Orangewind

Digitalisierung und Automatisierung von Energieertragsgutachten: Chancen und Herausforderungen

Okan Sargin – Senior Spezialist | Ingenieur okan.sargin@orangewind.io

2025-11-07 Revision 2a,

Windenergietage 2025, Potsdam

orangewind.io

© 2025 OWnD

Agenda

VORSTELLUNG

EINFÜHRUNG UND FRAGESTELLUNG

ANWENDUNGS-BEISPIELE UND CHANCEN

HERAUSFORDERUNGE UND FALLBEISPIELE

FAZIT & AUSBLICK

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Vorstellung

Aktuelle Position und Hintergrund

W-MA
Fraunhofer IWES
(Teilzeit)
&
Senior Spezialist |
Ingenieur (**Orangewind**)

Arbeitserfahrung im Land

Erfahrung

2006–2015: Grundlegende Erfahrungen

Beginn der Karriere als Projektingenieur mit Erfahrungen in den Bereichen Windprojektentwicklung und Ressourcenbewertung, CFD und Messkampagnen bei Unternehmen wie Tasyapi Energy Group, Lahmeyer International und Abo Wind AG.

2015–2021: Spezialisierung, Teamleitung

Vertiefung der Fachkenntnisse in den Bereichen Onshore-/Offshore-Energieertragsbewertung und technische Due Diligence bei Wood und Guidehouse. Leitung des europäischen Windanalyse-Teams bei Guidehouse.

2021–2025: Führung, Innovation und Forschung

Als Leiter des Bereichs Wind & Standort bei OWC den Servicebereich von Grund auf zu einem Team von 10 Analysten aufgebaut. Teilzeitforschung am Fraunhofer IWES zur Unterstützung der IEA Task 52. Solopreneur bei der Orangewind GmbH (OWnD) mit Schwerpunkt auf unabhängigen, digital gesteuerten B2B-Windenergie-Dienstleistungen.

Ausbildung & Zertifizierungen:

2024: MIT Professional Certificate in Strategic Technology Roadmapping and Innovation.
2022: M.Sc. in Windenergiesystemen von der Universität Kassel.
2006: M.A. Tontechnik, MIAM, Technische Universität Istanbul.
2003: B.Eng. in Maschinenbau von der Technischen Universität Istanbul.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Teil 1

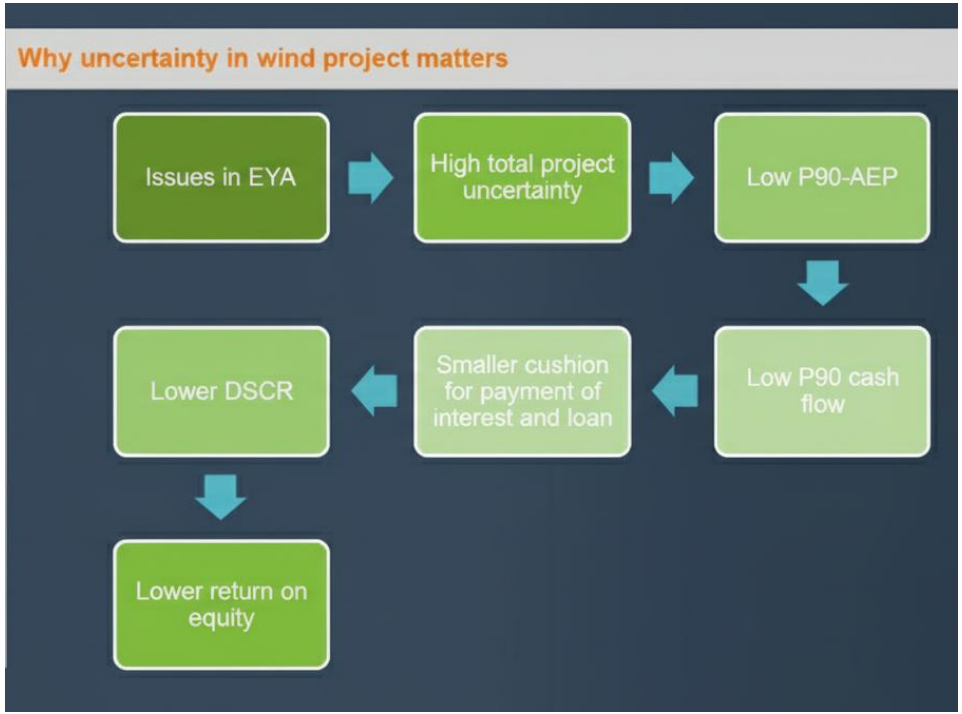
Einführung und Fragestellung (Status Quo)

© 2025 OWnD

Der Kontext: Es geht um Vertrauen & Bankfähigkeit

Warum brauchen wir robuste EYA und geringe Unsicherheit?

- Digitalisierung ist kein Selbstzweck. Am Ende des Tages muss das Gutachten "bankable" sein und Vertrauen schaffen
- Der DSCR (Debt Service Coverage Ratio) ist die zentrale Metrik für die Projektfinanzierung
- Digitalisierung muss helfen, Unsicherheiten (und Bias) zu reduzieren und Entscheidungen transparent nachvollziehbar zu machen



Berlin, Germany | info@orangewind.io

Status Quo: "Wir automatisieren doch schon längst"

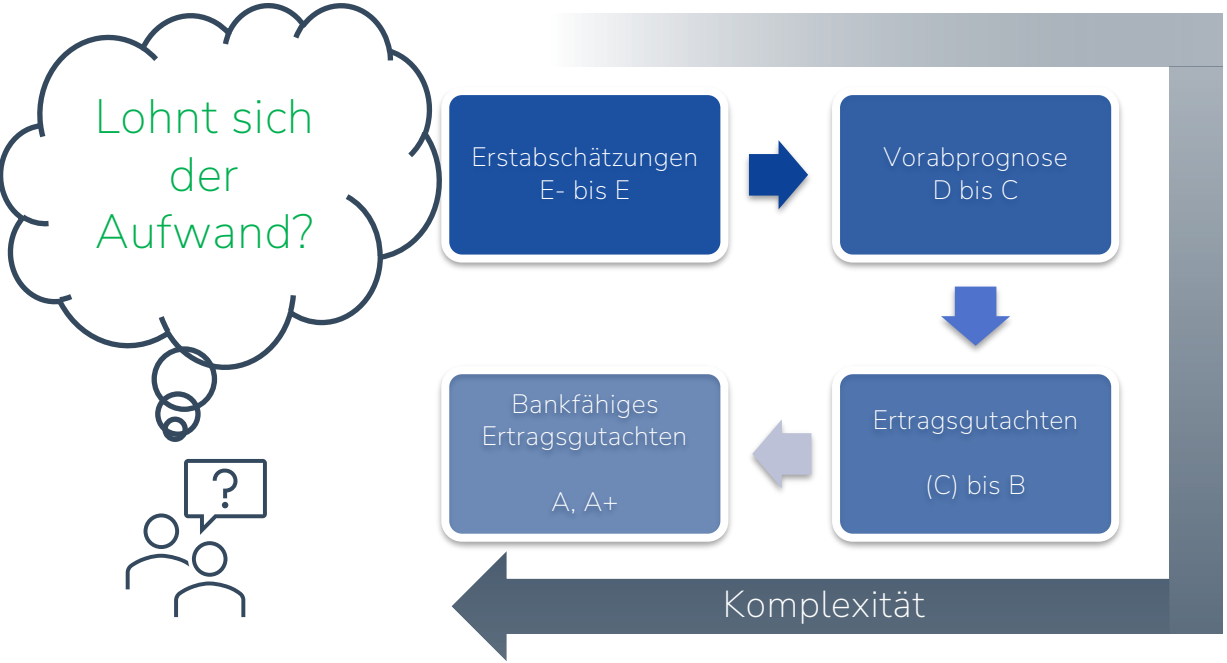
Die Prämisse – "Automatisierung" – ist korrekt.
Aber das heutige System ist selbst komplex und fehleranfällig geworden.

	Früher	Komplexität	Jetzt | Zukunft
Teamgröße	100%	↓	<50%
Toolset	2/3 Engineering-Software + interne Tools	↑	Größeres Toolset: Engineering-Software, Open-Source-Repositorien, SaaS, interne Toolkits, optimierte QA-Lösungen
Dienstleistungsangebot	One-stop-shop	↑	Engineering hub / Systemintegrator
Teamfähigkeiten	Physiker, Geographen	↑	Multidisziplinär, Atmosphärenwissenschaften, Datenwissenschaft, Ingenieurwesen
Normen	61400-12-1 Technische Richtlinien, TR6, Measnet	↑	+ 61400-15, 61400-50-1 to 4 und mehr...

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Einführung

Klassifizierung der Ertragsgutachten (OWnD)



Nicht enthalten!

- Ich gehe in meiner Präsentation nicht auf Aspekte ein, wie
  - die Schnelligkeit,
  - die Weboberfläche (Benutzer/-Teamfreundlichkeit) oder
  - Cloud-Computing im Kontext der Digitalisierung–
  - ebenso wenig auf die Kosteneffizienz.

Das sind unbestrittene Vorteile, genau wie potenzielle Cyberrisiken oder verstecktes Bias in automatisierten Trainingsprozessen".

Stattdessen konzentriere ich mich auf die fachlichen Kernpunkte.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Teil 2

Anwendungsbeispiele und Chancen

© 2025 OWnD

Automatisierung – Ertragsgutachten | Anwendungsbeispiele

1. Erstabschätzungen

Einsatz & Chancen
(was wird bereits eingesetzt)
Layoutgeneration, Einsatz von Zeitreihen, Szenarien, Kostenkalkulation

Herausforderung
Modelldaten
Variabilität

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Anwendungsbeispiele

2. Vorabprognosen

Einsatz & Chancen
(was wird bereits eingesetzt)

Berechnung mit Standard-Verlustfaktoren

Langzeitprognose

Ensemble-Strömungsmodellierung

Herausforderung

(noch) Modelldaten

Referenzzeitraum

Repräsentativität

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Anwendungsbeispiele

3. Ertragsgutachten

Einsatz & Chancen
(was wird bereits eingesetzt)

+ Legacy Wake-Modelle
+ Open-Source Wake-Modelle
+? (TR6-konforme Gutachten)

Herausforderung

Strömungsmodell, Wake-Modellierung, Komplexität in der Messtechnologie, Klimawandel

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Anwendungsbeispiele

4. Bankfähiges Ertragsgutachten

Einsatz & Chancen
(was wird bereits eingesetzt)
?

Herausforderung

Automatisiert =? > Standardisiert =? > weniger standortspezifisch =? > Höhere Unsicherheit? > höhere Projektfinanzierungskosten?

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Anwendungsbeispiele

Aktuelle Beispiele für Automatisierungs-Anwendungen

- Standartortbewertung
- Vorabprognosen
- Screening-Anwendungen (Bereinigung von Zeitreihen)
- Langzeitkorrektur der Messzeitreihen mit ML.
- Layout-Generierung
- Layout-Optimierung
- Ertragsberechnung mit Zeitreihe
- Messtechnologie (Verfügbarkeiten?)
- *Berechnung von Ertragsgutachten (?)*
- *TR6-konformes Gutachten (?)*

ANWENDER
- Entwickler
- OEMs
- Software-Entwickler
- Beratungsunternehmen
- Forschungsinstitute
- …?

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Anwendungsbeispiele

Stärken der Automatisierungs-Anwendungen

- Berichterstellung
- Anwendungsprogrammierschnittstellen
- Szenarien-Bildung
- Vorabprognosen und Erstabschätzungen (Heatmapping)
- Die Möglichkeit, für ein Projekt mehrere Szenarien abzubilden, ermöglicht eine umfassende Analyse und Planung.
- Standortspezifische Optimierung
- Kosteneffizienz

Derzeitige Trends

- Integration der Ertragsberechnungen in automatisierte Prozesse für Endnutzer, wo Kostenabschätzungen erforderlich sind (kein Ertragsgutachten)
- Vorabprognosen, die von der Strömungsmodellierung entkoppelt sind (die von anderen Nischenanbietern oder internen Teams in das System hochgeladen wird).
- Anwendung von Nischen-spezifischen Automatisierungen innerhalb der einzelnen Komponenten der Ertragsberechnung.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Teil 3

Herausforderungen und Fallbeispiele

© 2025 OWnD

Kontext und Herausforderungen bei Ertragsgutachten

"Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser."

Die Automatisierung in Ertragsgutachten muss projektspezifische technische Herausforderungen bewältigen.

Herausforderung in der EYA	Schutzmaßnahmen
Messungen an nicht repräsentativen Standorten	Multiskalenmodellierung, richtige Quantifizierung von Unsicherheiten
Komplexe Zukunftsszenarien für benachbarte WPs	Zeitvariable Wake-Szenarien mit automatisierten Tools
Fehlender SMC	Rahmen für die Validierung in der Frühphase
Herausforderungen bei der Nachlaufmodellierung	Ensemble- und High-Fidelity-Modellierung
Komplexes Windklima	Maßgeschneiderte mesoskalige und mehrskalige Modellierung

Der Automatisierungsprozess muss/kann sich weiterentwickeln, um mehr Vertrauen aufzubauen und die Transparenz für die Stakeholder zu erhöhen.

Und einige andere technische Herausforderungen:

Insel-Wakes

LLJs

Repräsentativität des langfristigen Zeitraums (Klimawandel)

EYA in komplexem Gelände (Forstwirtschaft)

Cluster-Wakes (2000+ WTs)

Verstärkte (rechtliche) Prüfung der Angemessenheit von Wake-Modellen

Coriolis-Effekt

Metocean-Ausrichtung, Beispiel: einheitliche WRF

15+ Schnittstellen während der Due Diligence (echte Projektherausforderungen)

Zunehmende Komplexität in Forschungsfragen

Berlin, Germany | info@orangewind.io

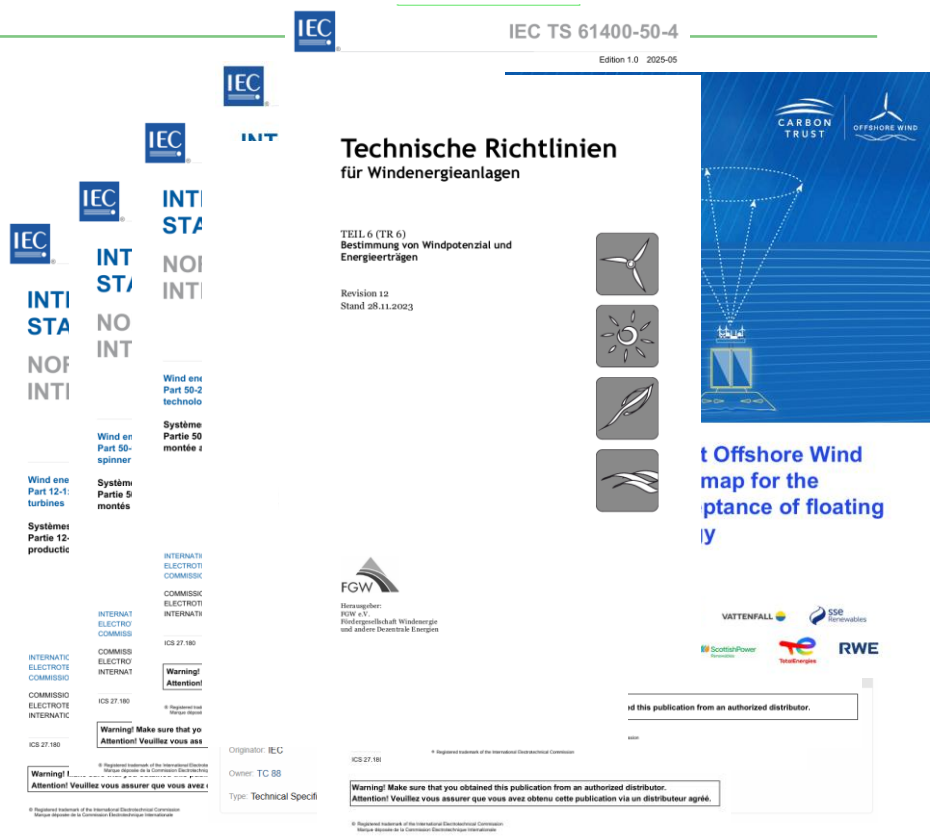
Sich entwickelnde Normen - seit 2017

Die Herausforderung: Inkonsistente Frameworks

- Die aktuelle IEC 61400-50-Serie, die diverse Technologien von Messmasten (-50-1) bis hin zu verschiedenen Lidars (-50-2, -50-3, -50-4) abdeckt, leidet unter Inkonsistenzen.
- Verschiedene Standards verwenden widersprüchliche Terminologie und Methoden für die Klassifizierung, Kalibrierung und Unsicherheitsabschätzung.
- Dies führt zu Messunsicherheiten, die oft durch inkonsistente Leitlinien und nicht unbedingt durch die Technologieleistung beeinflusst werden.

Kernziel: Harmonisierung und Konsistenz

- Das Hauptziel der Überarbeitungen besteht darin, sicherzustellen, dass die Standards aktuell, korrekt, vollständig und konsistent sind.
- Unsicherheitsschätzungen sollten die tatsächlichen Leistungsunterschiede zwischen den Messtechnologien widerspiegeln, um faire und genaue Vergleiche zu ermöglichen.
  Quelle: P. Clive



Automatisierung – Vorabprognose | Fallstudie 1 - Modelldaten

Ertragsgutachten / Vorabprognose

Herausforderung
- Kalibrierte Modelldaten nicht weltweit zugängig
- Auflösung
- Komplexität
- Repräsentativität

Beispiel

- WAsP (lineares Legacy-Strömungsmodell) ist nicht in der Lage Höhenunterschiede mehr als 100 m abzubilden.
- Direkte Modelldaten sind in der Regel nicht für Vorabprognosen oder Erstabschätzungen geeignet, es sei denn, sie sind ausreichend kalibriert.

Konsequenz

- Automatisierung bedingt möglich
- Einbringung von 20+ Jahre Branchenerfahrung bei spezialisierten Beratungsunternehmen durch Kalibrierung der Modelldaten
- Standortspezifische Betrachtung
- Implementierung zusätzlicher automatisierter Korrekturmechanismen

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Fallstudie 2 - Strömungsmodellierung

Ertragsgutachten (Komplex-Onshore)

Herausforderung

die Modellierung von Standorten mit komplexen Anströmverhältnissen und den zugehörigen Strömungsmodellen gestaltet sich als äußerst anspruchsvoll.

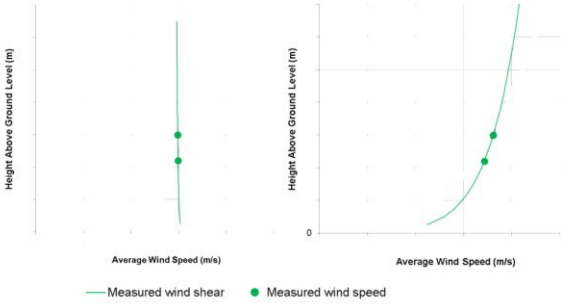
Zukunftsidee: Einsatz von maschinellem Lernen oder künstlicher Intelligenz (Blackbox) wäre möglich aber robust und akzeptabel?

Beispiel: Strömungsmodellierung

- TR6:
  „ Kriterien für die Auswahl des jeweils geeigneten Modells sind nicht eindeutig definiert und können im Rahmen dieser Richtlinie nicht vorgegeben werden. Die Anwendungsgrenzen der jeweiligen Modelle zeigen einen fließenden Übergang und der Nachweis der Eignung eines bestimmten Modelltyps für ein spezielles Projekt ist kaum zu führen. Neben den speziellen Projektgegebenheiten (Eingangsdaten, Geländekomplexität) wird beispielsweise auch die Erfahrung der Person, die das Gutachten erstellt, die Modellauswahl beeinflussen. „

Konsequenz: Manuelle Modellierung

- Trotz relativ einfacher Topographie, Schwierigkeiten wegen ausgeprägter Schichtung in der Atmosphäre
- Einsatz von CFD
- Komplexer Kalibrierungsprozess
- Ein innovativer und projektspezifischer Ansatz, der sowohl Tag- als auch Nachtmodelle berücksichtigt
- 12+ Sensitivitätsmodelle



Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Fallstudie 3 – Wake Modellierung

Ertragsgutachten (Offshore)

Herausforderung
Legacy-Modelle: Ungenauigkeit und/oder ggf. proprietäre Annahmen (Tunings) die eventuell nicht repräsentativ sind.

Hohekomplexität und Ressourcenbedarf moderner Modelle

Herausforderung

- Ältere "analytische" Modelle sind oft unzuverlässig bei neuen, komplexen Windpark-Layouts und erfordern umfangreiche, standortspezifische Anpassungen (Tuning) und Annahmen, was die Zuverlässigkeit einer standardisierten Automatisierung in Frage stellt.
- Die Implementierung fortschrittlicher, physikbasierter Modelle (wie 3D RANS oder LES), die für genaue Prognosen notwendig sind, ist rechenintensiv und erfordert tiefgreifendes Fachwissen, was die Automatisierung technisch anspruchsvoll macht.

Fallbeispiel

- Deutsche Bucht
- 2000+ WEA in Zukunftsszenarien
- 14+ Wakemodellierungsszenarien innerhalb von 30 Jahren
- Abschattungsverluste können bis zu 35% oder mehr betragen
- Bis zu 88% Unterschied zwischen Legacy-Modelle
- Fiktives Delta bis zu 35 MEUR pro Jahr (Beispiel Offshore)
- Die Unsicherheitsbetrachtung stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Fallstudie 4 - Klassifizierungsunsicherheit

Bankfähiges Ertragsgutachten

Herausforderung
Automatisiert =? > Standardisiert =? > weniger standortspezifisch =? > Höhere Unsicherheit? > höhere Projektfinanzierungskosten?

Beispiel: Klassifizierung (Unsicherh.)

- Die Annahme, dass die Automatisierung die TR6-Richtlinie erfüllt oder ggf. bereits umgesetzt wurde.
- Als Grundlage für die Berechnung der Messunsicherheit für die Fernmessgeräte, muss die Klassifizierungsunsicherheit angesetzt werden

$$\sigma_{RSD_{Referenz}} = \sqrt{\sigma_{Verifikation\ RSD_{Referenz}}{}^2 + \sigma_{Klass\ RSD_{Referenz}}{}^2 + \sigma_W{}^2}$$

Konsequenz

- Die Berechnung der Klassifizierungsunsicherheit gestaltet sich relativ komplex.
- Häufig werden die sogenannten „Klassifizierungsnummern“ eingesetzt, da diese den Vorteil bieten, einfach in automatisierte Prozesse integriert werden zu können.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Automatisierung – Ertragsgutachten | Fallstudie 4 - Klassifizierungsunsicherheit

Bankfähiges Ertragsgutachten

Herausforderung

Automatisiert =? > Standardisiert =? > weniger standortspezifisch =? > Höhere Unsicherheit? > höhere Projektfinanzierungskosten?

Automatisiertes Fiktivscenario

- Offshore Projekt
- 1.4% KlassRSD (FLS)

$$\sigma_{RSD_{Referenz}} = \sqrt{\sigma_{Verifikation\ RSD_{Referenz}}{}^2 + \sigma_{Klass\ RSD_{Referenz}}{}^2 + \sigma_w{}^2}$$

Manuell/Projektspezifisch

- Berechnung nach IEC TS 61400-50-4 ED1
- 0.0% KlassRSD (FLS)

Vorbehalt:

Es ist möglich, dass bestimmte FLS-Typen eine Klassifizierungsunsicherheit von 0 % erhalten (dadurch kompatibel mit Automatisierung werden). Dies ist jedoch Gegenstand einer separaten Diskussion, da Umgebungsparameter und deren Auswirkungen auf die „Klassifizierung“ zu berücksichtigen sind, insbesondere wenn bestimmte Standorte möglicherweise nicht innerhalb der „Testdatensätze“ liegen.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Teil 4

Fazit and Ausblick

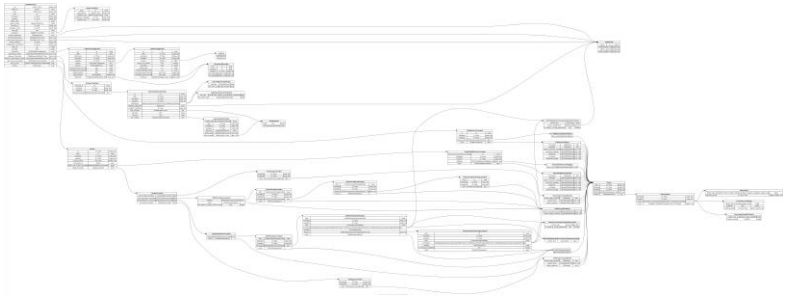
© 2025 OWnD

Normenwandel – EYA DEF

IEC 61400-15-2 EYA DEF (digital exchange format)

IEC 61400-15-2 führt ein Digital Exchange Format (DEF) ein, das das JSON-Schema verwendet, um schriftliche Berichte zu ergänzen.

Entwickler können EYA-Daten direkt in Modelle laden und die Ausgaben ohne manuelle Verarbeitung mit Stakeholders teilen.



Berlin, Germany | info@orangewind.io

Normenwandel – wissenschaftliche Diskussionen

Herausforderungen in der EYA-Prozesskette aus akademischer Perspektive (Diskussion)

- Verifikation von schwimmenden Lidar-Systemen in größeren Höhen
- TI-Korrektur in Lidar-Systemen
- Einfluss des Seegangs auf unterschiedliche Bedingungen
- Was ist Messung und was ist ein Modell?

WeDoWind

Eine Open-Innovation-Community, die sich auf die Beschleunigung von Lösungen für die Windenergie konzentriert, indem sie Industrie, Wissenschaft und Interessengruppen zusammenbringt, um neue Ansätze gemeinsam zu validieren.

Bietet eine digitale Plattform, auf der die Teilnehmer Datensätze, Modelle und Ergebnisse transparent austauschen können, um die Reproduzierbarkeit und schnelle Skalierung von Innovationen zu fördern.

Findable, Accessible, Interoperable, Reusable (FAIR Data): ein Rahmenwerk, das sicherstellt, dass Forschungsdaten leicht entdeckt, plattformübergreifend genutzt und in zukünftige Arbeiten integriert werden können.

Fördert maschinell verwertbare Metadaten und standardisierte Formate und ermöglicht so eine langfristige Wertschöpfung aus Datensätzen, die über ihren ursprünglichen Kontext hinausgehen.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Auswirkungen und nächste Schritte

Mit traditionellen Systemen können wir mehr erreichen, ohne neue Ansätze zu implementieren.

Erreichbare Maßnahmen zur Verbesserung der Automatisierung und Qualitätssicherung

- Bereinigen und strukturieren Sie Ihre proprietären Informationen
- Stellen Sie Beziehungen zwischen QA-Checkliste und neuesten Standards her
- Verwenden Sie vom Unternehmen bereitgestellte LLMs mit angemessenem Prompt Engineering
- Idealerweise implementieren Sie eine relationale (oder Graph-) Datenbank für Metadaten
- Beginnen Sie mit der Verwendung von EYA-DEF.
- Sprechen Sie mit Ihren Kollegen und Software-Ingenieuren über Anwendungsfälle für die Automatisierung

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Wichtige Erkenntnisse zum Zusammenhang von Automatisierung

Projektspezifische Komplexitäten sind schwer zu automatisieren

QS-Systeme (automatisiert oder manuell) sind unerlässlich

Eine automatisierte EYA-Analyse ist unvermeidlich, ähnlich wie die Notwendigkeit, projektspezifische Fragen in einem bestimmten zukünftigen Zeitpunkt des Projekts zu verteidigen und zu beantworten.

Automatisierung in der Qualitätssicherung unter fachkundiger Aufsicht erleichtert den Übergang und verhindert, dass sich die unterschiedlichen Anforderungen im Projektlebenszyklus vermischen.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Auswirkungen und Fragen für die nächsten Schritte

Potenzial und offene Fragen

- Viele Lösungen bereits verfügbar
- Implementierung
- Wie können solche neuartigen Konzepte in starre Akkreditierungssysteme eingeführt werden?

13. November 2025 | Forum 37 | 15:30–16:00
„Komplexität navigieren: Rahmenkonzept einer praxisnahen QA-Plattform mit Expertenabsicherung zur Bankfähigkeit künftiger Ertragsprognosen

Schlussfolgerung und Ausblick

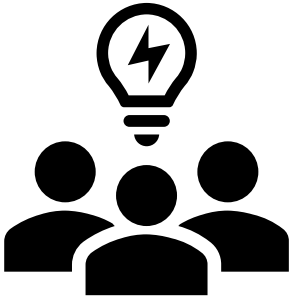
Eine robuste Automatisierung, die neue IEC-Normen, Branchenerfahrung und akademische Fortschritte widerspiegelt, kann das Vertrauen der Kreditgeber stärken und den Prozess beschleunigen.

Die Digitalisierung und Automatisierung stellen unverzichtbare Instrumente dar, um die Erreichung der Klimaziele mit dem Businesscase in Einklang zu bringen.

Automatisierte Ertragsgutachten mit KI-gestützten (QMS) könnten pauschale Annahmen in der Unsicherheitsanalyse adressieren, mit dem Potenzial der Reduzierung von Unsicherheiten und Senkung der Projektfinanzierungskosten.

Berlin, Germany | info@orangewind.io

Diskussion



Orangewind

„driven by winds, powered by purpose"

Berlin, Germany | info@orangewind.io

© orangewind, 2025
orangewind.io

Orangewind