Universität Stuttgart
Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE)
am Institut für Flugzeugbau

FGW

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

LiDAR-Messungen an komplexen Standorten

Erkenntnisse aus dem LoTar-Projekt: Ringversuch, Korrektur-Framework, Ausblick

13.11.2025

Vortragender: Martin Hofsäß, Tom Neumann

Spreewindtage 2025

Fraunhofer IEE
SWE
WindForS Windenergie Forschungscluster

Join at

slido.com

#8882 840

Do not edit
How to change the design

Wer sitzt im Publikum?

The Slido app must be installed on every computer you're presenting from

slido

Do not edit
How to change the design

Kannten Sie das LoTar-Projekt? Haben Sie schon mal davon gehört?

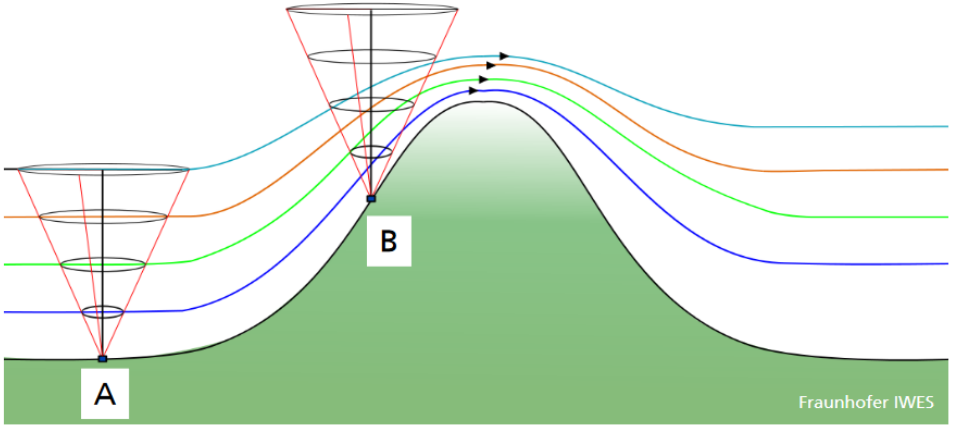
The Slido app must be installed on every computer you're presenting from

slido

LiDAR Fehler im komplexen Gelände

Fehlerquellen in komplexem Gelände

- Geländebedingte Strömungsverzerrungen (z. B. Beschleunigungseffekte, Strömungsablösung)
- gekrümmte Strömung (in hügeligem Gelände ist die Strömung geneigt)
- Inhomogene Windfelder über das Volumen



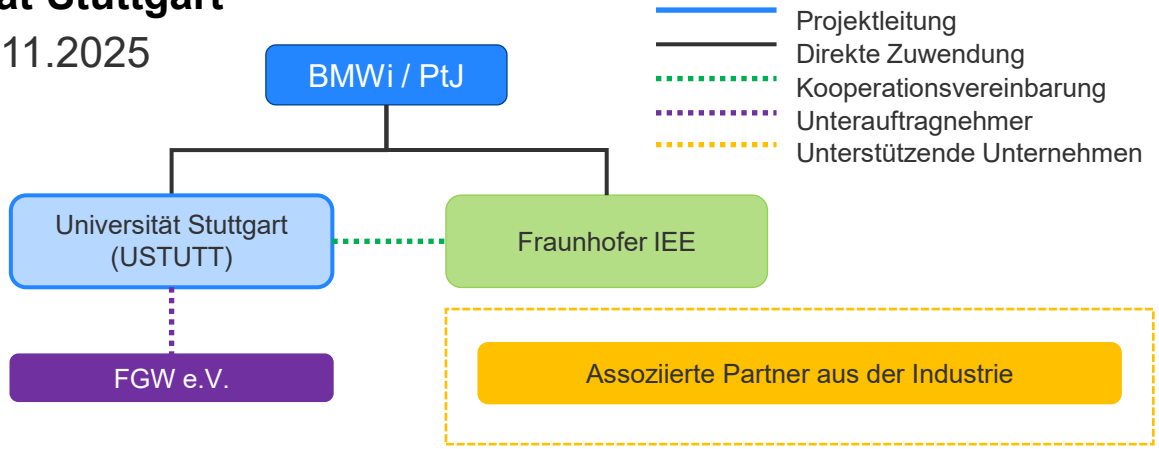
D. Callies, FORESIGHTED PLANNING OF LIDAR MEASUREMENT CAMPAIGNS BY USING ERROR MAPS, EWEA Technology Workshop: Resource Assessment 2015, Helsinki, Finland

- Es gibt Korrekturen für Lidarmessungen im Gelände, deren Genauigkeit **unklar** ist
- Geringe Anzahl an Studien zu LiDAR vs. Mast in komplexem Gelände
- Unsicherheiten bei LiDAR-Korrekturen weitgehend unbekannt

Allgemeine Projektvorstellung

Projektkonsortium

- **Koordinator: Universität Stuttgart**
- Zeitraum: 1.6.2021 - 30.11.2025

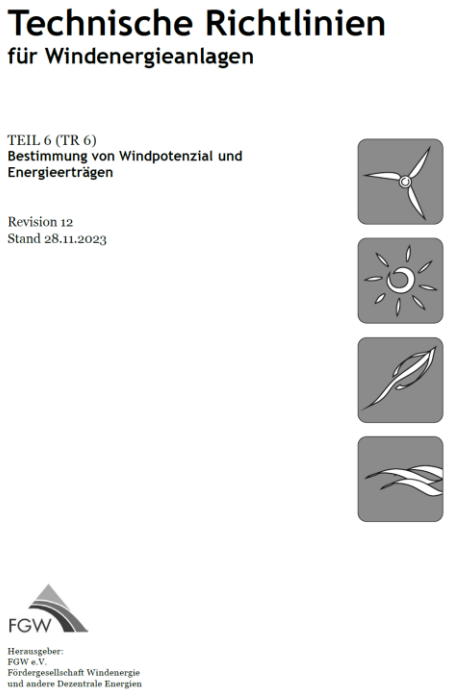


Ziele und Methodik

- Entwicklung eines offenen, modularen Frameworks für die effiziente Bearbeitung von LiDAR-Windmessdaten im komplexen Gelände
- Datengetriebene Modulentwicklung & Validierung (Industriepartnerschaft)
- Verständnis und Korrektur systematischer Abweichungen
- Standortklassifizierung auf Basis von Geländedaten
- Weit verbreitetes & aktiv genutztes Framework

Ringversuch zur LiDAR Korrektur

- **TR 6 Rev. 12** erlaubt LiDAR-Einsätze in mäßig komplexem Gelände.
- Strömungssimulationen können zur **Fehlerkorrektur** genutzt werden.
- Unterschiedliche **CFD-Tools** im Einsatz, aber kein Standard für deren Nutzung.


Technische Richtlinien
für Windenergieanlagen

TEIL 6 (TR 6)
Bestimmung von Windpotenzial und Energieerträgen

Revision 12
Stand 28.11.2023

FGW

Herausgeber:
FGW e.V.
Fördergesellschaft Windenergie
und andere Dezentrale Energien

→ Der Ringversuch soll die **Genauigkeit dieser Korrektur-Verfahren** prüfen

Durchführung des Ringversuchs

- **Organisation**:
  - FGW e. V.,
  - Uni Stuttgart,
  - Fraunhofer IEE.
- **16 Teilnehmende** aus Planung und Gutachterwesen.
- **Zwei Standorte**: mittlere und komplexe Orographie.
- Zeitraum: **13. März – 12. Mai 2023**.
- **Abschlussbericht öffentlich über FGW verfügbar.**

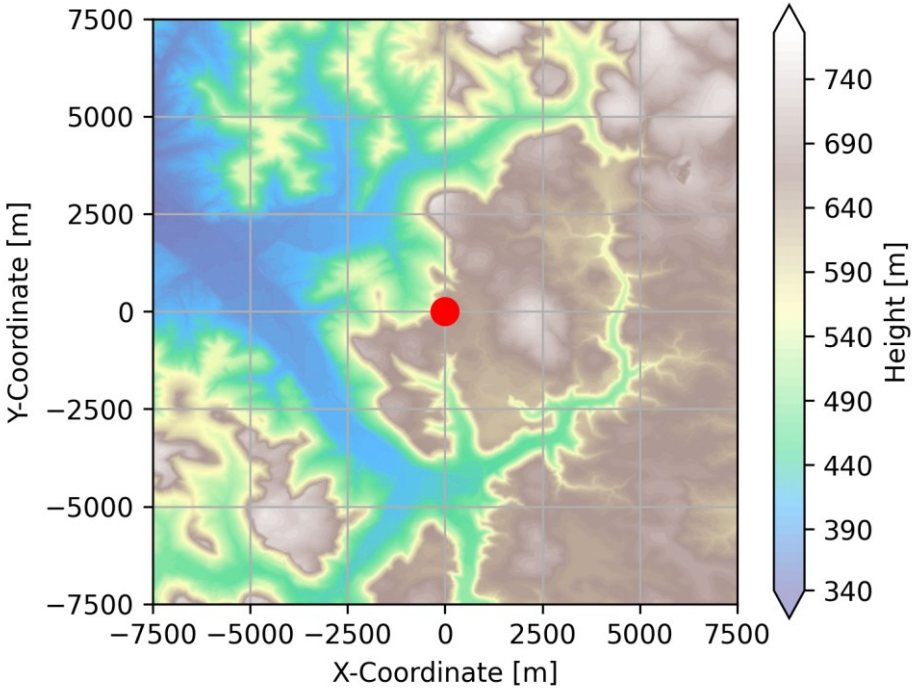
Beschreibung der Aufgabe im Ringversuch

- Aufgabe:
  - Berechnung von **Korrekturfaktoren** (5 Höhen, 10° Windrichtungsauflösung).
  - Angaben zu **Methode, Waldmodell, atmosphärischer Stabilität**.

- Bereitgestellte Daten:
  - **Geländemodell** 15 × 15 km (DTM 5 m, BKG)
  - **Landnutzung** (CORINE)
  - **LiDAR-Messdaten** mit Bericht

Standort I (WINSENT Testfeld)

- Komplexes Gelände, teils bewaldet, steiler Albtrauf (West).
- Referenzmast mit Cup (Thies First Class), LiDAR Windcube V2.
- Messdauer 3,5 Monate → 5959 10-min-Werte.



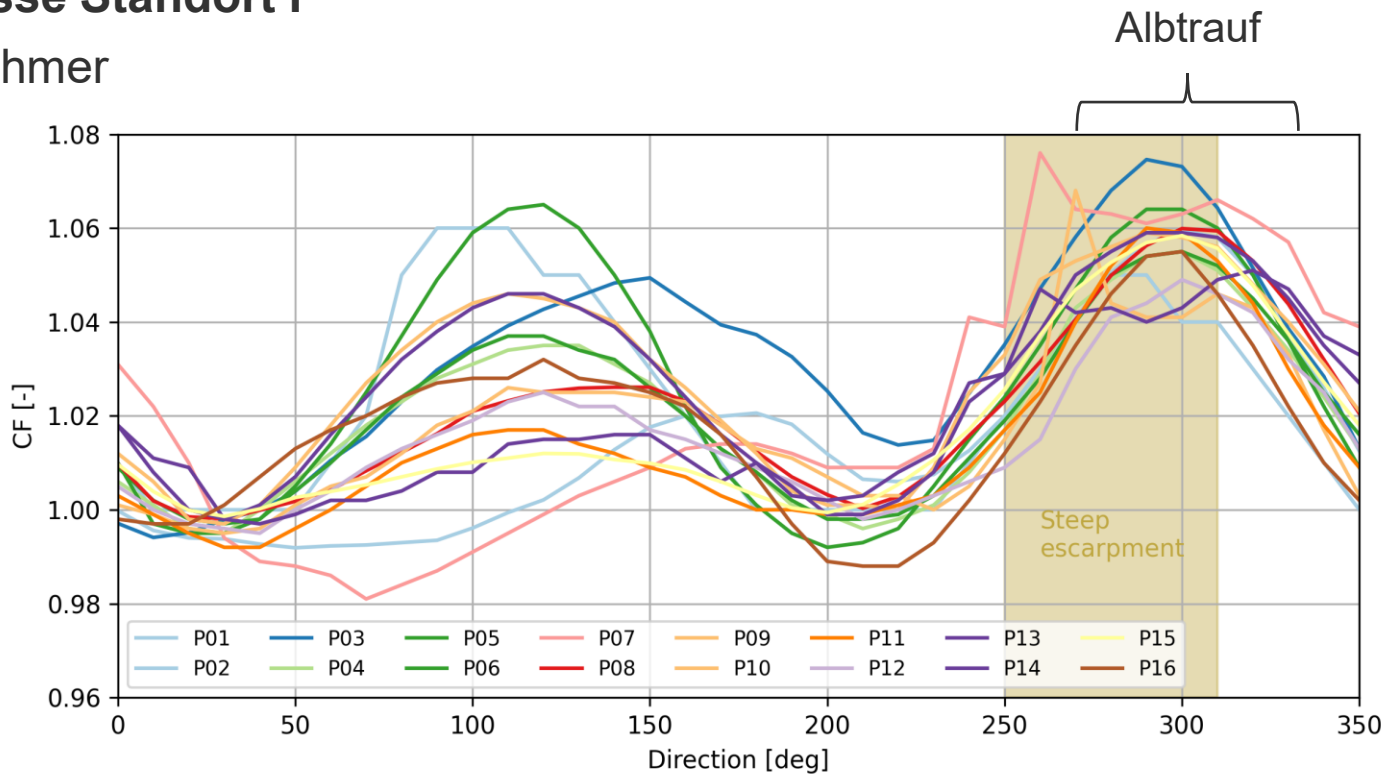
Luftbild Standort I, (WINSENT test site)

Steile Steilstufe
(Albtrauf), 50-200m

LiDAR position

Ergebnisse Standort I

16 Teilnehmer

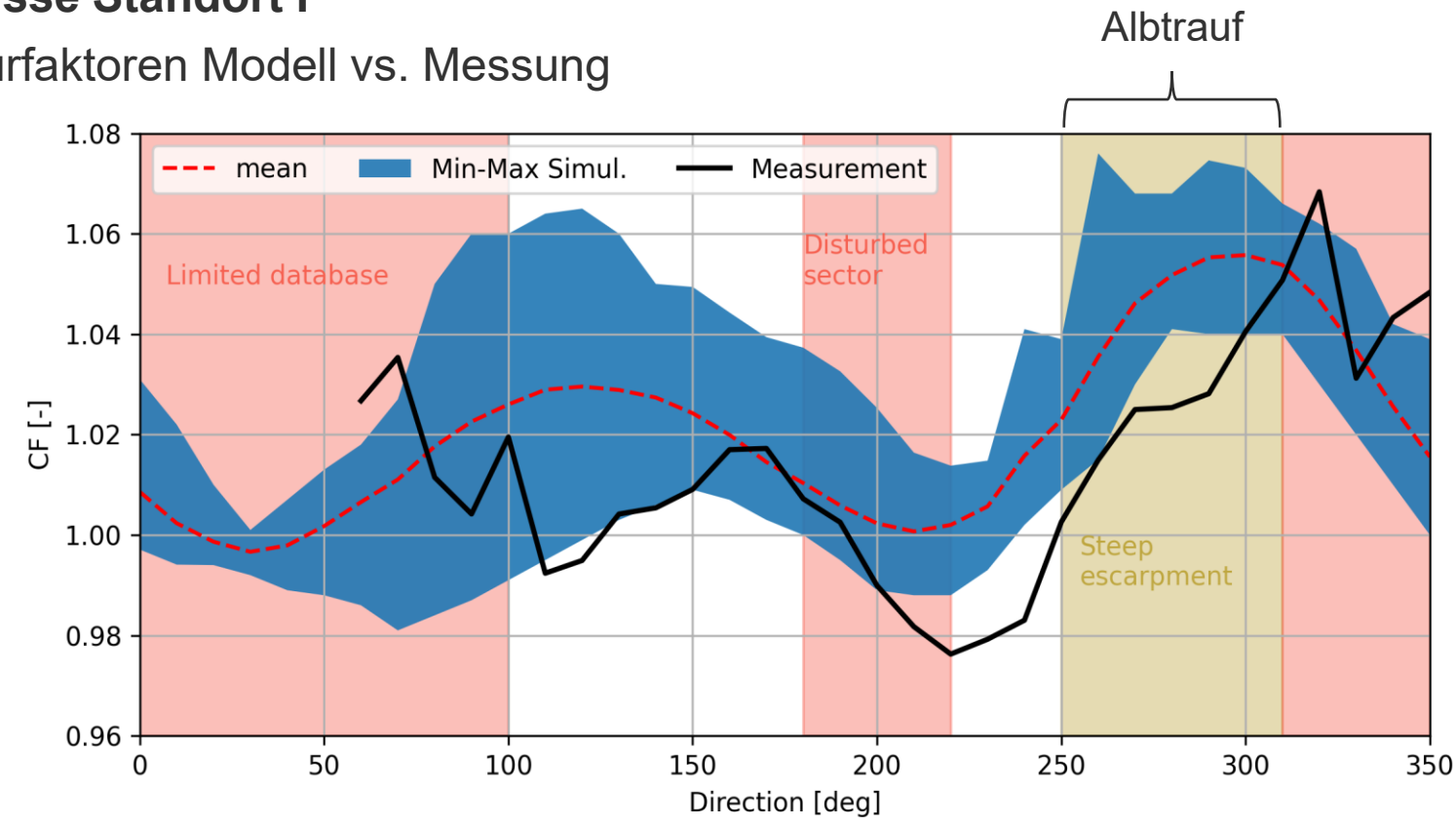


→ Deutliche Streuung zwischen Teilnehmenden (bis 6 % Abweichung bei 80°–120°).

→ In relevanten Windrichtungen gute Übereinstimmung.

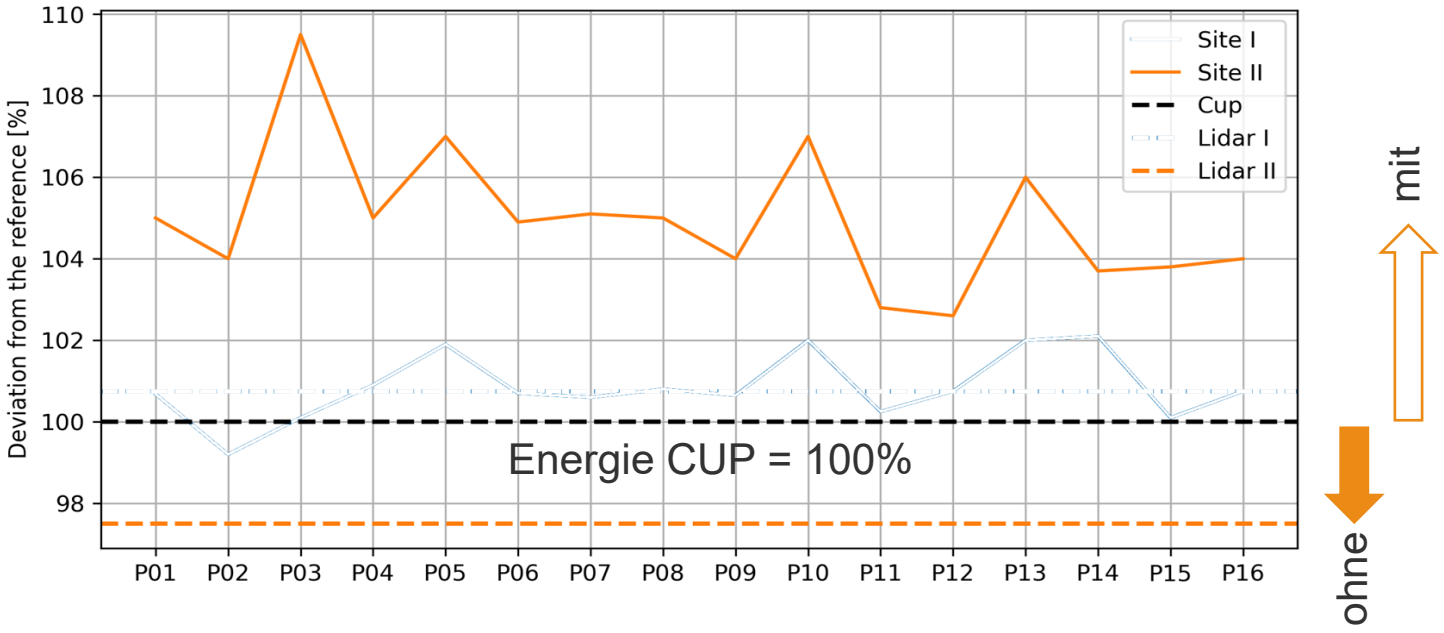
Ergebnisse Standort I

Korrekturfaktoren Modell vs. Messung



→ Signifikante Streuung der Ergebnisse untereinander und Abweichung zur gemessenen Korrektur.

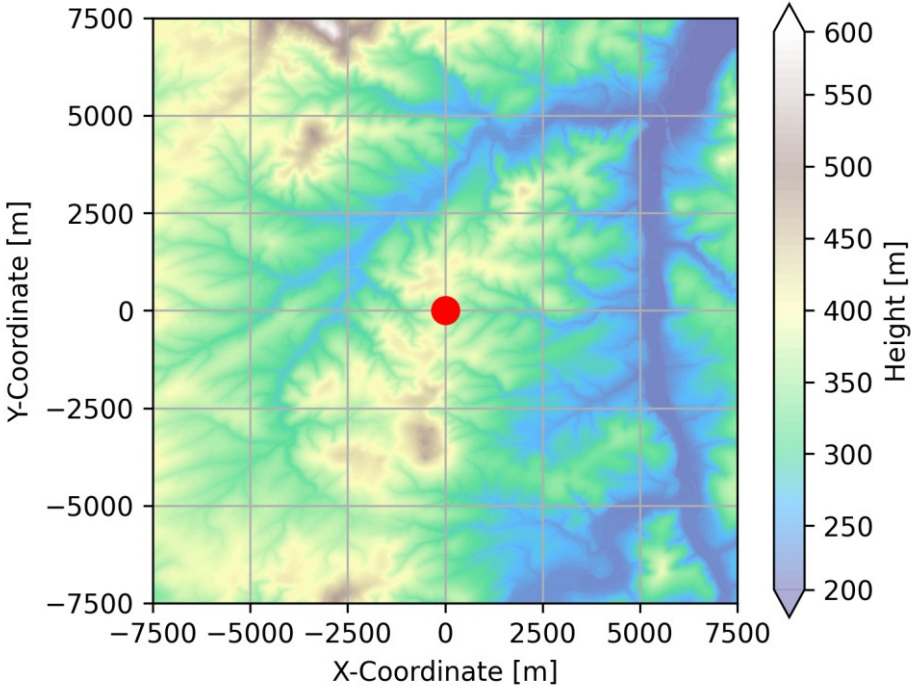
Was bedeuten die Ergebnisse für eine Energieberechnung?



Standort I: Überbewertung **+4 bis +6%**

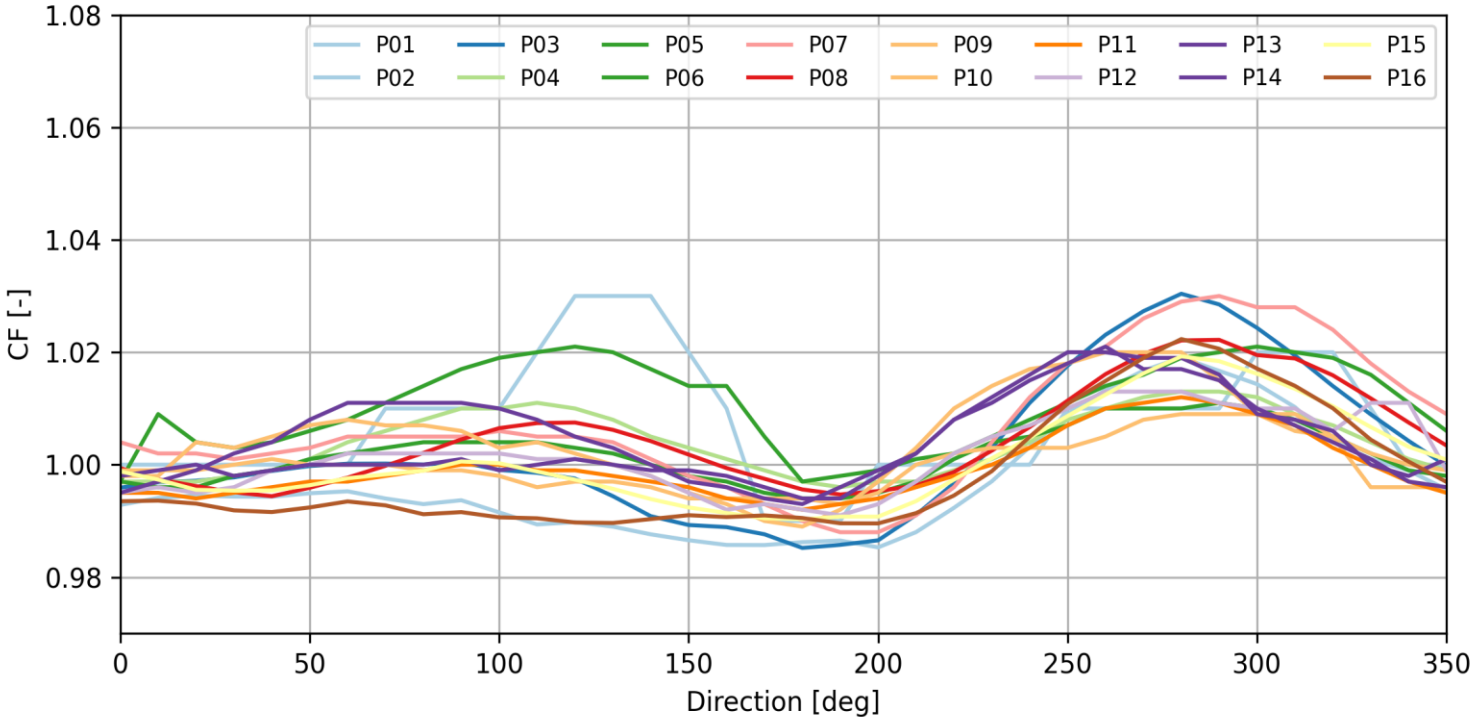
Standort II

- Mittlere Komplexität, bewaldetes Umfeld.
- Daten von 2014 bereitgestellt durch Unternehmen.
- Windmessmast mit Cup, LiDAR Windcube V1.
- Messdauer 2,5 Monate → 3402 10-min-Werte.



Ergebnisse Standort II

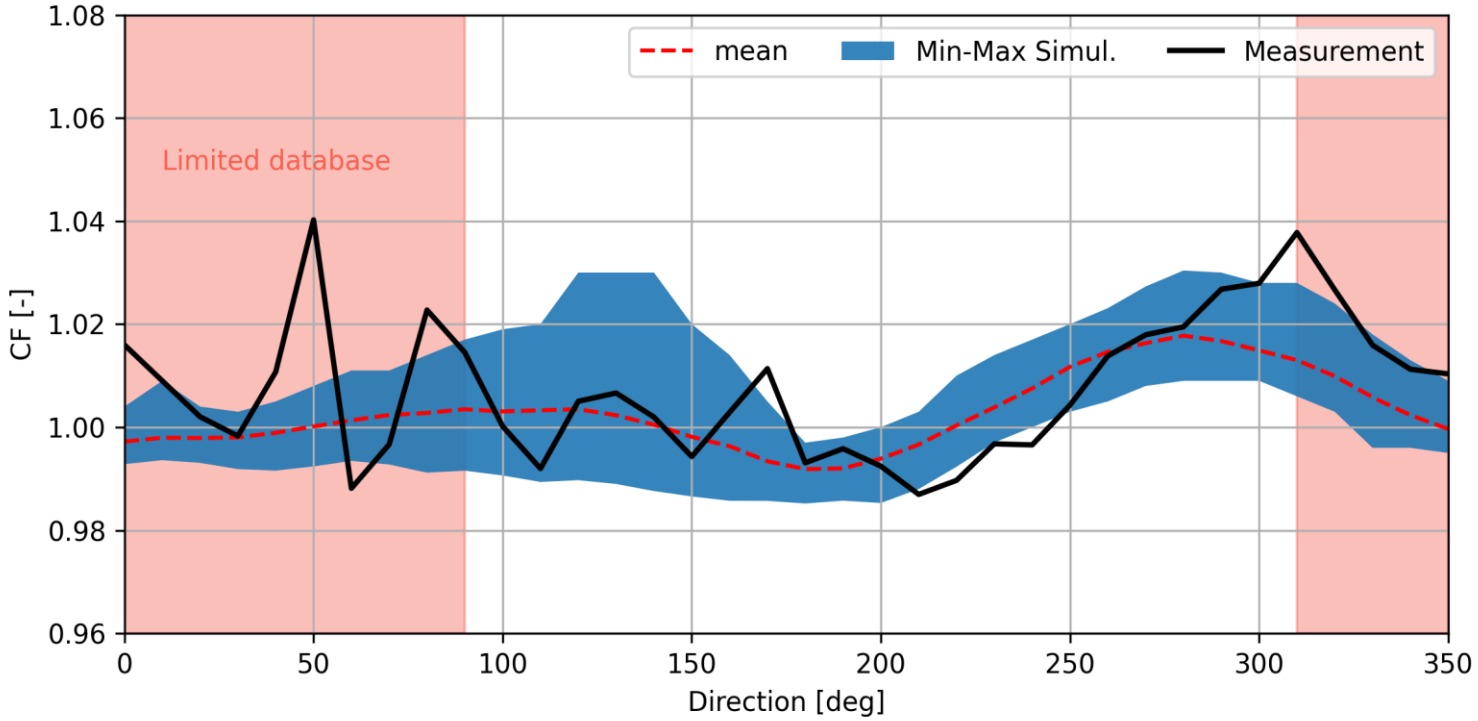
16 Teilnehmer



→ Ähnlicher Kurvenverlauf bei allen Teilnehmenden (1–2 Ausreißer).
→ Streuung 1–2 % je nach Sektor.

Ergebnisse Standort II

Korrekturfaktoren Modell vs. Messung



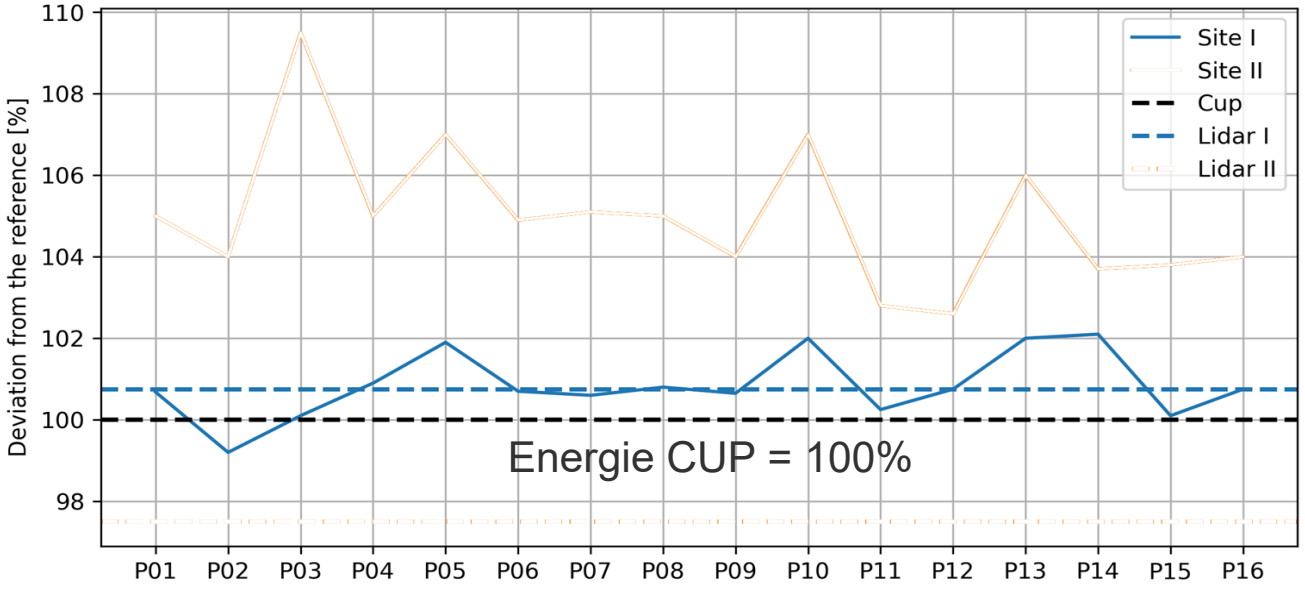
→ Bessere Übereinstimmung zwischen Modellen und Messungen.

Was bedeuten die Ergebnisse für eine Energieberechnung?

Standort II: Korrekturen **+1%**

ohne

mit



Do not edit
How to change the design

Wie gut funktioniert die Korrektur von Lidar-Daten im komplexen Gelände in der Praxis?

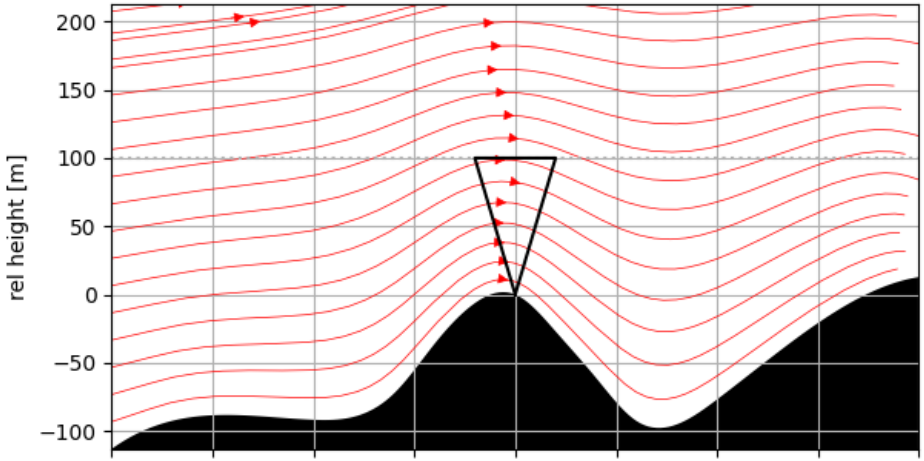
The Slido app must be installed on every computer you're presenting from

slido

Framework

Können LiDAR-Profiler mit KI Turbulenz-Messungen lernen
Florian Jäger;Fraunhofer IEE
Forum 2
11:55 – 12:20 Uhr

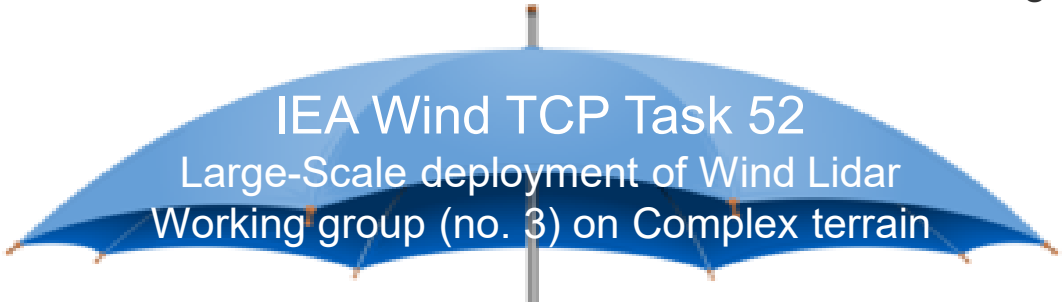
- Auf Basis der charakteristischen Kennwerte, die aus dem digitalen Geländemodell bestimmt werden, soll der LiDARfehler ermittelt und TI korrigiert werden.
- Abschätzung des LiDARfehlers mithilfe statistische ML- und analytischer Modelle.



- **Welche** charakteristischen Kennwerte sind überhaupt relevant?
- In welcher **Entfernung** müssen diese bestimmt werden?
- Statistische und ML-Modelle benötigen eine **große** Datenbasis

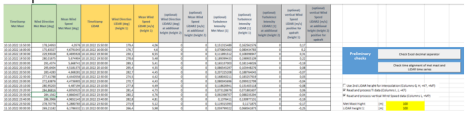
Datengrundlage

- Anfrage bei Mitglieder FAWP → Keine Daten oder können nicht zur Verfügung gestellt werden



- Entwicklung einer Methode, bei der **keine Standortkoordinaten** und **keine Messdaten** zwischen Teilnehmern geteilt werden müssen.
- Anforderungen an die **Methode**:
  - lokale Datenkompetenz
  - benutzerfreundlich
  - transparent
  - robust
- Energiewerkstatt und USTUTT haben zwei Tools entwickelt
  - Analyse der Messdaten
  - Abschätzung der Geländeeigenschaften / Charakteristika

- Input Data & VBS Marko



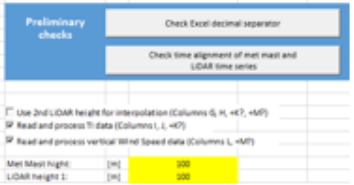
- Output

Center of wind direction bins [deg]	0	10	20	30	40	50	60	70
Bin - mean wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,9981			0,9356				0,9920
Bin - min wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,9725			0,9356				0,9882
Bin - 25% Quantile wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,9785			0,9356				0,9901
Bin - 50% Quantile wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,9914			0,9356				0,9920
Bin - 75% Quantile wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	1,0182			0,9356				0,9938
Bin - max wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	1,0300			0,9356				0,9957
Bin - interquartile range of wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,0397			0,0000				0,0037
Bin - standard deviation of wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,0251							0,0052
Bin - mean MetMast TI (optional)	0,0517			0,0663				0,0604
Bin - mean LiDAR TI (optional)	0,0747			0,0600				0,0641
Bin - mean LiDAR vertical wind speed [m/s] (positive for updraft) (optional)	0,1500			0,1300				-0,1600
Bin - mean LiDAR inflow angle [deg] (positive for updraft) (optional)	2,0594			1,8615				-2,2055
Number of data points per wind direction bin	5,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,0000

Datengrundlage

- Input Data & VBS Marko

TimeStamp Met Mast	Wind Direction Met Mast [deg]	Mean Wind Speed Met Mast [deg]	TimeStamp LiDAR	Wind Direction LiDAR [deg] (height 1)	Mean Wind Speed LiDAR [m/s] (height 1)	(optional) Wind Direction LiDAR2 [deg] at additional height (height 2)	(optional) Mean Wind Speed LiDAR2 [m/s] at additional height (height 2)	(optional) Turbulence Intensity Met Mast [1]	(optional) Turbulence Intensity LiDAR [1] (height 1)	(optional) Turbulence Intensity LiDAR2 [1] at additional height (height 2)	(optional) vertical Wind Speed LiDAR [m/s] positive for updraft (height 1)	(optional) vertical Wind Speed LiDAR2 [m/s] at additional height (height 2) positive for updraft
10.10.2022 15:50:00	178,24993	4,0576	10.10.2022 15:50:00	179,4	4,06	0	0	0,151315489	0,162961576	0	0,17	
10.10.2022 16:00:00	175,83327	4,6791943	10.10.2022 16:00:00	176,7	4,6	0	0	0,070804363	0,080434783	0	0,2	
10.10.2022 19:30:00	229,93028	6,48495826	10.10.2022 19:30:00	230,1	6,55	0	0	0,111891512	0,108398867	0	0,31	
10.10.2022 19:50:00	280,21675	5,674904	10.10.2022 19:50:00	278,6	5,48	0	0	0,189399433	0,198905109	0	0,22	
10.10.2022 20:00:00	291,4374	5,668741	10.10.2022 20:00:00	289,1	5,41	0	0	0,165137003	0,181146026	0	-0,19	
10.10.2022 20:10:00	295,6404	5,5181375	10.10.2022 20:10:00	295,4	4,35	0	0	0,086545297	0,109448276	0	0,08	
10.10.2022 20:50:00	283,4283	4,668281	10.10.2022 20:50:00	282,7	4,45	0	0	0,207125208	0,188764045	0	-0,07	
10.10.2022 22:30:00	277,41788	4,4440556	10.10.2022 22:30:00	274,5	4,42	0	0	0,168040211	0,185257919	0	0,03	
10.10.2022 23:00:00	272,63876	4,4738809	10.10.2022 23:00:00	270,7	4,43	0	0	0,080045696	0,099322799	0	-0,04	
10.10.2022 23:10:00	280,95203	4,487194	10.10.2022 23:10:00	277,8	4,49	0	0	0,118626941	0,131403118	0	-0,08	
10.10.2022 23:20:00	284,86816	4,8350525	10.10.2022 23:20:00	281,4	4,75	0	0	0,073128679	0,071881607	0	0,06	
10.10.2022 23:30:00	284,1561	4,8660407	10.10.2022 23:30:00	280,1	4,76	0	0	0,092198707	0,088235294	0	-0,04	
10.10.2022 23:40:00	286,9966	4,9652143	10.10.2022 23:40:00	282,8	4,81	0	0	0,1379411	0,130877151	0	-0,19	
10.10.2022 23:50:00	278,70276	5,2880783	10.10.2022 23:50:00	273,9	5,12	0	0	0,129315393	0,1171875	0	-0,17	
11.10.2022 00:00:00	288,21182	6,1786532	11.10.2022 00:00:00	286,4	5,88	0	0	0,059799322	0,068561873	0	-0,25	

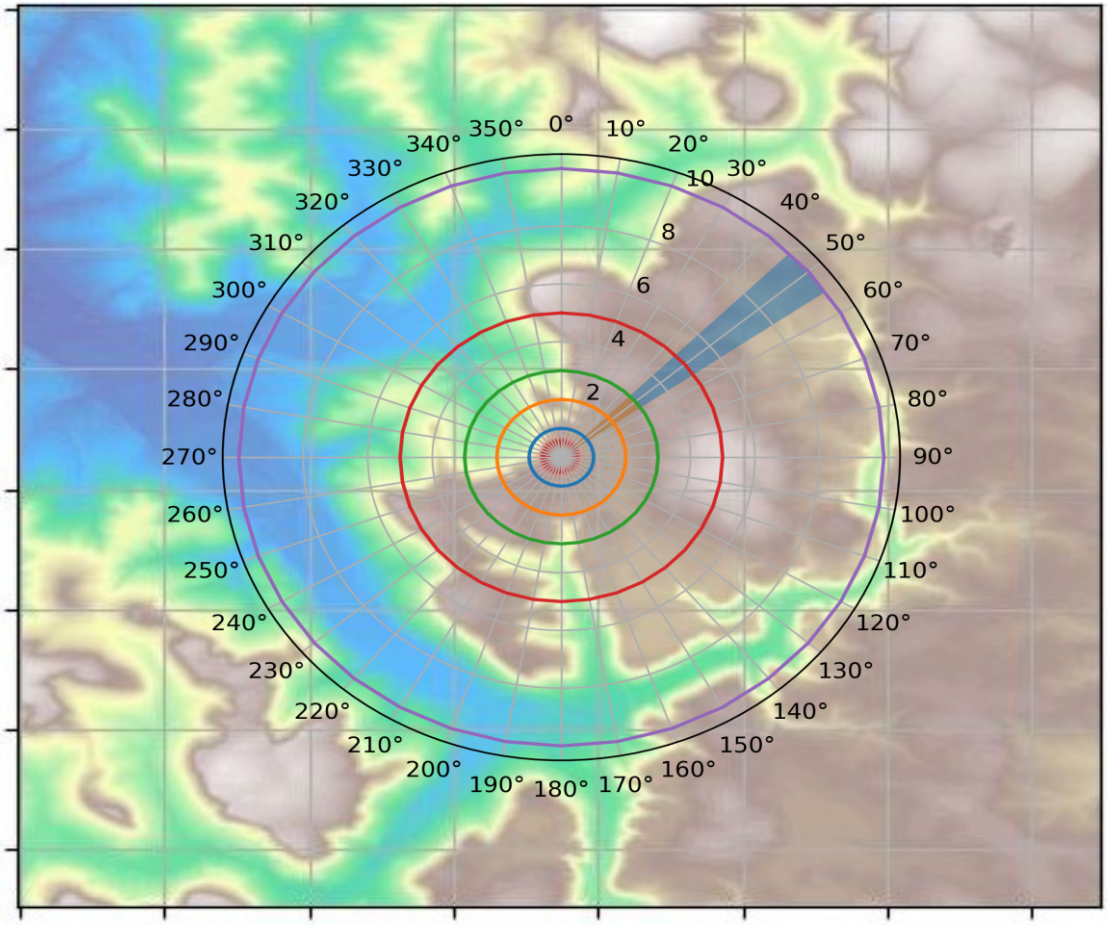


- Output

Center of wind direction bins [deg]	0	10	20	30	40	50	60	70
Bin - mean wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,9981			0,9356				0,9920
Bin - min wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,9725			0,9356				0,9882
Bin - 25% Quantile wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,9785			0,9356				0,9901
Bin - 50% Quantile wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,9914			0,9356				0,9920
Bin - 75% Quantile wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	1,0182			0,9356				0,9938
Bin - max wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	1,0300			0,9356				0,9957
Bin - interquartile range of wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,0397			0,0000				0,0037
Bin - standard deviation of wind speed ratio LiDAR/MetMast [1]	0,0251							0,0052
Bin - mean MetMast TI (optional)	0,0517			0,0663				0,0604
Bin - mean LiDAR TI (optional)	0,0747			0,0600				0,0641
Bin - mean LiDAR vertical wind speed [m/s] (positive for updraft) (optional)	0,1500			0,1300				-0,1600
Bin - mean LiDAR inflow angle [deg] (positive for updraft) (optional)	2,0594			1,8615				-2,2055
Number of data points per wind direction bin	5,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,0000

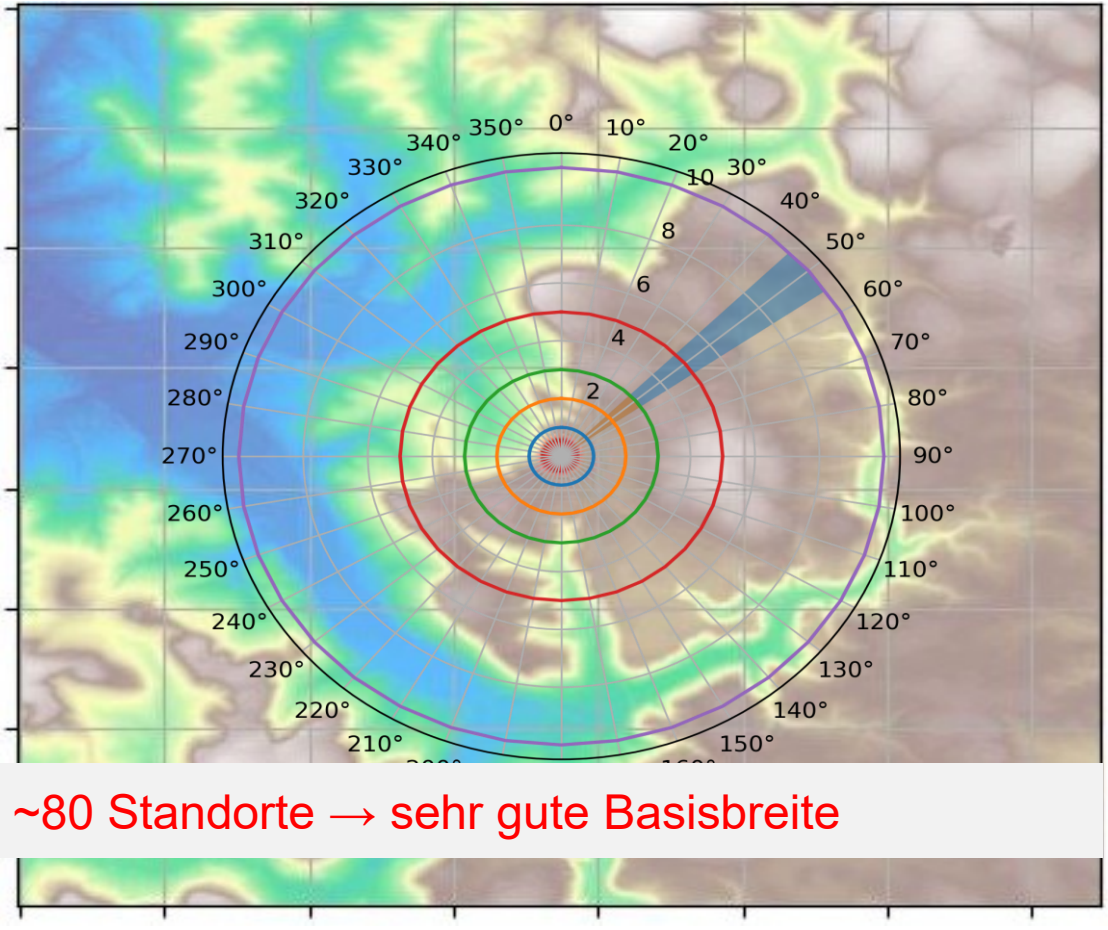
Datengrundlage

- 5 Distanzen (1x,2x,3x,5x,10x Referenzhöhe)
- Geländeparameter: 28 Parameter pro Distanz und Sektor (10°)
- z.B. aus der IEC 61400-1: TSI, TVI
- Approx. des Geländes durch 2D Funktion 2ter Ordnung: Hauptkrümmungen k1, k2; Richtung der Hauptkrümmungen; „Goodness of fit“: RMSE
- Reibungsfreien Strömungslöser
- ……



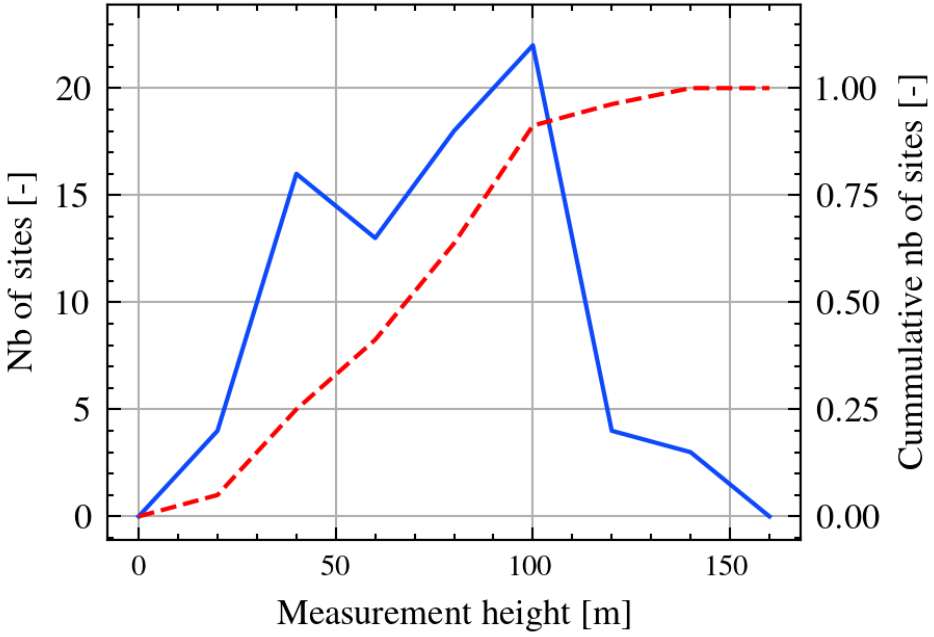
Datengrundlage

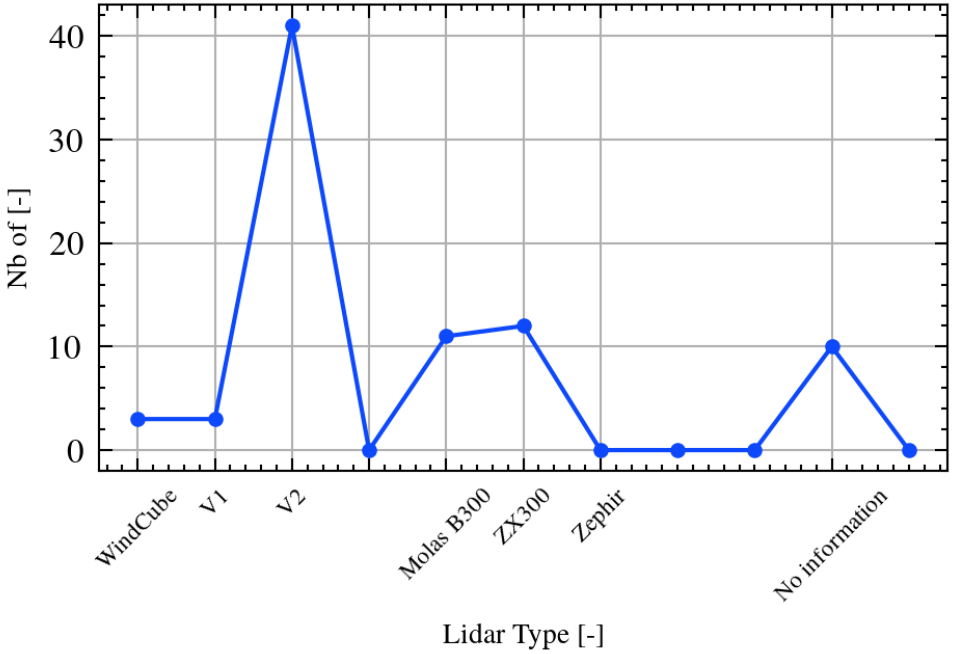
- 5 Distanzen (1x,2x,3x,5x,10x Referenzhöhe)
- Geländeparameter: 28 Parameter pro Distanz und Sektor (10°)
- z.B. aus der IEC 61400-1: TSI, TVI
- Approx. des Geländes durch 2D Funktion 2ter Ordnung: Hauptkrümmungen k1, k2; Richtung der Hauptkrümmungen; „Goodness of fit“: RMSE
- Reibungsfreien Strömungslöser



IEA-TASK Rückmeldung: ~80 Standorte → sehr gute Basisbreite

Datengrundlage

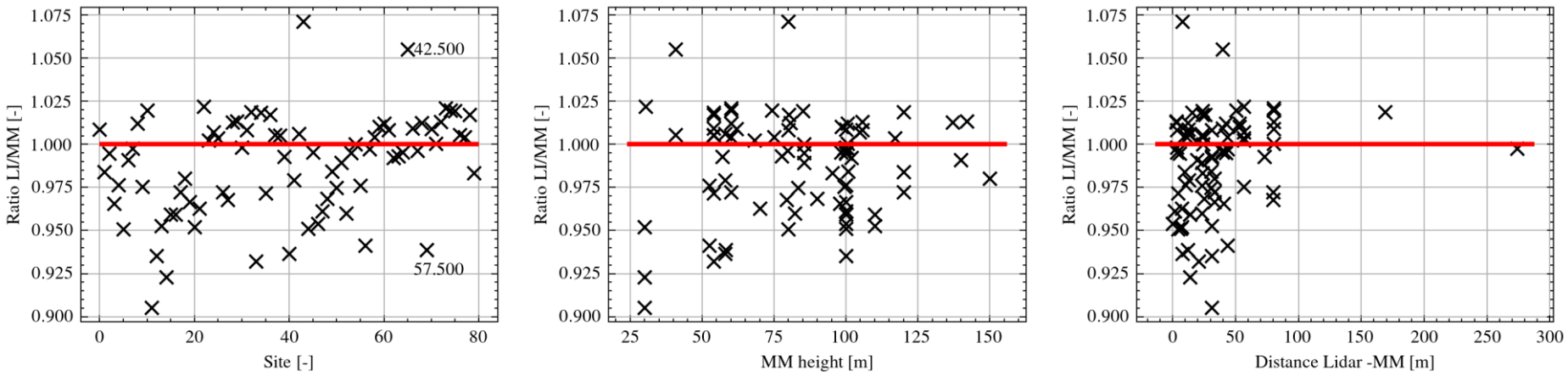




- **~90%** der Standorte weisen Messhöhen ≤ 100 m auf
- Vielfalt an LiDAR-Systemen → **keine** Beschränkung auf V2

Datengrundlage

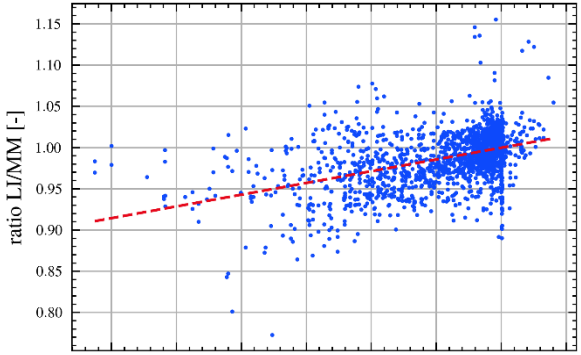
Basis Analyse

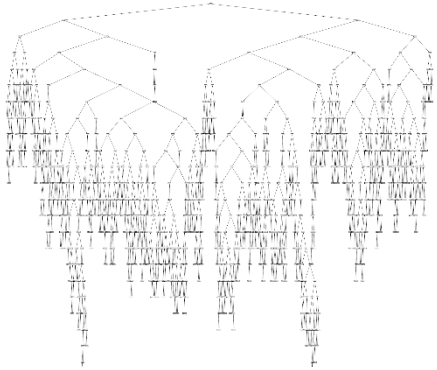


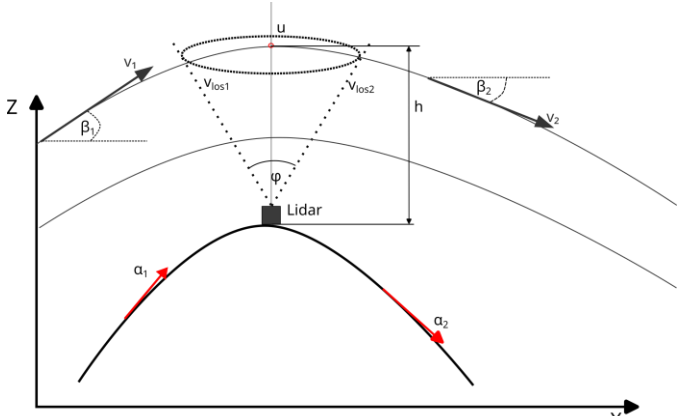
- bei ~57 % der Standorte wird die LiDAR-Messung unterschätzt.
- Kein erkennbarer Einfluss der Messhöhe auf den LiDAR-Fehler.
- Abstand LiDAR ↔ Mast zeigt keinen systematischen Einfluss.

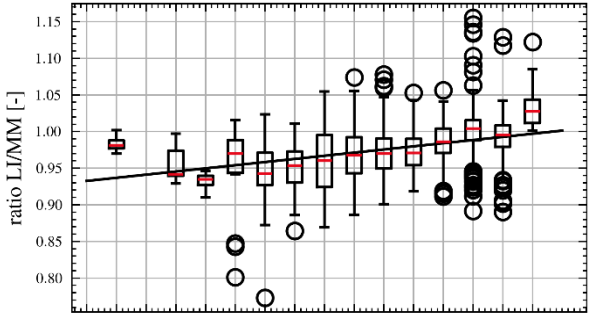
Implementierte Verfahren

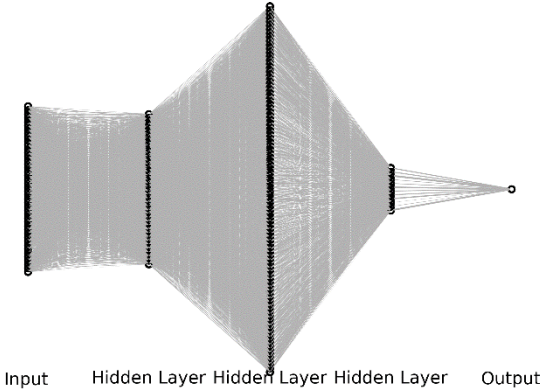
Statistische Verfahren, ML-Verfahren und Analytisches Modell

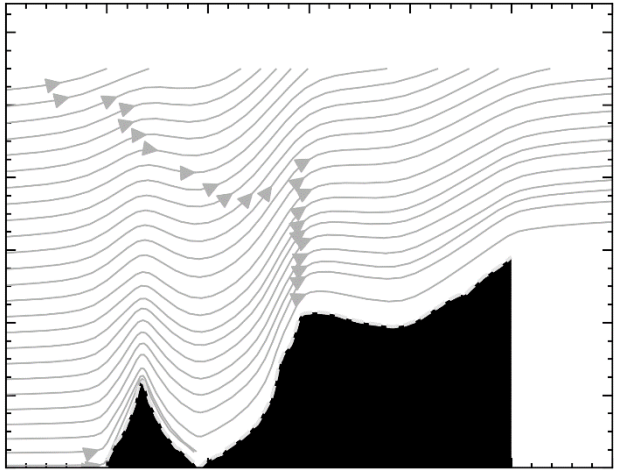












Framework

- Umgesetzt in Python -> Bereitgestellt als ausführbares all-inclusive Paket (exe)
- Konfigurierbar über eine Textdatei

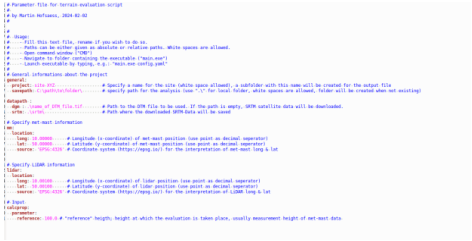
```
# Parameter file for terrain evaluation script
#
# by Martin Hofsaess, 2024-02-02
#

#
# Usage:
#  ---- Fill this text file, rename if you wish to do so.
#  ---- Paths can be either given as absolute or relative paths. White spaces are allowed.
#  ---- Open command window ("CMD")
#  ---- Navigate to folder containing the executable ("main.exe")
#  ---- Launch executable by typing, e.g.: "main.exe -config.yaml"
#
# General informations about the project
general:
  project: site_XYZ.......................# Specify a name for the site (white space allowed), a subfolder with this name will be created for the output file
  savepath: C:\path\to\folder\.........# specify path for the analysis (use "\" for local folder, white spaces are allowed, folder will be created when not existing)

datapath :
  dgm: ...\name_of_DTM_file.tif........# Path to the DTM file to be used. If the path is empty, SRTM satellite data will be downloaded.
  srtm: .\srtm\........................# Path where the downloaded SRTM-Data will be saved

# Specify met-mast information
mm:
  location:
    long: 10.00000.....# Longitude (x-coordinate) of met-mast position (use point as decimal seperator)
    lat: 50.00000......# Latitude (y-coordinate) of met-mast position (use point as decimal seperator)
    source: EPSG:4326 # Coordinate system (https://epsg.io/) for the interpretation of met-mast long & lat

# Specify LiDAR information
lidar:
  location:
    long: 10.00100.....# Longitude (x-coordinate) of lidar position (use point as decimal seperator)
    lat: 50.00100......# Latitude (y-coordinate) of lidar position (use point as decimal seperator)
    source: EPSG:4326 # Coordinate system (https://epsg.io/) for the interpretation of LiDAR long & lat

# Input
calcgroup:
  parameter:
    reference: 100.0 # "reference" heigth; height at which the evaluation is taken place, usually measurement height of met-mast data
```

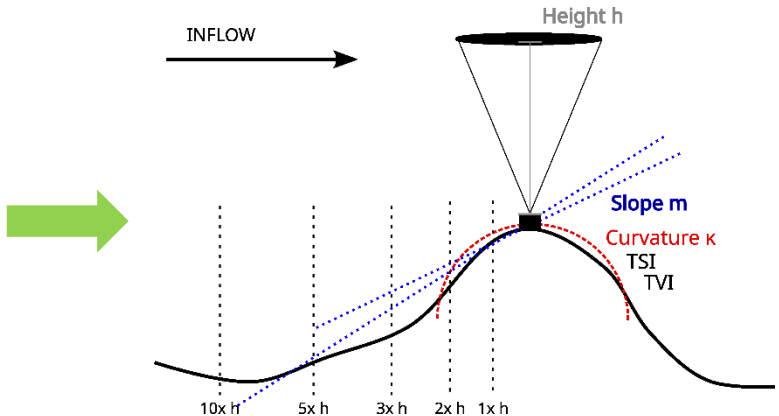
Framework

```yaml
# Parameter file for terrain evaluation script
#
# by Martin Hofsaess, 2024-02-02
#

#
#  Usage:
#    - Fill this text file, rename if you wish to do so.
#    - Paths can be either given as absolute or relative paths. White spaces are allowed.
#    - Open command window ("CMD")
#    - Navigate to folder containing the executable ("main.exe")
#    - Launch executable by typing, e.g.: "main.exe config.yaml"
#
# General informations about the project
general:
  project: site XYZ                    # Specify a name for the site (white space allowed), a subfolder with this name will be created for the output file
  savepath: C:\path\to\folder\         # specify path for the analysis (use ".\" for local folder, white spaces are allowed, folder will be created when not existing)

datapath :
  dgm :  .\name_of_DTM_file.tif        # Path to the DTM file to be used. If the path is empty, SRTM satellite data will be downloaded.
  srtm: .\srtm\                        # Path where the downloaded SRTM-Data will be saved

# Specify met-mast information
mm:
  location:
    long: 10.00000      # Longitude (x-coordinate) of met-mast position (use point as decimal seperator)
    lat:  50.00000      # Latitude (y-coordinate) of met-mast position (use point as decimal seperator)
    source: 'EPSG:4326' # Coordinate system (https://epsg.io/) for the interpretation of met-mast long & lat


# Specify LiDAR information
lidar:
  location:
    long: 10.00100      # Longitude (x-coordinate) of lidar position (use point as decimal seperator)
    lat:  50.00100      # Latitude (y-coordinate) of lidar position (use point as decimal seperator)
    source: 'EPSG:4326' # Coordinate system (https://epsg.io/) for the interpretation of LiDAR long & lat

# Input
calcprop:
  parameter:
    reference: 100.0 # "reference" heigth; height at which the evaluation is taken place, usually measurement height of met-mast data
```

Framework

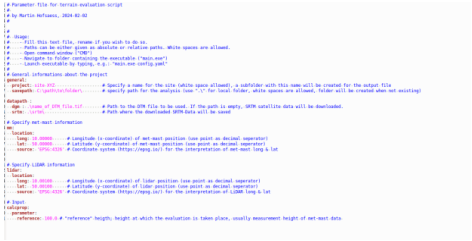
- Umgesetzt in Python
- Konfigurierbar über eine Textdatei
- Automatischer Download von Geländedaten (SRTM)
- Geländeparameter: Berechnung von 28 Parameter pro Entfernung und Sektor (10°); für 5 verschiedene Entfernungen und Integration eines reibungsfreien Strömungslösers

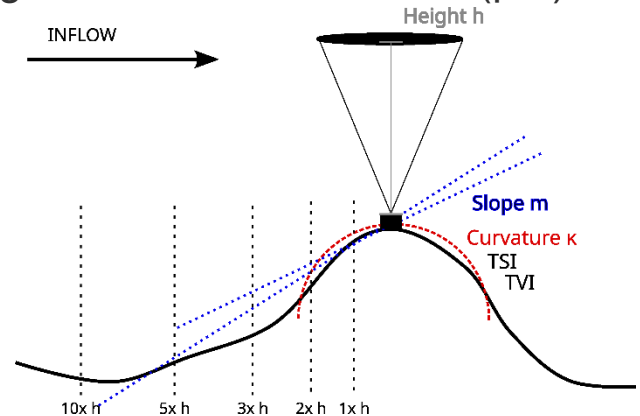


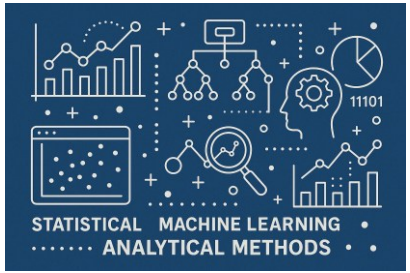


Framework

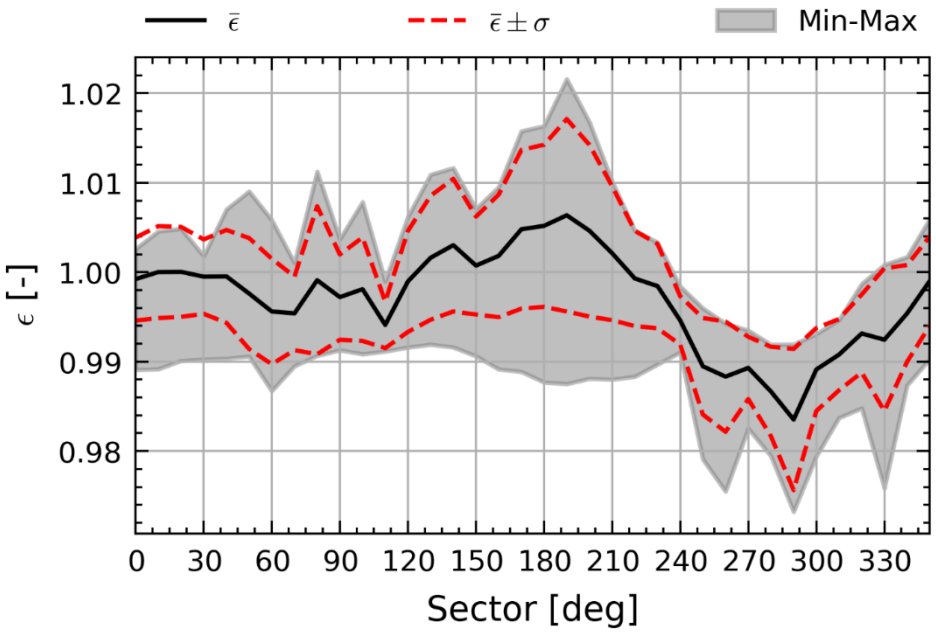
- Umgesetzt in Python
- Konfigurierbar über eine Textdatei
- Automatischer Download von Geländedaten (SRTM)
- Geländeparameter: Berechnung von 28 Parameter pro Entfernung und Sektor (10°); für 5 verschiedene Entfernungen und Integration eines reibungsfreien Strömungslösers
- Implementierung von 7 Methoden
- Automatische Erstellung der Ergebnisse in Berichtsform (pdf)

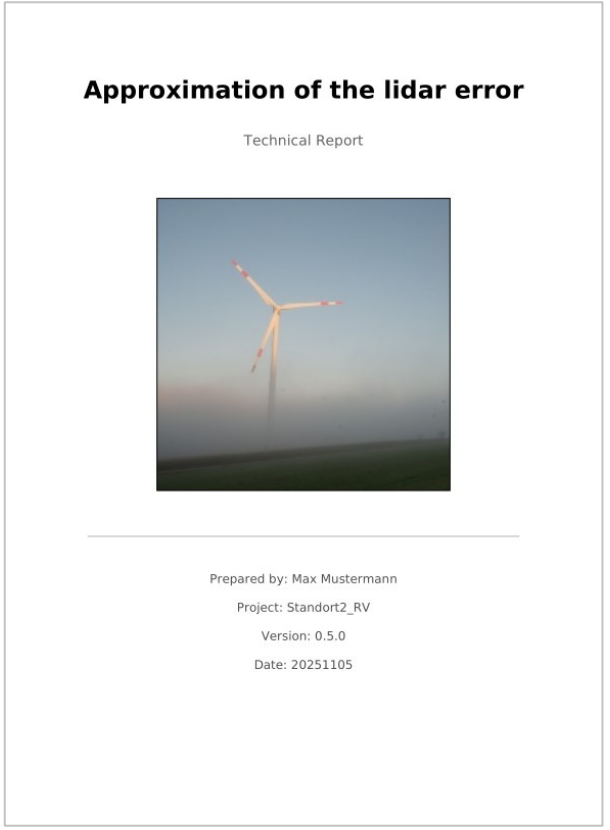






Framework





Approximation of the lidar error

Technical Report

Prepared by: Max Mustermann

Project: Standort2_RV

Version: 0.5.0

Date: 20251105

Zusammenfassung und Ausblick

Können LiDAR-Profiler mit KI Turbulenz-Messungen lernen
Florian Jäger;Fraunhofer IEE
Forum 2
11:55 – 12:20 Uhr

- **Veröffentlichung des Frameworks geplant bis Anfang 2026**
- **LoTar identifiziert zentrale Forschungsfragen und Bedarfe der Windbranche**
- **Derzeit verfügbare LiDAR-Korrekturverfahren:**
  - nur eingeschränkt und stark standortabhängig anwendbar
  - teils erhebliche Unsicherheiten bei der Bestimmung der Korrekturfaktoren
- **Ziel**: Auch anspruchsvolle Binnenlandstandorte sollen mittels LiDAR-Messungen zuverlässig für die Windenergienutzung erschließbar sein
- **Nächster Schritt:**
  Planung eines Forschungsvorhabens zur Entwicklung einer validierten, praxisnahen Methode zur *Bestimmung der Windverhältnisse mit LiDAR im komplexen Gelände und in großen Höhen über Grund*
  - 💡 Interessiert an einer Beteiligung?→ Melden Sie sich gern bei uns!

Do not edit
How to change the design

Welche Outputs brauchen Sie aus dem Korrektur-Framework am dringendsten?

The Slido app must be installed on every computer you're presenting from

slido

Do not edit
How to change the design

Welche Aspekte, Themen oder Forschungsfragen resultieren bei Ihnen aktuell zu den höchsten Unsicherheiten bzw. bereiten Ihnen die größten Probleme? (z.B. komplexes Gelände, sehr große Nabenhöhe, Wakes/Abschattungen, Leistungskurve, Referenzdaten, Turbulenz, Scherung…)

ⓘ The Slido app must be installed on every computer you're presenting from

slido

Universität Stuttgart

Fraunhofer IEE

Vielen Dank!

Martin Hofsäß

E-Mail hofsaess@ifb.uni-stuttgart.de
Telefon +49 (0) 711 685- 68308

Universität Stuttgart
Stuttgarter Lehrstuhl Windenergie
Allmandring 5b, 70569 Stuttgart

Paul Kühn

Email paul.kuehn@iee.fraunhofer.de
Telefon +49 (0) 561 7294-3518

Fraunhofer IEE
Joseph-Beuys-Straße 8, 34117 Kassel