzeGZ), zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Fowler, Martin (2004): UML Distilled. A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. 3. Auflage. Boston: Addison-Wesley.

Fraunhofer IEE (Hg.): Forschungs-Projekte: MILIA. Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Fraunhofer IEE (Hg.) (2018): Windmonitor - Turbine Size. Online verfügbar unter [http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor\\_en/3\\_Onshore/2\\_technik/4\\_anlagengroesse/](http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_en/3_Onshore/2_technik/4_anlagengroesse/), zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Fraunhofer ISE (Hg.) (2021): Nettostromerzeugung in Deutschland 2020: erneuerbare Energien erstmals über 50 Prozent. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2020/nettostromerzeugung-in-deutschland-2021-erneuerbare-energien-erstmals-ueber-50-prozent.html>, zuletzt geprüft am 27.01.2021.

Gryning, Sven-Erik; Floors, Rogier (2019): Carrier-to-Noise-Threshold Filtering on Off-Shore Wind Lidar Measurements. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19 (3), S. 592. DOI: 10.3390/s19030592.

Hasager, Charlotte; Stein, Detlef; Courtney, Michael; Peña, Alfredo; Mikkelsen, Torben; Stickland, Matthew; Oldroyd, Andrew (2013): Hub Height Ocean Winds over the North Sea Observed by the NORSEWInD Lidar Array: Measuring Techniques, Quality Control and Data Management. In: *Remote Sensing* 5 (9), S. 4280–4303. DOI: 10.3390/rs5094280.

Hau, Erich (2014): Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 5., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1802664>, zuletzt geprüft am 05.01.2021.

Hogan, Richard (2016): How to determine resolution uncertainty. The complete step-by-step guide. Hg. v. iso budgets. Online verfügbar unter <https://www.isobudgets.com/calculate-resolution-uncertainty/>, zuletzt aktualisiert am 28.04.2016, zuletzt geprüft am 12.03.2021.

Holtom, Theodore C.; Brooms, Anthony C. (2020): Error propagation analysis for a static convergent beam triple LIDAR. In: *Applied Numerical Mathematics* 150, S. 1–17. DOI: 10.1016/j.apnum.2019.08.020.

IDP Münster (Hg.): Messunsicherheit einer indirekt bestimmten Größe & Fehlerfortpflanzung. Unter Mitarbeit von Prof. Dr. Stefan Heusler. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Didaktik in der Physik. Online verfügbar unter <https://physikkommunizieren.de/messunsicherheit/fehlerfortpflanzung/>, zuletzt geprüft am 10.03.2021.

Jäger et al. (2019): Optimizing Multi-Lidar Measurements for Wind Park Planning. Wind Energy Science Conference. Cork, 2019.

Jäger et al. (2020): Challenges for multi-lidar measurements in wind energy applications. WindEurope Technology Workshop 2020. Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, 2020.

Josef Brüderl (2007): Multivariate Analyse. Kapitel I: Datenauswertung mit STATA. Vorlesung Multivariate Analyse. Universität Mannheim, Soziologie, 2007. Online verfügbar unter <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiq--OsssPtAhUyx4UKHV0dAO8QFjACegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ls3.soziolegie.uni-muenchen.de%2Fstudium-lehre%2Farchiv%2Fteaching-materials%2Fmultivariate.pdf&usg=AOvVaw1YGpkdSkYQFiY5NaW8aLjZ>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

KIT (Hg.): Fehlerrechnung im physikalischen Praktikum - ein Überblick. Online verfügbar unter [http://www.physik.kit.edu/Studium/Lehramt/Fehlerrechnung\\_Skript\\_Praktika.pdf](http://www.physik.kit.edu/Studium/Lehramt/Fehlerrechnung_Skript_Praktika.pdf), zuletzt geprüft am 10.03.2021.

Klein, B.: Python-Kurs - Numerisches Programmieren mit Python. Singen. Online verfügbar unter [https://www.python-kurs.eu/numerisches\\_programmieren\\_in\\_Python.php](https://www.python-kurs.eu/numerisches_programmieren_in_Python.php), <https://www.python-kurs.eu/generatoren.php>, zuletzt geprüft am 21.01.2021.

Krenn, A. (2016): Urbane Energieinnovationen - Beitrag zur Energiewende. IEA Vernetzungstreffen. IEA Wind, Energiewerkstatt Verein. Wien, 20.10.2016. Online verfügbar unter <https://youtu.be/pCkFxGgd0-o>, zuletzt geprüft am 08.03.2021.

Kristensen, L.; Kirkegaard, P.; Mann, J. (2002): Sampling Statistics of Atmospheric Observations. In: *Wind Energ.* 5 (4), S. 301–313. DOI: 10.1002/we.75.

Lane, S. E.; Barlow, J. F.; Wood, C. R. (2013): An assessment of a three-beam Doppler lidar wind profiling method for use in urban areas. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 119, S. 53–59. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.05.010.

Lenschow, Donald H.; Wulfmeyer, Volker; Senff, Christoph (2000): Measuring Second- through Fourth-Order Moments in Noisy Data. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 17 (10), S. 1330–1347. DOI: 10.1175/1520-0426(2000)017<1330:MSTFOM>2.0.CO;2.

Leosphere (Hg.): Software User Manual - WINDCUBE 100s/200s/400s.

Leosphere (Hg.): WINDCUBE 100s/200s/400s - Hardware System v1.3.5 User Guide. 4. Aufl.

Liu, Zhengliang; Barlow, Janet F.; Chan, Pak-Wai; Fung, Jimmy Chi Hung; Li, Yuguo; Ren, Chao et al. (2019): A Review of Progress and Applications of Pulsed Doppler Wind LiDARs. In: *Remote Sensing* 11 (21), S. 2522. DOI: 10.3390/rs11212522.

Lutz, M. (2014): Python kurz & gut. 5. Aufl.: O'Reilly Verlag GmbH & Co. KG (Python Pocket Reference).

Mann, J.; Angelou, N.; Arnqvist, J.; Callies, D.; Cantero, E.; Arroyo, R. Chávez et al. (2017): Complex terrain experiments in the New European Wind Atlas. In: *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 375 (2091). DOI: 10.1098/rsta.2016.0101.

Mann, J.; Cariou, J-P; Courtney, M. S.; Parmentier, R.; Mikkelsen, T.; Wagner, R. et al. (2008): Comparison of 3D turbulence measurements using three staring wind lidars and a sonic anemometer. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1, S. 12012. DOI: 10.1088/1755-1307/1/1/012012.

- Mann, J.; Peña, A.; Bingöl, F.; Wagner, R.; Courtney, M. S. (2010): Lidar Scanning of Momentum Flux in and above the Atmospheric Surface Layer. In: *J. Atmos. Oceanic Technol.* 27 (6), S. 959–976. DOI: 10.1175/2010JTECHA1389.1.
- Measurement Computing (Hg.): Messdatenerfassung - Ein Leitfaden zu Data Acquisition (DAQ). Online verfügbar unter [https://www.mccdaq.de/Messdatenerfassung?mc=GGLGER&gclid=CjwKCAiAl4WABhAJEiwATUnEFxGO2sU76Y4fb66iN76rmEO7Sltwoo1hyEfqvMC4qFqAT\\_sqhRqSrhcCJZUQAvD\\_BwE](https://www.mccdaq.de/Messdatenerfassung?mc=GGLGER&gclid=CjwKCAiAl4WABhAJEiwATUnEFxGO2sU76Y4fb66iN76rmEO7Sltwoo1hyEfqvMC4qFqAT_sqhRqSrhcCJZUQAvD_BwE), zuletzt geprüft am 15.01.2021.
- Mieke, Stefan: Berechnung der Messunsicherheit nach GUM - Kurzfassung in 20 min. Physikalisch-Technische Bundesanstalt - Institut Berlin. Online verfügbar unter [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwizx8\\_nolruAhUD\\_RQKHdIKB40QFjAAegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ptb.de%2Fcms%2Ffileadmin%2Finternet%2Ffachabteilungen%2Fabteilung\\_8%2F8.4\\_mathematische\\_modellierung%2F277\\_PTB\\_SEMINAR%2FVORTRAEGE%2F11\\_Mieke\\_-\\_Berechnung\\_der\\_Messunsicherheit\\_nach\\_GUM\\_Kurzfassung\\_in\\_20.pdf&usg=AOvVaw3olq-7ySfn\\_EFIVmRuc1TG](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwizx8_nolruAhUD_RQKHdIKB40QFjAAegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ptb.de%2Fcms%2Ffileadmin%2Finternet%2Ffachabteilungen%2Fabteilung_8%2F8.4_mathematische_modellierung%2F277_PTB_SEMINAR%2FVORTRAEGE%2F11_Mieke_-_Berechnung_der_Messunsicherheit_nach_GUM_Kurzfassung_in_20.pdf&usg=AOvVaw3olq-7ySfn_EFIVmRuc1TG), zuletzt geprüft am 08.03.2021.
- Moshinsky, M.; Szczepaniak, A. (1989): The Dirac oscillator. In: *J. Phys. A: Math. Gen.* 22 (17), L817–L819. DOI: 10.1088/0305-4470/22/17/002.
- Müller, Elke; Müller, Thomas (2020): Trigonometrie - PhysKi. Kleinwinkelnäherung. Hg. v. PhysKi, zuletzt aktualisiert am 25.10.2020, zuletzt geprüft am 11.11.2020.
- Newmann, Jennifer; et al. (2016): Testing and validation of multi-lidar scanning strategies for wind energy applications. In: *Wind Energy* 19, S. 2239–2254. DOI: 10.1002/we.1978.
- Paschotta, R.: RP Photonics Encyclopedia - Photocurrent. Hg. v. RP Photonics Consulting GmbH. Online verfügbar unter <https://www.rp-photonics.com/photocurrent.html>, zuletzt geprüft am 15.11.2020.
- Pauscher, Lukas; Vasiljevic, Nikola; Callies, Doron; Lea, Guillaume; Mann, Jakob; Klaas, Tobias et al. (2016): An Inter-Comparison Study of Multi- and DBS Lidar Measurements in Complex Terrain. In: *Remote Sensing* 8 (9), S. 782. DOI: 10.3390/rs8090782.
- Pearson, G. N.; Collier, C. G. (1999): A pulsed coherent CO<sub>2</sub> lidar for boundary-layer meteorology. In: *Q. J. Royal Met. Soc.* 125 (559), S. 2703–2721. DOI: 10.1002/qj.49712555918.

Rösner, Benjamin; Egli, Sebastian; Thies, Boris; Beyer, Tina; Callies, Doron; Pauscher, Lukas; Bendix, Jörg (2020): Fog and Low Stratus Obstruction of Wind Lidar Observations in Germany—A Remote Sensing-Based Data Set for Wind Energy Planning. In: *Energies* 13 (15), S. 3859. DOI: 10.3390/en13153859.

Sadeghi, Yaser; St-Onge, Benoit; Leblon, Brigitte; Simard, Marc (2016): Canopy Height Model (CHM) Derived From a TanDEM-X InSAR DSM and an Airborne Lidar DTM in Boreal Forest. In: *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* 9 (1), S. 381–397. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2512230.

Schlipf, David; Kapp, Stefan; Anger, Jan; Bischoff, Oliver; Hofsäß, Martin; Rettenmeier, Andreas; Kühn, Martin (2011): Prospects of optimization of energy production by LIDAR assisted control of wind turbines. Unter Mitarbeit von Universität Stuttgart: Universität Stuttgart. Online verfügbar unter <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/3933>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Stathopoulos, Ted; Alrawashdeh, Hatem; Al-Quraan, Ayman; Blocken, Bert; Dilimulati, Aierken; Paraschivoiu, Marius; Pilay, Pragasen (2018): Urban wind energy: Some views on potential and challenges. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 179, S. 146–157. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.05.018.

Stawiarski, Christina; Träumner, Katja; Knigge, Christoph; Calhoun, Ronald (2013): Scopes and Challenges of Dual-Doppler Lidar Wind Measurements—An Error Analysis. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30 (9), S. 2044–2062. DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00244.1.

TR 6, 26.10.2017: Technische Richtlinien für Windenergieanlagen. Online verfügbar unter [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiK39byi5ftAhVD8eAKHYy7AX4QFjACegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.wind-fgw.de%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F11%2F171026\\_Teil6\\_Rev10\\_ST\\_d\\_preview.pdf&usg=AOvVaw1OhGtz5QsAM9WyqforJku8](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiK39byi5ftAhVD8eAKHYy7AX4QFjACegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.wind-fgw.de%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F11%2F171026_Teil6_Rev10_ST_d_preview.pdf&usg=AOvVaw1OhGtz5QsAM9WyqforJku8), zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Technische Universität Darmstadt (Hg.) (2020): Akusto-optischer Modulator. Institut für Angewandte Physik. Online verfügbar unter <http://www.iap.tu-darmstadt.de/praktika/fp/abteilung-a/akustooptischer-modulator/>, zuletzt geprüft am 10.01.2020.

Umweltbundesamt (Hg.) (2020): Erneuerbare Energien in Deutschland - Daten zur Entwicklung im Jahr 2019. Unter Mitarbeit von Fachgebiet V 1.5. Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt (Hintergrund). Online verfügbar unter

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2019>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Vasiljevic, N. (2018): Uncertainty of (scanning) lidars wind speed measurements. PhD Remote Sensing Summer 2018. Risø, Denmark, 2018.

Vasiljević: Uncertainty of (scanning) lidars wind speed measurements. PhD Remote Sensing Summer 2018. DTU Wind Energy. Riso, Dänemark.

Vasiljević, Nikola (2014): A time-space synchronization of coherent Doppler scanning lidars for 3D measurements of wind fields. Dissertation. Technical University of Denmark (DTU), Roskilde. Wind Energy. Online verfügbar unter <https://orbit.dtu.dk/en/publications/a-time-space-synchronization-of-coherent-doppler-scanning-lidars->, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Vasiljević, Nikola (2019): YADDUM - Yet Another Dual-Doppler Uncertainty Model: Zenodo. Online verfügbar unter <https://zenodo.org/record/3551577#.X3XG6edCSUI>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Vasiljević, Nikola; Courtney, Michael; Pedersen, Anders Tegtmeier (2020): Uncertainty model for dual-Doppler retrievals of wind speed and wind direction. In: *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, S. 1–25. DOI: 10.5194/amt-2020-321.

Vasiljević, Nikola; et al. (2017): Perdigão 2015: methodology for atmospheric multi-Doppler lidar experiments. In: *Atmospheric Measurement Techniques*. DOI: 10.5194/amt-10-3463-2017.

Vasiljević, Nikola; Lea, Guillaume; Courtney, Michael; Cariou, Jean-Pierre; Mann, Jakob; Mikkelsen, Torben (2016): Long-Range WindScanner System. In: *Remote Sensing* 8 (11), S. 896. DOI: 10.3390/rs8110896.

Norm IEC 61400-12-1:2017, 12.2017: Windenergieanlagen - Teil 12-1: Messung des Leistungsverhaltens von Windenergieanlagen.

WindGuard (Hg.) (2013): Classification of Windcube V2. Unter Mitarbeit von K. Franke. Deutsche WindGuard Consulting GmbH. Varel (PP13054).

Wood, C. R.; Pauscher, L.; Ward, H. C.; Kotthaus, S.; Barlow, J. F.; Gouvea, M. et al. (2013): Wind observations above an urban river using a new lidar technique, scintillometry and anemometry. In: *The Science of the total environment* 442, S. 527–533. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.061.

ZHAW (Hg.) (2008): Kapitel 4: Rauschen. Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, School of Engineering. Online verfügbar unter <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiEpL->

j7YvtAhXR2aQKHWOgCNYQFjADegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fhome.zhaw.ch%2Fkunr%2FASV%2Fscripts%2FASV%2520FS2008%2520Rauschen.pdf&usg=AOvVaw3BeWMkMGQqAjfldlq\_1vF,  
zuletzt geprüft am 18.11.2020.

---

## ANLAGENVERZEICHNIS

<b>Anlage</b>	<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
Anlage 0	Übersicht digitale Anlagen	ii
Anlage 1	Mittlere und Lange Pulse: Vergleichsrechnungen	iii
Anlage 2	Karte mit Höhen ü. NN der Gahrenberg-Region, Geräte- und Windturbinenstandorte	iv
Anlage 3	Übersicht Funktionsnamen im Python-Skript	v
Anlage 4	Unsicherheiten in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ für 165 Gerätekombinationen	vi
Anlage 5	Weitere Ergebnisse zu Kapitel 5.2 – Statistische Analyse Szenario 2	xi
Anlage 6	Weitere Ergebnisse zu Kapitel 5.2 – Statistische Analyse Szenario 5	xvi
Anlage 7	Mittlere Windgeschwindigkeit Drantum Messdaten – Statistische Analyse	xxi
Anlage 8	Experimentelle und theoretisch-ermittelte RMSE-Werte	xxiv

---

## ANLAGE 0

### Übersicht digitale Anlagen

Tabelle mit Dateinamen und Inhaltsübersicht der digitalen Anlage

<b>Dateiname</b>	<b>Inhalt</b>
a_Abbildungen	Ordner mit Bilddateien
b_results	Ordner mit Drantum-Messdaten (Szenarien 2, 4, 5)
c_DA_Hildebrand.pdf	PDF-Datei der Diplomarbeit
d_DA_Hildebrand.docx	Word-Datei der Diplomarbeit
e_Quellcode_Unsicherheitsmodell.pdf	Quellcode I Unsicherheitsmodell (PDF)
f_unc_multi_lidar.py	Quellcode I Unsicherheitsmodell (Python-Skript)
g_activity_unc_model.pdf	Aktivitätsdiagramm Unsicherheitsmodell
h_activity_error_prop.pdf	Aktivitätsdiagramm Fehlerfortpflanzungs-Funktion
i_return_time_analysis.ipynb	Quellcode II Statistische Analyse (Jupyter Notebook)
j_return_time_analysis.html	Quellcode II Statistische Analyse (html)
k_rmse_evaluation.xlsx	Ergebniswerte RMSE aus der statistischen Analyse
m_Lit_Citavi.ctv6	Citavi-Verzeichnis

## ANLAGE 1

Mittlere und Lange Pulse: Vergleichsrechnungen

Vergleich von Mittleren und Langen Pulsen und Zusammenhänge der verschiedenen Begrifflichkeiten: Verweis von Kapitel 2.1.2.5 und 3.1.2.2 auf diesen Anhang zur Berechnung der Messraten der zwei verschiedenen Pulse bei minimaler Akkumulationszeit. Laut dem WINDCUBE-Hersteller sollten Akkumulationszeiten zwischen 100 ms und 10 s eingestellt werden (Leosphere, S. 40). Das minimale Zeitintervall für die Akkumulation ist folglich 100 ms = 0,1 s. Die Indizes M und L markieren die entsprechenden Berechnungen für den Mittleren und Langen Puls in der linken und rechten Spalte.

$PRF_M = 20 \text{ kHz} = 20.000 \text{ Hz}$	$PRF_L = 10 \text{ kHz} = 10.000 \text{ Hz}$
--	--

Berechnung der Impulsfolgeperiode  $T_s$  aus dem Kehrwert der Pulse Repetition Frequency  $PRF$ :

$$T_s = \frac{1}{PRF}$$

$T_{s,M} = \frac{1}{PRF} = \frac{1}{20.000 \text{ s}^{-1}} = 0,00005 \text{ s}$	$T_{s,L} = \frac{1}{PRF} = \frac{1}{10.000 \text{ s}^{-1}} = 0,0001 \text{ s}$
---	--

Berechnung der Anzahl der Signale  $N_m$  bei minimaler Akkumulationszeit  $T_A$  von 0,1 s (s.o.)

$$N_m = \frac{T_A}{T_s}$$

$\min N_{m,M} = \frac{\min T_A}{T_{s,M}} = \frac{0,1 \text{ s}}{0,00005 \text{ s}} = 2000$	$\min N_{m,L} = \frac{\min T_A}{T_{s,L}} = \frac{0,1 \text{ s}}{0,0001 \text{ s}} = 1000$
--	---

Wird diese Gleichung umgestellt, so ist es möglich zu berechnen, wie lange es dauert 2000 Signale bei einer Impulsfolgeperiode  $T_s$  auszusenden. Der Ergebniswert ist die minimale Akkumulationszeit  $T_A$ , da 2000 bzw. 1000 die minimale Anzahl an ausgesandten Signalen  $\min N_{m,M}$  pro Impulsfolgeperiode ist.

$$T_A = N_m \cdot T_s$$

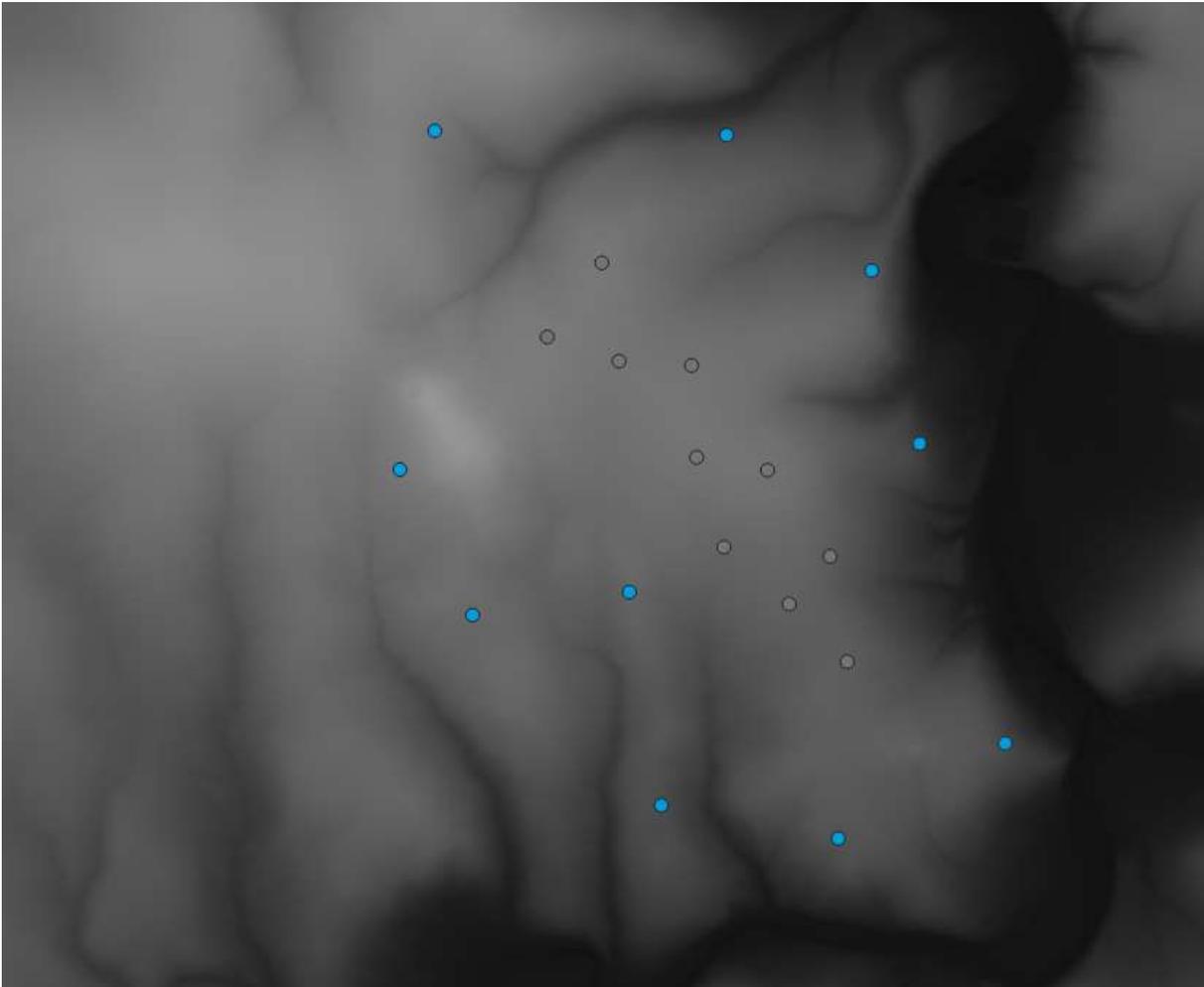
$\min T_{A,M} = \min N_{m,M} \cdot T_s = 2000 \cdot 0,00005 \text{ s} = 0,1 \text{ s}$	$\min T_{A,L} = \min N_{m,L} \cdot T_s = 1000 \cdot 0,0001 \text{ s} = 0,1 \text{ s}$
--	---

Die oben aufgeführten Zusammenhänge zeigen, dass bei beiden Pulsarten die maximale Messfrequenz bei 10 Hz liegt, da die Akkumulationszeiten identisch sind:

$$M_r = \frac{1}{\min T_A} = \frac{1}{0,1 \text{ s}} = 10 \text{ Hz}$$

## ANLAGE 2

Karte mit Höhen ü. NN der Gahrenberg-Region, Geräte- und Windturbinenstandorte



Karte mit Höhen über Normalnull von der Gahrenberg-Region, dunklere Bereiche stehen für geringere Geländehöhen, hellere Bereiche für größere Höhen. Mögliche Gerätestandorte sind in hellblau, geplante Windturbinenstandorte in grau eingezeichnet.

Tabellen mit Lidar-Gerätestandorten (Nr. 0–9) und Windturbinenstandorten (Nr.10–19) in UTM-Koordinaten im Zonenfeld 32U

Nr.	Rechtswert (E)	Hochwert (N)	Nr.	Rechtswert (E)	Hochwert (N)
0	539723	5701535	10	541079	5700455
1	539440	5698765	11	540637	5699849
2	542092	5701500	12	541219	5699651
3	541302	5697763	13	541808	5699616
4	543000	5695747	14	541849	5698864
5	544355	5696525	15	542425	5698759
6	543660	5698977	16	542070	5698130
7	543271	5700392	17	542932	5698054
8	540029	5697574	18	542600	5697664
9	541562	5696018	19	543072	5697192

## ANLAGE 3

### Übersicht Funktionsnamen im Python-Skript

Übersicht über die Funktionsnamen im Python-Skript zur Unsicherheitseinschätzung

<b>Funktion</b>	<b>Funktionsname im Python-Skript</b>
kombiniert die 10 Lidar-Gerätestandorte für 2 und 3 Geräte	get_combination_list()
ermittelt die Höhe ü. NN für alle Geräte- und Windturbinenstandorte mithilfe der GeoMap-Klasse aus dem Skript GeoMap.py	get_height_GeoMap()
wandelt UTM-Koordinaten in Dezimalgrad um, mit Proj-Klasse	get_utm_to_dec_degree()
berechnet Azimut-, Elevationswinkel und Distanz von jedem Geräte zu jeder Windturbine mit der calculate_leo_angles()-Funktion aus dem Skript geometry.py	get_geometry()
<u>3.1 Teilunsicherheiten bei radialer Geschwindigkeitsmessung</u>	
3.1.1.1 Ermittlung der radialen Geschwindigkeit aus rückgestreutem Licht	get_u_estimate()
3.1.1.2 Steuerung der Laserstrahl-Ausrichtung	get_u_pointing()
3.1.1.3 Distanzmessung	get_u_ranging()
3.1.2.1 Return Time	get_u_return_time()
3.1.2.2 Akkumulationszeit	get_u_accumulation()
3.1.2.3 Volumenmittelung	get_u_vol_avg()
Wurzel von der Summe der quadrierten Unsicherheitsbeiträge	get_device_unc()
3.1.2.4 Winkel zwischen Windrichtung und Laserstrahl	in Fehlerfortpflanzung
<u>3.2 Gesamtunsicherheit bei der Rekonstruktion des 2D Windvektors</u>	
3.2.1.1 Kreuzungswinkel der Laserstrahlen	in Fehlerfortpflanzung
3.2.2 Fehlerfortpflanzung	get_error_propagation()

**ANLAGE 4**Unsicherheiten in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  für 165 GerätekombinationenTabelle mit 165 Gerätekombinationen von 2 und 3 Geräten und der dazugehörigen Unsicherheit in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 

<b>Nr.</b>	<b>Gerätekombination, UTM-Koordinaten von 2 oder 3 Geräten</b>	<b>Unsicherheit [<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>]</b>
0	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.])]	0,276481658
1	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 542092., 5701500.])]	0,316068841
2	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 541302., 5697763.])]	0,33912945
3	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543000., 5695747.])]	1,224734408
4	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 544355., 5696525.])]	5,250128624
5	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,374139115
6	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,242504731
7	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,230361057
8	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,309108717
9	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.])]	72,73020001
10	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 541302., 5697763.])]	0,48628861
11	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543000., 5695747.])]	0,21498662
12	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 544355., 5696525.])]	0,573035255
13	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543660., 5698977.])]	1,127059359
14	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,458259806
15	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,424210127
16	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,212621091
17	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.])]	0,399079571
18	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543000., 5695747.])]	0,913747274
19	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 544355., 5696525.])]	0,270662778
20	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,233280815
21	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,377419578
22	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,453311934
23	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 541562., 5696018.])]	2,625626654
24	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.])]	0,378585721
25	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 544355., 5696525.])]	0,37161829
26	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,608408414
27	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,285408182
28	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 540029., 5697574.])]	1,963456942
29	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 541562., 5696018.])]	1,648541229
30	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.])]	0,443146601
31	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,298060448

<b>Nr.</b>	<b>Gerätekombination, UTM-Koordinaten von 2 oder 3 Geräten</b>	<b>Unsicherheit [m·s<sup>-1</sup>]</b>
32	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 543271., 5700392.])]	1,79860611
33	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,226044466
34	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,456871912
35	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,31503186
36	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,225799385
37	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,26600548
38	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,26637321
39	[array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,370475659
40	[array([ 543660., 5698977.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,32950977
41	[array([ 543660., 5698977.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,551090067
42	[array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,316320388
43	[array([ 543271., 5700392.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,402546213
44	[array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,291021849
45	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.])]	0,181372371
46	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.]), array([ 541302., 5697763.])]	0,472678767
47	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.]), array([ 543000., 5695747.])]	0,183117632
48	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.]), array([ 544355., 5696525.])]	0,38479546
49	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,296420155
50	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,230239294
51	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,441597365
52	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 539440., 5698765.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,181059553
53	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.])]	2,572038445
54	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 543000., 5695747.])]	0,293343288
55	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 544355., 5696525.])]	2,182281341
56	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,428077121
57	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,33011358
58	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,715995889
59	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,275109302
60	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.])]	0,473234232
61	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 544355., 5696525.])]	0,441719899
62	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,551556903
63	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,419613332
64	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,387780472
65	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,242040383
66	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.])]	2,447747751
67	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 543660., 5698977.])]	1,275568621

<b>Nr.</b>	<b>Gerätekombination, UTM-Koordinaten von 2 oder 3 Geräten</b>	<b>Unsicherheit [m·s<sup>-1</sup>]</b>
68	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,573538247
69	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,591674851
70	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,29816518
71	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.])] ]]	1,057309436
72	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	3,580132776
73	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,810897589
74	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,230935373
75	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	2,068920876
76	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,280643478
77	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,196112377
78	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,348619026
79	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,22152658
80	[array([ 539723., 5701535.]), array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,200380089
81	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.])] ]]	0,28054554
82	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 543000., 5695747.])] ]]	0,199427752
83	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 544355., 5696525.])] ]]	0,288248874
84	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 543660., 5698977.])] ]]	0,343396756
85	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,928435987
86	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,311005133
87	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 542092., 5701500.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,19891715
88	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.])] ]]	0,18376207
89	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 544355., 5696525.])] ]]	0,272343951
90	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543660., 5698977.])] ]]	0,319359943
91	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,27994408
92	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,599365848
93	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,195814069
94	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.])] ]]	0,282118126
95	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 543660., 5698977.])] ]]	0,286482769
96	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,246871903
97	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,285883889
98	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,193844448
99	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.])] ]]	0,299697669
100	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,225682729
101	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,566347352
102	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,178967496
103	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,241967019

<b>Nr.</b>	<b>Gerätekombination, UTM-Koordinaten von 2 oder 3 Geräten</b>	<b>Unsicherheit [m·s<sup>-1</sup>]</b>
104	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,281269078
105	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,169066829
106	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,279205657
107	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,179284514
108	[array([ 539440., 5698765.]), array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,19251404
109	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.])]	0,308400874
110	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 544355., 5696525.])]	0,402210035
111	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,771968581
112	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 543271., 5700392.])]	2,916136178
113	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 540029., 5697574.])]	1,035457521
114	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 541302., 5697763.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,3317167
115	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.])]	3,026343648
116	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 543660., 5698977.])]	1,395387327
117	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,737837771
118	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 540029., 5697574.])]	3,548800593
119	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,683346618
120	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,387469373
121	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,291374791
122	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,401738741
123	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,234457947
124	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,28982467
125	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,399023573
126	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,28883449
127	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.])]	1,400576534
128	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,571431277
129	[array([ 542092., 5701500.]), array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,2396535
130	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.])]	1,878020144
131	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 543660., 5698977.])]	1,452598223
132	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,849277408
133	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,439673745
134	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543000., 5695747.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,329995119
135	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.])]	0,66028183
136	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,350546734
137	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 540029., 5697574.])]	0,595410958
138	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 541562., 5696018.])]	0,21909755
139	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.])]	0,259603747

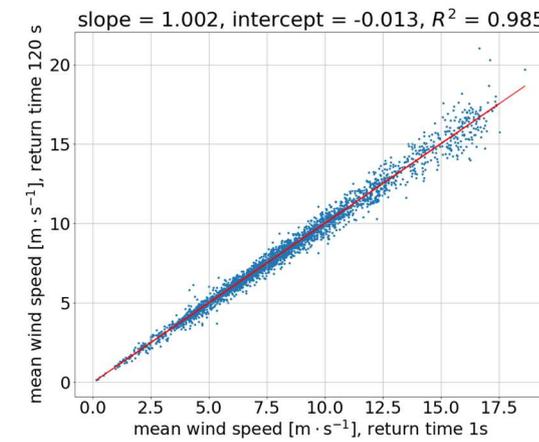
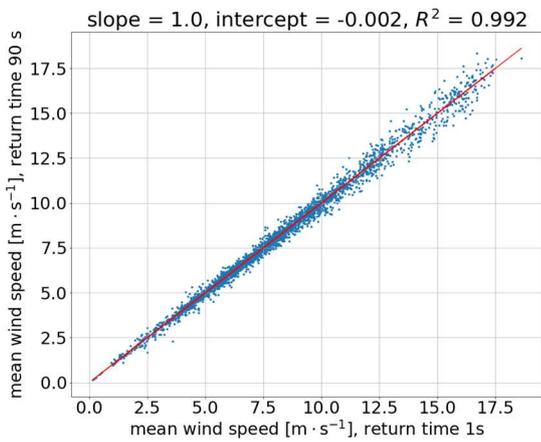
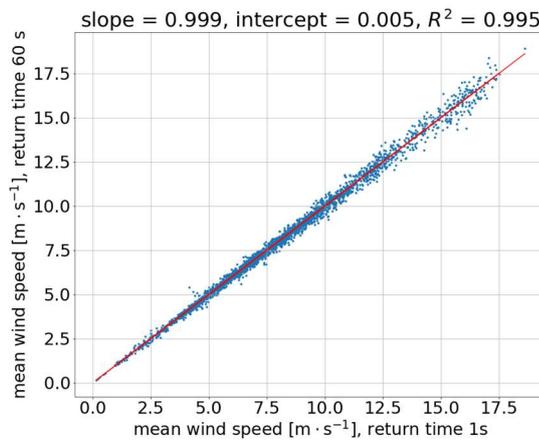
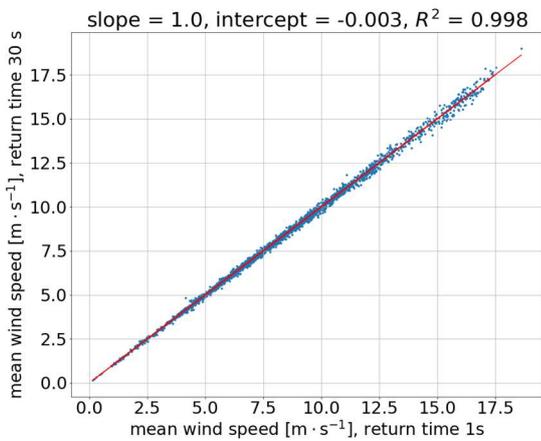
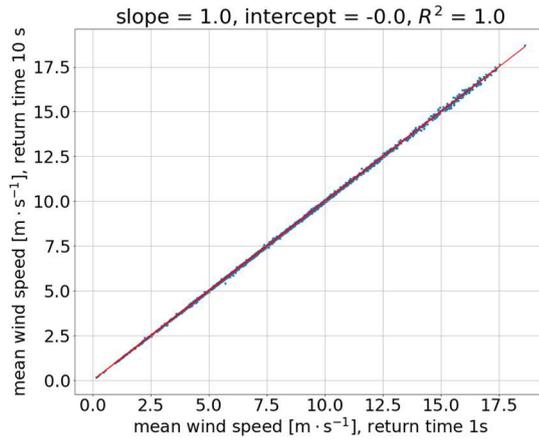
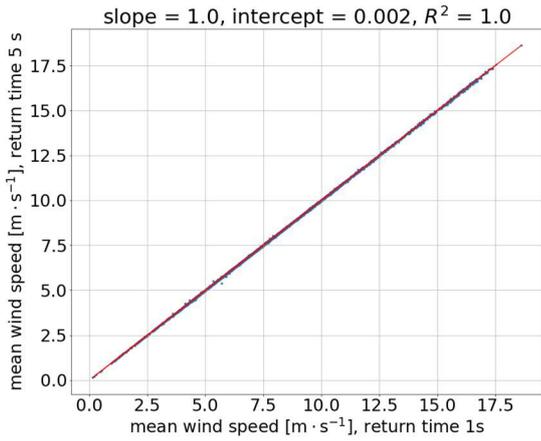
Nr.	Gerätekombination, UTM-Koordinaten von 2 oder 3 Geräten	Unsicherheit [m·s <sup>-1</sup> ]
140	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,372170762
141	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,196255374
142	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,655039975
143	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,219822597
144	[array([ 541302., 5697763.]), array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,281037537
145	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.])] ]]	1,611335148
146	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,756473393
147	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,413647888
148	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 544355., 5696525.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,264697802
149	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,373647113
150	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,547163099
151	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,533108324
152	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	4,795109554
153	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	1,727174892
154	[array([ 543000., 5695747.]), array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,23283768
155	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.])] ]]	0,47315475
156	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,264974631
157	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 543660., 5698977.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,182723358
158	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,289359216
159	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,196830526
160	[array([ 544355., 5696525.]), array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,191282018
161	[array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.])] ]]	0,869267213
162	[array([ 543660., 5698977.]), array([ 543271., 5700392.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,545655309
163	[array([ 543660., 5698977.]), array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,185929441
164	[array([ 543271., 5700392.]), array([ 540029., 5697574.]), array([ 541562., 5696018.])] ]]	0,199434996

## ANLAGE 5

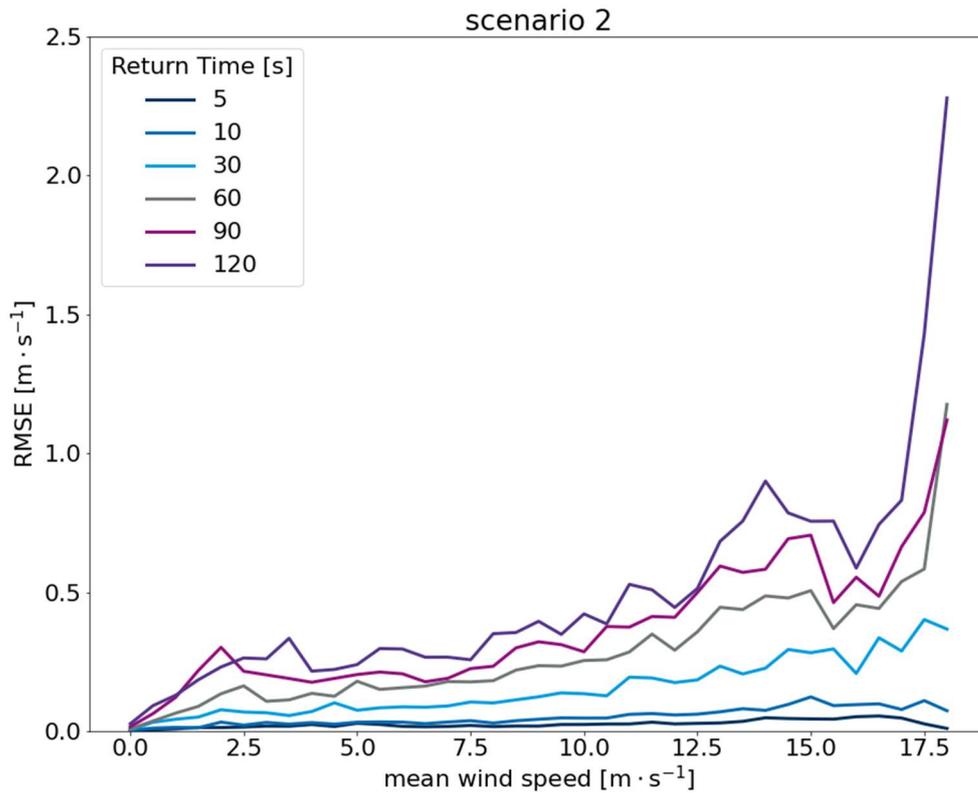
Weitere Ergebnisse zu Kapitel 5.2 – Statistische Analyse Szenario 2

Die folgenden Diagramme wurden im Rahmen der statistischen Analyse erstellt.

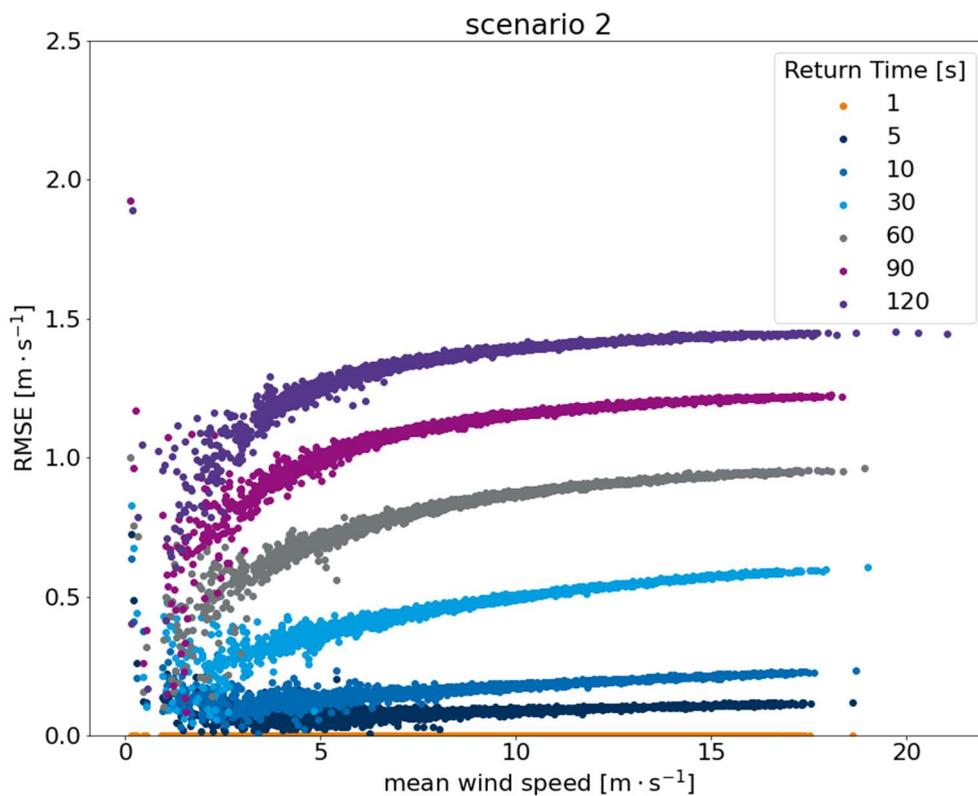
1. Je Return Time eine lineare Regression der Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu 1-s-Return Time zur Ermittlung eines Bestimmtheitsmaßes, auf Basis der Messdaten aus Drantum
2. Experimenteller RMSE aus Messdaten vom Standort Drantum für alle Return Times mit Einteilung in Windgeschwindigkeitsklassen von  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
3. Berechnung theoretischer RMSE für alle Windgeschwindigkeiten, die Varianz  $\sigma^2$  wird für die gesamten Messdaten je Return Time berechnet
4. Berechnung theoretischer RMSE mit Einteilung in Windgeschwindigkeitsklassen von  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , die Varianz  $\sigma^2$  wird für die gesamten Messdaten je Return Time berechnet
5. Korrelationsuntersuchungen: ob die Annahme von unabhängigen Messwerten erfüllt ist, für die Return Times 60 s, 90 s und 120 s



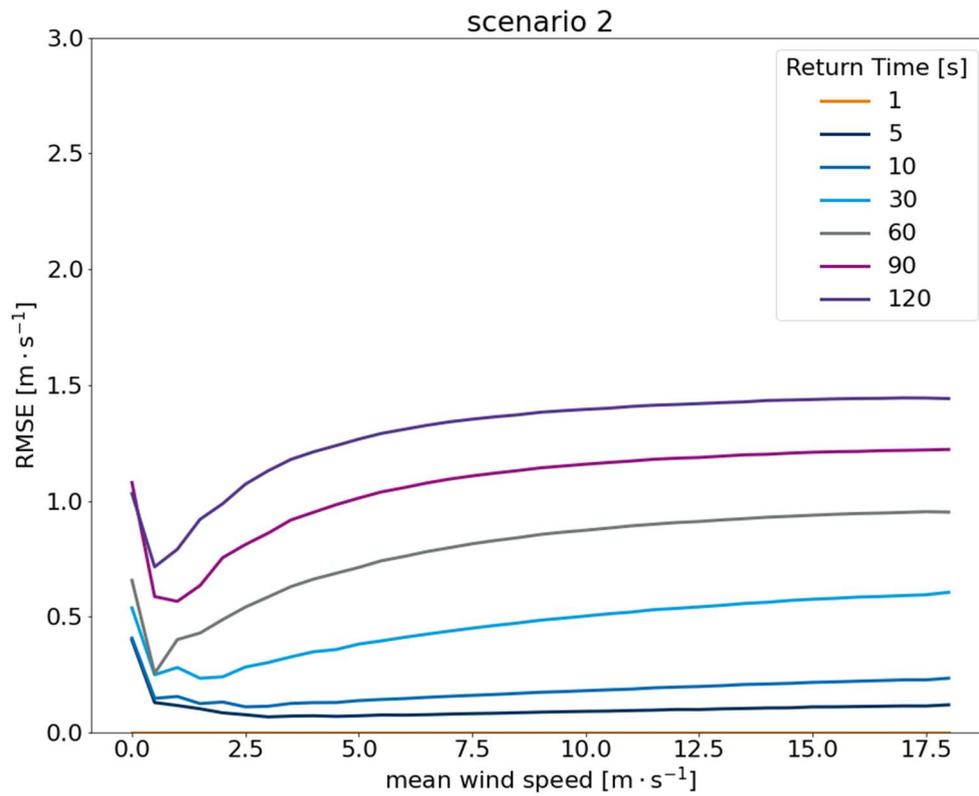
Szenario 2: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die horizontale Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Return Times 5 s, 10 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s (jeweils auf der y-Achse) im Vergleich zu der Windgeschwindigkeit bei 1s Return Time (auf der x-Achse). Werte für die Neigung der Regressionsgeraden (Slope), dem Schnittpunkt dieser mit der y-Achse (Intercept) sowie das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  sind über den Diagrammen angegeben.



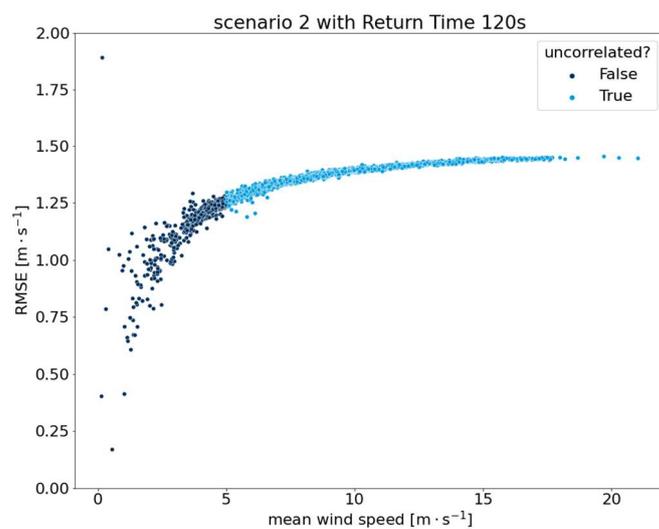
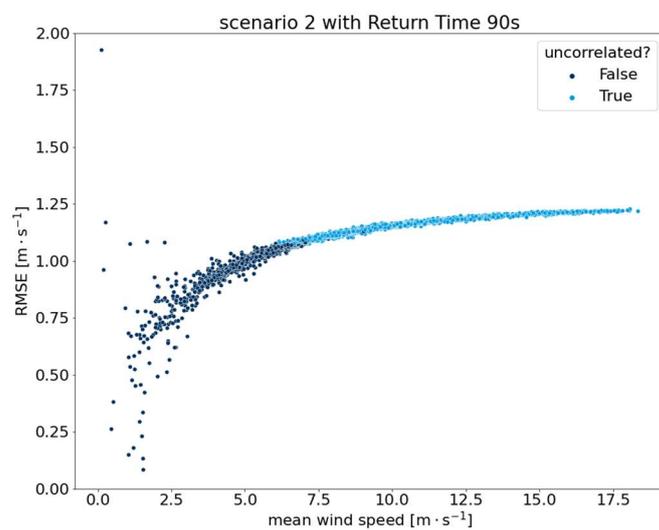
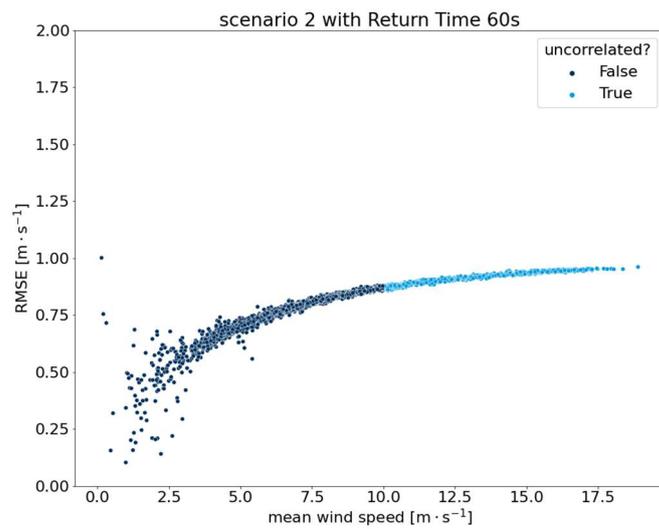
Experimenteller Ansatz zur Berechnung des RMSE abhängig von der Windgeschwindigkeit mit den Messdaten von 1 s Return Time als Basiswert; die Windgeschwindigkeiten sind in  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  breite Windgeschwindigkeitsklassen eingeteilt



Theoretisch berechneter RMSE in Abhängigkeit von allen gemessenen Windgeschwindigkeiten; die Varianz wird aus der Gesamtheit der Messdaten je Return Time berechnet



Theoretisch berechneter RMSE in Anhängigkeit von 0,5 m·s<sup>-1</sup> breiten Windgeschwindigkeitsklassen; die Varianz ist aus der Gesamtheit der Messdaten berechnet



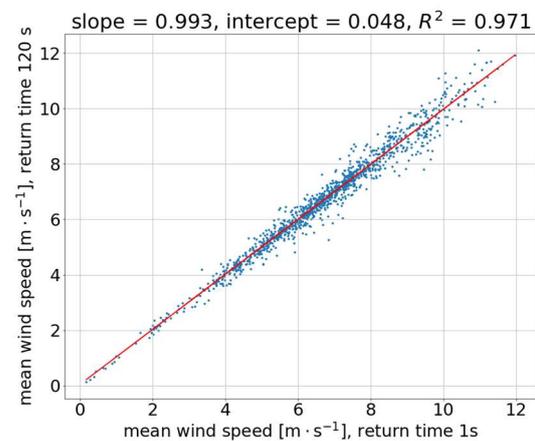
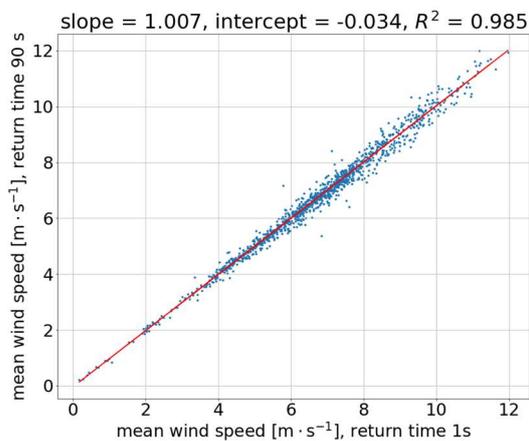
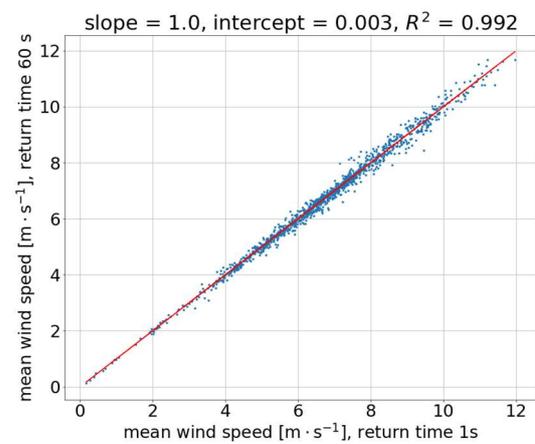
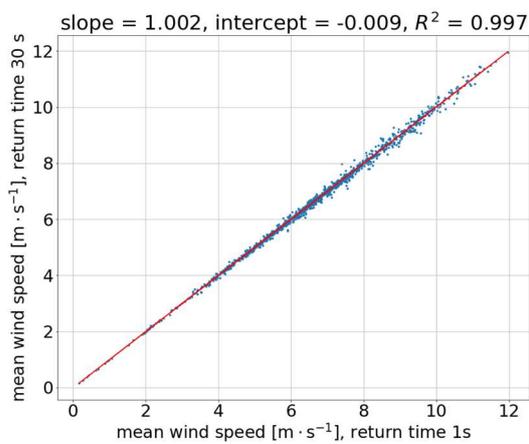
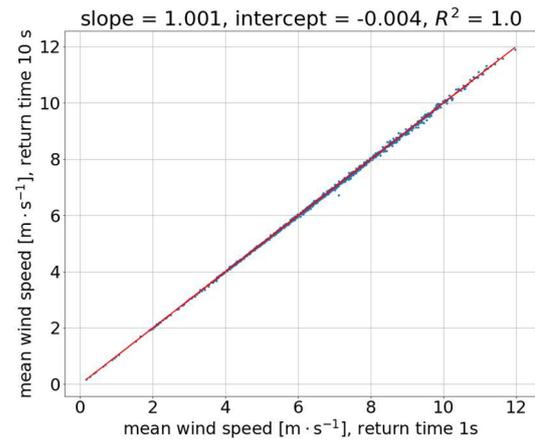
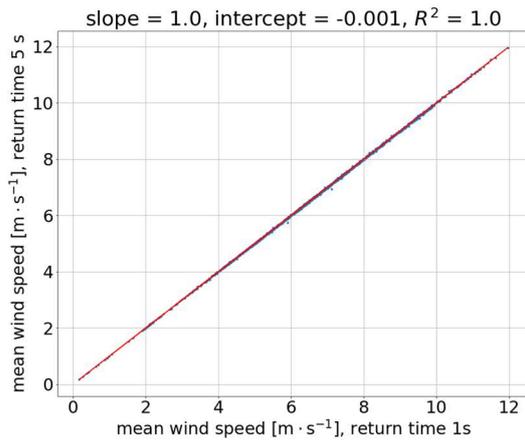
Korrelation aufeinanderfolgender Messungen bei Return Times 60 s, 90 s und 120 s

## ANLAGE 6

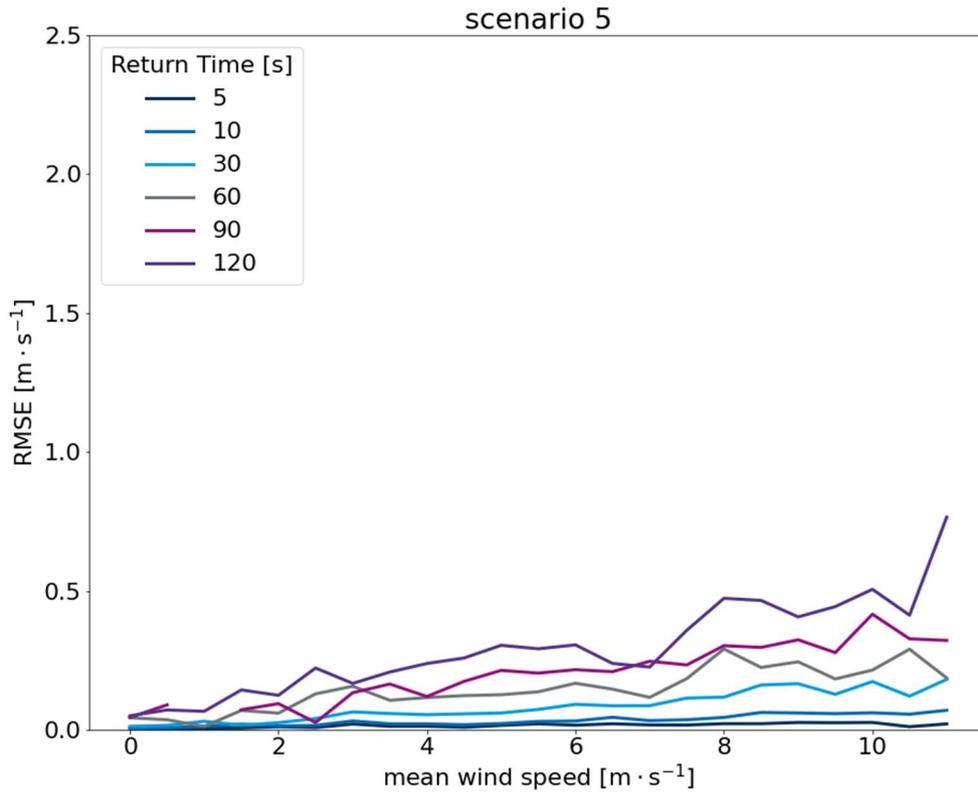
Weitere Ergebnisse zu Kapitel 5.2 – Statistische Analyse Szenario 5

Die folgenden Diagramme wurden im Rahmen der statistischen Analyse erstellt.

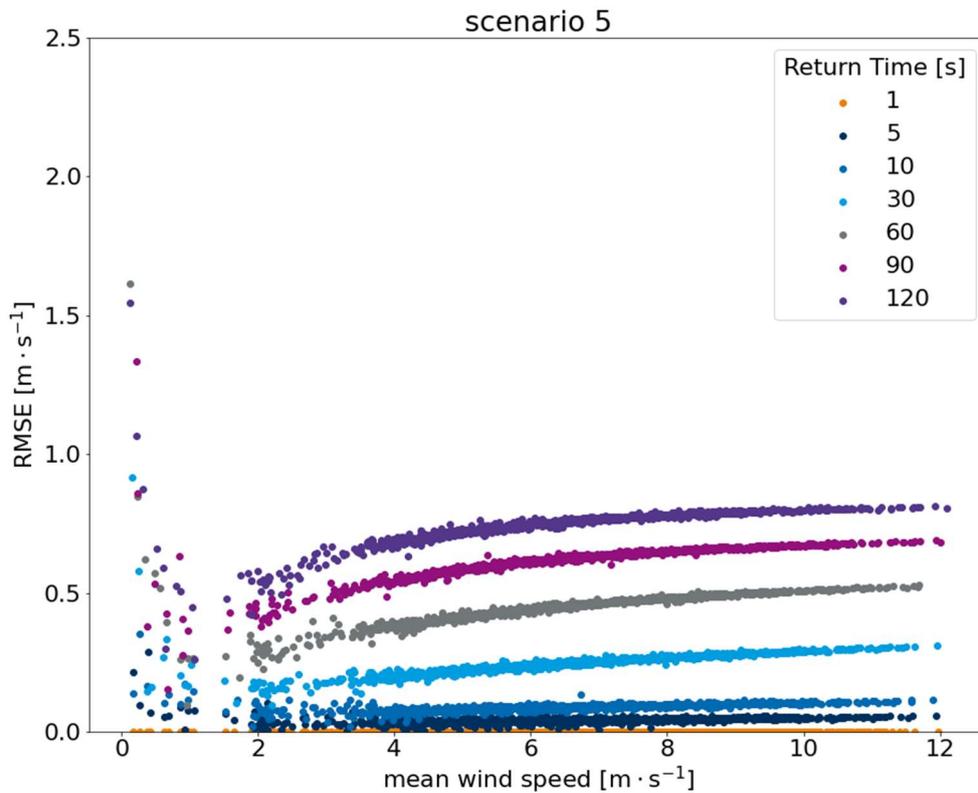
1. Je Return Time eine lineare Regression der Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu 1-s-Return Time zur Ermittlung eines Bestimmtheitsmaßes, auf Basis der Messdaten aus Drantum
2. Experimenteller RMSE aus Messdaten vom Standort Drantum für alle Return Times mit Einteilung in Windgeschwindigkeitsklassen von  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
3. Berechnung theoretischer RMSE für alle Windgeschwindigkeiten, die Varianz  $\sigma^2$  wird für die gesamten Messdaten je Return Time berechnet
4. Berechnung theoretischer RMSE mit Einteilung in Windgeschwindigkeitsklassen von  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , die Varianz  $\sigma^2$  wird für die gesamten Messdaten je Return Time berechnet
5. Korrelationsuntersuchungen: ob die Annahme von unabhängigen Messwerten erfüllt ist, für die Return Times 60 s, 90 s und 120 s



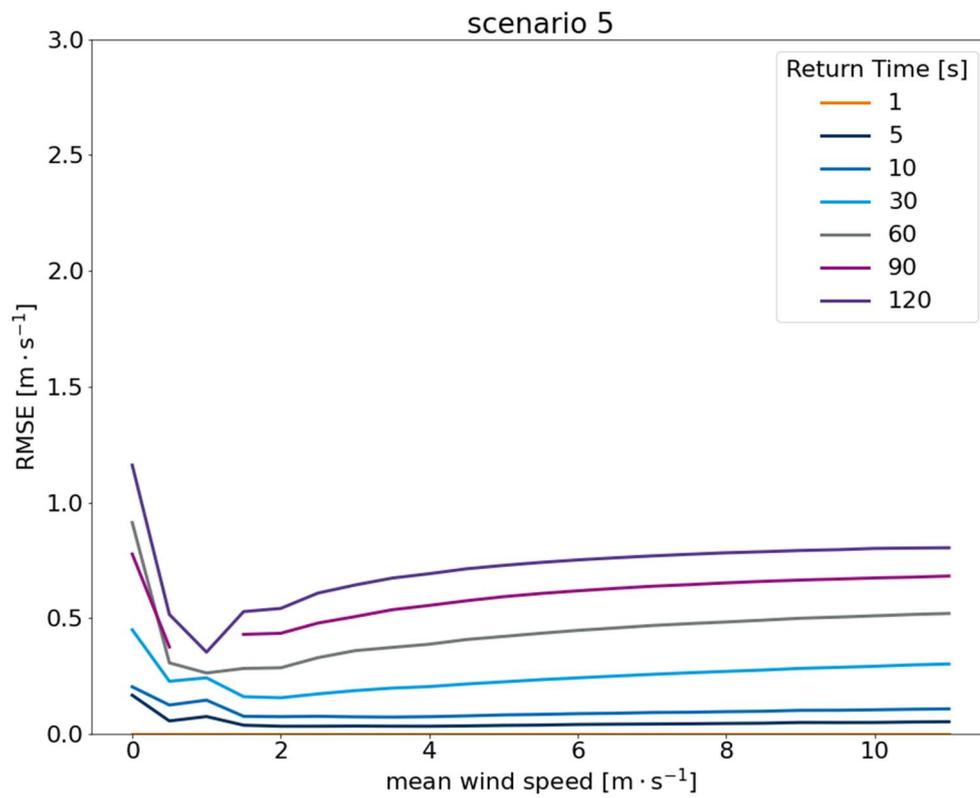
Szenario 5: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die horizontale Windgeschwindigkeit bei verschiedenen Return Times 5 s, 10 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s (jeweils auf der y-Achse) im Vergleich zu der Windgeschwindigkeit bei 1-s-Return-Time (auf der x-Achse). Werte für die Neigung der Regressionsgeraden (Slope), dem Schnittpunkt dieser mit der y-Achse (Intercept) sowie das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  sind über den Diagrammen angegeben.



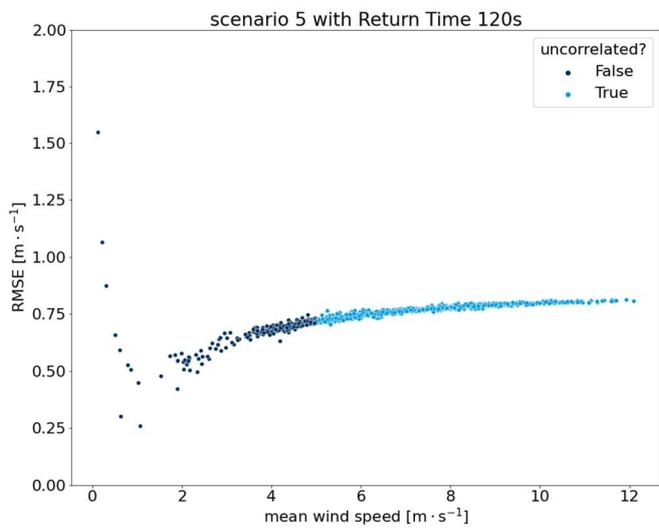
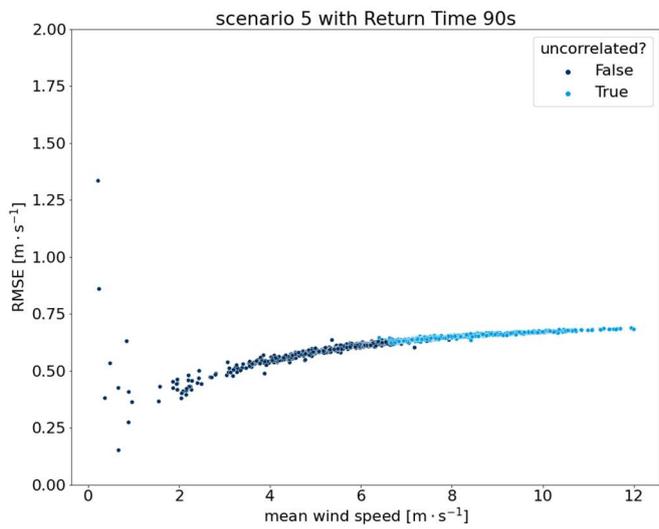
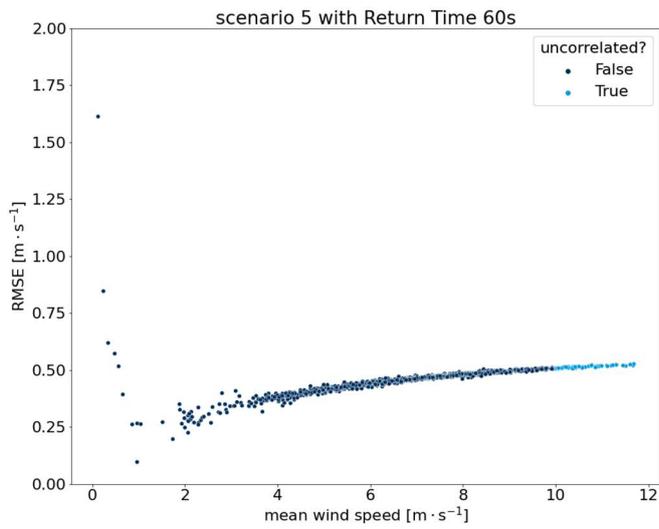
Experimenteller Ansatz zur Berechnung des RMSE abhängig von der Windgeschwindigkeit mit den Messdaten von 1-s-Return Time als Basiswert; die Windgeschwindigkeiten sind in  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  breite Windgeschwindigkeitsklassen eingeteilt



Theoretisch berechneter RMSE in Abhängigkeit von allen gemessenen Windgeschwindigkeiten; die Varianz wird aus der Gesamtheit der Messdaten je Return Time berechnet



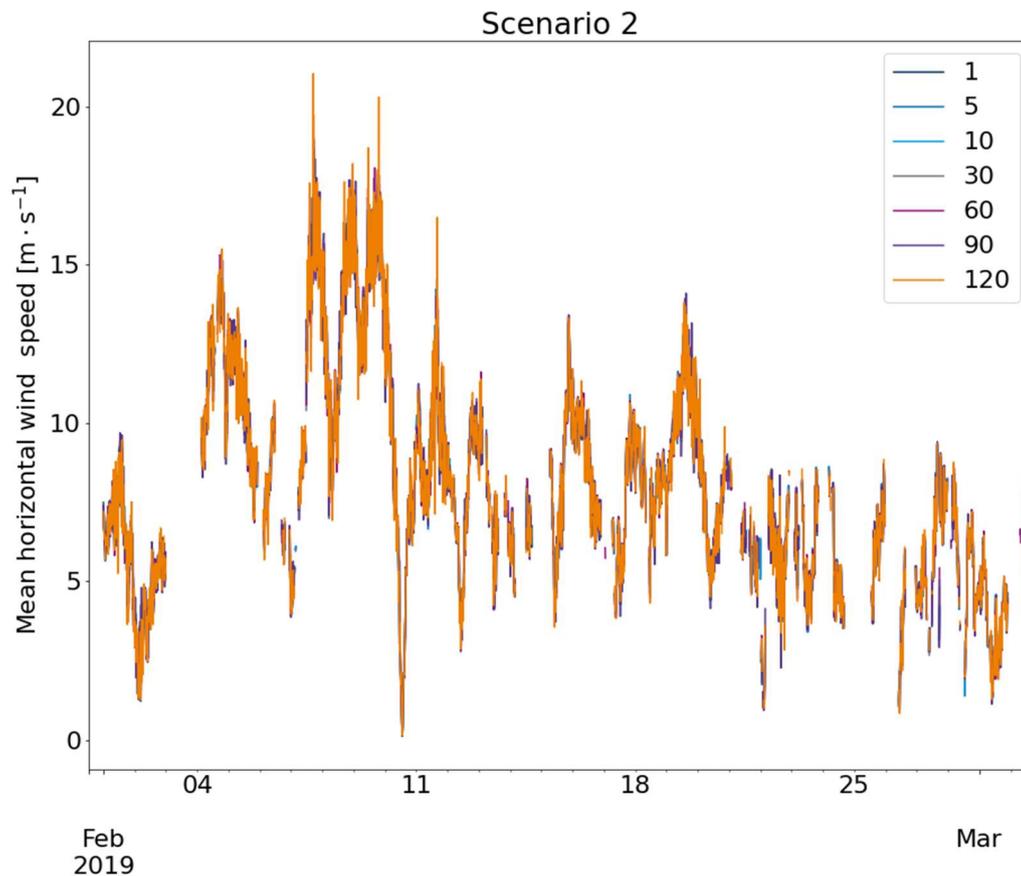
Theoretisch berechneter RMSE in Anhängigkeit von  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  breiten Windgeschwindigkeitsklassen; die Varianz ist aus der Gesamtheit der Messdaten berechnet



Korrelation aufeinanderfolgender Messungen bei Return Times 60 s, 90 s und 120 s

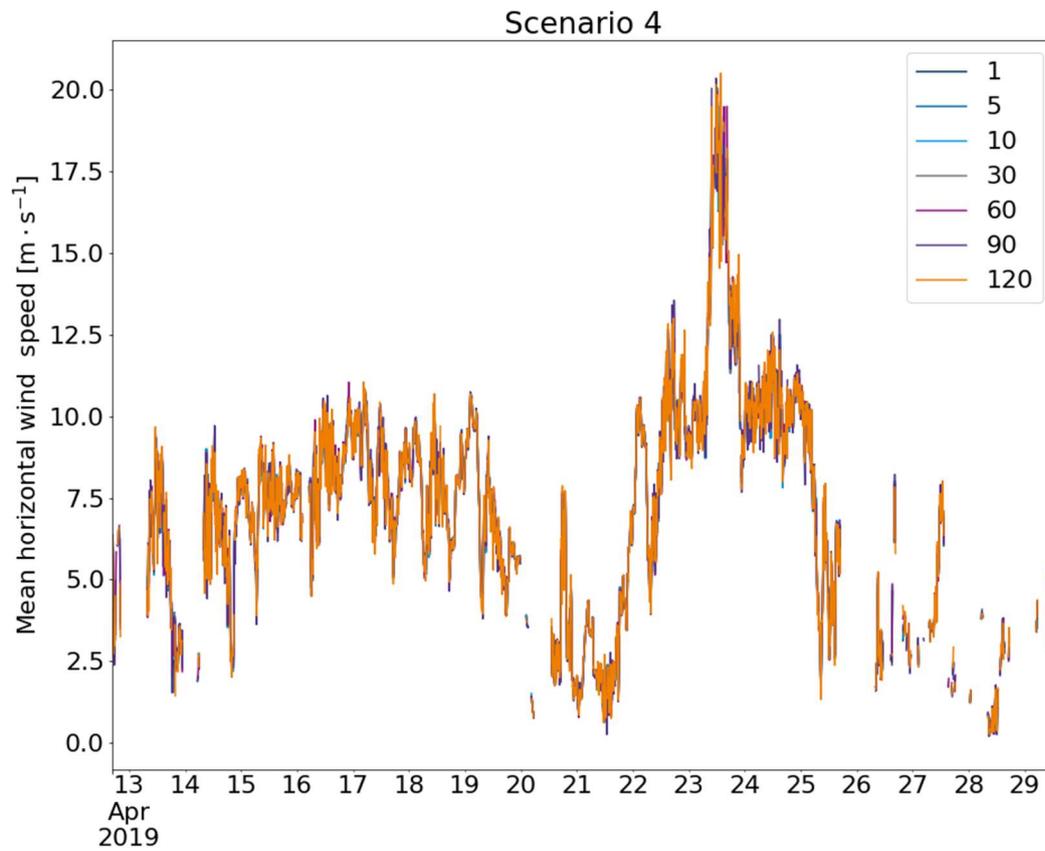
## ANLAGE 7

## Mittlere Windgeschwindigkeit Drantum Messdaten – Statistische Analyse



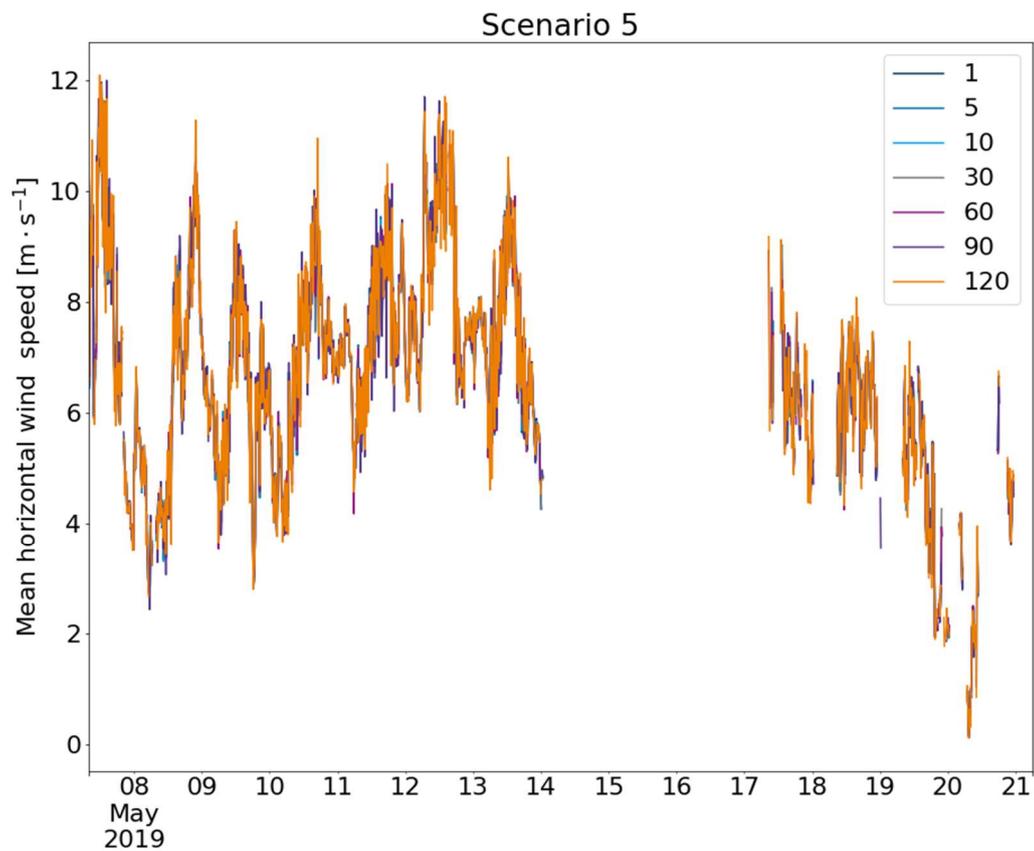
Szenario 2: Messzeitraum auf der x-Achse zeigt die mittlere Windgeschwindigkeit in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  auf der y-Achse, die in den Messdaten der verschiedenen Return Times enthalten sind. In der Tabelle sind die Informationen zum Szenario 2 enthalten.

Szenario	Start-Datum	End-Datum	FFT-Größe	Sendeimpulsdauer $T_{\text{pulse}}$ [ns]	Range Gate Min [m]	Range Gate Max [m]
2	31.01.2019	02.03.2019	64	200	100	8000



Szenario 2: Messzeitraum auf der x-Achse zeigt die mittlere Windgeschwindigkeit in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  auf der y-Achse, die in den Messdaten der verschiedenen Return Times enthalten sind. In der Tabelle sind die Informationen zum Szenario 4 enthalten.

<b>Szenario</b>	<b>Start-Datum</b>	<b>End-Datum</b>	<b>FFT-Größe</b>	<b>Sendeimpulsdauer</b> $T_{\text{pulse}}$ [ns]	<b>Range Gate</b> Min [m]	<b>Range Gate</b> Max [m]
4	10.04.2019	06.05.2019	128	400	200	2500



Szenario 5: Messzeitraum auf der x-Achse zeigt die mittlere Windgeschwindigkeit in  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  auf der y-Achse, die in den Messdaten der verschiedenen Return Times enthalten sind. In der Tabelle sind die Informationen zum Szenario 5 enthalten.

Szenario	Start-Datum	End-Datum	FFT-Größe	Sendeimpulsdauer $T_{\text{pulse}}$ [ns]	Range Gate Min [m]	Range Gate Max [m]
5	07.05.2019	21.05.2019	64	200	200	2500

## ANLAGE 8

## Experimentelle und theoretisch-ermittelte RMSE-Werte – Statistische Analyse

Szenario 2: experimenteller Ansatz; die Mitte jeder Windgeschwindigkeitsklasse ist in der linken Spalte gegeben; 5rmse\_p steht für: RMSE-Wert bei 5-s-Return Time mit dem praktischen / experimentellen Ansatz

[m·s <sup>-1</sup> ]	5rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	10rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	30rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	60rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	90rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	120rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]
0,25	0,002363	0,003609	0,004614	0,00813	0,015943	0,026538
0,75	0,005228	0,010873	0,03204	0,036378	0,063127	0,091753
1,25	0,008174	0,013521	0,042965	0,064977	0,121736	0,129227
1,75	0,013088	0,012218	0,050818	0,089172	0,218375	0,184815
2,25	0,013124	0,032621	0,077093	0,134604	0,301578	0,231012
2,75	0,014944	0,021568	0,068943	0,162884	0,215555	0,263401
3,25	0,018404	0,031263	0,066197	0,107558	0,202578	0,26016
3,75	0,01793	0,02527	0,056236	0,112576	0,189561	0,334047
4,25	0,023957	0,030695	0,07077	0,136064	0,175894	0,215932
4,75	0,016929	0,025209	0,101861	0,125531	0,189792	0,22215
5,25	0,028421	0,032221	0,075379	0,179598	0,203697	0,239526
5,75	0,024172	0,033361	0,083967	0,150329	0,212685	0,29739
6,25	0,017284	0,032364	0,087556	0,156502	0,20641	0,29561
6,75	0,015794	0,026925	0,086242	0,162205	0,177771	0,266183
7,25	0,017033	0,032856	0,090641	0,178539	0,190145	0,266295
7,75	0,020651	0,037698	0,104954	0,177212	0,225219	0,256871
8,25	0,016406	0,029103	0,10168	0,181681	0,233583	0,350747
8,75	0,018676	0,037593	0,112714	0,219688	0,299536	0,354995
9,25	0,018383	0,042853	0,123731	0,235572	0,32151	0,3953
9,75	0,023886	0,047779	0,137781	0,23399	0,311341	0,348356
10,25	0,024082	0,047099	0,134723	0,254215	0,285767	0,421944
10,75	0,025786	0,047166	0,127092	0,256892	0,376544	0,385885
11,25	0,025932	0,060529	0,194241	0,285046	0,374471	0,5282
11,75	0,03231	0,063266	0,19141	0,349164	0,412641	0,508713
12,25	0,026228	0,058311	0,174918	0,291416	0,409695	0,445141
12,75	0,028132	0,061183	0,184532	0,357524	0,499114	0,513536
13,25	0,029541	0,069618	0,233982	0,44573	0,594098	0,683136
13,75	0,035315	0,080826	0,205958	0,437629	0,571239	0,75608
14,25	0,048241	0,074863	0,226585	0,486629	0,5826	0,899589
14,75	0,045609	0,096214	0,293812	0,47908	0,692299	0,785213
15,25	0,04411	0,12314	0,282282	0,505586	0,705139	0,755125
15,75	0,043397	0,091958	0,295743	0,36917	0,462695	0,755741
16,25	0,052055	0,095471	0,207856	0,454941	0,553761	0,586726
16,75	0,054592	0,098351	0,335912	0,44148	0,485671	0,743594
17,25	0,047268	0,078046	0,288449	0,538501	0,663901	0,831068
17,75	0,026296	0,109925	0,401479	0,583503	0,787115	1,428568
18,25	0,009729	0,073565	0,367343	1,175629	1,119453	2,277864

Szenario 2: theoretischer Ansatz; die Mitte jeder Windgeschwindigkeitsklasse ist in der linken Spalte gegeben; 5rmse\_t steht für: RMSE-Wert bei 5-s-Return Time mit dem theoretischen Ansatz

[m·s <sup>-1</sup> ]	5rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	10rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	30rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	60rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	90rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	120rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]
0,25	0,39879244	0,40743487	0,53806168	0,65704951	1,07918997	1,03141023
0,75	0,12931261	0,14744515	0,24946361	0,25561209	0,58691021	0,71519944
1,25	0,11663069	0,15567235	0,28057293	0,40121814	0,56618919	0,79107085
1,75	0,10246501	0,12482274	0,23420618	0,42957941	0,63436202	0,92010974
2,25	0,08501065	0,1315377	0,2403906	0,48745744	0,75484926	0,98788984
2,75	0,07670731	0,11076722	0,28264	0,54138622	0,81141046	1,07199844
3,25	0,06739734	0,1133222	0,3019967	0,58518401	0,86050079	1,12972293
3,75	0,07099312	0,12555017	0,32636084	0,62952931	0,91726666	1,1786929
4,25	0,07218295	0,12893691	0,3484798	0,66201826	0,95057855	1,21164581
4,75	0,06973483	0,12946217	0,35831753	0,68758431	0,98348334	1,23871628
5,25	0,07210562	0,13785547	0,38181555	0,71276631	1,01217702	1,26663107
5,75	0,07572688	0,14267743	0,39556906	0,74151903	1,03875195	1,29119989
6,25	0,07519774	0,14649975	0,41087514	0,76019666	1,05723274	1,30888287
6,75	0,07692233	0,15185747	0,42469598	0,78101307	1,07724039	1,32626754
7,25	0,07964956	0,15632088	0,43776627	0,79783773	1,09408369	1,34120385
7,75	0,08165076	0,16036627	0,45041547	0,81486886	1,10784339	1,35269931
8,25	0,08322569	0,16429301	0,4621094	0,82878391	1,11972932	1,36296422
8,75	0,08547489	0,16894223	0,47263921	0,84095799	1,13054098	1,37136938
9,25	0,08797089	0,1737267	0,48473372	0,85491762	1,14245319	1,38255727
9,75	0,08971181	0,17665487	0,49362842	0,86506304	1,15045235	1,38918029
10,25	0,09144094	0,18055857	0,50280447	0,87324782	1,15835121	1,39505149
10,75	0,09256985	0,18423937	0,51237035	0,88241649	1,16557853	1,39992014
11,25	0,09476909	0,18735446	0,51978872	0,89208857	1,17193503	1,40748561
11,75	0,09665663	0,19297831	0,53030786	0,89934849	1,17966655	1,41285109
12,25	0,09954515	0,19604687	0,53579325	0,90637416	1,18412417	1,41610896
12,75	0,09923583	0,19865313	0,54228385	0,91101213	1,18717375	1,41984927
13,25	0,10212342	0,20226755	0,54902751	0,91773963	1,19311329	1,42407258
13,75	0,10384195	0,20741771	0,5570472	0,92318093	1,19877465	1,42751361
14,25	0,10600651	0,20942808	0,56215163	0,92952148	1,20108771	1,43343693
14,75	0,10661936	0,21223904	0,57012224	0,93349998	1,20614887	1,43541172
15,25	0,1105454	0,21645381	0,57533317	0,93811515	1,20981786	1,43770012
15,75	0,11076299	0,21864192	0,57932546	0,9420785	1,2123732	1,44034084
16,25	0,11206302	0,2217226	0,58472259	0,9454319	1,21354108	1,44194643
16,75	0,11320679	0,22426815	0,58717537	0,94735852	1,21676546	1,44264365
17,25	0,11469642	0,22724804	0,59123682	0,95020686	1,21804295	1,44455483
17,75	0,11448425	0,22725386	0,59448183	0,95314918	1,21983038	1,44402401
18,25	0,11947213	0,2344074	0,60539547	0,95165313	1,22202365	1,44149609

Szenario 4: experimenteller Ansatz; die Mitte jeder Windgeschwindigkeitsklasse ist in der linken Spalte gegeben; 5rmse\_p steht für: RMSE-Wert bei 5-s-Return Time mit dem praktischen / experimentellen Ansatz

[m·s <sup>-1</sup> ]	5rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	10rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	30rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	60rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	90rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	120rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]
0,25	0,005174	0,01633	0,029087	0,037167	0,104616	0,062282
0,75	0,008125	0,012952	0,032066	0,080271	0,061293	0,125643
1,25	0,009612	0,01193	0,040518	0,067208	0,072431	0,246738
1,75	0,010954	0,017909	0,039742	0,083032	0,135042	0,170885
2,25	0,014521	0,017912	0,052673	0,107417	0,134469	0,176477
2,75	0,011751	0,024131	0,062275	0,099363	0,141223	0,229534
3,25	0,014741	0,029688	0,064035	0,081695	0,130325	0,146837
3,75	0,012677	0,021977	0,04924	0,145085	0,105864	0,18892
4,25	0,013629	0,019241	0,072928	0,143937	0,225983	0,365077
4,75	0,030923	0,026641	0,076934	0,199859	0,211687	0,280012
5,25	0,015446	0,027921	0,086297	0,12107	0,230039	0,268566
5,75	0,015814	0,024447	0,066577	0,159582	0,163836	0,346784
6,25	0,018583	0,034766	0,094303	0,163989	0,210821	0,289847
6,75	0,018879	0,027513	0,106325	0,212382	0,266274	0,300547
7,25	0,020913	0,0376	0,101195	0,154414	0,263532	0,308564
7,75	0,014186	0,039615	0,088089	0,162178	0,254216	0,324219
8,25	0,017415	0,033134	0,095275	0,189816	0,225051	0,292055
8,75	0,016808	0,031986	0,095435	0,188404	0,319804	0,317316
9,25	0,019897	0,036832	0,100557	0,215604	0,247503	0,348881
9,75	0,015195	0,036768	0,102429	0,197091	0,266861	0,317819
10,25	0,014726	0,034761	0,134248	0,212839	0,292391	0,317486
10,75	0,019225	0,038561	0,150214	0,263828	0,394478	0,428286
11,25	0,027481	0,058203	0,148108	0,264604	0,486658	0,43581
11,75	0,024523	0,062731	0,168378	0,38798	0,415215	0,581753
12,25	0,036313	0,07923	0,204601	0,336274	0,455261	0,571887
12,75	0,027121	0,062314	0,200167	0,259307	0,530818	0,713638
13,25	0,032126	0,054249	0,250727	0,494383	0,496336	0,396492
13,75	0,027921	0,089484	0,317363	0,417844	1,05939	1,117878
14,25	0,013482	0,008455	0,266439	0,858769	0,795119	1,274907
14,75	0,033356	0,113869	0,117166	0,442875	1,353363	1,579882
15,25	0,061475	0,153086	0,295866	0,612501	0,287375	1,165312
15,75	0,063513	0,096423	0,33569	0,707387	0,816798	0,274803
16,25	0,053201	0,161865	0,360838	0,643732	0,911989	0,542721
16,75	0,047589	0,091681	0,173964	0,402078	0,450107	0,391514
17,25	0,023576	0,107226	0,201359	0,336041	0,56949	0,345056
17,75	0,04812	0,033834	0,372282	0,400057	0,763339	0,464939
18,25	0,032244	0,160459	0,225803		0,058155	0,505631
18,75	0,032011	0,039974	0,442398	0,686958	0,436004	1,671935
19,25	0,05181	0,064109	0,547194	1,102766	0,380975	0,741989
19,75	0,02733	0,121528	0,285688	0,293136	1,144101	0,923969

Szenario 4: theoretischer Ansatz; die Mitte jeder Windgeschwindigkeitsklasse ist in der linken Spalte gegeben; 5rmse\_t steht für: RMSE-Wert bei 5-s-Return Time mit dem theoretischen Ansatz

[m·s <sup>-1</sup> ]	5rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	10rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	30rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	60rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	90rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]	120rmse_t [m·s <sup>-1</sup> ]
0,25	0,34414721	0,53894406	0,89077615	1,01251471	1,14516202	1,37355838
0,75	0,18619359	0,20298811	0,30635669	0,44225748	0,48923058	0,67865758
1,25	0,12260204	0,13558122	0,26611193	0,38478827	0,53819972	0,74857762
1,75	0,07868968	0,12321031	0,22750087	0,44311194	0,65838244	0,79040921
2,25	0,07220631	0,09978121	0,2554117	0,48337692	0,71329482	0,87542148
2,75	0,05931432	0,09803979	0,27253275	0,53204155	0,75390879	0,97610432
3,25	0,04715311	0,10391149	0,29289974	0,58011449	0,82114685	1,04868748
3,75	0,03750485	0,11052633	0,31293737	0,60119919	0,86312139	1,08296102
4,25	0,03806524	0,10921788	0,32682499	0,64260289	0,90758779	1,13021018
4,75	0,04206025	0,11493395	0,35058988	0,66677461	0,9323402	1,15684901
5,25	0,04540156	0,12603449	0,36457709	0,69218057	0,96663312	1,18667742
5,75	0,04934123	0,12914468	0,37560465	0,71135392	0,98741237	1,20724477
6,25	0,05386908	0,13358121	0,39198163	0,73513703	1,01056785	1,22586799
6,75	0,05614647	0,1388284	0,40551308	0,75280631	1,02747067	1,24394629
7,25	0,05998333	0,14436831	0,41932286	0,76966513	1,04415887	1,25642381
7,75	0,06532765	0,14854858	0,42956252	0,78467754	1,05793145	1,26862944
8,25	0,06741498	0,15285374	0,44150335	0,79870056	1,06885839	1,27870683
8,75	0,07004291	0,15728708	0,45237784	0,81061584	1,08149454	1,28968683
9,25	0,07298364	0,16152484	0,46314799	0,82197156	1,08969358	1,29662584
9,75	0,07605761	0,16623751	0,47226546	0,83387597	1,09861641	1,30405339
10,25	0,07807897	0,16924981	0,48034119	0,84067463	1,105814	1,30957846
10,75	0,08149806	0,17400388	0,48857289	0,84880397	1,1109287	1,31343633
11,25	0,0839261	0,17663119	0,49655962	0,85534279	1,11586126	1,31980482
11,75	0,08386927	0,18094	0,50351139	0,86099537	1,12235462	1,32337089
12,25	0,0870506	0,18652355	0,51308518	0,87013572	1,13213957	1,32706015
12,75	0,09021796	0,18828338	0,51875472	0,87798405	1,13164578	1,33289662
13,25	0,09072471	0,19300758	0,52458128	0,87854941	1,13750227	1,33744376
13,75	0,09614646	0,19806384	0,53021938	0,88787503	1,14160256	1,3403204
14,25	0,09615924	0,19792525	0,53271823	0,89014307	1,1449163	1,33662879
14,75	0,10016762	0,20610364	0,54645351	0,9018451	1,14816053	1,35213815
15,25	0,10135289	0,20635874	0,55037885	0,90332836	1,15646065	1,35625611
15,75	0,10180856	0,21013068	0,55705224	0,90768864	1,15280616	1,35564381
16,25	0,10326986	0,21192361	0,56234858	0,91229882	1,16281748	1,35487849
16,75	0,10350614	0,21460644	0,5645471	0,91552168	1,16482379	1,3613716
17,25	0,10579764	0,21610371	0,56886506	0,91849919	1,16546576	1,36189063
17,75	0,10612348	0,21855549	0,56996143	0,91850347	1,16542316	1,36383515
18,25	0,10788766	0,21964249	0,57456712		1,1701943	1,36556516
18,75	0,11015409	0,22442838	0,58240526	0,92544859	1,17476271	1,36344872
19,25	0,11044864	0,22723391	0,58061309	0,92461726	1,17632799	1,3698184
19,75	0,11392366	0,22699348	0,58743367	0,93184171	1,17420623	1,36960753

Szenario 5: experimenteller Ansatz; die Mitte jeder Windgeschwindigkeitsklasse ist in der linken Spalte gegeben; 5rmse\_p steht für: RMSE-Wert bei 5-s-Return Time mit dem praktischen / experimentellen Ansatz

[m·s <sup>-1</sup> ]	5rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	10rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	30rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	60rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	90rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]	120rmse_p [m·s <sup>-1</sup> ]
0,25	0,004873	0,004854	0,01197	0,043299	0,044219	0,050185
0,75	0,002608	0,007076	0,015725	0,035901	0,08957	0,071139
1,25	0,005661	0,01213	0,030412	0,012034		0,066299
1,75	0,006194	0,020161	0,016404	0,069506	0,071955	0,143241
2,25	0,010435	0,013929	0,025485	0,059712	0,093871	0,123895
2,75	0,007724	0,015535	0,040226	0,129094	0,026022	0,222154
3,25	0,020629	0,031656	0,064252	0,156566	0,133219	0,166733
3,75	0,012471	0,021383	0,058266	0,105844	0,164455	0,207692
4,25	0,012461	0,021258	0,054324	0,115984	0,119589	0,238404
4,75	0,008618	0,018008	0,057121	0,122866	0,174092	0,258094
5,25	0,015772	0,022209	0,060245	0,126029	0,213602	0,303836
5,75	0,021446	0,029953	0,07312	0,136604	0,203751	0,291237
6,25	0,016372	0,03151	0,091431	0,167172	0,216123	0,305335
6,75	0,02152	0,044787	0,086216	0,146128	0,208964	0,238513
7,25	0,017408	0,032778	0,086751	0,116489	0,24633	0,225672
7,75	0,017013	0,035982	0,113876	0,18397	0,233211	0,357972
8,25	0,021918	0,044302	0,117238	0,2906	0,302485	0,472854
8,75	0,021865	0,062144	0,160999	0,224121	0,296201	0,46527
9,25	0,026217	0,060357	0,165574	0,244434	0,323569	0,406072
9,75	0,025352	0,057903	0,127533	0,182746	0,277549	0,442969
10,25	0,026291	0,061033	0,173358	0,214707	0,415726	0,505159
10,75	0,0109	0,055864	0,120859	0,289786	0,327191	0,41238
11,25	0,021026	0,069939	0,181151	0,18626	0,321395	0,764643

Szenario 5: theoretischer Ansatz; die Mitte jeder Windgeschwindigkeitsklasse ist in der linken Spalte gegeben; 5rmse\_t steht für: RMSE-Wert bei 5-s-Return Time mit dem theoretischen Ansatz

<b>[m·s<sup>-1</sup>]</b>	<b>5rmse_t [m·s<sup>-1</sup>]</b>	<b>10rmse_t [m·s<sup>-1</sup>]</b>	<b>30rmse_t [m·s<sup>-1</sup>]</b>	<b>60rmse_t [m·s<sup>-1</sup>]</b>	<b>90rmse_t [m·s<sup>-1</sup>]</b>	<b>120rmse_t [m·s<sup>-1</sup>]</b>
0,25	0,16724877	0,20361043	0,44993825	0,91272399	0,77701293	1,16084014
0,75	0,05618545	0,12484951	0,2276139	0,30699977	0,37561714	0,51619932
1,25	0,07529295	0,14598315	0,24244254	0,26326407		0,35340623
1,75	0,03787459	0,07616272	0,16097265	0,28292976	0,43009817	0,52843558
2,25	0,03326684	0,07468094	0,15622121	0,285832	0,43474423	0,54218798
2,75	0,03330497	0,07633645	0,17298672	0,3293544	0,47886291	0,60827881
3,25	0,03415219	0,07382938	0,18723536	0,35973707	0,50668997	0,64317741
3,75	0,03347707	0,07283789	0,19799973	0,37380888	0,53634733	0,67312437
4,25	0,03329992	0,07458709	0,20449234	0,3875053	0,55507204	0,69203179
4,75	0,03469228	0,07803587	0,21577519	0,40784042	0,57513384	0,71315135
5,25	0,03707055	0,08218983	0,22504451	0,42117142	0,59277003	0,72796003
5,75	0,0383357	0,08450148	0,23431967	0,43463705	0,60658825	0,74064669
6,25	0,04096045	0,0875773	0,24221961	0,44734655	0,6181905	0,75156923
6,75	0,04208839	0,08935812	0,24993691	0,45757006	0,62845158	0,76063614
7,25	0,04286459	0,09265799	0,2574894	0,46826621	0,63792033	0,76889044
7,75	0,04392847	0,0936527	0,26404941	0,47636936	0,64474166	0,77591617
8,25	0,04541838	0,09626759	0,27024338	0,48358126	0,65246947	0,78231779
8,75	0,04642213	0,09802293	0,27598759	0,49149468	0,65906259	0,787019
9,25	0,04965959	0,10206922	0,28323568	0,49971578	0,66457941	0,79232811
9,75	0,04934654	0,10236578	0,28747392	0,50458396	0,66899812	0,79575632
10,25	0,04963257	0,1042497	0,29224613	0,51020185	0,67374366	0,80118941
10,75	0,0516863	0,10672897	0,29811893	0,51603052	0,67714646	0,80280754
11,25	0,05274902	0,10838543	0,30214301	0,5203147	0,68190709	0,80404226