

Bachelorarbeit

**Statistische Untersuchung
des Einflusses der Geländetopographie
auf Messungen mit einem long-range Lidar**

von

Sofya Svetlosanova

Matrikel-Nr: 2776523

Betreuerin: Dipl.-Ing. I. Würth

Universität Stuttgart
Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie, SWE
Prof. Dr.-Ing. P.W. Cheng

3. November 2017

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	IV
Eidstattliche Erklärung	V
Kurzfassung / Abstract	VII
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einführung	1
1.1 Projekt VORKAST	1
1.2 Problemstellung	2
2 Grundlagen	3
2.1 Lidar-Messtechnik	3
2.2 Datenfilterung	4
2.3 Windfeldrekonstruktion	5
2.4 Turbulenz	7
2.5 Komplexe Strömung und ihre Ursachen	9
3 Messkampagne	13
3.1 Messstandort	13
3.2 Windrichtung am Standort	15
3.3 Long-Range Lidar	16
3.4 Messaufbau	17
3.5 Datengrundlage	18
4 Algorithmen der Datenverarbeitung	21
4.1 Methoden	21
4.2 Datenanordnung in Matlab	22
4.3 Diskussion	23
4.4 Algorithmen zur räumlichen Datenverarbeitung	24
4.4.1 Grundidee	24
4.4.2 Ein- und Ausgabedaten	25
4.4.3 Funktionsaufbau	27

5	Statistische Analyse des Topographieinflusses	33
5.1	Sortierung der Daten nach Windrichtung	33
5.2	Analyse der Datenverfügbarkeit	34
5.3	Visualisierung der Strömungsphänomene	36
5.4	Untersuchung des Topographieinflusses	39
5.4.1	Geländemodellvergleich	39
5.4.2	Höhenlinienvergleich	40
5.4.3	Geländeschnitt	43
6	Fazit und Ausblick	47
	Literaturverzeichnis	49
	Abbildungsverzeichnis	52
	Tabellenverzeichnis	53

Aufgabenstellung

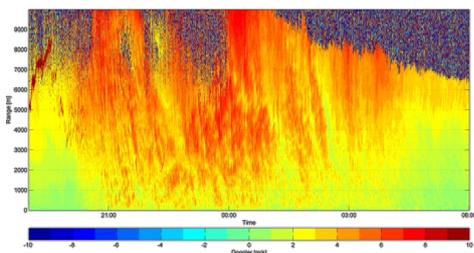


Bachelorarbeit

Statistische Untersuchung des Einflusses der Geländetopographie auf long-range Lidardaten

Betreuerin: Ines Würth
wuerth@ifb.uni.stuttgart.de, 0711/68568-285

Innerhalb des Forschungsprojektes VORKAST soll das long-range Lidar Stream Line XR eingesetzt werden, um Kurzfristvorhersagen der Windleistung einer Windenergieanlage im Zeitbereich bis 60min zu ermöglichen. Diese Vorhersagen sind nötig um zukünftig in 100% EE-Regionen dezentrale regenerative Kombikraftwerke mit verschiedenen Speicher- und Erzeugungstechnologien sinnvoll zu koppeln um einen vorgegebenen Lastgang decken zu können.



Die Windgeschwindigkeitsmessungen mittels Lidar sind maßgeblich von der Geländebeschaffenheit abhängig. Vor allem in komplexem Gelände kommt es zu lokalen Geschwindigkeitsänderungen, die durch die flächendeckende Lidarmessung erfasst werden können. In dieser Arbeit soll statistisch untersucht werden, in wieweit sich aus den gemessenen Radialgeschwindigkeiten des Lidargerätes lokale

Geschwindigkeitsänderungen ableiten können um so den Einfluss des Geländes zu bestimmen. Hierzu werden Daten von Messungen auf der schwäbischen Alb verwendet, bei denen zeitgleich zu den Lidarmessungen auch meteorologische Daten des SWE-Messmasten zur Verfügung stehen um lokale die Rekonstruktion der Lidardaten zu Validieren. In einem weiteren Schritt sollen dann lokale Geschwindigkeitsänderungen mit einem Topographiemodell verglichen werden um zu untersuchen welchen Einfluss die Geländestruktur auf die Messungen hat.

Empfohlener Arbeitsablauf:

- Literaturstudie, Einarbeitung, Konzeption
- Implementierung statistischer Algorithmen in MATLAB
- Statistische Auswertung der Lidardaten in Hinblick auf lokale Geschwindigkeitsänderungen
- Abgleich der Ergebnisse mit einem Topographiemodell und Untersuchen des Einflusses der Geländestruktur
- Dokumentation und Präsentation

Kenntnisse in MATLAB/Simulink sowie selbstständiges Arbeiten werden vorausgesetzt. Kenntnisse in Windenergie und der Lidartechnologie sind von Vorteil.

Dauer: ca. 4 Monate, Beginn: ab sofort

Eidstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind, die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war, dass die Arbeit weder vollständig noch in Teilen bereits veröffentlicht wurde und das elektronische Exemplar mit den anderen (ausgedruckten) Exemplaren übereinstimmt

Stuttgart, den 3. November 2017

Sofya Svetlosanova

Kurzfassung

Für die Nutzung von Erneuerbare Energien ist es von hoher Bedeutung, die Energiebereitstellung kontrollieren zu können. Dies kann durch Kurzfristvorhersagen ermöglicht werden. Die Vorhersagegenauigkeit der Leistungsabgabe von Windenergieanlagen wird durch lokale Geschwindigkeitsschwankungen aufgrund der Topographie des Standortes beeinflusst. Besonders im komplexen Gelände treten turbulente Strömungseffekte auf, die durch flächendeckende Lidarmessungen erfasst werden können. Diese Arbeit behandelt die Frage, ob und inwieweit der Einfluss eines komplexen Messtandortes nahe Geislingen auf die Windströmung in den Lidardaten erkannt werden kann. Um dies zu untersuchen, werden zuerst Methoden zur räumlichen Datenverarbeitung entwickelt, um folglich die große Menge an zeitlich und räumlich hochaufgelösten vorliegenden Messdaten statistisch auswerten zu können. Anschließend werden die lokalen Änderungen der Windgeschwindigkeit mit der Geländetopographie verglichen, um so den Geländeeinfluss zu analysieren. Dabei zeigt sich, dass der Einfluss des Geländes in den visualisierten Daten erkennbar ist, aber auf der Messhöhe der vorliegenden Daten keine großen lokalen Schwankungen vorhanden sind.

Abstract

For the use of renewable energies it is significant to monitor the energy supply. Short-term forecasts of the performance of wind turbines make this possible. Local wind speed fluctuations because of location topography influence the forecast precision. Turbulent flow effects occur especially in the complex terrain. Measurements with lidar can cover large area and register there this fluctuations. This paper deals with the questions, whether and how much the complex terrain near Geislingen influences the wind flow and what can be recognized. First, methods are developed to spatial process the data. Afterwards the large amount of temporally and spatially high-resolution measurement data can be statistical analyzed. Finally, local wind speed fluctuations are compared with terrain topography to analyze terrain influence. The results show, that influence of terrain exist and can be seen in the visualized lidar data. But the fluctuations in this measurement height aren't large.

Abkürzungsverzeichnis

BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
KB	Kombikraftwerken
Lidar	LIght Detection And Ranging
los	Line of Sight
NaN	Not a Number
SWE	Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie
TI	Turbulenzintensität
WEA	Windenergieanlagen
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

1 Einführung

1.1 Projekt VORKAST

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) hat sich das Ziel gesetzt, bis 2050 80% des Stromverbrauchs aus erneuerbaren Quellen zu erreichen. Regenerative Energieversorgungssysteme in Form von Kombikraftwerken (KB) spielen eine große Rolle für die Umsetzung der Energiewende. Um einen vorgegebenen Lastgang decken zu können, werden verschiedene Speicher- und Erzeugungstechnologien eingesetzt [14].

Innerhalb des Forschungsprojektes VORKAST soll durch das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) und den Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE) die Auslegung und Betriebsführung von KB und Speichertechnologien mittels Kurzfristvorhersagen der Wind- und Photovoltaikleistung optimiert werden. Bereits existierende Modelle für die Auslegung und Optimierung von Kombikraftwerken sind nicht in der Lage, Kurzfristprognosen mit hoher zeitlicher Auflösung zu bearbeiten. Solche Prognosen sind jedoch für die direkte Einsatzplanung und Onlineregulierung von Energieerzeugern und Speichersystemen wichtig [8].

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen vom SWE die Kurzfristvorhersagestrategien der Windgeschwindigkeit mittels eines langreichweitigen Lidarmessgeräts (LIght Detection And Ranging), mit einer Messentfernung von bis zu 10 km und im Zeitbereich bis 60 min entwickelt werden [6]. Für Netzbetreiber ist die Windleistungsprognose von besonderer Relevanz, um die Energiebereitstellung zu kontrollieren und die Netzfrequenz im zulässigen Bereich zu halten. Deshalb spielen die Kurzfristvorhersagen eine große Rolle.

Durch die Kooperation mit dem Windenergieforschungsbereich WindForS wurde beschlossen, die Messkampagne am Stöttener Berg in der Nähe von Geislingen an der Steige/Schwäbische Alb durchzuführen. Dieser zukünftige Testfeldstandort ist durch ein bergig-komplexes Gelände geprägt [7].

1.2 Problemstellung

An dem Standort in der Nähe von Geislingen herrschen, typisch für ein bergig-komplexes Gelände, besondere Windbedingungen. Infolge der Abbremsung des Windes durch die Oberflächenobjekte entstehen Wirbelströmungen und Strömungsablösung, was eine turbulente Strömung ergibt. Diese führt zu lokalen raschen Änderungen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung und beeinflusst die Messdaten [9]. Daraus folgt, dass die Windgeschwindigkeitsmessungen von der Topographie des Standortes abhängig sind.

Zurzeit ist die Windfeldentwicklung bzw. -bewegung über eine große Entfernung und der Einfluss des komplexen Geländes auf die Vorhersagen ein bedeutendes Forschungsthema [6]. Das Windfeld bewegt sich nach Taylors Hypothese „frozen turbulence hypothesis“ mit einer konstanten mittleren Windgeschwindigkeit fort [3]. Im komplexen Gelände kann diese Annahme jedoch nicht getroffen werden, da die Strömungsphänomene inhomogen, d. h. ortsabhängig sind und das Windprofil nicht mehr logarithmisch ist [9].

Die Kurzfristvorhersagen sind sehr lokale Prognosen. Deshalb sind die Windgeschwindigkeiten in kurzer Zeit schwer vorhersagbar, wenn die ortsabhängige Windfeldevolution nicht bekannt ist. Es ist eine besondere Anforderung, Windenergieanlagen (WEA) für einen solchen Standort auszulegen. Deshalb spielt die Kurzfristvorhersage der Windgeschwindigkeit bzw. des Windfeldes eine besondere Rolle für die Windleistungsprognose einer WEA.

Im Rahmen dieser Arbeit soll statistisch untersucht werden, ob und inwieweit geländeabhängige Strömungsphänomene durch Lidar erkannt werden können, um somit den Einfluss des Geländes auf das Windfeld aus den Messdaten zu bestimmen.

Hierzu werden Messdaten mittels MATLAB verarbeitet. Zuerst werden für die Rohdaten bereits fertige Methoden zur Datenfilterung und Windfeldrekonstruktion in MATLAB angewendet. Außerdem sollen die gefilterten Messdaten mittels statistischen Algorithmen ausgewertet werden. Im Folgenden können die geländeabhängigen Strömungsphänomene abgeleitet und analysiert werden.

Im weiteren Schritt werden die visualisierten Ergebnisse mit der Topographie des Standortes verglichen, sodass der Zusammenhang zwischen dem Gelände und den Windgeschwindigkeitsänderungen erkennbar wird.

2 Grundlagen

2.1 Lidar-Messtechnik

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, als Laser erfunden wurde, hat die Lidar Messtechnik ihren Ursprung [1].

Das Messprinzip, des im Rahmen dieses Projektes verwendeten Lidar, basiert auf dem Doppler Effekt und ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. Mehrere Laserstrahlen werden vom Gerät ausgesandt, die von den mit dem Wind bewegten Luftpartikeln, frequenzverschoben zurückgestreut werden. Aus der Frequenzdifferenz zwischen dem Ausgangs- und Eingangssignal kann die Geschwindigkeit der Luftpartikel abgeschätzt werden. Da die Teilchengröße im Bereich von $1\mu\text{m}$ liegt, wird angenommen, dass sie sich mit der Windgeschwindigkeit bewegen [1]. Das Lidar misst jedoch die Windgeschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung, Line Of Sight (los). Durch die Windfeldrekonstruktion kann die tatsächliche Windgeschwindigkeit bestimmt werden [2], siehe Kapitel 2.3.

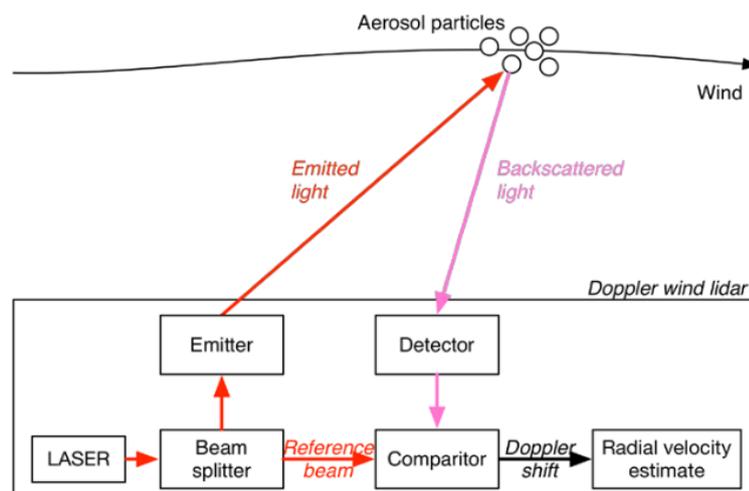


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Doppler Lidar [9]

Doppler Lidar ist ein Fernerkundungsverfahren, das seinen Einsatz in der Atmosphärenforschung, in der Luft- und Raumfahrttechnik: im Bereich der Flugsicherheit am Flughafen und als ein Bordgerät im Flugzeug gefunden hat.

In der Windenergiebranche wird das Lidar als boden- und gondelgestütztes Windmesssystem angewendet. Mit der raschen Entwicklung der Windenergie werden die WEAs immer größer. Da die Messmasten für größere Messhöhen ungünstig sind, kommen die gondelgestützten Lidargeräte immer häufiger zum Einsatz. Durch das Wissen tatsächlicher Einströmung des Windfeldes auf den gesamten Rotor kann das Leistungsverhalten überwacht und die Regelung von WEAs angepasst werden. Die Praxis zeigt, dass die bodengestützten Messgeräte sich besser für Standortgutachten eignen, als die teuren Messmasten. Ein weiteres Potenzial besitzen die Messsysteme für Windmessungen zur Wettervorhersage, insbesondere für Kurzfristvorhersagen. Die zeitlich und räumlich hochaufgelösten Messdaten liefern Information über die Entwicklung des Windfeldes. Dank Lidar können unterschiedliche Strömungsphänomene erfasst werden. Zum Beispiel in Windparks werden die Nachlaufeffekte durch die Lidarmessdaten ersichtlich [3].

2.2 Datenfilterung

Die Bearbeitung der Rohdaten beginnt mit einer Filterung, um gültige und ungültige Daten zu identifizieren. Die Rohdaten der radialen Windgeschwindigkeit enthalten fehlerhafte Messwerte, da die Umgebungsbedingungen wie Nebelbildung, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag die Rückstreuungseigenschaften verändern. Dadurch wird die Qualität der Messdaten stark beeinflusst [11].

Dafür benötigte Filtermethoden wurden bereits in einer früheren Thesis [10] am SWE ausgearbeitet und getestet. Eine davon ist der Range-Filter, der im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Die Methode basiert auf dem Algorithmus der Kantendetektion (engl. edge detection) aus der Bildbearbeitung. Wie es in der Abbildung 2.2 zu sehen ist, werden die benachbarten Bereiche voneinander getrennt, wenn eine lokale Änderung in der Bildintensität detektiert wird. Im Gegensatz zu anderen Filtern weist die Range-Methode eine bessere Qualität der gefilterten Daten, einen geringeren Informationsverlust und eine höhere Rechengeschwindigkeit auf [10].

Der Range-Filter bestimmt innerhalb eines bereits definierten Fensters die

Differenz zwischen maximalen und minimalen Messwerten der Radialwindgeschwindigkeit. Wenn die Differenz eine vorgegebene Grenze überschreitet, wird der entsprechende Messwert als ungültig gekennzeichnet. Das Ziel ist, die Bereiche mit sprunghaften Veränderungen innerhalb diesen Fensters zu erkennen und zu entfernen [11].

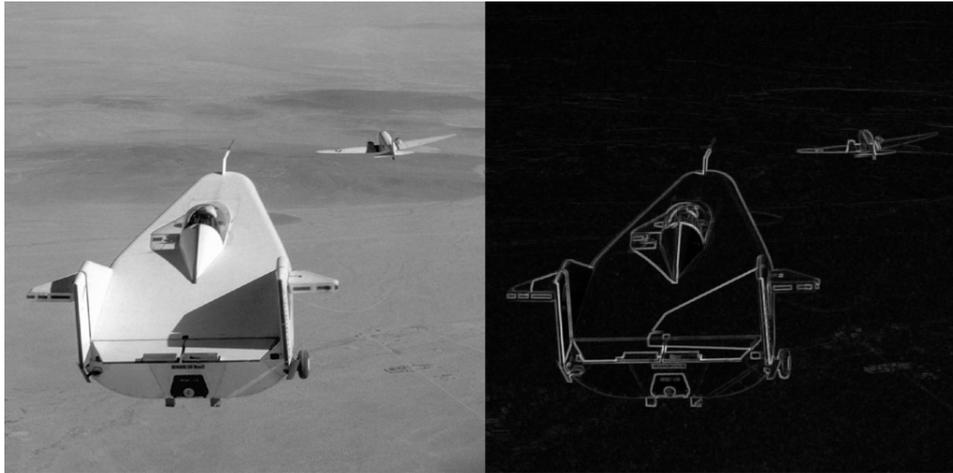


Abbildung 2.2: Beispiel der Kantendetektion in der Bildverarbeitung [18]

2.3 Windfeldrekonstruktion

Der Windvektor setzt sich aus 3D-Komponenten u , v und w zusammen, wie es in Abbildung 2.3 zu erkennen ist. Das Lidarmessgerät misst jedoch nur den auf den Laserstrahl projizierten Windgeschwindigkeitsvektor. Diese Windgeschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung v_{los} (engl. Line-Of-Sight) wird als Radialgeschwindigkeit v_r bezeichnet. Ziel der Windfeldrekonstruktion ist, die tatsächliche Windgeschwindigkeit aus der radialen Geschwindigkeit abzuleiten [2] [9].

Durch die Gleichung (2.3.1) wird ersichtlich, dass die Windgeschwindigkeit indirekt vom Lidar gemessen wird. Die Radialgeschwindigkeit v_{los} wird vereinfacht als Projektion des 3D-Windvektors $[u \ v \ w]$ auf den normierten Strahlvektor $[x_N \ y_N \ z_N]$ dargestellt [3].

$$v_{los} = x_N u + y_N v + z_N w \quad (2.3.1)$$

Der Algorithmus stellt eine Gleichung mit drei Unbekannten dar. Um das Windfeld trotzdem rekonstruieren zu können, wird angenommen, dass der Windvektor in mindestens drei linear unabhängigen Punkten des Messbereiches unveränderlich bleibt, d. h. homogen. Diese Annahme liefert ein lösbares Gleichungssystem mit drei Gleichungen und drei Unbekannten. Jedoch kann die homogene Strömung nur im flachen Gelände angenommen werden. Komplexe Geländestrukturen stellen somit eine Herausforderung dar, die Windvektoren korrekt zu rekonstruieren. Deshalb muss das Rekonstruktionsmodell entsprechend angepasst werden, um die Qualität der Ergebnisse sicherzustellen [15].

Außerdem wird in Rahmen dieser Arbeit die vertikale Komponente w des Windvektors in der Windfeldrekonstruktion vernachlässigt, da nur die Messreihen berücksichtigt werden, die in der horizontalen Ebene durchgeführt werden, siehe Kapitel 3.4. In diesem Fall kann die Windgeschwindigkeit als horizontal bezeichnet werden.

Nach der Windfeldrekonstruktion wird in der Regel eine Plausibilitätsanalyse durchgeführt. Der rekonstruierte Windvektor wird mit der horizontalen Windgeschwindigkeit, die z. B. mit einem Schalenkreuzanemometer gemessen werden kann, verglichen. Somit wird die Gültigkeit des ausgewählten Modells geprüft. Im Folgenden wird auf die Problematik nicht näher eingegangen, da sie nicht im Schwerpunkt dieser Arbeit liegt.

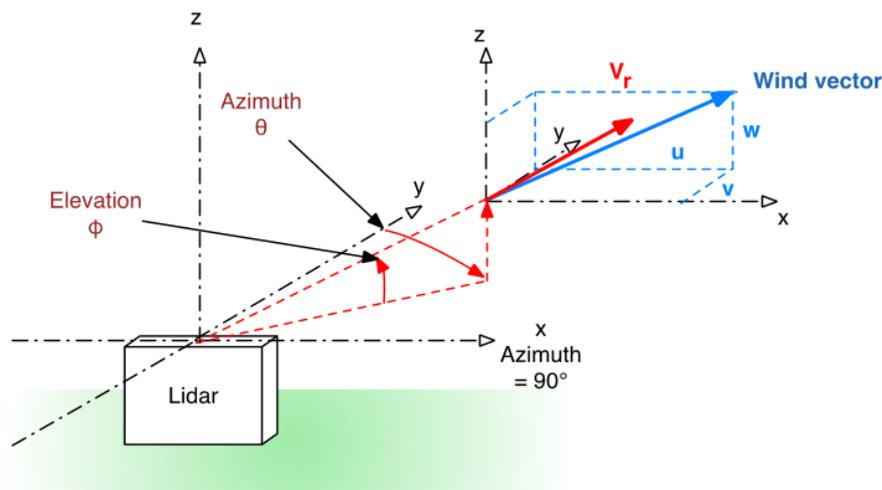


Abbildung 2.3: Verhältnis zwischen dem Windvektor und der Radialgeschwindigkeit eines Lidars [9]

2.4 Turbulenz

Der Wind stellt eine Luftmassenbewegung dar, die durch die Unterschiede des Luftdrucks in der Atmosphäre verursacht wird. Diese Luftmassen werden jedoch durch die Umgebung beeinflusst. Dabei entstehen lokale, tageszeitliche, synoptische und saisonale Schwankungen [5] [4].

Die Turbulenz ist definiert als kurzzeitige, lokale Änderungen der Windgeschwindigkeit und -richtung. In Abbildung 2.4 wird diese graphisch als Luftblasen, die sich in unterschiedlichen Richtungen bewegen, dargestellt. Das Verhältnis der Standardabweichung zur mittleren Windgeschwindigkeit ergibt die Turbulenzintensität (TI) [12].

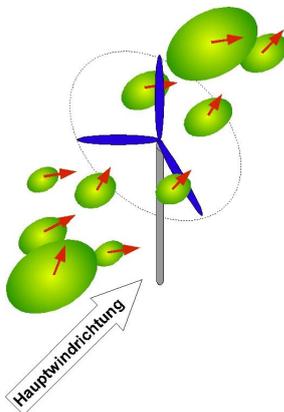


Abbildung 2.4: Atmosphärische Turbulenz [12]

Die atmosphärische Turbulenz entsteht durch thermische und mechanische Einflüsse. Die thermisch induzierte Turbulenz wird durch Temperaturdifferenzen zwischen Erdoberfläche und den Luftmassen (Wärmekonvektion) verursacht. Die mechanisch induzierte Turbulenz wird durch vertikale Windscherung hervorgerufen, die mit der Bodenrauigkeit zusammenhängt [4].

Die Schwankungen der Windgeschwindigkeit, die in Abbildung 2.5 dargestellt sind, unterscheiden sich nach der räumlichen und zeitlichen Größenordnung. Einige atmosphärische Phänomene sind großräumig, bis zu 250 km und haben lange Zeitperioden von einigen Tagen bis zu einem Monat, z. B. Fronten. Die anderen beschränken sich auf wenige Meter mit Zeiträumen von weniger als einer Sekunde bis zu einigen Stunden, so wie kleinräumige Turbulenz [4].

Innerhalb dieser Arbeit sind jedoch nur die Schwankungen von Bedeutung, die aufgrund der komplexen Geländestrukturen auftreten. Die TI hängt von den Mittelungszeiträumen der Messungen ab. Durch das Mitteln der Messdaten werden einige Phänomene nicht mehr erkannt, da ihre Größenordnung auf der Zeitskala überschritten wird. Die orographischen Effekte gehören zu den Prozessen mit Zeitintervallen von einer Stunde bis zu einem Tag und räumlichen Strukturen von mehreren Kilometern. Mit Hilfe der zeitlichen und räumlichen Mittelung werden die Schwankungen der Windgeschwindigkeit, die durch mechanische und thermische Turbulenzen verursacht werden, verringert. Dadurch kann der Einfluss des Geländes in Messdaten erkannt werden.

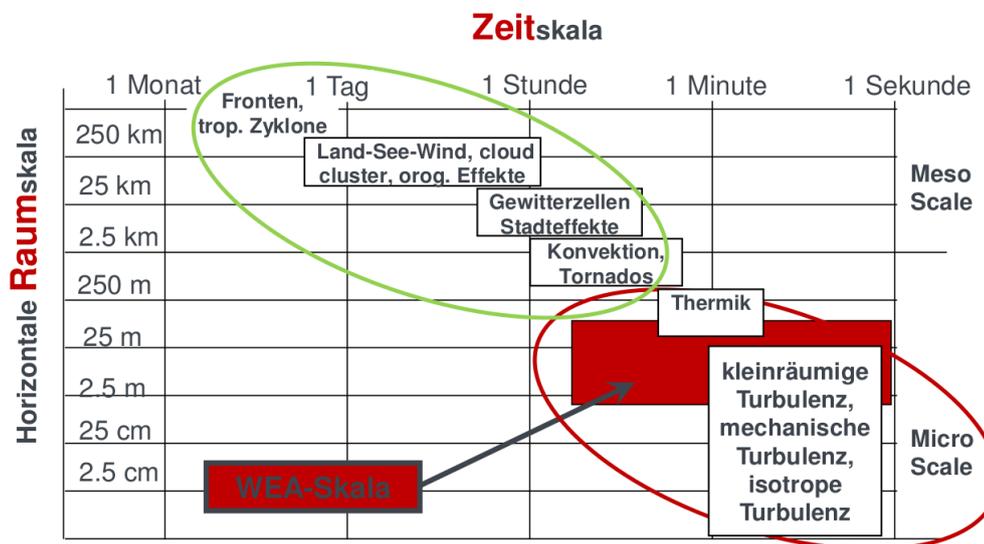


Abbildung 2.5: Räumliche und zeitliche Größenordnung atmosphärischer Phänomene [12]

Turbulenzen werden ebenso durch Geländeneigungen verursacht. Aufgrund von orographischen Effekten (Hänge des Plateaus) entstehen lokale Windzirkulationen. Diese verursachen eine räumlich inhomogene Strömung im bodennahen Bereich, die zu Verzerrungen in den Lidarmessdaten führt. Darüber hinaus beeinflusst eine hohe TI die Messungsgenauigkeit [5].

2.5 Komplexe Strömung und ihre Ursachen

Das Verständnis des Windes ist von großer Bedeutung für die Vorhersage der Leistungsabgabe von WEAs. Genaue Prognosen sind für Netzbetreiber wichtig, um die Leistungsbalance im Netz zu erhalten. Je komplexer der Standort ist, desto schwieriger ist es, die Windentwicklung zu prognostizieren. Da die lokalen Strömungsänderungen die Vorhersagegenauigkeit beeinflussen [4].

Eine komplexe Strömung wird als ein räumlich und zeitlich variabler Fluss definiert und kann auch als heterogene oder inhomogene Strömung bezeichnet werden. Homogen bedeutet, dass der Fluss auf der gleichen Höhe in jedem Punkt konstant ist. Inhomogen bedeutet das Gegenteil [9].

Eine komplexe Strömung hat mehrere Ursachen. Die wichtigsten sind in Abbildung 2.6 zusammengefasst.

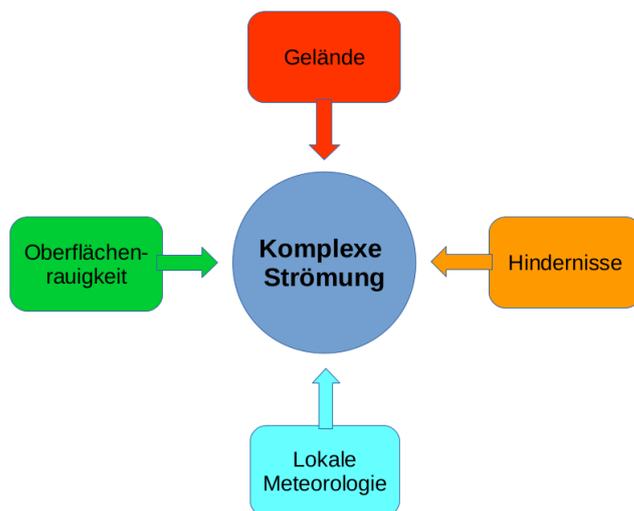


Abbildung 2.6: Ursachen komplexer Strömungen (angelehnt an [9])

Die Oberflächenrauigkeit beschreibt die Landbedeckung inklusive der Vegetation, also den Pflanzenbestand in einem Gebiet. Durch Veränderung des Bedeckungstyps in der Windrichtung tritt Strömungsheterogenität auf, d. h. horizontale und vertikale Schwankungen der Windgeschwindigkeit. Eine erhöhte Rauigkeit, z. B. über einem Wald, verursacht eine ansteigende Windscherung, d. h. die Zunahme der Windgeschwindigkeitsänderung mit der Höhe. Dabei

nimmt die TI zu. Allerdings wird das Windprofil steiler bei geringerer Rauigkeit [9] [4].

Das Vorhandensein jeglicher Art von Hindernissen in der Strömung erzeugt Nachlaufeffekte, die zu Störungen im Messbereich führen können [9].

Die lokale Meteorologie kann in Lidarmessungen heterogene Strömungseigenschaften verursachen. Die Tageszyklen der Windrichtung oder der Oberflächenerwärmung können dazu führen, dass der Windgeschwindigkeitsverlauf nach Tages-, Jahreszeit, Messhöhe und nach Richtung variiert. Es soll jedoch beachtet werden, dass sich die komplexe Strömung über flachem Gelände von der Strömung über komplexem Gelände unterscheidet [9].

Die Abbildung 2.7 zeigt beispielhaft deutliche Strömungsunterschiede zwischen zwei Geländetypen, die durch lokale Wettererscheinungen hervorgerufen werden. In der warmen Jahreszeit tritt die maximale Windgeschwindigkeit im flachen Gelände am Mittag auf, wobei zu dieser Tageszeit für die Wintermonate ein Minimum zu erkennen ist. In der bergigen Landschaft können nachts höhere Windgeschwindigkeiten als zur Mittagszeit beobachtet werden [5].

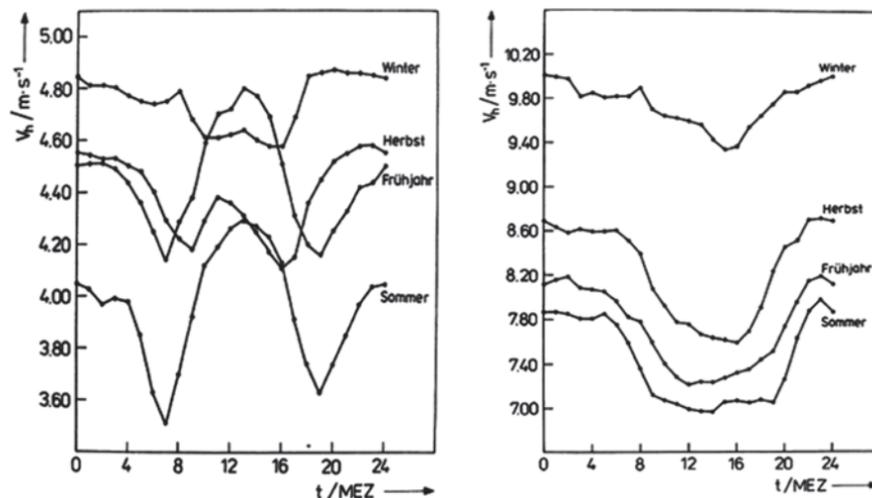


Abbildung 2.7: Tagesgang des Windes zu unterschiedlichen Jahreszeiten (links: Flaches Gelände, rechts: komplexes Gelände) [5]

Im Folgenden wird näher auf den Einfluss der komplexen Geländeformen auf die Strömung eingegangen.

Unter Gelände oder Topographie versteht man unterschiedliche Formen der Erdoberfläche, wie Täler, Grate und Hügel. Nach IEC 61400-12-1 (2005) ist der Begriff komplexes Gelände definiert als: Die Geländeumgebung, die sichtbare Änderungen der Topographie und Geländehindernisse aufweist und eine Strömungsdeformation verursachen kann [9].

Abbildung 2.8 zeigt, wie das Windprofil vom komplexen Gelände beeinflusst wird. Auf dem Hügel wird der Wind bei einer geringeren Geländeneigung beschleunigt und das Windprofil ist dadurch steiler [4]. Bei starker Geländesteigung ab 30 % kann es auf der vom Wind abgewandten Seite (Leeseite) des Hügel zur Abbremsung und darüber hinaus zur Ablösung der Strömung kommen. In manchen Fällen kann die Windgeschwindigkeit mit der Höhe sinken. Die kritische Neigung ist jedoch von Oberflächenrauigkeit und der atmosphärischen Stabilität abhängig. Die Größe der turbulenten Ablöseblase ist von der Krümmung und Steigung des Hügel, dem Temperaturprofil und der Rauigkeit abhängig. Sie führen zu hohen Schwankungen der Windgeschwindigkeit [9], [4].

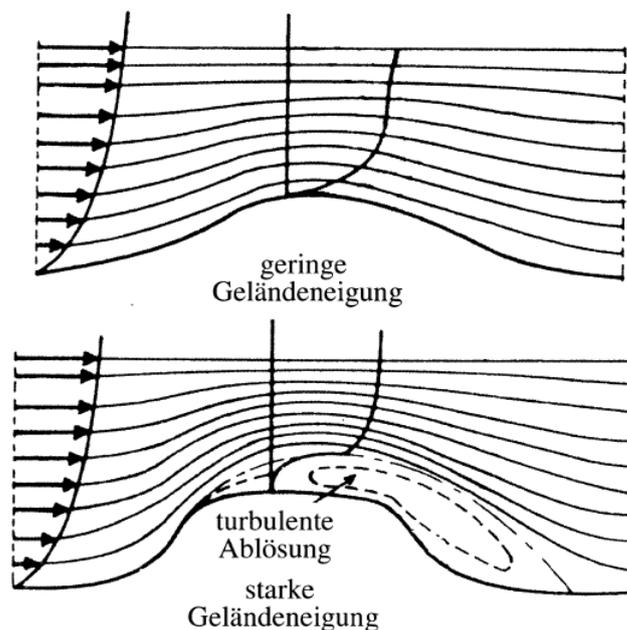


Abbildung 2.8: Einfluss des Geländes auf das Windgeschwindigkeitsprofil [4]

Die Geländeformen verursachen inhomogene Strömungen, d. h. räumlich nicht konstante (ortsabhängige) Strömungsfelder. Hinter den Hindernissen wird die Windströmung bei starker Geländesteigung (steiler Abhang) abgebremst und abgelöst. Auf sanften Hügeln mit einer geringeren Geländeneigung erhöht sich die Windgeschwindigkeit. Infolge von Strömungsabrissen entstehen lokale Windwirbel, die zu hohen Schwankungen der Windgeschwindigkeit führen. Wirbel sind der Hauptbestandteil komplexer turbulenter Strömungen [9].

Die Modelle für Windfeldrekonstruktion, siehe Kapitel 2.3, sind unter der Annahme gültig, dass der horizontale Fluss homogen ist. Eine Verzerrung tritt dann auf, wenn diese Annahme aufgrund einer durch die Topographie, meteorologische Ereignisse, die Rauigkeit oder ein Hindernis verursachten Strömungsänderung, nicht gültig ist [9]. Die Topographie übt einen großen Einfluss auf die Windmessdaten aus. Die Auswirkungen lassen sich schwer erfassen. Jedoch ist eine möglichst genaue Vorhersage der Windbedingungen für die Auslegung und Betriebsführung von Kombikraftwerken und Speichertechnologien erforderlich.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt in der Untersuchung des Geländeeinflusses auf die Strömung.

3 Messkampagne

3.1 Messstandort

Etwa 50 km von Stuttgart zwischen Stötten und Schnittlingen nahe Geislingen an der Steige (Schwäbische Alb) erstreckt sich der Stöttener Berg (Abbildung 3.1). Die genauen Koordinaten vom Standort sind $48,664^\circ$ Breite und Länge $9,865^\circ$ auf einer Höhe von 735 m über dem Meeresspiegel. Das Lidarmessgerät befindet sich in einer Höhe von 91 m über dem Boden auf einer Plattform des Fernmeldeturms und zeigt entgegen der Hauptwindrichtung.

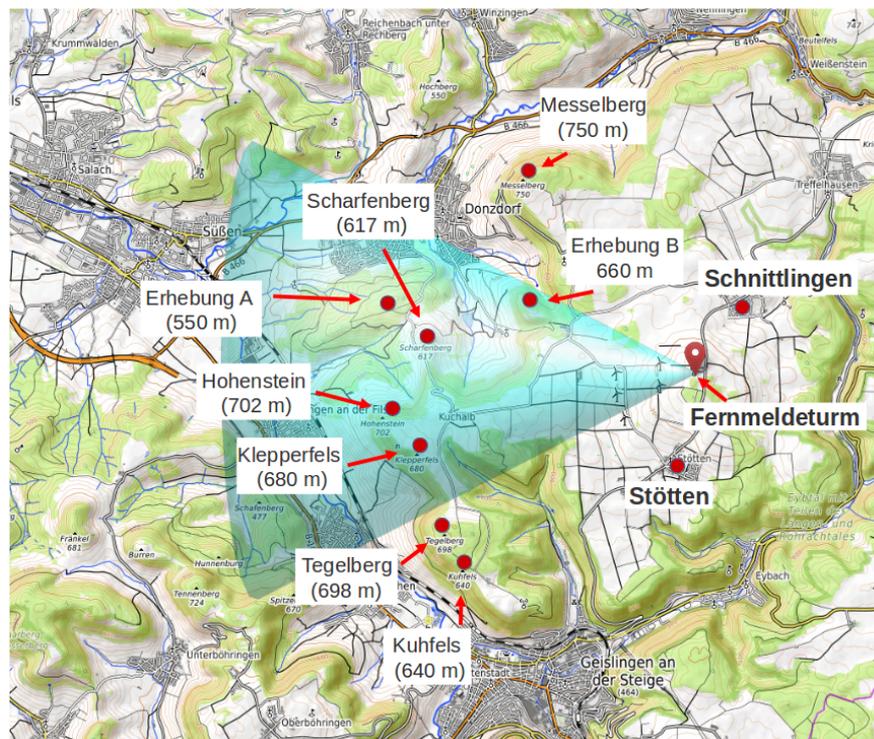


Abbildung 3.1: Topographische Darstellung des Messstandortes (OpenTopo-Map) mit Lidar-Messtrajektorie

In Abbildung 3.1 wird deutlich, dass es sich hier um ein komplexes Gelände handelt. Das große steilkantige Hochplateau umgeben vom Albtrauf erstreckt sich von Süden nach Norden. Im nördlichen Tal hinter der Steilkante befinden sich einige Ortschaften. Auf dem Plateau ist der Stöttener Berg von Ackerland und einigen WEAs umgeben. Östlich grenzt das Plateau ans Roggental, in der die Eyb fließt. Im Süden schneiden sich zwei Längstäler vom Geislinger Talkessel in die Hochebene ein. Die Messtrajektorie, die auf der Abbildung transparent blau dargestellt ist, ist nach Westen ausgerichtet. Dort ist das Vorland der Mittleren Schwäbischen Alb mit einer großen Bergkette, über die der Hauptwind strömt. Am Rande des Plateaus, westlich und südwestlich vom Messstandort, befindet sich eine weitere Bergreihe: Scharfenberg (617 m), Hohenstein (702 m), Klepperfels (680 m), Tegelberg (698 m), Kuhfels (640 m) und Erhebung A (550 m). Im Nordwesten hinter der Steilkante erstrecken sich die Stadt Donzdorf am Messelberg (750 m), Erhebung B (660 m) und die Stadt Süssen. Durch die Lage am Albtrauf weist die Umgebung eine abwechslungsreiche Landschaft auf: Täler, Hügel, Bergketten, relativ flache Ebenen, bebauten Gebiete, Felder, Wälder usw. Durch das bergig-komplexe Gelände werden die Strömungseffekte verursacht, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

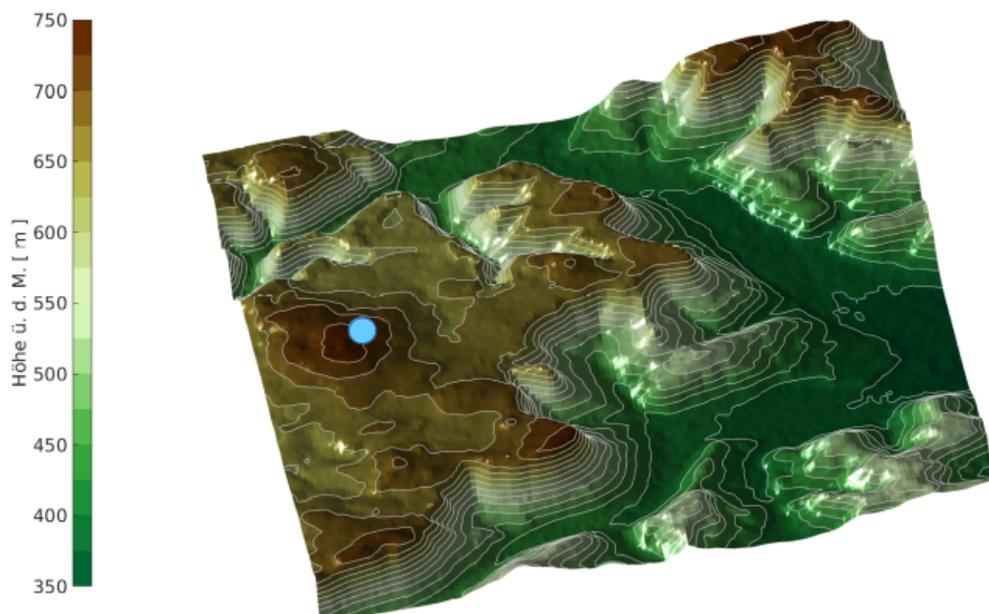


Abbildung 3.2: Topographiemodell, blauer Punkt: Position des Lidargerätes

Unter Zuhilfenahme des 3D-Topographiemodells, das den Geländeverlauf repräsentiert und in der Abbildung 3.2 mittels MATLAB und SRTM-Daten dargestellt ist, kann das Terrain hinsichtlich der Höhenunterschiede betrachtet werden. Daraus lässt sich erkennen, dass die Höhenangaben von 350 m bis 750 m über dem Meeresspiegel variieren. Das Modell ermöglicht, einen gesamten Überblick über die Geländeformen und dadurch ein realistisches Landschaftsbild zu verschaffen. Mit Hilfe von dem Geländemodell kann im Folgenden eine Aussage über dem Geländeeinfluss auf Lidarmessungen getroffen werden.

3.2 Windrichtung am Standort

Vom SWE wurde die Windrichtungsverteilung zur Verfügung gestellt, die in der Abbildung 3.3 dargestellt ist. Dabei zeigt sich, dass der Wind mit größerer Wahrscheinlichkeit aus Westen und Westnordwesten kommt, das entspricht der folgenden Gradzahlen: 270°, 285° und 300°. Das Messgerät ist in die Hauptwindrichtung ausgerichtet und scannt den Bereich zwischen 250° und 290° ab. Des Weiteren zeigt das Diagramm eine Farbskala, mit deren Hilfe die Größe der Windgeschwindigkeit beurteilt werden kann.

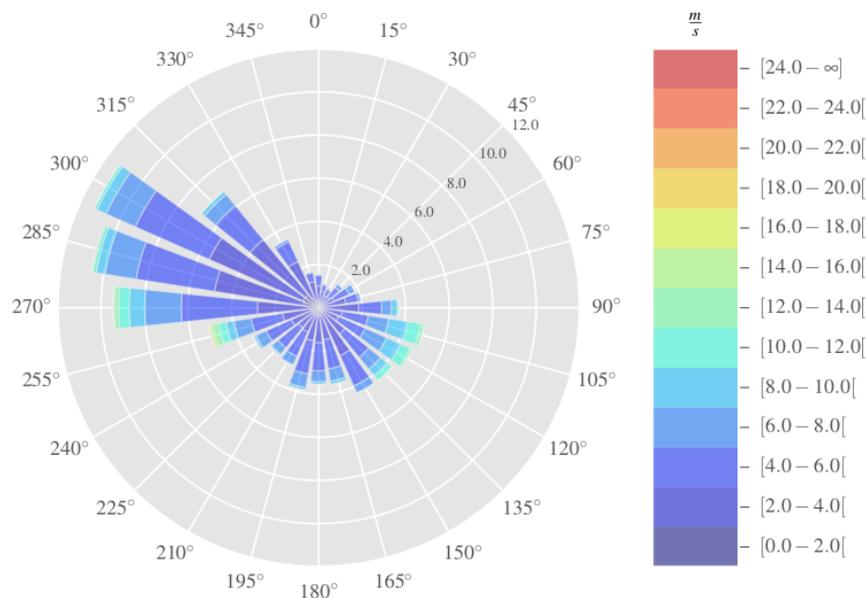


Abbildung 3.3: Windrose

Die Information über Windrichtungen ist für diese Arbeit von großer Wichtigkeit, da sich je nach Windrichtung unterschiedliche Strömungsphänomene ergeben können. Im weiteren Kapitel werden die Messdaten nach Windrichtungen statistisch untersucht, um glaubwürdige Ergebnisse zu erzielen.

3.3 Long-Range Lidar

Im Rahmen der Messkampagne wurde das Lidarmessgerät Long-Range Stream Line XR des Herstellers HALO Photonics verwendet. In Abbildung 3.4, die vom SWE zur Verfügung gestellt wurde, ist das Gerät auf der Plattform des Fernmeldeturms zu sehen.



Abbildung 3.4: Long-Range Lidar: Stream Line XR

Das Gerät benutzt ein gepulstes Verfahren. Dabei werden die Pulssignale ausgesandt, die mit Lichtgeschwindigkeit eine Messreichweite bis zu zehn km erreichen können. Der Vorteil dieses Verfahren ist, dass die Messwerte innerhalb eines Laserstrahles in gleichen Abständen zur gleichen Zeit gemessen werden. Zwischen den einzelnen Strahlen benötigt das Gerät jedoch noch Zeit, um die

gemessenen Daten auszuwerten und abzuspeichern. Dank komplexerer Signalerfassung und -Verarbeitung bleiben die Messvolumina mit der Entfernung in der Länge unverändert, was eine große Messreichweite gewährleistet. Das Gerät misst mehrere Frequenzdifferenzen des emittierten Strahles innerhalb eines Messvolumens und mittelt sie, woraus ein Messpunkt entsteht [3]. Eine ganze Messtrajektorie enthält tausende Messwerte, die innerhalb von einigen Minuten gemessen werden. Somit misst das long-range Lidargerät zeitlich und räumlich sehr hochaufgelöst.

Dieses Gerät kann eingesetzt werden, um die lokale Änderungen des Windfeldes im komplexen Gelände durch die flächendeckende Messungen zu erfassen und Kurzzeitvorhersagen zu ermöglichen. Damit kann eine Aussage über die Leistungsabgabe der WEAs getroffen werden.

3.4 Messaufbau

Abbildung 3.5 zeigt zwei Ansichten des Messaufbaus des verwendeten Lidargerätes auf der Fernmeldeturmplattform. In der linken Abbildung ist die Seitenansicht zu sehen. Im Falle, dass die Messung in einer vertikalen Ebene durchgeführt wird, wird der Öffnungswinkel der Messtrajektorie aus der horizontalen Ebene heraus als Elevation bezeichnet.

In der rechten Abbildung ist die Draufsicht von einer in der horizontalen Ebene durchgeführte Messtrajektorie dargestellt. In diesem Fall wird der Öffnungswinkel als Azimutwinkel definiert.

Die gesamte Messtrajektorie, die das Gerät abtastet, unabhängig davon, in welcher Ebene die Messung durchgeführt wird, kann als ein Scan bezeichnet werden. Ein Scan setzt sich aus mehreren Strahlen zusammen. Wobei ein Strahl aus Range Gates besteht, die als fortlaufende Entfernungsschritte definiert sind. Ein Scan besitzt eine bestimmte Range Gate Länge (range gate length), d. h. die Entfernungslänge oder den Abstand zwischen einzelnen Messpunkten. Die radiale Windgeschwindigkeit wird für einzelne Range Gates ausgewertet. Durch die Anzahl von Range Gates (number of range gates) und die Range Gate Länge wird die maximale Messreichweite bestimmt.

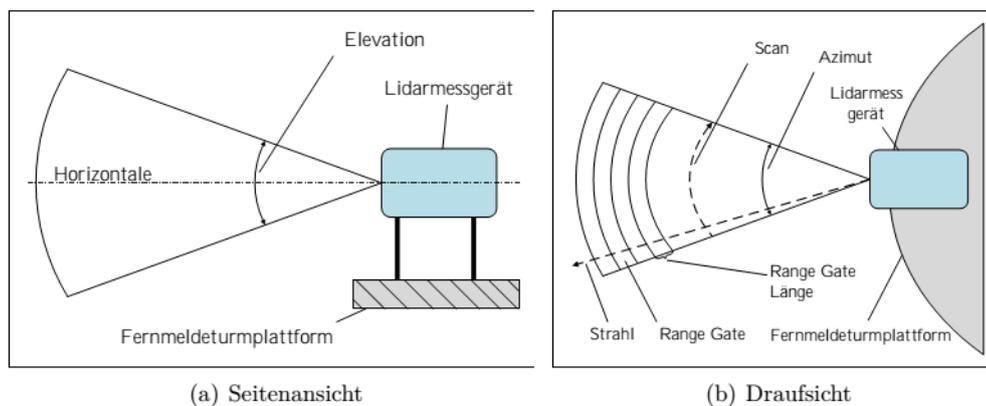


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Messaufbaus [11]

Das Lidarmessgerät ist in der Lage verschiedene Messtrajektorien abzuscanen, z. B. eine horizontale (Elevation = 0°), sowie eine vertikale (Azimut = 0°). Außerdem kann die Messung durch Berücksichtigung von beiden Winkeln als dreidimensional eingestellt werden.

3.5 Datengrundlage

Von 01.03.2016 bis 31.10.2016 wurden die Lidarmessungen ausgewertet. In diesem Zeitraum sind unterschiedliche Messtrajektorien gelaufen. Bei den meisten wird der Elevationswinkel konstant auf 0° gehalten. Der größte Teil der Scans enthält fünf oder 41 Strahlen. Der Azimutwinkel wurde die meiste Zeit auf 40° bei 0° Elevation eingestellt. Zeitweise wurde auch dreidimensional gemessen. Die Trajektorien sind mit 167, 100 und 111 (vom Oktober bis November) Range Gates gelaufen. Dabei beträgt die Range Gates Länge 60 oder 90 m. Die Pulsanzahl variiert zwischen 5000 und 60 000, ist jedoch für die Auswertungen in dieser Arbeit nicht relevant.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde beschlossen, die Menge an Messdaten zu begrenzen und nur eine Messtrajektorie mit 41 Strahlen und 167 Range Gates zu untersuchen, die schematisch in der Abbildung 3.6 dargestellt ist. Es ist von Vorteil, für die Messdaten mit gleichen Parametern ein Algorithmus zu implementieren, da er für alle Daten schwer anwendbar wäre.

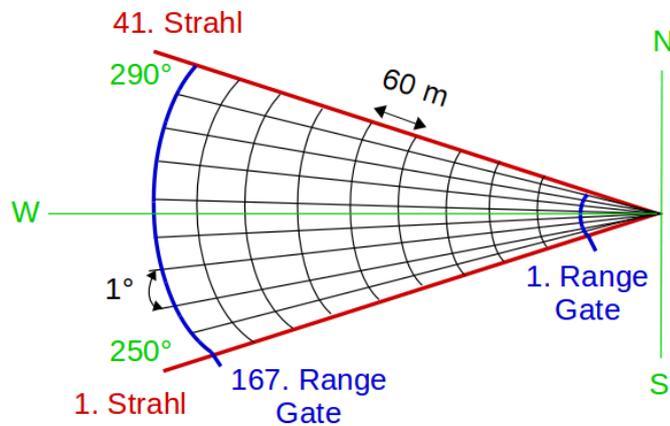


Abbildung 3.6: Untersuchte Messtrajektorie

In Tabelle 3.1 sind die für die Thesis relevante Parameter der ausgewählten Trajektorie aufgelistet. Dabei ist zu beachten, dass vom gesamten Messzeitraum 4 Monate und 11 Tage an Messdaten übrig bleiben, an denen diese Messtrajektorie durchgeführt wurde.

Tabelle 3.1: Relevante Messparameter

Strahlanzahl	41
Min.Azimuth	250°
Max.Azimuth	290°
Öffnungswinkel	40°
Elevation	0°
Anzahl Range-Gates	167
Länge Range-Gates	60 m
Messtage	4 Monate und 11 Tage

4 Algorithmen der Datenverarbeitung

4.1 Methoden

Unaufbereitete Daten sind von geringem Nutzen, um eine Aussage über den Geländeeinfluss auf die Daten treffen zu können. Damit nachvollziehbare Ergebnisse entstehen, werden die Rohdaten entsprechend aufbereitet. In Abbildung 4.1 ist die Reihenfolge der Methoden zur Datenverarbeitung und -auswertung dargestellt, die in dieser Arbeit angewandt werden. Dabei werden einzelne Arbeitsschritte im Folgenden näher beschrieben. Die Verarbeitung und Auswertung der Messdaten wird mit Hilfe des Programms MATLAB vorgenommen.

Zuerst werden die Rohdaten nach Messparameter aussortiert. Wie in Kapitel 3.5 beschrieben wird, sind nicht alle Messreihen aus der Messkampagne für diese Arbeit relevant. Danach werden die Daten mit einer Range-Methode gefiltert, siehe Kapitel 2.2. Dann wird das Windfeld rekonstruiert, wie es bereits im Kapitel 2.3 erwähnt wird. Vom SWE sind die Algorithmen für den Range-Filter und die Windfeldrekonstruktion ausgearbeitet und die Ergebnisse zur Verfügung gestellt. Anschließend werden die Messdaten räumlich, zeitlich gemittelt und statistisch ausgewertet. Die räumliche Datenverarbeitung wird im Folgenden näher beschrieben. Zum Schluss können die Daten visualisiert und in Hinblick auf lokale, durch das Gelände verursachte Geschwindigkeitsänderungen, ausgewertet werden.



Abbildung 4.1: Vorgehensweise bei der statistischen Auswertung der Lidar-daten in Hinblick auf lokale Geschwindigkeitsänderungen

4.2 Datenanordnung in Matlab

MATLAB verwendet eine Programmiersprache, die zur Formulierung mathematischer Probleme ausgelegt ist. Informationen und Daten werden in Matrixschreibweise dargestellt [18]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Messdaten als Matrizen in MATLAB verarbeitet. Die Abbildung 4.2 zeigt an, wie die Lidardaten in Matrizenform aufgebaut sind.

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, besitzt eine Messtrajektorie eine bestimmte Anzahl von Strahlen und Range Gates, nämlich 41 Strahlen und 167 Range Gates. Jedes einzelne Matrixelement, das auf dem Bild als eine blaue Zelle dargestellt ist, enthält einen Wert der gemessenen Windgeschwindigkeit, dem eine Strahl- und Range Gate-Nummer zugeordnet werden kann. In Matrizen erfolgt die Anordnung von Daten in Zeilen und Spalten. Dabei entspricht jede einzelne Zeile einem Strahl und die Spalten den Range Gates. Somit wird ein gemessener Scan in Matlab durch eine 41×167 Matrix repräsentiert.

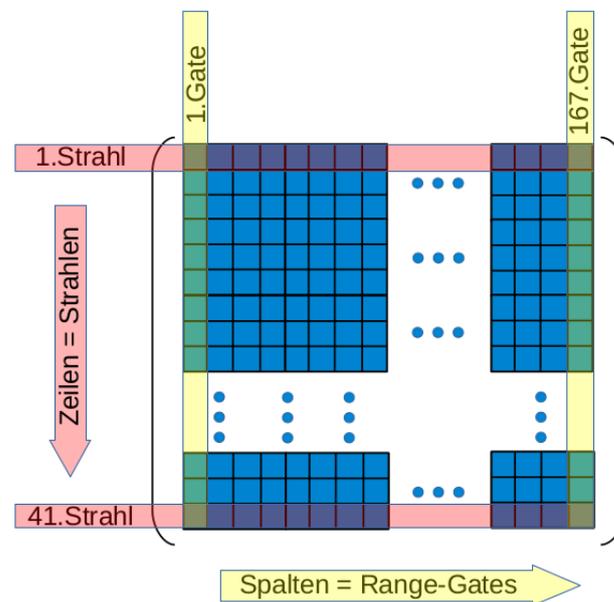


Abbildung 4.2: Anordnung der Winddaten

4.3 Diskussion

Es wird in früheren Kapiteln erwähnt, dass solche Themen wie komplexes Gelände, Lidarmessdaten und Strömungsphänomene im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen. Sie hinterlassen einige Fragen, die hier beantwortet werden. Wie wird die Strömung durch die Geländestruktur auf der schwäbischen Alb beeinflusst? Ist es möglich, die geländeabhängigen Strömungseffekte in den Messdaten zu erkennen? Wenn ja, inwieweit? Um dies zu erforschen, wird zunächst im Rahmen dieser Arbeit eine Raster-Methode zur Datenverarbeitung entwickelt. Anschließend werden die durch diese Methode erzielten Ergebnisse zeitlich gemittelt, statistisch über größere Zeiträume untersucht und mit der Geländetopographie verglichen, um somit eine Aussage über deren Zusammenhang treffen zu können.

Die Lidardaten sind zeitlich und räumlich hochaufgelöst. Es existiert eine große Menge an Daten, die verarbeitet werden muss. Die Länge von Range-Gates, d. h. der Abstand zwischen den Messpunkten auf jedem Strahl beträgt 60 m, siehe Kapitel 3.5. Dabei sind die Laserstrahlen sehr dicht beieinander. Der Winkel zwischen den Strahlen beträgt 1° . Bei hoher zeitlicher Auflösung der

Rohdaten sind vor allem die Windgeschwindigkeitsschwankungen ersichtlich, die durch kleinräumige Turbulenzen in den Zeiträumen von weniger als eine Sekunde bis zu einigen Minuten verursacht werden, siehe Kapitel 2.4. Dadurch sind die Schwankungen, die in einer größeren Zeit- und Raumskala auftreten und durch die Topographie verursacht werden, in den Messdaten nicht zu erkennen. Dies hat zur Folge, dass eine zeitliche, sowie eine räumliche Mittelung der Rohdaten unerlässlich ist.

4.4 Algorithmen zur räumlichen Datenverarbeitung

4.4.1 Grundidee

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird ein Algorithmus zur räumlichen Datenverarbeitung mittels MATLAB entwickelt, damit die Korrelation zum Gelände aufgestellt werden kann. Die Grundidee ist somit, die hochaufgelösten Windgeschwindigkeitsdaten in einer räumlich übersichtlichen Form von einem Raster darzustellen.

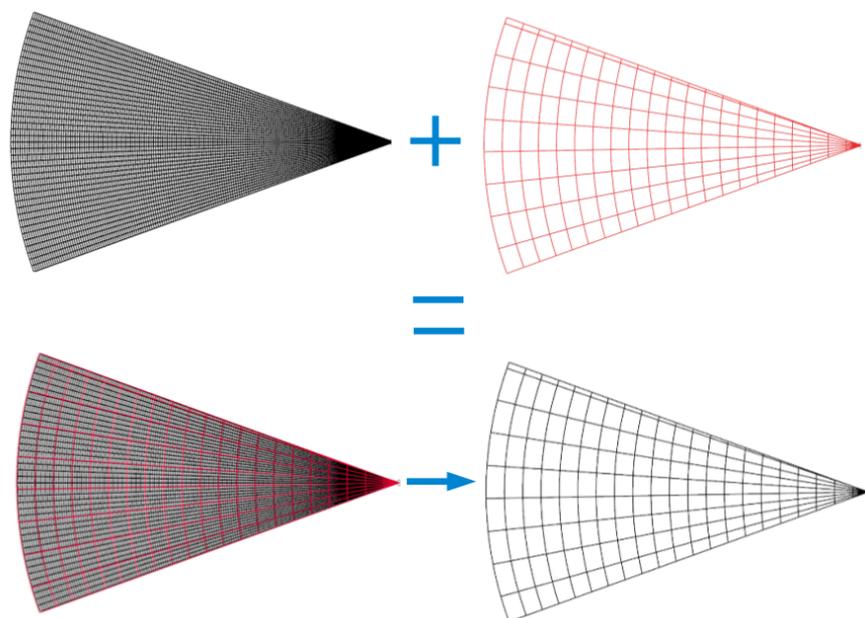


Abbildung 4.3: Entwicklung des Rasters

In Abbildung 4.3 ist das Grundprinzip der Rasterentwicklung dargestellt. Auf dem oberen Bild links ist die Messtrajektorie, die 41 Strahlen und 167 Range-Gates enthält, dargestellt. Die Messdaten besitzen bereits ein sehr feines Raster, das jedoch schwer zu erkennen ist, weil die Daten räumlich hochaufgelöst sind. Die Daten stellen somit eine Grundform dar, für die ein Rastermuster angepasst wird, wie auf dem Bild oben rechts. Im nächsten Schritt wird die Rasterform auf die Daten angewandt, indem die Grundform in Rasterzellen aufgeteilt wird (Bild unten links). Dadurch ergeben sich Daten, die eine gut erkennbare Rasterstruktur aufweisen (Bild unten rechts). Jede Rasterzelle besitzt eine räumlich gemittelte horizontale Windgeschwindigkeit und entsteht aus mehreren Range-Gates und Strahlen. Im Folgenden werden die einzelnen Entwicklungsschritte näher beschrieben.

4.4.2 Ein- und Ausgabedaten

Unter Zuhilfenahme von MATLAB wird eine Funktion implementiert, die eine Rasterform erschafft und sie auf die Windgeschwindigkeitsdaten anwendet. In Abbildung 4.4 wird die Funktion durch die Ein- und Ausgabedaten erst von außen betrachtet. An die Rasterfunktion in MATLAB werden somit die Lidardaten, die als Grundform für die Rasteranwendung verwendet werden, und die Rasterparameter, die in einer Konfigurationsfunktion frei einstellbar sind, übergeben. Nach der Datenverarbeitung ist die Ausgabe der Funktion (engl. output) die Windgeschwindigkeitsdaten in einer erkennbaren Rasterform, wie im unteren Teil der Abbildung 4.4.

Tabelle 4.1: Eingabedaten

Lidardaten	Parameter
Endzeit	Strahlanzahl/Zelle
Strahlanzahl/Scan	Anzahl der Range-Gates/Zelle
Anzahl Range-Gates/Scan	
Strahlzeit	
Windfeld [u,v]	

Die Eingabe der Funktion (engl. input) sind die Daten, die zur Ausführung der Funktion benötigt werden und aus der Tabelle 4.1 entnommen werden

können. Die Endzeit gibt an, wann die Messtrajektorie endet, d. h. zu welchem Zeitpunkt der letzte Strahl im Scan vom Gerät ausgesandt wird und somit wann ein Scan beendet wird. In der Inputvariable Strahlzeit wird abgespeichert, wann die Windgeschwindigkeiten entlang eines Strahls gemessen sind. Somit wird jedem Strahl ein Zeitstempel zugeordnet. Allerdings wird der Wind in allen Messpunkten eines Strahls zur selben Zeit gemessen. Für die Implementierung wird außerdem die Anzahl an Strahlen und Range-Gates pro Scan benötigt. Die Windgeschwindigkeitsvektoren u und v sind in der Funktion unerlässlich, da sie in weiteren Schritten in Hinblick auf lokale Geschwindigkeitsänderungen ausgewertet werden.

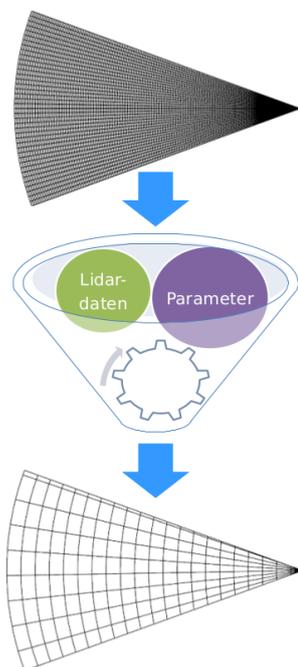


Abbildung 4.4: Ein- und Ausgabe der Rasterfunktion

Allerdings muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass die Menge an Messdaten, die in die Funktion eingehen kann, begrenzt ist. Um die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen, werden an die Funktion jeweils 10-Minuten-Blöcke aus Lidardaten übergeben. In der Funktion werden die Daten innerhalb eines Blocks in Scans aufgeteilt, damit jeder Scan separat verarbeitet werden kann. Die Parameter enthalten Information über die Anzahl der Range-Gates und die Strahlen in einer Rasterzelle.

4.4.3 Funktionsaufbau

Im Weiteren wird die Funktion von innen betrachtet. In Abbildung 4.5 wird dargestellt, wie die Funktion aufgebaut ist, aus welchen Implementierungsschritten sie besteht.

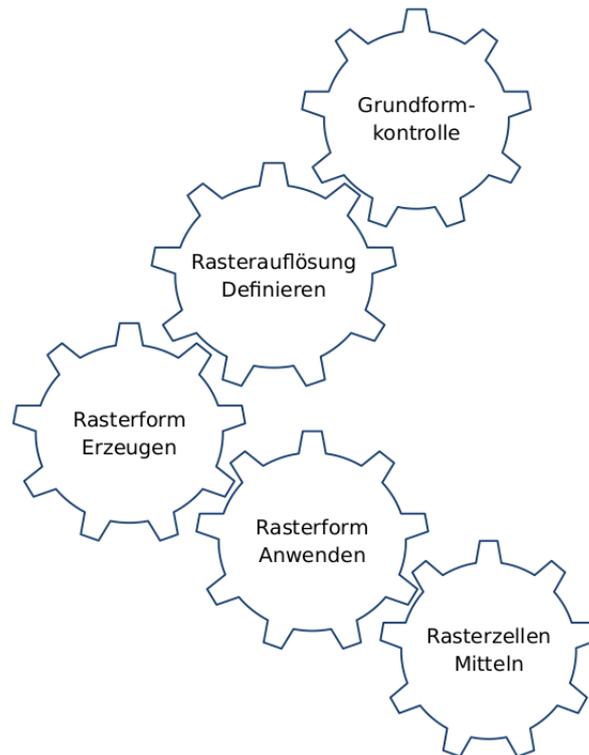


Abbildung 4.5: Implementierungsschritte

Zunächst wird eine Grundformkontrolle durchgeführt. Die Lidardaten, die an die Funktion übergeben werden, enthalten in den 10-Minuten-Blöcken Scans mit nicht voller Anzahl an Strahlen, d. h. mit weniger als 41 Strahlen, wie es in Abbildung 4.6 zu sehen ist. Meistens enthält der letzte und/oder der erste Scan im Block nur ein Teil der 41 Strahlen. Wenn der letzte Scan im Block nicht alle Strahlen enthält, weil die Strahlzeiten von einigen Strahlen nicht in diesem 10-Minuten-Block liegen, dann gehen die restlichen Strahlen dieses Scans in den nächsten Block über. Dadurch ist der erste Scan im nächsten Block auch nicht voll, da er die restlichen Daten des Scans davor enthält. Folglich werden gleichzeitig so viele Strahlen verarbeitet, wie viele ein Scan enthält.

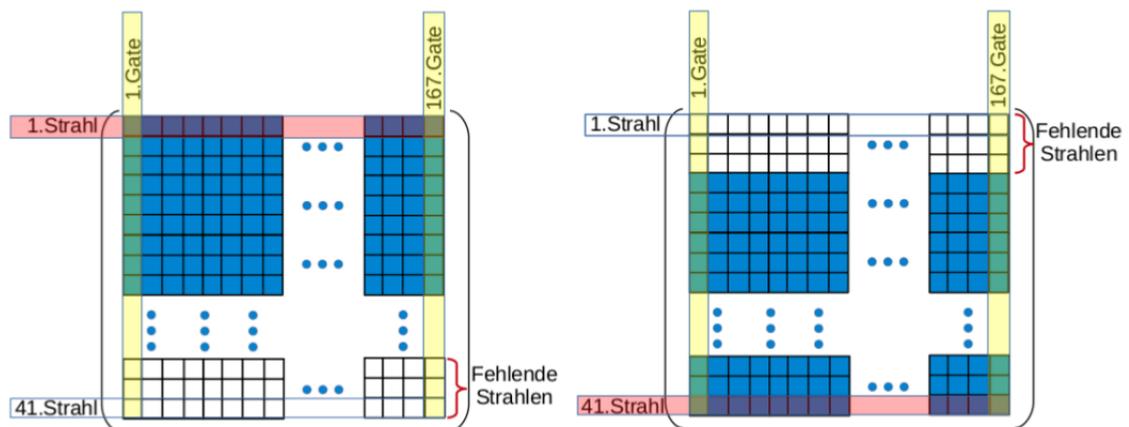


Abbildung 4.6: Matrizen mit fehlenden Strahlen am Ende des Scans und am Scananfang

Die Grundidee für diesen Schritt ist, zu überprüfen, ob die Scans 41 Strahlen enthalten. Anderenfalls muss der leere Teil eines Scans mit undefinierten Werten „Not a Number“ (NaN) [16] ersetzt werden, damit die Grundform mit 41 Strahlen und 167 Range-Gates sich nicht ändert und die weiteren Schritte korrekt durchgeführt werden können. Zunächst wird kontrolliert, ob alle Strahlen im Scan vorhanden sind, indem die Zeilenanzahl der mit Windgeschwindigkeitsdaten gefüllten Matrix mit ursprünglicher Strahlanzahl 41 verglichen wird. In dem Fall, dass diese Bedingung nicht erfüllt ist, wird überprüft, ob die Daten am Anfang oder am Ende des Scans fehlen, damit die NaNs an der richtigen Stelle eingesetzt werden können. Dafür wird die Endzeit des vollen Scans mit 41 Strahlen mit der Strahlzeit des letzten vorhandenen Strahls im Scan verglichen. Wenn die Zeiten sich übereinstimmen, dann ist der letzte Strahl genau der 41. Strahl im Scan. Somit fehlen einige Strahlen am Scananfang, wie in der rechten Matrix der Abbildung 4.6. Anderenfalls sind nicht alle Strahlen am Ende des Scans vorhanden, siehe die linke Matrix.

Als Nächstes wird die Rasterauflösung definiert. Damit ist die Größe einer Rasterzelle im Ausgabe-Raster gemeint. In einer Konfigurationsfunktion kann frei eingestellt werden, wie viele Strahlen und Range-Gates eine Zelle enthalten soll. Die Rastergröße wird als Inputvariable Parameter an die Rasterfunktion übergeben. In Abbildung 4.7 ist beispielhaft eine Rasterzelle mit vier Range

Gates und drei Strahlen dargestellt.

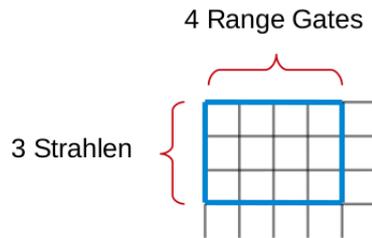


Abbildung 4.7: Rasterauflösung

Mit Hilfe der bereits definierten Rasterauflösung kann nun die Rasterform erstellt werden, wie in Abbildung 4.8. Je nach Rastergröße ergibt sich eine andere Form des Rasters. Diese muss außerdem an die Grundform des Eingangsscans angepasst werden. In Abbildung 4.9 werden Vektoren definiert, durch welche festgelegt wird, wie die Zeilen und Spalten der ursprünglichen Matrix aufgeteilt werden sollen. Die Elemente der Vektoren stellen die bereits definierte Rasterauflösung dar, wobei die Länge der Zellenanzahl entspricht. Für den Fall, dass die Rastergröße die Größe der Ursprungsmatrix überschreitet, wird die Größe der Rasterzellen, die sich außerhalb der Ursprungsmatrix befinden, an die Grenzen der Grundform angepasst.

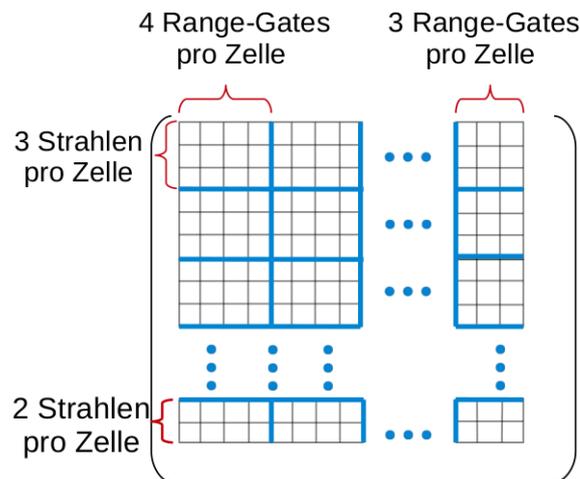


Abbildung 4.8: Fertige Rasterform

Die Zeilen der Matrix (links oben) in der Abbildung 4.9 werden durch den Vektor ohne Rest aufgeteilt. Für die Matrix (rechts oben) kann dieser Vektor nicht mehr angewendet werden, da nur zwei restliche Strahlen in den unteren Zellen vorhanden sind. Deshalb wird die Rasterform an die Grundform angepasst, indem das letzte Element des Vektors von drei auf zwei geändert wird. Die gleiche Vorgehensweise gilt auch für die Aufteilung der Spalten. Der Unterschied zwischen der Matrix (rechts unten) und der Matrix (links unten) ist die Anzahl von Range Gates in den rechten Zellen. Die geänderte Rasterauflösung führt auch dazu, dass das letzte Vektorelement angepasst werden muss.

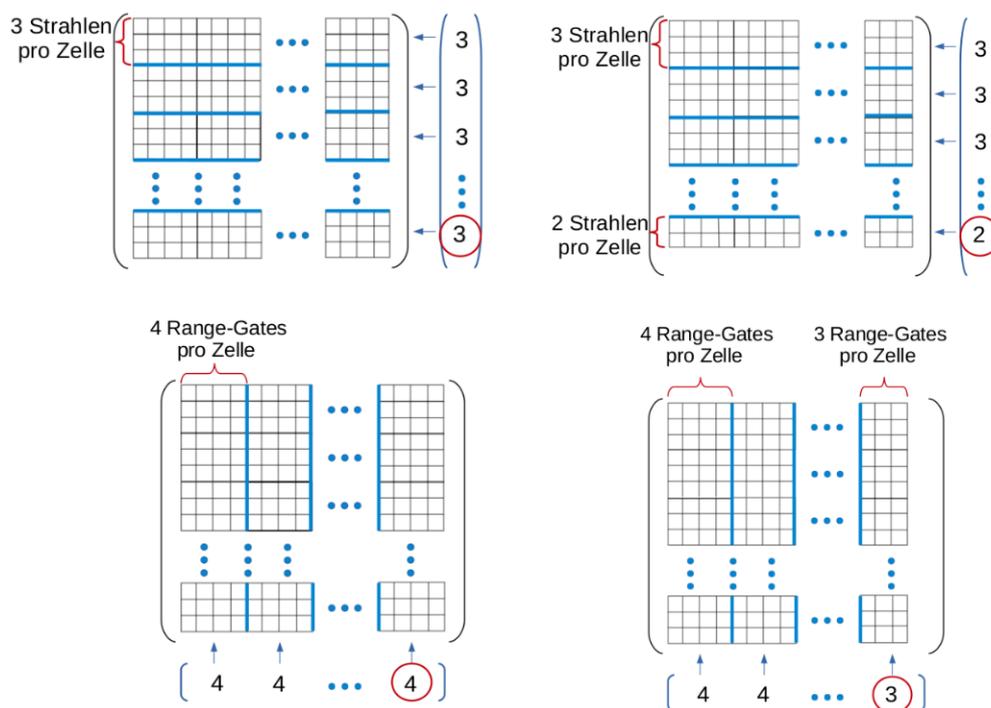


Abbildung 4.9: Erzeugen der Rasterform

Im nächsten Schritt werden die zwei Vektoren für die Zeilen- und Spaltenaufteilung verwendet, um die Rasterform auf die Messdaten anzuwenden. Der Matlab Befehl „mat2cell“ teilt die Ursprungsmatrix in kleineren Matrizen auf [17]. Eine Teilmatrix entspricht einer Rasterzelle. Somit wird der ursprüngliche Scan in Raster eingeteilt. In Abbildung 4.10 ist die Matrix nach der Anwendung der Mat2cell-Funktion dargestellt [17], die die Windgeschwindigkeitswerte enthält und bereits in Raster aufgeteilt ist.

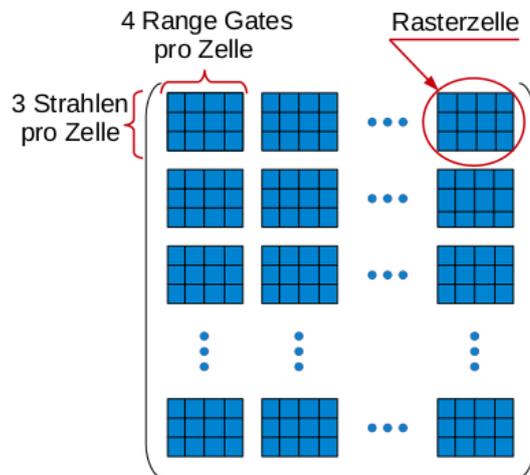


Abbildung 4.10: Anwendung der Rasterform auf die Grundform

Schließlich werden die Windgeschwindigkeitsdaten, die in einer Rasterzelle enthalten sind, räumlich gemittelt, sodass nur ein Wert pro Zelle übrig bleibt. Durch die Einteilung der Grundform in die Teilmatrizen und die räumliche Mittelung der Rasterzellen weisen die Messdaten eine klare Rasterstruktur auf und sind somit für die statistische Auswertung und die Korrelationsuntersuchung vorbereitet. Die Matrix mit gemittelten Rasterzellen, die die Ausgabe der Rasterfunktion, nämlich das Raster darstellt, ist in Abbildung 4.11 zu sehen.

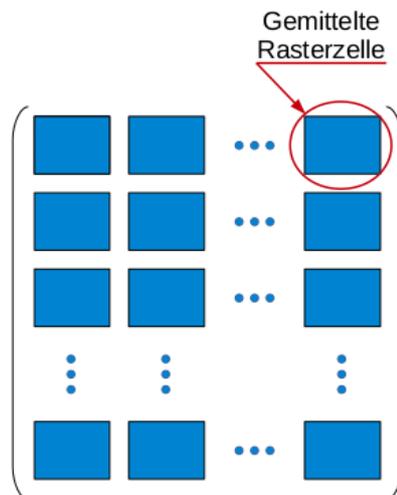


Abbildung 4.11: Ausgabe der Rasterfunktion

5 Statistische Analyse des Topographieeinflusses

5.1 Sortierung der Daten nach Windrichtung

Der Messzeitraum erstreckt sich über mehrere Monate, in welchen der Wind aus unterschiedlichen Richtungen weht. Um die Windgeschwindigkeitsdaten statistisch zu untersuchen, werden diese zuerst nach der Windrichtung sortiert. Die Richtung, aus der die Windströmung fließt, ist für eine Aussage über den Einfluss der Geländestrukturen auf das Windfeld von ausschlaggebender Bedeutung. Je nachdem, aus welcher Richtung der Wind über das Gelände strömt, können sich unterschiedliche Phänomene in der Windströmung ergeben.

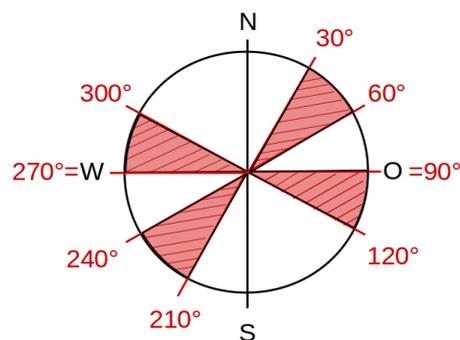


Abbildung 5.1: Windrichtungssektoren

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, liegt die Hauptwindrichtung vorherrschend im westlichen Sektor von 270° bis 300°, welcher in dieser Arbeit untersucht wird. Es werden noch drei weitere Sektoren für die statistische Analyse ausgewählt, die in Abbildung 5.1 rot markiert sind. Der Sektor von 90° bis 120° entspricht der Gegenrichtung zur Hauptwindrichtung. Von 210° bis 240° liegt der weitere Sektor, wobei von 30° bis 60° ihm entgegengesetzt ist. Somit können die Strömungsphänomene aus entgegengesetzten Richtungen nicht nur mit dem Gelände, sondern auch paarweise miteinander verglichen

werden. Deshalb wird zu jedem Windrichtungssektor ein Sektor gegenüber ausgewählt.

Tabelle 5.1: Untersuchte Windrichtungssektoren und Anzahl der Messtage

Windrichtungssektor	Messtage
270° - 300°	31
90° - 120°	11
210° - 240°	5
30° - 60°	2

Die Windrose, welche bereits in Kapitel 3.2 dargestellt ist, zeigt, dass der Wind hauptsächlich aus Westen kommt. Aus dieser Richtung stehen deutlich mehr Daten zur Verfügung im Vergleich zu den anderen Sektoren. In der Tabelle 5.1 sind die statistisch untersuchten Windsektoren und Anzahl der Messtage, an welchen der Wind aus entsprechender Richtung strömte, aufgelistet. Dabei ist zu beachten, dass nur wenige Daten bei den letzten zwei Sektoren vorhanden sind. Deshalb kann hier keine statistisch verlässliche Aussage getroffen werden.

5.2 Analyse der Datenverfügbarkeit

Nachdem die Daten nach vier Windrichtungssektoren sortiert werden, können diese letztendlich statistisch ausgewertet werden. Dabei handelt es sich um die zeitliche Mittelung über die entsprechende Anzahl von Messtagen, wie in der Tabelle 5.1 zu sehen ist.

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, werden durch den Range-Filter fehlerhafte Messwerte identifiziert und aus den Daten entfernt. Somit kann festgestellt werden, dass sich die Anzahl der Messwerte, aus welchen die zeitlichen Mittelwerte gebildet werden, pro Rasterzelle unterscheidet.

In Abbildungen 5.2, 5.3, 5.4 und 5.5 ist die Datenverfügbarkeit der statistisch ausgewerteten Daten für vier Windrichtungssektoren dargestellt. Der prozentuale Anteil von gefilterten Daten, die an 31, 11, 5 bzw. 2 Messtagen vorhandenen sind, kann über den Farbbalken abgelesen werden. Es lässt sich erkennen, dass je weiter die Range Gates von Lidar entfernt sind, umso mehr Messwerte rausgefiltert werden und somit weniger Daten zu Verfügung stehen,

da die maximale Messreichweite von den Umgebungsbedingungen stark beeinflusst wird [11].

Bei Betrachtung der Abbildungen fällt auf, dass es Rasterzellen gibt, die unabhängig von der Windrichtung und der Anzahl von ausgewerteten Messtagen auf allen Diagrammen zu finden sind. Solche Zellen sind hier mit schwarzen gestrichelten Linien markiert und werden als „Blinde Flecken“ bezeichnet. Erfahrungsgemäß kann das Lidar an solchen Stellen die Frequenzverschiebung nicht detektieren und misst somit die Windgeschwindigkeit um 0 m/s. Deshalb erhöht sich durch die Anzahl an fehlerhaften Messwerten die Datenverfügbarkeit. Dieses Phänomen bleibt jedoch bisher unerklärbar und muss mit dem Hersteller des Gerätes besprochen werden.

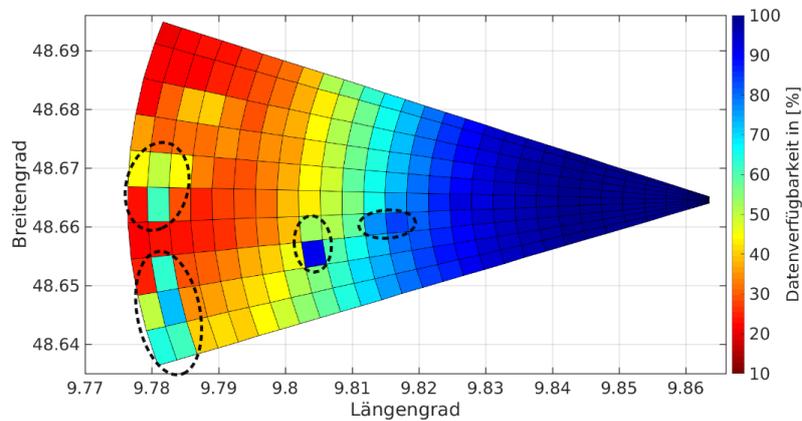


Abbildung 5.2: Datenverfügbarkeit aus dem Windrichtungssektor 270°-300°

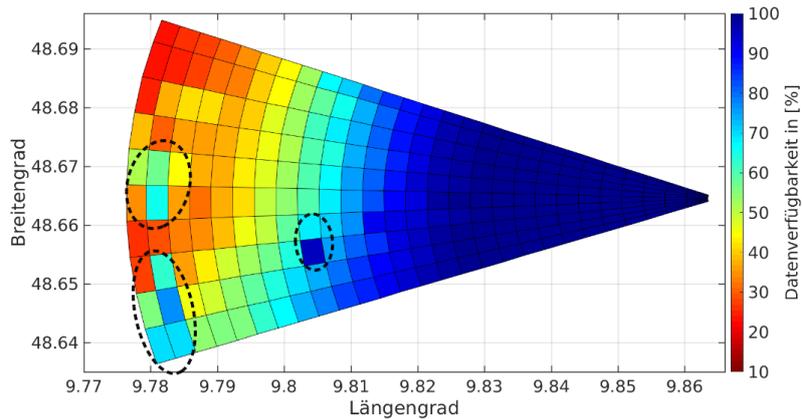


Abbildung 5.3: Datenverfügbarkeit aus dem Windrichtungssektor 90°-120°

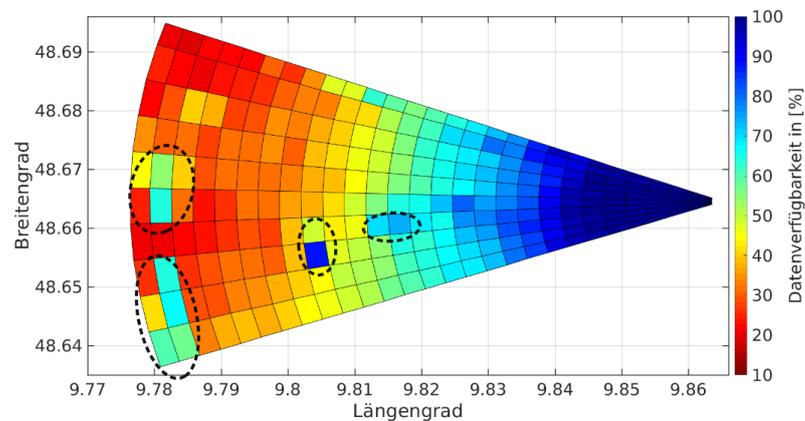


Abbildung 5.4: Datenverfügbarkeit aus dem Windrichtungssektor 210°-240°

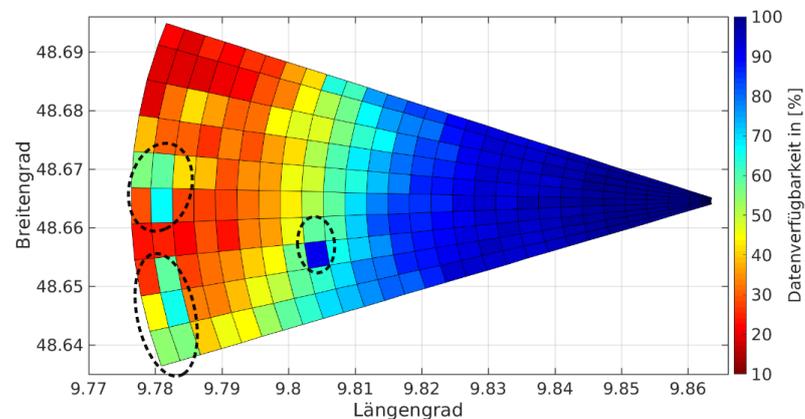


Abbildung 5.5: Datenverfügbarkeit aus dem Windrichtungssektor 30°-60°

5.3 Visualisierung der Strömungsphänomene

In diesem Abschnitt werden die nach Windrichtungen statistisch untersuchten und schließlich visualisierten Windgeschwindigkeitsdaten vorgestellt.

Abbildungen 5.6 - 5.9 repräsentieren in Raster aufgeteilte und zeitlich gemittelte Rohdaten, die mit dem Range-Filter verarbeitet und nach vier Windrichtungssektoren sortiert sind. Der Farbbalken an der rechten Seite zeigt die Zuordnung der Farben zu den Windgeschwindigkeitswerten. Dabei entspricht die x-Achse dem Längengrad und die y-Achse dem Breitengrad des Standortes. Als Hinweis gilt, dass ein hundertstel Grad etwa 1,17 km ist. Wie aus dem Plot ersichtlich, wird zusätzlich zum besseren Erkennen

des Strömungsverlaufs die pro Sektor gemittelte Windrichtung mit schwarzen Pfeilen dargestellt.

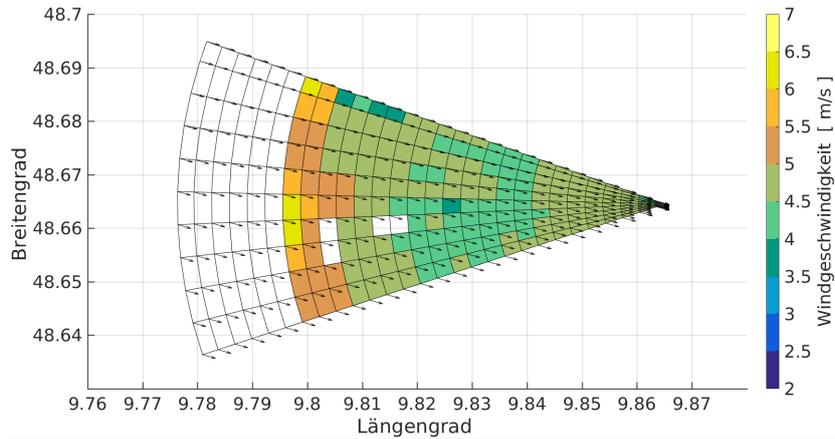


Abbildung 5.6: Messdaten aus dem Windrichtungssektor 270°-300°

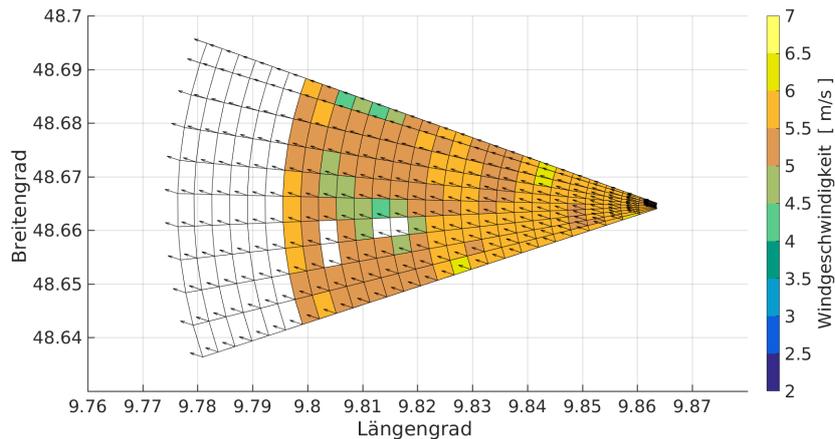


Abbildung 5.7: Messdaten aus dem Windrichtungssektor 90°-120°

Es fällt hier auf, dass die Daten in den letzten 6-7 Range Gates am Ende vom Scan aus dem Diagramm entfernt sind. Es soll berücksichtigt werden, dass der Range-Filter im Vergleich zu anderen Filtermethoden, als nicht konservativ bezeichnet wird. Somit lässt dieser mehr gültige und auch mehr ungültige Daten zu. Deshalb werden die Daten, die weiter weg vom Fernmeldeturm gemessen wurden, als unverlässlich bezeichnet. Außerdem ist die Datenverfügbarkeit in diesen Bereichen sehr niedrig, wie es bereits in Abbildungen 5.2 - 5.5 vorgestellt ist. Statistisch gesehen sind solche Daten geringwertig. Da die Rasterzellen am

Ende vom Scan wenig Daten enthalten, die dazu noch höchstwahrscheinlich fehlerhaft sind, weil die durch den Range-Filter nicht erkannt wurden, werden diese zur Sicherheit aus den Diagrammen entfernt. Im Folgenden werden noch vier Rasterzellen rausgelöscht, die als „Blinde Flecken“ identifiziert wurden, um verlässliche Aussagen treffen zu können.

Wie im Abschnitt 5.1 erwähnt wurde, treten je nach Windrichtung unterschiedliche Strömungsphänomene auf. Abbildungen 5.6 - 5.9 verdeutlichen die Unterschiede bezüglich des Windfeldes. Anschließend werden die visualisierten Geschwindigkeitsschwankungen mit der Topographie des Geländes verglichen, sodass die Ursache solcher lokaler Änderungen abgeschätzt werden kann.

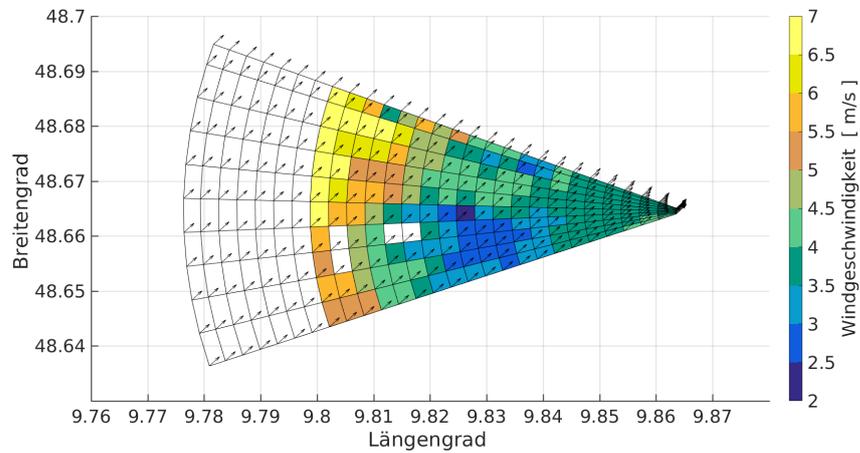


Abbildung 5.8: Messdaten aus dem Windrichtungssektor 210°-240°

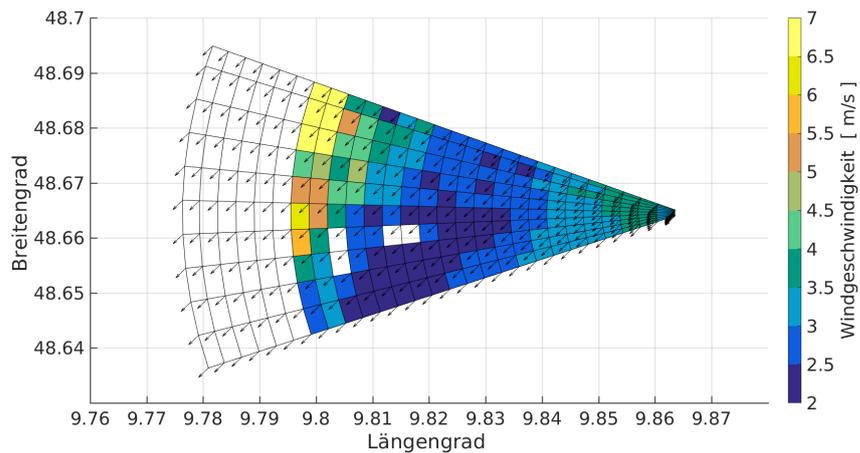


Abbildung 5.9: Messdaten aus dem Windrichtungssektor 30°-60°

5.4 Untersuchung des Topographieeinflusses

5.4.1 Geländemodellvergleich

Die Topographie des Standortes übt zweifellos einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung des Windfeldes und somit auf die Genauigkeit der Kurzzeitvorhersagen aus. Um den Einfluss der Geländestrukturen zu untersuchen, wird in Abbildung 5.10 ein dreidimensionales Modell des Geländes mit visualisierten Windgeschwindigkeitsdaten, die im Abschnitt davor vorgestellt werden, überlagert.

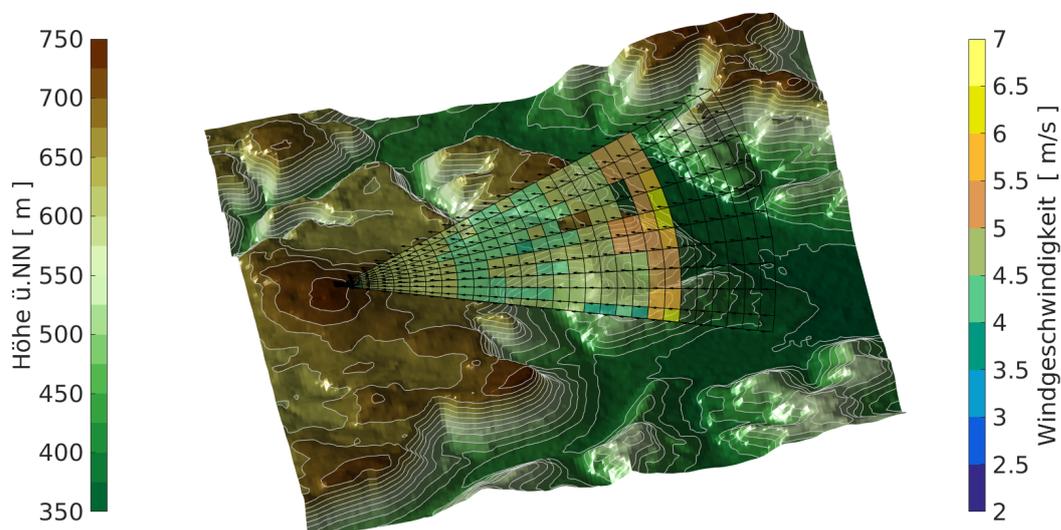


Abbildung 5.10: Vergleich des Geländemodells mit Messdaten, 270°-300°

Das topographische Geländemodell wird in MATLAB unter Zuhilfenahme von geografischen SRTM-Daten implementiert. Die Höhe des Geländes über dem Meeresspiegel kann an dem Farbbalken links abgelesen werden und variiert von 350 m (grün) bis 750 m (braun). Der Farbbalken an der rechten Seite zeigt die Zuordnung der Farben zu den Windgeschwindigkeitswerten, die dem Hauptwindrichtungssektor von 270° bis 300° entsprechen. Wie aus dem Plot ersichtlich ist, nimmt die Windgeschwindigkeit auf dem Plateau ab. Es zeigt sich somit, dass Änderungen im Windfeld aus dieser Windrichtung vorhanden sind. Die Herkunft dieser Schwankungen soll im weiteren Abschnitt näher erläutert werden.

5.4.2 Höhenlinienvergleich

Um die Strömungseffekte näher zu betrachten, werden die in Raster aufgeteilten und visualisierten Daten, die nach vier Windrichtungssektoren sortiert und statistisch ausgewertet sind, mit dem Höhenliniendiagramm überlagert, siehe Abbildungen 5.11 - 5.14.

Ein Höhenliniendiagramm stellt Linien dar, die die Geländepunkte gleicher Höhe miteinander verbinden. Dadurch werden die Form und die Steigung des Geländes sichtbar. Ob die Geländeform steiler oder flacher ist, zeigt der Abstand zwischen den Höhenlinien. Liegen die Höhenlinien nah beieinander, handelt es sich um ein steiles Gelände. Bei weitem Abstand zwischen den Linien ist das Gelände flacher.

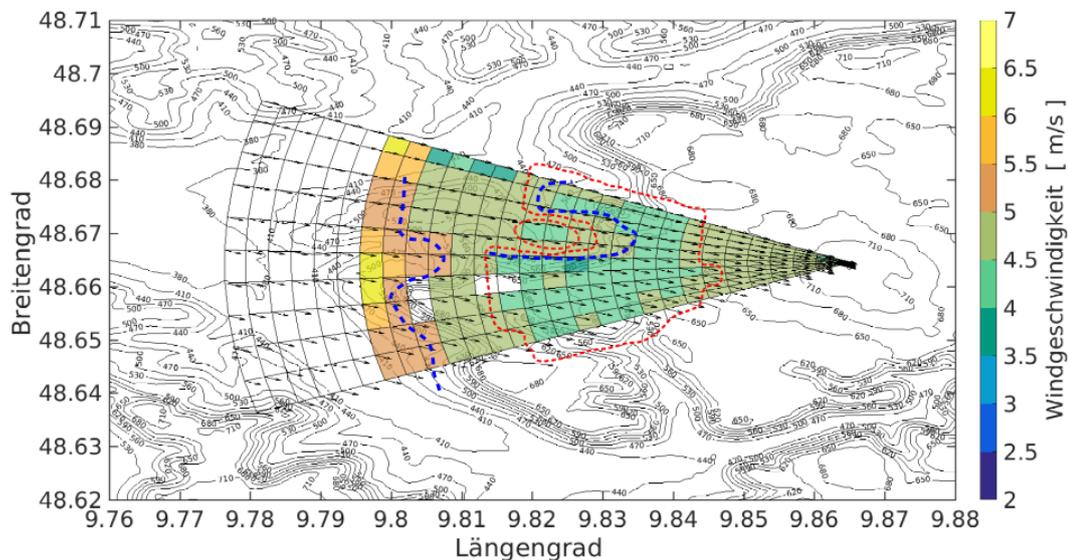


Abbildung 5.11: Vergleich der Höhenlinien mit Messdaten, 270°-300°

Abbildung 5.11 zeigt den Vergleich des Rasters aus der 270°-300° Windrichtung mit den Höhenlinien. Zur Verfügung stehen 31 Messtage, über die die Mittelwerte gebildet sind, siehe Tabelle 5.1. Am Farbverlauf ist zu erkennen, dass die gemittelte Windgeschwindigkeit am Messstandort von 4 m/s bis 6 m/s schwankt. Außerdem fallen in diesem Plot Bereiche mit niedriger Geschwindigkeit zwischen 4 und 4,5 m/s auf, die mit rot gestrichelten Linien gekennzeichnet sind. In diesen Bereichen kommt es womöglich zu einer Ablösung der Strömung. An den blau gestrichelten Linien ist zu erkennen, dass die Änderung der Wind-

geschwindigkeit mit der Form des Plateaus gut übereinstimmt. Entlang der blauen Linien befinden sich die Kuppen Scharfenberg (617 m), Hohenstein (702 m), Klepperfels (680 m), Erhebung A (550 m) und Erhebung B (660 m), siehe Abschnitt 3.1. Daraus folgt, dass das Windfeld aus 270°-300° Richtung durch die Steilkante und Erhebungen deutlich beeinflusst wird.

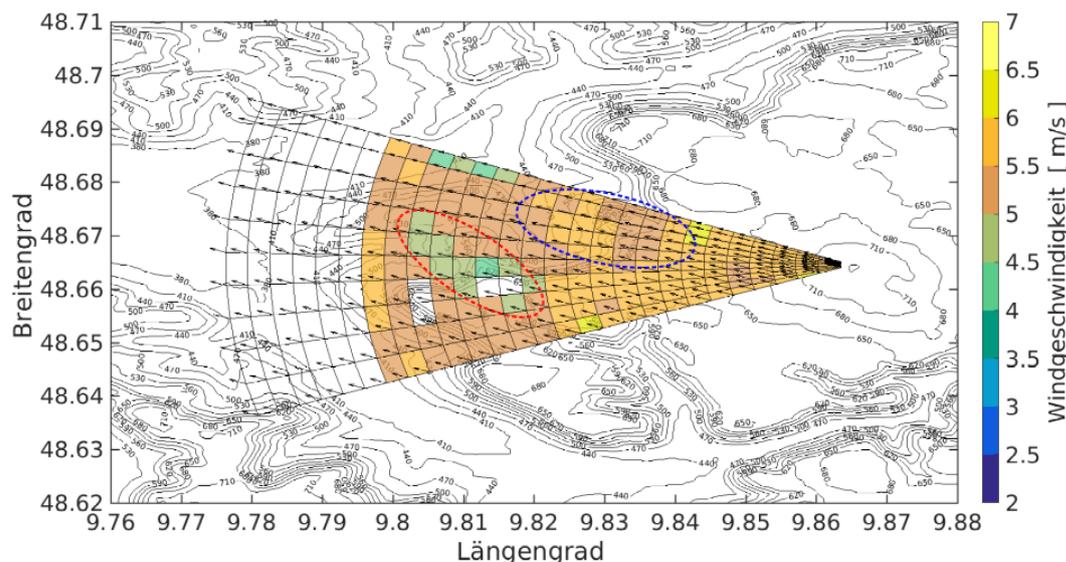


Abbildung 5.12: Vergleich der Höhenlinien mit Messdaten, 90°-120°

In Abbildung 5.12 sind die Windgeschwindigkeitsdaten aus der Gegenrichtung 90° - 120° dargestellt, die an 11 Messtagen vorhanden sind, siehe Tabelle 5.1. Hier treten Änderungen der gemittelten Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s bis 6 m/s auf. Durch den Vergleich der Abbildungen 5.11 und 5.12 wird deutlich, dass die Windgeschwindigkeit aus der Gegenrichtung grundsätzlich höher ist, als die aus der Hauptwindrichtung. In dieser Abbildung lässt sich ein Bereich erkennen, der mit rot gestrichelten Linien gekennzeichnet ist. Vermutlich handelt es sich hier um eine Ablöseblase, die sich im Tal zwischen dem Scharfenberg (617 m) und Hohenstein (702 m) genau in Windrichtung ausbreitet. Im blau markierten Bereich lassen sich lokale Änderungen der Windgeschwindigkeit identifizieren. Dabei zeigt sich, dass die Geschwindigkeit vor der Erhebung B (660 m) sinkt und danach wieder steigt. Es lässt sich daraus schließen, dass die Geländestrukturen zu lokalen Schwankungen im Windfeld führen. Jedoch können im Rahmen dieser Arbeit die einzelnen Ursachen für das Verhalten des Windfelds nicht detaillierter analysiert werden.

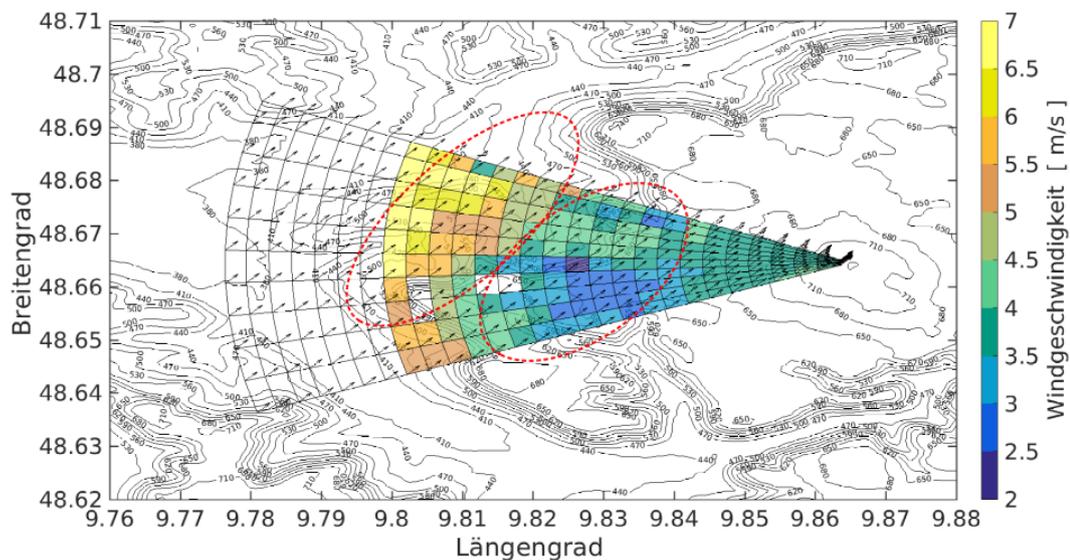


Abbildung 5.13: Vergleich der Höhenlinien mit Messdaten, 210°-240°

Aus dem Windsektor in Abbildung 5.13 stehen nur fünf Messtage zur Verfügung, was an der statistischen Aussagekraft zweifeln lässt. In rot markierten Bereichen können sprunghafte Änderungen der Windgeschwindigkeit identifiziert werden. Grundsätzlich treten hier Schwankungen von 2,5 m/s bis 7 m/s auf. Daraus lässt sich auf eine heterogene Strömung schließen. Die Ursache der Heterogenität bleibt jedoch unbekannt.

Zu Abbildung 5.14 lassen sich keine verlässlichen Aussagen treffen, da die Windgeschwindigkeit aus der Richtung 30°-60° nur an zwei Tagen gemessen wurde. Jedoch können hier einige Phänomene beobachtet und Vermutungen aufgestellt werden. An den Farbverläufen ist deutlich erkennbar, dass die Strömung sich in drei Bereiche aufteilen lässt. Im rot markierten linken Bereich ist das Windfeld besonders heterogen. Das könnte an den fehlerhaften Messwerten liegen, die durch den Range-Filter nicht erkannt wurden. Der mittlere Bereich weist eine Strömung mit sehr niedriger Geschwindigkeit auf, die sich in die Windrichtung ausbreitet. Es lässt sich vermuten, dass das Windfeld durch den Messelberg (750 m), der mit einem blauen Punkt in der Abbildung markiert ist, beeinflusst wird. Der Bereich rechts, der mit blau gestrichelten Linien gekennzeichnet ist, zeigt ein weniger heterogenes Windfeld. Bei diesen Ergebnissen muss berücksichtigt werden, dass die Aussagekraft für diesen Windsektor aufgrund der mangelhaften Messdaten nicht eindeutig ist.

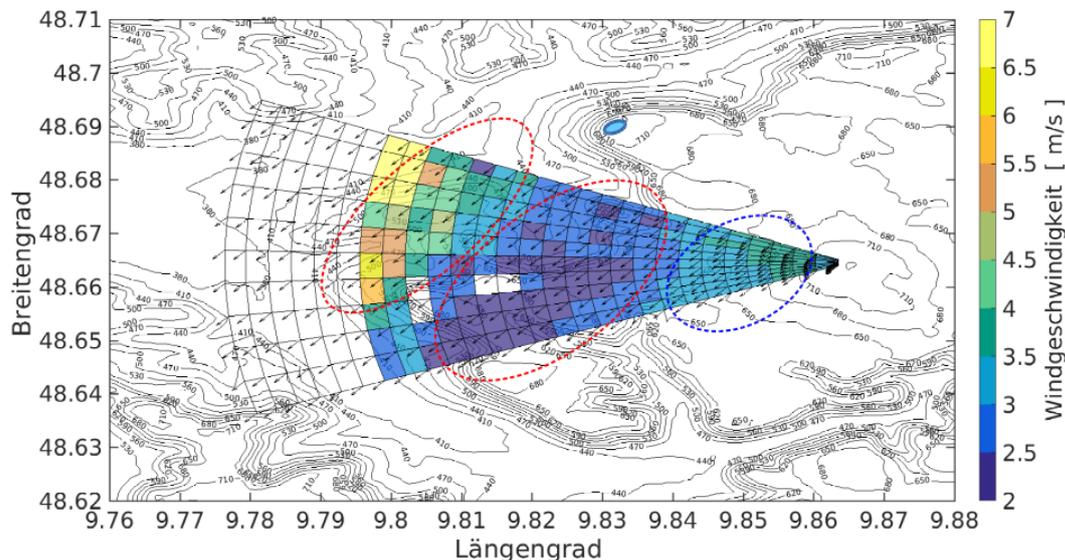


Abbildung 5.14: Vergleich der Höhenlinien mit Messdaten, 30°-60°

5.4.3 Geländeschnitt

Zum Schluss wird eine weitere Darstellungsweise des Geländeeinflusses vorgestellt. Um den Zusammenhang zwischen dem Gelände und der Windströmung zu verdeutlichen, wird ein Detailausschnitt des Geländes durch die Steilkante in Richtung des Windes gewählt.

In Abbildung 5.16 oben zeigt sich ein Geländeprofil (braune Linie), das entlang der rot gestrichelten Linie auf dem Höhenliniendiagramm in Abbildung 5.15 erstellt wird. Mit der grünen Linie wird die Höhe abgebildet, auf der die Lidarmessung stattgefunden hat. Dieses Diagramm verdeutlicht, dass im Rahmen der Messkampagne die bodennahe Windströmung nicht gemessen wurde. Somit können in dieser Arbeit nur generelle Aussagen zum Verhalten des Windfeldes auf dieser Messhöhe getroffen werden, da der Geländeeinfluss im bodennahen Bereich unbekannt ist.

Das mittlere Diagramm der Abbildung 5.16 zeigt den Verlauf der normierten Windgeschwindigkeit über dem Gelände aus zwei Windrichtungssektoren. Die x-Achse entspricht der Entfernung in km von dem Messstandort auf dem Stöttener Berg. Der Referenzpunkt, zu dem die Daten in Bezug gesetzt sind, ist in der Abbildung 5.15 mit einem blauen Punkt markiert. Für den Refe-

renzpunkt wurde eine Rasterzelle verwendet, in der die Datenverfügbarkeit für beide Richtungssektoren am größten ist. Der Grund für Normierung liegt in den saisonalen und tageszeitlichen Schwankungen der Windgeschwindigkeit.

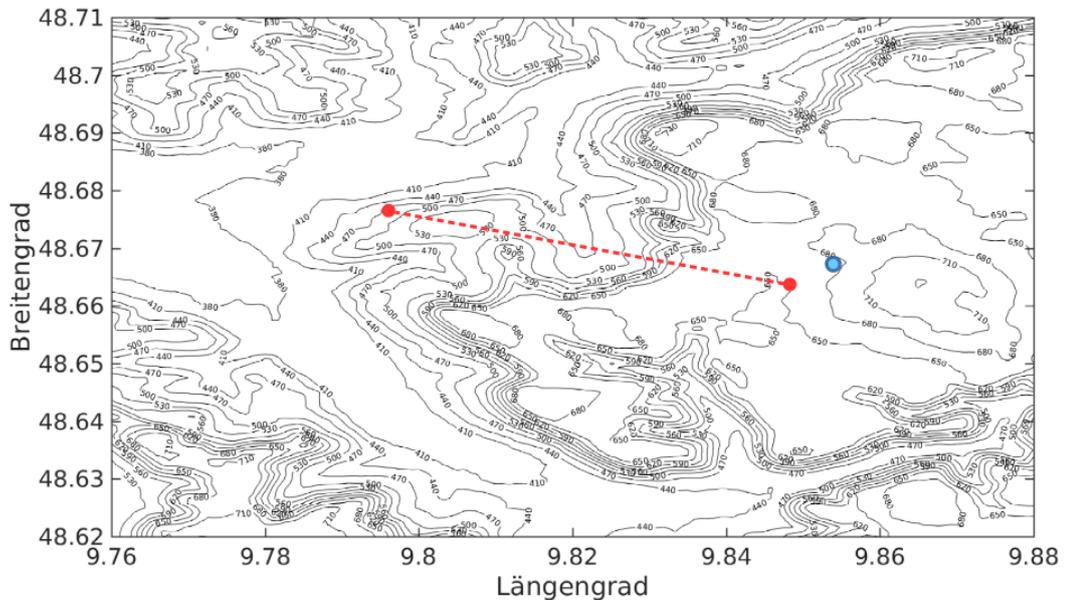


Abbildung 5.15: Position des Geländeschnittes

Um sicherzustellen, dass die Verläufe aus dem mittleren Plot ihre Richtigkeit haben, werden im unteren Diagramm der Abbildung 5.16 die berechneten Standardabweichungen der normierten Windgeschwindigkeitsdaten dargestellt. In der statistischen Analyse werden für diese Windrichtungssektoren die Mittelwerte über 31 bzw. 11 Messtage gebildet. Die Grundlage dafür sind zuvor berechnete 10-Minuten-Mittelwerte, aus welchen die Standardabweichungen berechnet werden.

Die Standardabweichung gibt an, wie stark die einzelnen 10-Minuten-Mittelwerte innerhalb des gesamten Mittelungszeitraumes von den endgültigen Mittelwerten abweichen. Daraus lässt sich schließen, ob die Windgeschwindigkeitsverläufe aus diesen Mittelwerten statistisch gesehen zuverlässig sind. Dafür müssen die Verläufe der Windgeschwindigkeitsdaten zuerst auf einen Referenzpunkt normiert werden. Sonst sind die berechneten Standardabweichungen unüberschaubar, da die saisonalen und tageszeitlichen Schwankungen in den Standardabweichungen mitberechnet sind.

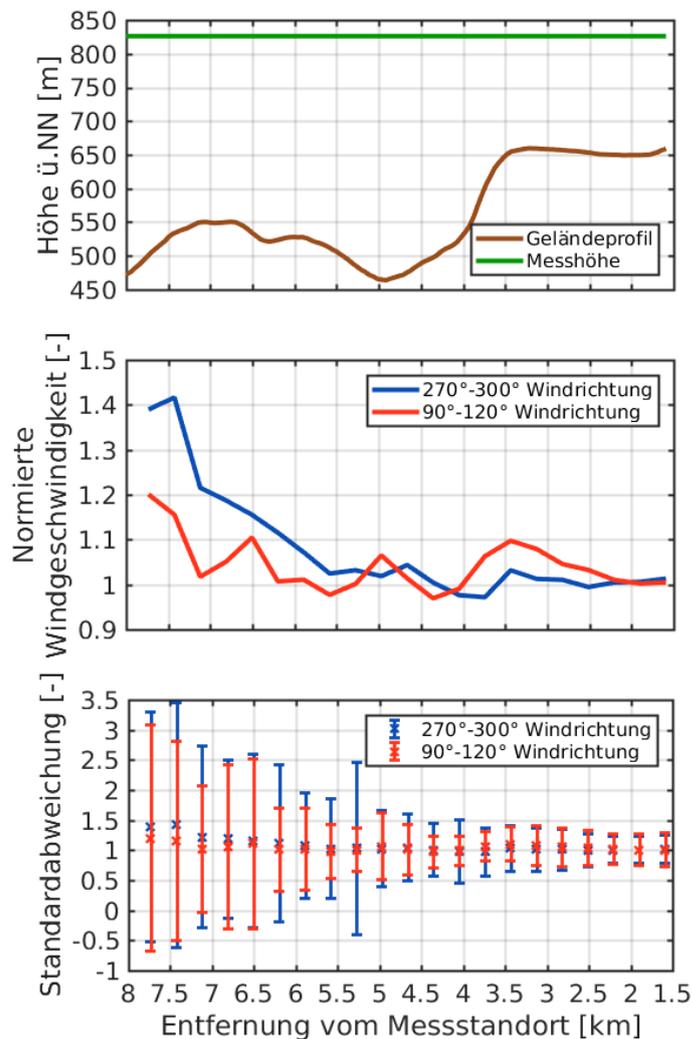


Abbildung 5.16: Geländeschnitt, Verlauf der normierten Windgeschwindigkeit aus 270°-300° und 90°-120° Richtungen, Standardabweichung

Im vorliegenden Fall zeigt sich, dass die Standardabweichung im Bereich von 1,5 km bis 5 km Entfernung am niedrigsten ist. Daraus ergibt sich, dass die normierten Windgeschwindigkeitsverläufe in diesem Bereich verlässlich sind und innerhalb dieser Untersuchung betrachtet werden können. Dabei zeigt sich, dass die Windgeschwindigkeitswerte aus beiden Richtungen einen relativ ähnlichen Verlauf haben. Außerdem lässt sich in Abbildung 5.16 eine Übereinstimmung des Windverlaufes mit dem Höhenprofil auf der Steilkante erkennen.

Mit zunehmender Höhe des Geländes steigt die Windgeschwindigkeit und mit abnehmender Höhe sinkt sie. Die Betrachtung der gesamten normierten Windgeschwindigkeitsverläufe bis zu 8 km Entfernung vom Messstandort zeigt, dass die Windgeschwindigkeit mit sinkender Höhe des Geländeschnittes steigt.

Die Darstellung der Standardabweichung und der Vergleich des Geländeprofiles mit den statistisch untersuchten Lidardaten verdeutlichen, dass die Geländetopographie einen sichtbaren Einfluss auf die Lidarmessungen in 90 m Höhe über dem Stöttener Berg ausübt.

6 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welchen Einfluss die Geländetopographie auf Messungen mit einem long-range Lidar ausübt und ob dieser Einfluss erfasst werden kann.

Zu Beginn werden die Grundlagen für die angestrebte Thesis erörtert. Dabei werden Themen wie, Lidarmesstechnik, Datenfilterung und Windfeldrekonstruktion betrachtet. Außerdem wird im Abschnitt 2 näher auf die komplexe und turbulente Strömung eingegangen. Im nächsten Kapitel wird der Messstandort, das verwendete Lidargerät, der Messaufbau und die Datengrundlage beschrieben. Für die weitere Analyse wird eine Messtrajektorie mit 41 Strahlen und 167 Range Gates ausgewählt. Im Hauptteil dieser Arbeit werden zunächst die Algorithmen für Datenverarbeitung vorgestellt. Dabei wird eine Raster-Methode entwickelt, um die Daten räumlich zu verarbeiten. Für die Untersuchung des Geländeeinflusses werden die gemittelten und in Raster aufgeteilten Windgeschwindigkeitsdaten nach Windrichtung sortiert, statistisch ausgewertet und visualisiert. Anschließend werden die Ergebnisse mit der Topographie des Messstandortes verglichen. In dieser Analyse wird außerdem die Datenverfügbarkeit berücksichtigt. Um die Geschwindigkeitsschwankungen an der Steilkante näher zu betrachten, werden ein Geländeprofil und ein Verlauf der Windgeschwindigkeit über dem Gelände aus zwei Windrichtungen erzeugt.

Es zeigt sich, dass die Topographie des Messstandortes zu lokalen Schwankungen führt. An den Stellen, wo das Gelände einen komplexen Verlauf aufweist, ist das Windfeld heterogen. Besonders an der Steilkante wird die Windströmung durch die Geländestruktur beeinflusst. Jedoch sind die lokalen Schwankungen gering. Dabei ist zu beachten, dass es sich hier um keine bodennahe Strömung handelt, da es auf 90 m Höhe über dem Stöttener Berg gemessen wurde.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Einfluss der Geländetopographie auf die Messungen mit dem long-range Lidar eindeutig erkennbar ist. Es können aber nur generelle Aussagen getroffen werden, da es in dieser Messkampagne unbekannt ist, wie sich die bodennahe Windströmung an diesem

Standort verhält.

Um verlässliche Aussagen zu erzielen, empfiehlt sich, eine CFD Windmodellierung durchzuführen. Damit kann der Einfluss des Geländes auf das Windprofil untersucht werden. Dabei handelt es sich jedoch nicht um eine Validierung der Ergebnisse, sondern um das Betrachten des Gesamtbildes der Windströmung. Besonders die bodennahe Strömung ist für diese Analyse von Bedeutung, da diese durch das Gelände stärker beeinflusst wird.

Eine weitere Möglichkeit ist, eine Korrelationsuntersuchung zwischen der Geländesteigung und Windgeschwindigkeit durchzuführen. Die Steigung des Geländes kann als ein Maß für die Strömungsablösung verwendet werden.

Außerdem kann noch der Höhenunterschied zwischen der Mess- und Geländehöhe betrachtet werden. Da die Höhe des Geländes insgesamt von 350 m bis 750 m variiert und das Lidar immer auf der gleichen Höhe gemessen hat, verändert sich somit dieser Höhenunterschied. Wenn der Abstand zwischen der Mess- und Geländehöhe kleiner wird, soll die Strömung auf der Messhöhe durch das Gelände stärker beeinflusst werden.

Bezüglich der Raster-Methode können zusätzliche Änderungen vorgenommen werden. Die Rasterauflösung kann feiner gewählt werden, um zu sehen, ob sich dadurch die Ergebnisse verändern. Dazu kann die Rasterform in Abhängigkeit von der untersuchten Windrichtung schräg gestaltet werden.

Eine Möglichkeit zur weiteren Forschung besteht darin, auf diesem Standort eine zusätzliche Messkampagne durchzuführen, in der nicht nur horizontal, sondern auch vertikal gemessen wird, um das Windprofil zu untersuchen. Zusätzlich kann mit der Geländeschnitt-Methode der Verlauf der Windgeschwindigkeit über dem Gelände an anderen Stellen analysiert werden.

Die statistische Analyse des Geländeeinflusses auf Messungen mit einem long-range Lidar leistet einen signifikanten Beitrag für die Entwicklung der Kurzfristvorhersagen im Rahmen des Projektes VORKAST und für die zukünftige Realisierung der 100% EE-Regionen. Außerdem ist es für die Entwicklung der Erneuerbare Energien von Bedeutung, die Windenergie nicht nur in windreichen, sondern auch in bergigen Regionen von Süddeutschland, auszubauen. Somit ist das komplexe Gelände weiterhin ein wichtiges Forschungsthema im Windenergiebereich.

Literaturverzeichnis

- [1] Weitkamp, C.: Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. – New York : Springer, 2005. – XX, 455 Seiten S. – ISBN 0-387-40075-3
- [2] Kapitel Pulsed lidars. In: Cariou, J.P. u. a.: Remote Sensing for Wind Energy. – Denmark : DTU Wind Energy, 2013 (DTU Wind Energy-E-Report-0029(EN))
- [3] Kühn, M. u. a.: LIDAR II: Entwicklung gondelbasierter Lidar-Technologien für die Messung des Leistungsverhaltens und die Regelung von Windenergieanlagen. – Abschlussbericht des Forschungsprojekts. ForWind Zentrum für Windenergieforschung, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 26129 Oldenburg. Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE), Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart.
- [4] Gasch, R. u. a.: Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. 8., überarbeitete Auflage 2013. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2005. – ISBN 978-3-8348-2562-9
- [5] Klose, B.: Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. 3. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg : Springer Spektrum, 2016. – Online-Ressource (XIX, 524 S, online resource) S. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-43622-6>. – ISBN 978-3-662-43622-6
- [6] Würth, I. u. a.: Nowcasting the power output of a wind turbine using a long-range lidar. – Stuttgart Wind Energy (SWE), University of Stuttgart, Allmandring 5B, 70569 Stuttgart
- [7] WindForS: Testfeld für die Windenergieforschung. Homepage. <http://www.windfors.de/testfeld.html>. Version: Juni 2017
- [8] Kaifel, A.: Optimierung der Auslegung und Betriebsführung von Kombikraftwerken und Speichertechnologien mittels Kurzestfristvorhersagen der

- Wind- und PV-Leistung. – Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Industriestr. 6, 70565 Stuttgart, Unveröffentlichter Projektantrag VORKAST.
- [9] Clifton, A.: Remote Sensing of Complex Flows by Doppler Wind Lidar: Issues and Preliminary Recommendations. – National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5000-64634, December 2015.
- [10] Niemeier, M. J.: Adaptive filtering of long range lidar data. – University of Stuttgart, Thesis, 2016
- [11] Brenner, A.: Statistische Auswertung der Reichweite von long-range Lidardaten unter Einbeziehung von Umgebungsbedingungen. – Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2017
- [12] Cheng, P. W.: Entwurf von Windenergieanlagen I, Teil 2: Windfeldmodellierung. – Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE), Universität Stuttgart, Allmandring 5b, 70569 Stuttgart, Unterlagen zur Vorlesung
- [13] MathWorks: Documentation. Homepage. https://de.mathworks.com/help/images/ref/rangefilt.html?s_tid=srchtitle. Version: Oktober 2017
- [14] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: I. Wirtschaftspolitische Themen und Analysen. Homepage. http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Monatsberichte/2015/06/onlinemagazin-schlaglichter-06-15.html?cms_textId=227426&cms_artId=227462. Version: Oktober 2017
- [15] Schlipf, D. u. a.: Model based wind vector field reconstruction from lidar data. – Stuttgart Wind Energy (SWE), University of Stuttgart, Germany, DTU Wind Energy, Risø Campus, Denmark
- [16] MathWorks: Documentation. Homepage. <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/nan.html>. Version: Oktober 2017
- [17] MathWorks: Documentation. Homepage. <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/mat2cell.html>. Version: Oktober 2017
- [18] MathWorks: MATLAB. Homepage. <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>. Version: Oktober 2017

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung eines Doppler Lidar [9]	3
2.2	Beispiel der Kantendetektion in der Bildverarbeitung [18] . .	5
2.3	Verhältnis zwischen dem Windvektor und der Radialgeschwindigkeit eines Lidars [9]	6
2.4	Atmosphärische Turbulenz [12]	7
2.5	Räumliche und zeitliche Größenordnung atmosphärischer Phänomene [12]	8
2.6	Ursachen komplexer Strömungen (angelehnt an [9])	9
2.7	Tagesgang des Windes zu unterschiedlichen Jahreszeiten (links: Flaches Gelände, rechts: komplexes Gelände) [5]	10
2.8	Einfluss des Geländes auf das Windgeschwindigkeitsprofil [4] .	11
3.1	Topographische Darstellung des Messstandortes (OpenTopo-Map) mit Lidar-Messtrajektorie	13
3.2	Topographiemodell, blauer Punkt: Position des Lidargerätes .	14
3.3	Windrose	15
3.4	Long-Range Lidar: Stream Line XR	16
3.5	Schematische Darstellung des Messaufbaus [11]	18
3.6	Untersuchte Messtrajektorie	19
4.1	Vorgehensweise bei der statistischen Auswertung der Lidardaten in Hinblick auf lokale Geschwindigkeitsänderungen	22
4.2	Anordnung der Winddaten	23
4.3	Entwicklung des Rasters	24
4.4	Ein- und Ausgabe der Rasterfunktion	26
4.5	Implementierungsschritte	27
4.6	Matrizen mit fehlenden Strahlen am Ende des Scans und am Scananfang	28
4.7	Rasterauflösung	29
4.8	Fertige Rasterform	29
4.9	Erzeugen der Rasterform	30
4.10	Anwendung der Rasterform auf die Grundform	31

4.11	Ausgabe der Rasterfunktion	31
5.1	Windrichtungssektoren	33
5.2	Datenverfügbarkeit aus dem Windrichtungssektor 270°-300° . .	35
5.3	Datenverfügbarkeit aus dem Windrichtungssektor 90°-120° . .	35
5.4	Datenverfügbarkeit aus dem Windrichtungssektor 210°-240° . .	36
5.5	Datenverfügbarkeit aus dem Windrichtungssektor 30°-60° . . .	36
5.6	Messdaten aus dem Windrichtungssektor 270°-300°	37
5.7	Messdaten aus dem Windrichtungssektor 90°-120°	37
5.8	Messdaten aus dem Windrichtungssektor 210°-240°	38
5.9	Messdaten aus dem Windrichtungssektor 30°-60°	38
5.10	Vergleich des Geländemodells mit Messdaten, 270°-300°	39
5.11	Vergleich der Höhenlinien mit Messdaten, 270°-300°	40
5.12	Vergleich der Höhenlinien mit Messdaten, 90°-120°	41
5.13	Vergleich der Höhenlinien mit Messdaten, 210°-240°	42
5.14	Vergleich der Höhenlinien mit Messdaten, 30°-60°	43
5.15	Position des Geländeschnittes	44
5.16	Geländeschnitt, Verlauf der normierten Windgeschwindigkeit aus 270°-300° und 90°-120° Richtungen, Standardabweichung .	45

Tabellenverzeichnis

3.1	Relevante Messparameter	19
4.1	Eingabedaten	25
5.1	Untersuchte Windrichtungssektoren und Anzahl der Messtage	34