

Schlussbericht zum Teilvorhaben

„Koordination - Aufbau und Betrieb - Forschungswindenergieanlagen und
Messsysteme - Windleistungsprognose und Langzeitbezugsverfahren“

im Zuge des Verbundvorhabens

„Realisierung und Charakterisierung einer süddeutschen Forschungsplattform
für Windenergie im bergig-komplexen Gelände“

Akronym „**WINSENT**“



Förderkennzeichen 0324129A

Berichtszeitraum: 1. Dezember 2016 – 30. September 2024

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart-Vaihingen

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Ein Vorhaben des süddeutschen
Windenergie-Forschungsclusters



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autorinnen und Autoren:

- Andreas Rettenmeier, Projektleiter
- Florian Haizmann, stellv. Projektleiter
- Henning Jachmann
- Maayen Wigger
- Frank Sehnke
- Nico Klar
- Daniel Leukauf
- Jan Anger
- Marie Hundhausen
- Stoyan Trenchev
- Martin Felder
- Anton Kaifel
- Linda Menger
- Kay Ohnmeiß
- Marcel Zoller

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	4
1. Aufgabenstellung.....	4
2. Voraussetzungen des Vorhabens	5
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
5. Literaturverzeichnis.....	8
6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
II. Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele, Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.....	9
AP 0 Koordination.....	9
AP 0.1 Koordination des Gesamtvorhabens und der Teilprojekte.....	10
AP 0.2 Vorbereitende Maßnahmen Forschungsbetrieb	14
AP 0.3 Öffentlichkeitsarbeit, Technologietransfer	17
AP 1 Aufbau und Betrieb	28
AP 1.1 Windmessmasten.....	28
AP 1.2 Forschungs-WEA	36
AP 1.3 Betrieb Windtestfeld.....	84
AP 2 Mikroklima	102
AP 2.3 Analysen	102
II. Eingehende Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	114
II. Eingehende Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	114
II. Eingehende Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	115
II. Eingehende Darstellung der während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	117
II. Eingehende Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.	117

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens wird ein Windenergie-testfeld im bergig-komplexen Gelände errichtet und bereitgestellt. Der Standort des Testfelds und dessen Ausstattung wurden bereits im Rahmen des Vorhabens KonTest (FKZ: 0325656A-D, BMWi) identifiziert. Das Testfeld bietet eine reale, sowie virtuelle Umgebung für die Erforschung des dynamischen Verhaltens von Windenergieanlagen (WEA) in komplexem Gelände, sowie die Möglichkeit zur Erprobung neuer Technologien und Regelungsstrategien. Die offene Plattform unterstützt die Nutzung der Windenergie in komplexem Gelände durch verbesserte Vorhersagen von Leistung und mechanischer Anlagenbelastung und durch das Aufzeigen und Erschließen von Potenzialen zur Ertragssteigerung, ebenso wie zur Reduktion von Betriebslasten. Das Gesamtprojekt verfolgt entsprechend die drei übergeordneten Ziele:

- (1) Aufbau und Bereitstellungsstellung einer weltweit einmaligen Forschungsplattform für die Windenergieforschung und Weiterentwicklung vom Komponenten und Systemen in Zusammenarbeit mit der Wissenschaft und der Industrie.
- (2) Aufbau und Validierung einer Modellkette zur Simulation der Strömungsverhältnisse von der Mesoskala bis zur Rotorblattumströmung.
- (3) Definition und Errichtung zweier Forschungswindenergieanlagen, einschließlich validierter virtueller Simulationsumgebungen und Entwurf eines offenen Forschungs-Windenergieanlagenreglers.

Das Vorhaben gliedert sich neben der Koordination in die drei Teilprojekte „Aufbau und Betrieb“, „Mikroklima“ sowie „FoWEA“ (vgl. Abbildung 1). Die wissenschaftliche und technische Gesamtkoordination des Verbundvorhabens erfolgt durch das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW).

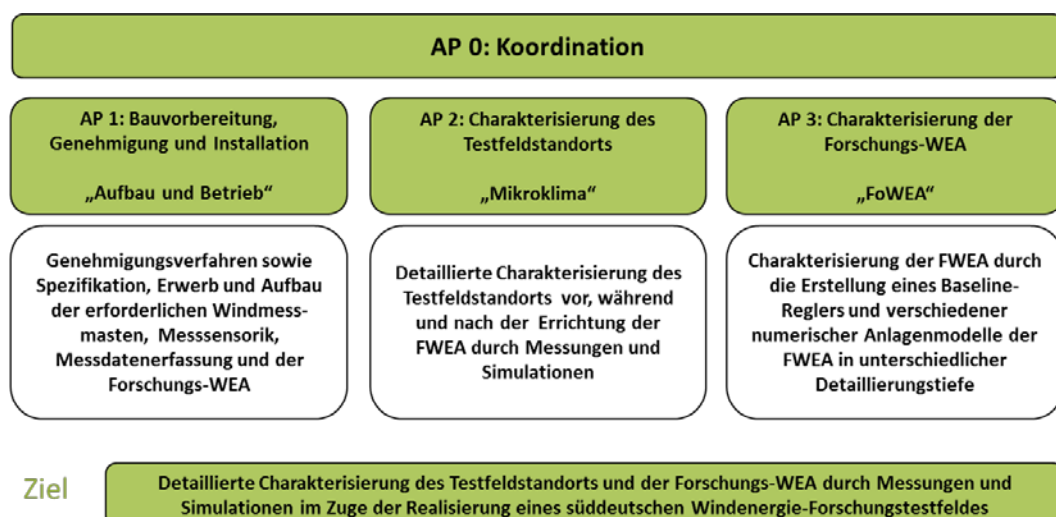


Abbildung 1 Gesamtprojektstruktur des Forschungsvorhabens WINSent [ZSW]

2. Voraussetzungen des Vorhabens

Rückblickend war der Weg zum Testfeld sehr viel schwieriger und länger als erwartet. Bereits im Jahr 2017 wurde das Genehmigungsverfahren nach Bundesimmissionsschutzgesetz im parallellaufenden Landesvorhaben WINSent-BW angestoßen. Es war jedoch aufgrund der starken Verbreitung des Rotmilans und anderer windenergiesensibler Arten am geplanten Standort trotz des Forschungscharakters des Testfelds sehr anspruchsvoll, alle artenschutzrechtlichen Anforderungen zu erfüllen, was letztlich mit einem aufwändigen Vermeidungs- und Risikomanagementkonzept gelungen ist. Doch nicht alle Naturschützer sahen die Chancen, die mit Forschungsvorhaben auf dem Testfeld für den Artenschutz verbunden sind. Eine kleine, der Windenergienutzung generell kritisch gegenüberstehende Naturschutzinitiative erhob zunächst Widerspruch gegen die im Juni 2020 erteilte BImSchG-Genehmigung des Testfelds und reichte nach dessen Abweisung Klage beim Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg ein. So dauerte es allein fast zweieinhalb Jahre, bis die Genehmigung nach der mündlichen Verhandlung und dem Urteilsspruch der Verwaltungsrichter im Oktober 2022 rechtskräftig bestätigt wurde.

Weitere Verzögerungen ergaben sich aufgrund der Insolvenz von Firmen und dem Wegfall des ursprünglich geplanten WEA-Herstellers. Die Entscheidung, die für die Forschung konzipierten WEA selbst zu bauen führte nicht zuletzt auch durch Lieferengpässe und Kostensteigerungen aufgrund der globalen Coronakrise sowie des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine zu weiterem zeitlichen Verzug und weiteren Fördermittelbedarfen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Gesamtvorhabens war aufgrund der unvorhersehbaren und unverschuldeten Verzögerungen und des damit verbundenen Mehraufwands weitaus komplexer und umfangreicher als bei der ursprünglichen Antragsstellung geplant.

Sowohl die Ausgaben- und Kostenplanung, als auch die Zeitplanung mussten während der überdurchschnittlich langen Vorhabenlaufzeit mehrfach angepasst werden. Kostensteigerungen wurden im Zuge zweier Aufstockungen weitestgehend kompensiert, dem zeitlichem Verzug mit mehreren budgetneutralen Verlängerungen entgegnet. Das Vorhaben endete am 30.09.2024 und damit mehr als vier Jahre später als ursprünglich geplant (31.05.2020). Die Gesamtzuwendung erhöhte sich aufgrund zweier notwendiger Aufstockungen.

Gründe hierfür liegen zum einen in unvorhersehbaren und unverschuldeten Vorkommnissen, wie zum Beispiel Firmeninsolvenzen, die COVID-19 Pandemie und der Angriffskrieg auf die Ukraine und zum anderen in dem Widerspruch und der Klage einer Naturschutzinitiative aus dem Westerwald gegen die erteilte BImSchG-Genehmigung des Landratsamts Göppingen. Bis zur Klärung des Sachverhalts wurden die Mittelverausgabung, Beschaffungen und Bauarbeiten vorläufig gestoppt oder auf ZSW-seitiges Risiko fortgeführt, bis am Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg in Mannheim die Klage vollumfänglich und unanfechtbar abgewiesen wurde.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Aufgrund der Komplexität des Vorhabens wird im Weiteren auf die folgenden drei wesentlichen Punkte eingegangen, die das Vorhaben charakterisieren:

- Windenergie-Forschungstestfelder in bergig-komplexem Gelände,
- Forschungswindenergieanlagen,
- Standortcharakterisierung.

Windenergie-Forschungstestfelder in bergig-komplexem Gelände

Das Forschungstestfeld Aláiz des spanischen Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) ist seit einigen Jahren in Betrieb und bietet inzwischen die Möglichkeit, auf nunmehr sechs Testparzellen Prototypen von Windenergieanlagen bis zu einer Nennleistung von 5 MW zu testen. Die Testparzellen sind nach gültiger IEC-Norm standortkalibriert und mit insgesamt fünf Windmessmasten (WMM) ausgestattet, welche auf verschiedenen Höhen von 40 m bis 120 m meteorologische Größen erfassen. Nach aktuellem Stand und Wissen wird keine Testparzelle von einer für die Wissenschaft und Industrie zugänglichen, gläsernen FWEA mit offener Betriebsführung und Design genutzt.¹

In der Schweiz wurden trotz der Wichtigkeit, die Windenergieforschung auf nationaler Ebene voranzutreiben², nach einer Internetrecherche keine weiteren Anstrengungen unternommen, ein Testfeld an einem komplexen Standort zu realisieren.

Forschungswindenergieanlagen

FWEA mit offenen Konstruktionsdaten und dem Zugriff auf die Anlagensteuerung sind weiterhin sehr rar, ihr Bestand hat sich zuletzt noch reduziert: Ende April 2021 wurde die Forschungsanlage „CART3“ (Controls advanced research turbine) des amerikanischen National Renewable Laboratory NREL in Boulder, Colorado, abgebaut. Die dreiblättrige WEA wurde neben Lidar-gestützter Reglerentwicklung des WindForS Partners SWE³ auch im Verbundvorhaben „SmartBlade2“ (FKZ 0324032A-H, 14,15 Mio. €) genutzt. Damit endet die Ära einer speziell für Reglerentwicklung und -validierung umgebauten Forschungsanlage, deren Anlagenmodell und Regler öffentlich zugänglich waren. Die Schwesteranlage CART2, eine WEA mit zwei Rotorblättern, ist nach aktuellem Stand noch in Betrieb.

In Europa gibt es eine Forschungsanlage auf dem Risø Campus der Dänisch Technischen Universität (DTU) vom Typ Vestas „V-52“⁴. Sie steht im flachen Gelände unmittelbar am Roskilde Fjord und ist mit einer mechanisch ausgeführten, kollektiven Blattverstellung ausgestattet, weshalb Experimente zur Einzelblatt-Verstellung (Individual pitch control (IPC)) nicht möglich sind. Auch werden über die DTU bislang keine numerischen Modelle oder Regler der WEA öffentlich zugänglich gemacht.

¹ <https://www.cener.com/en/wind-turbine-test-laboratory-lea/experimental-alaiz-wind-farm/>, zuletzt
zugegriffen am 16.04.2025

² <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=22604>, zuletzt zugegriffen am 16.04.2025

³ <https://elib.uni-stuttgart.de/items/70c794e5-be4d-4e85-830e-51a6049a52dd>, zuletzt zugegriffen am
16.04.2025

⁴ <https://windenergy.dtu.dk/english/research-infrastructure/research-facilities/the-research-wind-turbine-v52>,
zuletzt zugegriffen am 16.04.2025

Das DLR e.V. plant im Forschungspark Windenergie „WiValdi“⁵ in Krummendeich (flaches Gelände, Küstennähe) u.a. die Errichtung einer Experimentalturbine in ähnlicher Größenordnung mit einer Nennleistung von 500kW sowie einem Rotordurchmesser und einer Nabenhöhe von jeweils 40m. Das DLR wird bei dieser Experimentalturbine ebenfalls den vollständigen Zugriff auf die Konstruktionsdaten und auf die Betriebsführung haben, weshalb sich zukünftig Vergleiche und Experimente mit den WINSent-Forschungsanlagen anbieten. Ob auch ein Open-Science Konzept verfolgt wird, ist bislang unbekannt.

Standortcharakterisierung

Die Standortplanung und der Betrieb von Windkraftanlagen für Test- und Produktionszwecke in komplexem Gelände bergen große, im jeweiligen Mikroklima des Standorts liegende Herausforderungen. Dabei wird der Begriff Klima hier in einem erweiterten Sinne benutzt, der nicht nur die langzeitigen statistischen Eigenschaften der meteorologischen Verhältnisse auf dem Testfeld charakterisiert, sondern auch die kurzfristig auftretenden aktuellen Wetterzustände. Hierzu zählen nach derzeitigem Wissen [1], [2] unter anderem:

- die Wechselwirkung von zugleich auftretenden wetterbedingten, großskaligen, durch die naturräumliche Gliederung bedingten mesoskaligen und lokalen mikroskaligen dynamischen Strömungseffekten,
- Berg- und Talwinde, Hangwinde und Kaltluftabflüsse, die durch die unterschiedliche Erwärmung oder Abkühlung der Erdoberfläche thermisch getrieben sind, und welche mitunter Einfluss auf die von den WEA ausgehenden Schallemissionen haben können,
- lokale Beschleunigungen oder Verzögerungen der Winde in der atmosphärischen Grenzschicht durch den Einfluss der Geländeform wie z.B. durch Verdrängungseffekte über Erhebungen oder Lenkung der Strömung durch Taleinschnitte,
- Strömungsablösungen an Gelände- und Landschaftsübergängen bei unterschiedlicher Schichtung der Atmosphäre,
- Beeinflussungen der Windströmung durch unterschiedliche Landnutzung wie z.B. Wald [3], Landwirtschaft [4] und Bebauung [5].

Diese Phänomene haben erfahrungsgemäß folgende unerwünschte Effekte:

- hohe Turbulenzgrade führen zu erhöhten mechanischen Belastungen der WEA,
- topographische und orographische lokale Gegebenheiten können erhebliche Fehlanströmungen hervorrufen und damit die WEA zusätzlich mechanisch belasten bzw. den Ertrag mindern,
- der Langzeitbezug und die Modellierung der direkten Zuströmung auf die WEA ist mit den bisher entwickelten Methoden nicht ausreichend gegeben, da lokale Strömungsphänomene keine Berücksichtigung finden,
- der Vorhersagefehler für die Windleistung ist im komplexen Gelände höher und führt damit zu einer höheren Fehleinschätzung von Einspeiseprognosen, was die Systemintegration von EE-Erzeugern erschwert.

⁵ <https://forschungspark-windenergie.de/>, zuletzt zugegriffen am 16.04.2025

Zur numerischen Modellierung der mikroklimatischen Verhältnisse solcher Standorte stehen derzeit numerische Modelle für verschiedene Skalen zur Verfügung (mesoskalige Wettermodelle, mikroskalige Modelle, CFD-Modelle für WEA), welche jedoch noch individuell verbessert oder auch miteinander gekoppelt werden sollten. Insbesondere im Bereich der Schnitt- und Übergabeebenen zwischen den Skalen, aber auch um die Einflüsse der thermischen Schichtung der Atmosphäre und der Vegetation (z.B. Belaubung) ausreichend genau untersuchen zu können, sind weitere Arbeiten notwendig [7].

Bezüglich der Wechselwirkung von WEA mit ihrer Umgebung sind Eisbildung an WEA [8] und die Schallausbreitung von WEA [8] immer noch nicht hinreichend gelöste Probleme. Bodenbewegungen sind bezüglich der Translationen teilweise erforscht [9], die Rotationsbewegungen sind völlig unbekannt. Auch der Einfluss von WEA auf das Mikroklima und auf die Austauschvorgänge durch turbulente Flüsse von Wärme und Feuchte zwischen Boden und Vegetation und der Atmosphäre sind Gegenstand aktueller Untersuchungen

5. Literaturverzeichnis

- [1] Emeis, S., 2012: Wind Energy Meteorology - Atmospheric Physics for Wind Power Generation. Series: Green Energy and Technology. Springer, Heidelberg etc., XIV+196 pp.
- [2] Petersen, E.L., I. Troen, 2012: WIREs Energy Environ 2012, 1: 206–217 DOI: 10.1002/wene.4.
- [3] Shannak, B., K. Träumner, A. Wieser, U. Corsmeier, C. Kottmeier, 2012: Flow characteristics above a forest using light detection and ranging measurement data. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 226, 921-939. DOI: 10.1177/0954406211417944
- [4] Schädler, G., 1990: Triggering of atmospheric circulations by moisture inhomogenities of the earth's surface. Bound.-Layer Meteor., 51, 1-29. DOI: 10.1007/BF00120459
- [5] Emeis, S., K. Baumann-Stanzer, M. Piringer, M. Kallistratova, R. Kouznetsov, V. Yushkov, 2007: Wind and turbulence in the urban boundary layer – analysis from acoustic remote sensing data and fit to analytical relations. Meteorol. Z., 16, 393-406.
- [6] El Bahlouli, A., Knaus, H., Leukauf, D., zum Berge, K., "Coupling mesoscale-microscale models for characterising the wind flow in complex terrain", WESC 2019
- [7] Heimann, D., Y. Käsler, G. Gross, 2011: The wake of a wind turbine and its influence on sound propagation. Meteorol. Z., 20, 449-460. DOI: 10.1127/0941-2948/2011/0273
- [8] Roy, S.B., J.J. Traiteur, 2010: Impacts of wind farms on surface air temperatures. PNAS, October 19, 2010, 107, no. 42, 17899–17904. DOI: 10.1073/pnas.1000493107
- [9] Nagel, S., Zieger, T., Luhmann, B., Knödel, P., Ritter, J., Ummenhofer, T., 2019: Erschütterungsemissionen von Windenergieanlagen, *Stahlbau*, 88, 559-573.

6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Zusätzlich zum stetigen Austausch und der Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern und weiteren Mitgliedern des süddeutschen Forschungsclusters WindForS, wurde mit zahlreichen anderen Stellen und Firmen zusammengearbeitet. Beispielhaft seien hier das Test Wind Turbine Committee der EAWE, die IEA Wind TCP Task 50 „Hybrid Power Plants“ und Task 57 „JAM“, das Umweltbundesamt (UBA) sowie Gemeinde- und Ortschaftsräte genannt.

Eine detailliertere Aufführung ist den Arbeitsergebnissen des AP 0.3 zu entnehmen.

II. Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele, Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Die Arbeiten des Teilvorhabens des ZSW erfassten die Arbeitspakete AP0, AP1 und AP2, wobei neben der Gesamtkoordination (AP0), in AP1 der Aufbau des WindForS-Testfelds und sukzessive der Testfeldbetrieb erfolgte. In AP2 „Mikroklima“ wurde der Standort vor der Errichtung und Installation der Forschungswindenergieanlagen (FWEA) umfassend charakterisiert. Die Charakterisierung nach der Inbetriebnahme der FWEA wird im aktuellen Folgevorhaben WINSentvalid (FKZ 03EE2048A-F, BMWK) bearbeitet. Die erhobenen Messdaten fließen in die Weiterentwicklung von Simulationsmodellen sowie zur Verbesserung von Vorhersagesystemen und Langzeitbezugsverfahren ein. In AP3 wurden von den Verbundpartnern numerische Simulationsmodelle unterschiedlichen Detaillierungsgrades der FWEA entwickelt. Das ZSW war jedoch an keinen Arbeitspaketen des AP 3 beteiligt.

AP 0 Koordination

Das Teilprojekt „Koordination“ beinhaltet die gesamten Arbeiten rund um die Projektkoordination (AP 0.1) sowie Arbeiten, welche den reibungslosen Ablauf während der Errichtungs- und Betriebsphase gewährleisten (AP 0.2). Die Gesamtkoordination des Vorhabens übernahm das ZSW, welches sowohl das Landesvorhaben WINSent-BW als auch das Vorhaben WINSent koordinierte und auch das Forschungstestfeld betreibt. Die Öffentlichkeitsarbeit und der Austausch bzw. die Kooperation mit nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen fand im dritten Teil-Arbeitspaket AP 0.3 statt. Ziel war hierbei, dass bereits während des Aufbaus des WindForS-Testfeldes weitere Kooperationen geschlossen und für zukünftige Forschungsarbeiten geworben werden konnte.

Im Laufe der Vorhabenlaufzeit wurden Inhalte der begonnenen (AP 0.2.2) und zum Teil noch nicht gestarteten Arbeitspakete (AP 0.2.3) in das Folgevorhaben WINSentvalid verschoben.

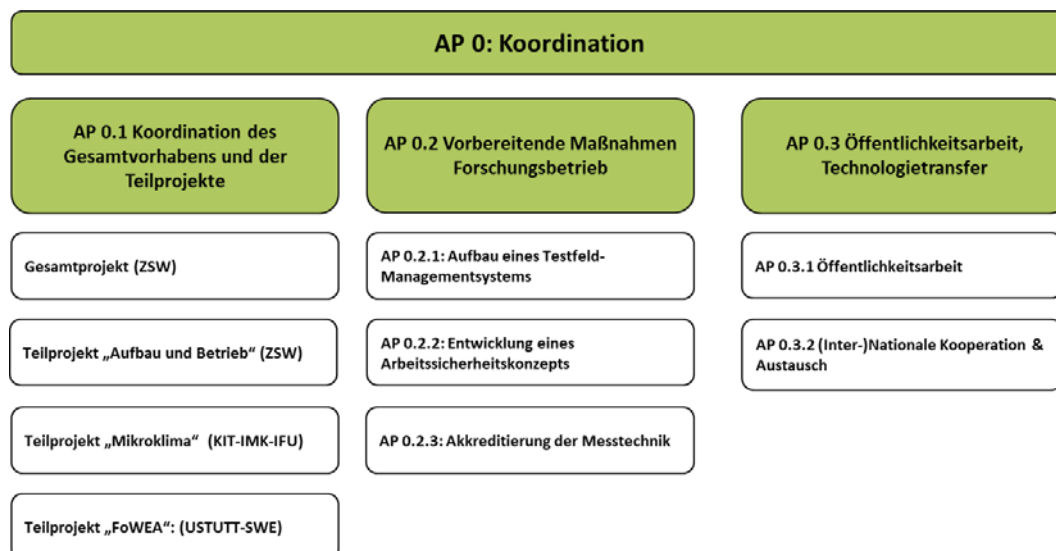


Abbildung 2: Struktur des Arbeitspakets „Koordination“

AP 0.1 Koordination des Gesamtvorhabens und der Teilprojekte

AP 0.1.1/ 0.1.2 Leitung des Gesamtvorhabens und des Teilprojekts „Aufbau und Betrieb“

Anfang Januar 2017 fand das Kick-Off Meeting zum Verbundvorhaben “WINSent” am ZSW in Stuttgart statt. Unter Mitwirkung der am Projekt beteiligten Institute und des Projektträgers Jülich wurden am Vormittag Themen der generellen Projektabwicklung (Fristen der Zwischenberichte- und nachweise, Kooperationsvereinbarung, Datenaustausch, Öffentlichkeitsarbeit, u.v.m.) angesprochen. Das ZSW stellte zur Durchführung des Vorhabens den Verbundpartnern einen Projektserver in Form einer Cloud zum Austausch von Daten während der gesamten Laufzeit zur Verfügung. Die inhaltlichen Arbeiten der drei Teilprojekte wurden am Nachmittag in Kleingruppen diskutiert und die Arbeiten für die kommenden Monate abgestimmt

Weitere, meist halbjährliche, Projekttreffen folgten im Laufe des Vorhabens. Einige fanden im Zuge von „WindForS-Spring Meetings“, bei Verbundpartnern, am ZSW oder Corona-bedingt sehr häufig virtuell statt.

Im August 2018 wurde beim Projektträger Jülich aufgrund von Verzögerungen ein Antrag auf Verschiebung des kritischen Meilensteins 1.9 „BlmSchG-Genehmigung erteilt“ gestellt. Da es sich um einen Abbruchmeilenstein für das Gesamtvorhaben handelt, mussten alle Verbundpartner den Antrag auf Verschiebung individuell stellen und jene Arbeitspakete benennen, an denen im Verschiebungszeitraum weitergearbeitet werden konnte und welche Mittel hierzu benötigt wurden. Die Aufgabe des Gesamtkoordinators bestand in der Kommunikation mit den Verbundpartnern, in der Ausarbeitung einer Vorlage für den Antrag auf Verschiebung, sowie in der Abstimmung und Aktualisierung der Zeitpläne für die einzelnen Arbeitspakete.

Im Februar 2019 musste beim Projektträger Jülich ein zweites Mal der Antrag auf Verschiebung des kritischen Meilensteins gestellt werden. Die weitere Verzögerung war abermals nicht durch die bisherige Vorhabenarbeit verursacht. Die Gründe lagen in der unerwartet hohen Komplexität im Verfahrens- und Genehmigungsablauf aufgrund der Entwicklungen zum Natur- und Artenschutz am Testfeldstandort. Zusätzlich waren Gründe in der schleppenden Zuarbeit von externen Gutachtern und dem Projektierer zu suchen. Zudem war die Flächensicherung für die notwendigen Vermeidungsmaßnahmen für die in der Umgebung vorkommenden windkraftrelevanten Vogelarten Rotmilan, Raubwürger und Feldlerche sehr mühsam. All diese Umstände führten dazu, dass der bisherige Zeitplan zum Erhalt der Genehmigung nach Bundesimmissionsschutzgesetz (BlmSchG) nicht fristgerecht eingehalten werden konnte und der Abbruchmeilenstein abermals verschoben werden musste.

Die BlmSchG-Genehmigung konnte bis zum 30. September 2019 (Abbruchmeilenstein im Bundesvorhaben) aufgrund der einzuhaltenden Fristen innerhalb des Genehmigungsverfahrens wieder nicht erreicht werden, weshalb eine Verschiebung des Meilensteins abermals beantragt wurde. Ende September 2019 wurde dem ZSW ein Schreiben übermittelt, mit dem das Landratsamt Göppingen als Genehmigungsbehörde das Ergebnis der überschlägigen Ersteinschätzung der vorgelegten Unterlagen zum BlmSchG-Genehmigungsverfahren für das Windenergie-Forschungstestfeld Donzdorf/Geislingen durch die maßgeblichen Fachbehörden mitgeteilt hatte. Es wurde mitgeteilt, „dass bei der Prüfung keine unüberwindbaren Hürden bezüglich der Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens festgestellt werden konnten.“ Letzt genannte Aussage „gilt

unter der Bedingung, dass die notwendigen artenschutzrechtlichen Ausnahmen durch das Regierungspräsidium Stuttgart erteilt wird.“ Zum Thema Artenschutz fand Ende September 2019 ein Behördentermin beim ZSW statt bei dem Vertreter des Umweltministeriums Baden-Württemberg, des Regierungspräsidiums Stuttgart und der unteren Naturschutzbehörde des Landratsamts Göppingen sowie die an der Untersuchung beteiligten Gutachter anwesend waren. Es wurden unter anderem die Ausnahmeanträge für die windkraftrelevanten Vogelarten Rotmilan, Uhu und Raubwürger diskutiert und im Folgenden eingereicht. Das Regierungspräsidium Stuttgart als höhere Naturschutzbehörde stimmte Mitte April 2020 gemäß § 45 Absatz 7 Satz 1 Nr. 3 BNatSchG der Erteilung einer Ausnahmegenehmigung zu.

Die für das erste/zweite Quartal 2020 in Aussicht gestellte BImSchG-Genehmigung für das Forschungstestfeld WINSent konnte aufgrund der sich inzwischen ausbreitenden Corona-Pandemie nicht erteilt werden. Hintergrund war unter anderem die Abordnung von Mitarbeitern der Immissionsschutz- und Naturschutzbehörde des Landratsamtes Göppingen zum dortigen Gesundheitsamt. Die Verzögerung wurde dem Projektträger Jülich mitgeteilt und um eine zeitliche, vierte Verschiebung der Frist zur Einreichung des Meilensteinberichts um weitere vier Monate auf den 31. Juli 2020 gebeten. Separat wurde seitens des ZSW und der Verbundpartner aufgrund dieser Verzögerung eine erstmalige budgetneutrale Verlängerung des Vorhabens beantragt. Die Genehmigung nach BImSchG wurde seitens des Landratsamts Göppingen dann am 04. Juni 2020 erteilt. Der Bericht für den Abbruchmeilenstein 1.9 „BImSchG-Genehmigung erteilt“ wurde innerhalb der gesetzten Frist am 30. Juni 2020 dem Projektträger Jülich übermittelt, so dass sämtliche gesperrte Mittel des ZSW und der Verbundpartner freigegeben werden konnten.

Um das Windenergie-Forschungstestfeld nach erteilter BImSchG-Genehmigung auch rechtssicher errichten und betreiben zu können, wurde nach Rücksprache mit dem Landratsamt Göppingen, dem am Landesvorhaben WINSent-BW beteiligten Projektierer und einer Anwaltskanzlei seitens ZSW der Antrag auf freiwillige öffentliche Bekanntmachung gemäß § 21a Satz 1 der 9. BImSchV gestellt. Die Auslegungs- und Rechtsbehelfsfristen dieser öffentlichen Bekanntmachung endeten Mitte August.

Am 13. Juli 2020 hatte die bundesweit nach § 3 UmwRG anerkannte Umweltvereinigung Naturschutzinitiative e.V. aus dem Westerwald Widerspruch gegen die erteilte BImSchG-Genehmigung für das vom Land und Bund geförderten Windenergie-Forschungstestfeld WINSent zunächst ohne Begründung eingelegt. Das ZSW hatte daraufhin gemäß § 80a Absatz 1 Ziffer 1 VwGO die Anordnung der sofortigen Vollziehung Mitte August 2020 beim Landratsamt Göppingen beantragt. Die Anordnung der sofortigen Vollziehung durch das LRA erfolgte mit Bescheid Anfang September 2020, so dass die gestoppten Bauplanungen und -Maßnahmen wiederaufgenommen werden konnten. Die hierdurch entstandene Verzögerung machte alle getroffenen Baufeldvorbereitungen samt entstandener Kosten zunichte. Die Absagen an Baufirmen und die Wiederaufnahme der Ausschreibungen und Gespräche verzögerten im Folgenden den Projektverlauf zum Teil erheblich. Bereits begonnene Baumaßnahmen konnten indes auf ZSW-eigenes Risiko fortgeführt und teilweise beendet werden.

Fristgerecht wurde durch den Anwalt der Naturschutzinitiative e.V. eine Begründung zum Widerspruch Mitte September 2020 beim zuständigen LRA Göppingen eingereicht. Er begründete den Widerspruch nicht nur mit dem Naturschutz (u.a. Ausnahmegenehmigungen), sondern nannte auch weitere formale und inhaltliche Gründe. Aufgrund des eingegangenen Widerspruchs mussten zunächst sämtliche Baumaßnahmen, die auf der Grundlage der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung durchgeführt

werden sollten, eingestellt werden. Außerdem wurden seitens der Baurechtsämter keine weiteren Baufreigaben erteilt und Mittel im geförderten Vorhaben gesperrt. Im Bundesvorhaben wurde in einer Online-Konferenz am 8. Oktober 2020 mit Vertretern des PtJ, des BMWK, des Projektträgers Karlsruhe und des Umweltministeriums Baden-Württemberg die bisherigen Arbeiten, die bestehenden Herausforderungen (Widerspruch u.a.m.) und Szenarien zur Zielerreichung diskutiert.

Das LRA Göppingen gab mithilfe seiner entsprechenden Fachbehörden Mitte November 2020 einen Vorlagebericht an das RP Stuttgart ab. Unabhängig von der Entscheidung des RP Stuttgart verständigten sich sowohl das Umweltministerium Baden-Württemberg als auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz darauf, das Testfeld ungeachtet einer möglichen Klage der Naturschutzinitiative gegen den Widerspruchentscheid fertigstellen zu wollen. Aufgrund der Verzögerungen und damit verbundenen Teuerungen sowohl im Landes- als auch im Bundesvorhaben wurde das ZSW aufgefordert, den Mittelmehrbedarf abzuschätzen und die Mehrbedarfe in Form von Aufstockungen zu beantragen. Des RP Stuttgart setzte sich sowohl mit der Begründung des Widerspruchs als auch mit dem Vorlagebericht des LRA Göppingen auseinander und wies den Widerspruch Ende März 2021 als unbegründet zurück.

Innerhalb der gesetzlichen Frist von vier Wochen nach Ablehnung des Widerspruchs hatte Ende April 2021 der Anwalt der Naturschutzinitiative e.V. Klage gegen das Land Baden-Württemberg, vertreten durch das LRA Göppingen, eingereicht. Am 5. Oktober 2022 fand schließlich ein Termin beim Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg in Mannheim in der Verwaltungsrechtssache Naturschutzinitiative e. V./ Land Baden-Württemberg statt. Im Urteilsspruch wurde die Klage abgewiesen und keine Revision zugelassen. Die „Naturschutzinitiative“ verzichtete im Nachgang darauf, Beschwerde gegen die Nichtzulassung der Revision zu beantragen. Nach dem Ablauf entsprechender Fristen und Zeiten stand seit 9. Dezember 2022 fest, dass das Urteil des Senats vom 5. Oktober rechtskräftig und damit auch die immissionsschutzrechtliche Genehmigung bestandskräftig ist.

Im Bundesvorhaben wurde in einem weiteren Gespräch mit dem PTJ am 2. Februar 2021 Vertretern des PtJ die aktuellen Entwicklungen um den Hersteller der beiden FWEA erläutert (vgl. AP 1.2.4). Im Nachgang wurde in einer zweiseitigen Kostenaufstellung der Mittelmehrbedarf zur Erreichung der Vorhabenziele aufgeführt. Es folgte ein Aufruf zur Skizzeneinreichung (März 2021), eine Aufforderung zur Antragstellung (April 2021) und die Erläuterung von Nachforderungen (Juni 2021). Die Aufstockung wurde im August bewilligt.

Gegenüber dem Fördermittelgeber musste nach der Ablehnung des Widerspruchs Ende März 2021 zudem der Antrag auf Mittelfreigabe gestellt werden, welche während des schwelenden Widerspruchszeitraums gesperrt waren.

2021 bedurfte es einer intensiven Koordination der Bauarbeiten der parallel laufenden Vorhaben beim Bau der Fundamente (Landesvorhaben) und der geotechnischen Instrumentierung (Bundesvorhaben). Im parallellaufenden Landesvorhaben WINSent-BW wurden alle Baumaßnahmen fertiggestellt und das Vorhaben zum 31.12.2021 erfolgreich beendet

Anfang 2022 wurde die Skizze für das Folgevorhaben „WINSentvalid“ eingereicht und auch seitens des Projektträgers zur Antragsstellung aufgefordert. Im Folgevorhaben steht nach erfolgter Inbetriebnahme der beiden Forschungsanlagen die bislang im Vorhaben WINSent verorteten Arbeiten in Bezug auf die Validierung der numerischen Modelle der Anlage als auch der Windkette nach der

Inbetriebnahme des Forschungstestfelds im Fokus. Ende 2022 wurde seitens des Projektträgers Jülich der Zuwendungsbescheid für das Folgevorhaben „WINSentvalid“ übersendet, welches am 1. Februar 2023 startete.

Die Koordination des Gesamtvorhabens war aufgrund der unvorhersehbaren und unverschuldeten Verzögerungen (u.a. Erteilung BImSchG-Genehmigung, Widerspruch und Klage) und des damit verbundenen Mehraufwands (Verschiebungen des kritischen Meilensteins, Kommunikation mit dem Projektträger sowie mit den Verbundpartnern, Mittelsperungen, u.v.m.) weitaus komplexer und umfangreicher als bei der ursprünglichen Antragsstellung geplant.

Es wurden darüber hinaus in den Folgemonaten und -jahren zahlreiche Anträge auf budgetneutrale Verlängerung und Anträge auf Mittelumwidmung gestellt. Auch wurden zwei Anträge auf Aufstockung (WINSentplus und WINSentplus2) während der Vorhabenlaufzeit gestellt.

Das Aufstockungsvorhaben „WINSentplus2“ hatte zum Ziel, die WindForS Forschungsplattform WINSent fertigzustellen, weshalb ausschließlich Arbeiten in den Teilprojekten „Koordination“ und „Aufbau und Betrieb“ bearbeitet wurden und auch nur das ZSW als Errichter und späterer Betreiber des Testfelds diese Aufstockung beantragen durfte. Der Zuwendungsbescheid wurde im Dezember 2023 zugestellt. Aufgrund der schleppend verlaufenden Inbetriebnahme wurden im Februar und Juni 2024 zwei weitere budgetneutrale Verlängerungsanträge beim Projektträger gestellt, welche auch bewilligt wurden.

Das Vorhaben WINSent endete am 30. September 2024 mit einer Verzögerung von mehr als vier Jahren.

AP 0.2 Vorbereitende Maßnahmen Forschungsbetrieb

AP 0.2.1: Aufbau eines Testfeld-Managementsystems

Das Testfeld soll sowohl den WindForS Partnern als auch weiteren Forschungseinrichtungen und insbesondere der Industrie als Plattform für Forschung und Entwicklung dienen, weshalb die Entwicklung eines Testfeldmanagementsystems für einen reibungslosen Betrieb begonnen wurde. Das saisonale Windvorkommen am Standort wurde mithilfe numerischer Simulationen genauer abgeschätzt. Daraus konnten sowohl die monatlichen Betriebsstunden als auch die Energieproduktion abgeleitet werden. Auf dieser Grundlage wurde mit der Entwicklung des Managementsystems gestartet, was u.a. die Planung von Betriebs-, Wartungs- und Rüstzeiten unterstützen soll. Die Naturschutzbegleitforschung findet hauptsächlich in den windschwächeren Monaten März bis Oktober statt, während die technischen Experimente jährlich hauptsächlich im Zeitraum von Oktober bis März stattfinden sollen. In den überschneidenden Monaten sollen gemeinsame Forschungsarbeiten anvisiert werden. Auch diese weitere saisonale Besonderheit soll in dem Planungstool Berücksichtigung finden.

Des Weiteren wurde mit der Entwicklung eines Schemas begonnen, welches zusätzlich zu generellen Informationen auch den Bedarf an z.B. Daten, Zugangsmöglichkeiten, Testprozeduren abfragt, die durch die Nutzung des Testfelds durch Externe (Industrie, Forschungseinrichtungen) aufkommen. Ziel ist es, das generelle Vorgehen für die spätere Nutzung des Testfelds im Rahmen von neuen Forschungsvorhaben zwischen den WindForS-Partnern und in Bezug auf externe Partner (Industrie, Forschungseinrichtungen) zu regeln.

Weitere notwendige Arbeiten zur Fertigstellung des Managementsystems wurden in das Arbeitsprogramm des Folgevorbahens „WINSentvalid“ mitaufgenommen.

AP 0.2.2: Entwicklung eines Arbeitssicherheitskonzepts

Windmessmasten

Im Zuge der Errichtung des ersten Windmessmasts wurde eine Gefährdungsbeurteilung für Arbeiten an den meteorologischen Masten erarbeitet. Diese Beurteilung beinhaltet die Arbeitsabläufe „Auf- und Absteigen des Mastes“, „Durchführen von Installations- und Wartungsarbeiten am Messsystem“ sowie „Evakuierung und Rettung“. In einer objektorientierten Herangehensweise wurden die möglichen Gefährdungen ermittelt und beurteilt. Eine Beurteilung der Risiken erfolgte anhand einer Risikobewertungsmatrix. Darauf aufbauend wurden Lösungsmöglichkeiten eruiert, Schutzmaßnahmen entwickelt und eine Betriebsanweisung abgeleitet. Die erstellte Gefährdungsbeurteilung wurde innerhalb des ZSW sowie mit der Firma „B·A·D Gesundheitsvorsorge und Sicherheitstechnik GmbH“ diskutiert und beschlossen. Die Gefährdungsbeurteilung konnte samt der Betriebsanweisung auch für die weiteren meteorologischen Masten herangezogen werden.

Jährlich stattfindende Sicherheitsbegehungen dienen zur Überprüfung der geltenden Gefährdungsbeurteilungen an den Windmessmasten und an den vorhandenen Infrastrukturen und Messeinrichtungen und erforderten während des Vorhabenzeitraums diverse Anpassungen an neue Gegebenheiten und gesetzliche Vorschriften.

Im August 2019 konnte erstmals das jährlich erforderliche Höhenrettungstraining am Testfeldstandort anstatt in Übungshallen unter realen Bedingungen an einem der Windmessmasten durchgeführt werden (vgl. Abbildung 4). Im Fokus des Trainings stand hierbei die Schulung der am Standort aktiven Mitarbeiter des Projektverbundes. Hierbei wurde neben dem allgemeinen Umgang mit persönlicher Schutzausrüstung gegen Absturz (PSAgA) die Handhabung und der Umgang mit den vor Ort verfügbaren Rettungsmitteln trainiert. In mehreren Durchgängen wurden verschiedene Evakuierungsszenarien und Rettungen verunfallter Personen trainiert. Alle Teilnehmer erhielten nach Abschluss des Trainings ein für ein Jahr gültiges Zertifikat nach DGUV Regel 112-198/199.



Abbildung 3: Übung unter realen Bedingungen - Bergung einer am Windmessmast verunfallten Person mittels Rettungshubgerät. [ZSW]

Freifeld-Sensorik

Zur Absicherung diverser Messeinrichtungen wie Lidarsysteme, Ceilometer oder des Freifeldmesstechnikareals beim nahegelegenen Naturfreunde-Haus „Immenreute“ wurden Piktogrammwarntafeln entworfen und installiert. Frei im Feld installierte Messgeräte, wie z. B. die Long Range Lidar Geräte oder das Wolkenhöhenmessgerät (Ceilometer) sind zusätzlich mit Hinweisen zur Abstandswahrung versehen. Dies soll zum einen Unbefugte abhalten, sich den Geräten zu nähern oder diese gar zu berühren. Zum anderen wird durch diese Kennzeichnung der Hinweispflicht auf mögliche Gefahren gemäß der entwickelten Gefährdungsbeurteilung genüge getan (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 4: Hinweistafel am Zugang zum Lidar-Standort „Wasserhochbehälter“. [ZSW]

Eisfall/Eiswurf

Als Auflage der Genehmigungsbehörde mussten im Umfeld des Forschungstestfelds weitere Warntafeln für den möglichen Eisfall von den meteorologischen Masten und der beiden FWEA sowie für Eiswurf von den beiden FWEA installiert werden. Die Hinweistafeln waren entlang von öffentlich zugänglichen Wegen so anzubringen, dass sowohl Autofahrer als auch Fußgänger rechtzeitig über die mögliche Gefahr gewarnt werden. Zusätzlich zu den zuvor genannten Eisfall-Hinweisen wurden in Abstimmung mit dem ZSW-Datenschutzbeauftragten DSGVO-konforme Hinweisschilder entworfen, welche auf die Videoerfassung des Umfeldes um das Testfeld aufmerksam machen (vgl. AP 1.2.2). Drei Standorte für die Aufstellung des Schildes konnten ermittelt und mit den Verantwortlichen der Städte Donzdorf und Geislingen abgestimmt werden. Sowohl die Warnung vor Eisfall, als auch der Hinweis auf die Videoüberwachung wurde auf einer gemeinsamen Tafel gedruckt (42 x 75cm) und an den drei dafür vorgesehenen Standorten in der Umgebung um das Testfeldgelände installiert (Abbildung 6).

Bau und Errichtung der FWEA

Die Behörden hatten für den Bau und die Errichtung der beiden Forschungsanlagen die Benennung eines unabhängigen Sicherheits- und Gesundheitskoordinators (SiGeKo) gefordert. Dieser trug während der Bau- und Errichtungsphase hinweg die Verantwortung über die Einhaltung der Arbeitsstättenverordnung sowie Arbeitssicherheitsmaßnahmen. Diese abgeleiteten Maßnahmen wurden unter Berücksichtigung der auf der Baustelle arbeitenden Gewerke in einem Sicherheits- und Gesundheitsplan (SiGe-Plan) zusammengefasst und die verschiedenen Gewerke vor Beginn der Arbeiten in Kenntnis gesetzt. Es wurde die Firma BfGA für die entsprechenden SiGeKo-Arbeiten beauftragt. Die ernannte Sicherheitsfachkraft stand fortwährend im direkten Austausch mit dem ZSW als Bauherr und überwachte in regelmäßigen Abständen die im SiGe-Plan definierten Regeln und Maßnahmen.



Abbildung 5: Montierte Warntafel am Wegrand der Ortsverbindungsstraße Kuchalb-Oberweckerstell (links) und Eisfahnen an einem Abspannseil des Windmessmastes Nordwest (rechts) [ZSW].

Forschungs-Windenergieanlagen

Die Erarbeitung von Gefährdungsbeurteilungen und Betriebsanweisungen sowie des Rettungskonzepts für die beiden FWEA erfolgte im Vorhaben WINSentvalid, nachdem diese Arbeiten erst nach erfolgter Errichtung und Erstinbetriebnahme beider Anlagen möglich waren.

AP 0.3 Öffentlichkeitsarbeit, Technologietransfer

AP 0.3.1 Öffentlichkeitsarbeit

Printmedien und Pressemitteilung

Zu Beginn des Vorhabens wurden in Abstimmung mit den Partnern im Dezember 2016 eine Pressemitteilung zum WINSent Vorhaben veröffentlicht, welche in anderen Druck- und Online Medien weiterverarbeitet und publiziert wurde⁶. Auf den Internetseiten des ZSW und des Forschungsclusters WindForS wird auf die Pressemitteilung verwiesen, sowie weitere Informationen über das Testfeld den Lesern vermittelt.

Den am Vorhaben beteiligten Partnern wurden neben Präsentations-Vorlagen in Deutsch und Englisch auch ein Projektlogo (vgl.: Abbildung 7) zur Verfügung gestellt. Im ersten Halbjahr 2020 wurde das Logo überarbeitet und an das aktuelle Logo des Windenergie-Forschungsclusters WindForS angepasst. WINSent wird auch nach Abschluss des gleichnamigen Vorhabens das Akronym für das WindForS-Forschungstestfeld sein.



Abbildung 6: Projektlogo WINSent 2017 (li.) und 2020 (re.)

Die Zusammenarbeit mit der Fa. S&G Engineering GmbH wurde mithilfe einer Presseinformation⁷ über die Homepage des ZSW als auch des WindForS-Forschungsclusters veröffentlicht. Der Öffentlichkeit wurde in der Presseinformation zum ersten Mal der Typ und Hersteller der Forschungs-WEA vorgestellt und auch die Möglichkeiten zur Kooperation und Zusammenarbeit aufgezeigt.

In der Ausgabe 4/2018 der Zeitschrift Ingenieurspiegel erschien ein dreiseitiger Artikel zum Vorhaben WINSent samt Erläuterungen in Bezug auf die Ausstattung.

⁶ <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/neues-windfors-projekt-windenergie-forschung-auf-der-schwaebischen-alb.html>, zuletzt zugegriffen am 24.04.2025

⁷ <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/kooperation-von-zsw-und-sg-engineering-beim-windenergie-testfeld-besiegelt.html>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

Nach Erhalt der BImSchG-Genehmigung im Juni 2020 wurde seitens ZSW eine Presseinformation⁸ an die relevanten Presseorgane gegeben und auf der Homepage des ZSW veröffentlicht. Basierend auf dieser Presseinformation wurde in zahlreichen Berichten (Print- und Onlineversion) über das Testfeld berichtet (Geislinger Zeitung, NWZ Göppingen, erneuerbareenergien.de, teckbote.de, WindForS, Landratsamt Göppingen, u.a.m.). Auch der Südwestrundfunk publizierte einen Beitrag zum Testfeld. Der Projektträger Jülich veröffentlichte ebenfalls einen Artikel auf der Homepage Strom-Forschung⁹.

Die Klage durch eine Naturschutzinitiative aus dem Westerwald gegen die erteilte BImSchG-Genehmigung wurde am 5. Oktober 2022 vor dem Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg vollumfänglich abgewiesen. Das Urteil ist seit dem 9. Dezember 2022 rechtskräftig, worüber die Öffentlichkeit mithilfe einer Presseinformation informiert wurde.¹⁰

Homepage und Internetauftritt

In Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart (Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie) wurde eine grafische Aufbereitung der Messdaten der bisher errichtenden Windmessmasten auf der WINSent-Projektseite der WindForS-Homepage in der zweiten Jahreshälfte 2018 realisiert. Dargestellt werden die 10min-Mittelwerte der letzten 48h aller analogen Sensoren, wie die Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen, Temperaturen, Luftfeuchtigkeit und -drücke. Dazu werden die Messdaten über eine Mobilfunkverbindung am Testfeld-Standort nach Stuttgart übertragen und am SWE automatisiert aufbereitet und online gestellt. Dies ermöglicht die Darstellung der Werte mit halbstündiger Verzögerung. Langfristig soll diese Live-Datenanzeige weiter ausgebaut und mit noch kleinerem Verzug aktualisiert werden.

Im August 2020 wurde die Domäne www.winsent.de¹¹ vom ZSW gekauft. Diese Internetadresse wird im Moment auf die Homepage des ZSW und die dort aufgebaute Informationsseite zum WINSent-Testfeld weitergeleitet. Zukünftig sollen über diese Adresse Informationen zum Testfeld, zu laufenden öffentlich geförderten Vorhaben am Testfeld, aber auch zum Herunterladen der offenen Daten (Messdaten und WINSent Basisregler) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Am 14. März 2024 wurden in der Präsentation „Windenergieforschung hinter’m Deich und auf der Alb“ im Zuge der online Veranstaltungsreihe „Rückenwind“¹² die beiden Testfelder WiValdi und WINSent von Dr. Jan Teßmer (DLR) und Andreas Rettenmeier vorgestellt.

Ende 2023 kam seitens des Projektträgers Jülich (PTJ) der Wunsch auf, für die Energieforschung des BMWK einen 5-minütigen Film über das WINSent-Testfeld auf dem entsprechenden YouTube Kanal¹³ zu zeigen. Aufgrund der Verzögerungen bei der Inbetriebnahme einigte man sich auf einen Dreh im

⁸ <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/weltweit-erstes-windenergie-testfeld-in-bergigem-gelaende-nimmt-die-letzte-grosse-huerde.html>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

⁹ www.energieforschung.de/de/aktuelles/news/2020/weltweit-erstes-windenergie-testfeld-in-bergigem-gelaende-genehmigt, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

¹⁰ <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/verwaltungsgerichtshof-genehmigt-windtestfeld.html>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

¹¹ www.winsent.de, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

¹² <https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/events/de/rueckenwind>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

¹³ <https://www.youtube.com/@energieforschung>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

Frühjahr 2024 und es konnte Ende April ein Termin am WINSent Testfeld, im Windkanal des Instituts für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart und in den Räumlichkeiten des ZSW gefunden werden. Dem Dreh voraus gingen mehrere Treffen mit VertreterInnen des PTJ, des Filmteams und des ZSW, um die Inhalte des Filmes und die Abfolge des Drehbuchs abzusprechen. Das Video ging im August 2024 online¹⁴.

Konferenz und Messebesuche

Am 24. Mai 2017 hielt A. Rettenmeier beim 9. Windbranchentag Baden-Württemberg einen Vortrag zum Forschungsvorhaben und zum geplanten Testfeld mit dem Titel „Das WindForS-Windenergie-testfeld bei Geislingen-Stötten - Plattform für Forschung und Industrie“.

In enger Abstimmung mit der WindForS Koordinierungsstelle wurde auf der international besuchten Deutschen Windenergiekonferenz („DEWEK“) vom 17.-18. Oktober 2017 das skalierte Modell des Testfelds sowie Hintergrundinformation rund um das Testfeld den Messe- und Konferenzbesuchern auf dem WindForS Messestand präsentiert.

Bei der Windenergie - expo & congress in Offenburg wurde Mitte November 2017 seitens der WindForS Koordinierungsstelle das Projekt WINSent und die Testfeldpläne vorgestellt werden.

Dr. Frank Musiol (ZSW) hat im Mai 2018 einen Vortrag zur geplanten Naturschutzbegleitforschung am Windenergie-testfeld beim Windbranchentag Baden-Württemberg gehalten, auf den die Resonanz positiv war.

Vom 18.-22. März 2019 fand in Garmisch-Partenkirchen die Fach- und Fortbildungstagung für Meteorologie DACH¹⁵ im deutschsprachigen Raum, also Deutschland (D), Österreich (A) und der Schweiz (CH) statt. Nach einer internen Diskussion innerhalb WindForS und des ZSW wurde es als sinnvoll angesehen, bei dem Kongress das WINSent-Vorhaben vorzustellen. In einem Vortrag wurde von A. Rettenmeier das Testfeld, der Standort und die zukünftige Ausstattung vorgestellt. Hieraus ergaben sich interessante Diskussionen in Bezug auf die Nutzung des Testfelds für meteorologische Fragestellungen, die Durchführung gemeinsamer Messkampagnen (u.a. DLR e.V. und KIT) sowie Erweiterungen seitens der Messtechnik.

Im Mai 2021 wurde bei der online stattfindenden Wind Energy Science Conference WESC von Andreas Rettenmeier ein Vortrag mit dem Thema „Insights into the realization of the Wind Science and Engineering Test Site “WINSent” in Complex Terrain“ präsentiert.

Beim online stattfindenden STOREENERGY Congress (November 2021) wurde von Stoyan Trenchev (ZSW) in einem Vortrag das Forschungstestfeld vorgestellt und die Teilnehmer ermutigt, dieses als Plattform für die Entwicklung und Erprobung von neuen Technologien zu nutzen. Des Weiteren präsentierte Hr. Trenchev aus seiner Bachelorarbeit „Scenarios for the Development of the WINSent Research Facility into a Hybrid Power Plant“ Szenarien zur möglichen Weiterentwicklung des WINSent Testfelds in ein hybrides Kraftwerk (hybrid power plant).

¹⁴ <https://youtu.be/7HlvbS-QUAY?si=c-NQVfIPOxb5RKQG>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

¹⁵ <https://www.dach2019.de>

Informations- und Bautafeln

In Zusammenarbeit mit der Professur für Landschaftsarchitektur regionaler Freiräume (LAREG) der TU München, konnten Entwürfe für acht Informationstafeln über das Testfeld erstellt werden. Die Informationstafeln sollen den bestehenden Rundwanderweg „Wind- und Wetterpark“ der Stadt Geislingen und der Gemeinde Böhmenkirch erweitern. Diese Entwürfe wurden so konzipiert, dass sie mehrere Zielgruppen ansprechen. Auf folgende Plakatinhalte konnte sich – auch in Absprache mit der WindForS-Koordinierungsstelle – verständigt werden, welche die aktuelle Forschung am Testfeld und den Mehrwert für die Gesellschaft in den Vordergrund stellen:

- Wind und Energie in Süddeutschland
- Windenergie in der Landschaft des Albtraufs
- Testfeld Ulrich Hütter und Wind und Wetter Erlebnispark Stötten
- Das Forschungsprojekt WINSSENT
- Das Testfeld Stötten
- Die Forschungsprojekte im Testfeld (1): WINSSENT-FoWEA und WINSSENT-Mikroklima
- Die Forschungsprojekte im Testfeld (2): Flamingo und InterWind
- Die Forschungsprojekte im Testfeld (3): NatForWINSSENT 1 & 2 und Birdrecorder

In den Berichtszeitraum fiel das Zusammentragen der Informationsmaterialien, auf denen diese Plakate aufbauen. Das umfasste die Sammlung von Texten, Vorträgen oder Pressemeldungen, die Sammlung geeigneter Fotoaufnahmen und Abbildungen sowie Kommunikation mit den Projektpartnern, das Einholen derer Materialien und die Klärung von Bildrechten. Zusätzlich wurden Onlinequellen wie zum Beispiel Projekthomepages zusammengetragen, um weiterführende Information per QR-Code zur Verfügung zu stellen. Zudem fiel die Iteration der von LAREG verfassten Plakattexte und gegebenenfalls weitere inhaltliche Recherche in den Aufgabenbereich des ZSW.

Zusätzlich zu den Informationstafeln wurden Informationen für eine Bautafel zusammengetragen, welche neben den Informationen über den Bauherrn und wichtige ausführende Gewerke auch die Fördermittelgeber sowie weiterführende Informationen über das Testfeld enthält. Die Bautafel wurde am 07. November 2020 vor Ort installiert (vgl. Abbildung 8).



Abbildung 7: Bautafel am Rand des Testfeldstandorts. [ZSW]

Eröffnungsfeier

Am 15. September 2023 wurde feierlich das WINSSENT Forschungstestfeld eröffnet¹⁶. Gemeinsam mit Ministerpräsident Winfried Kretschmann und Umweltministerin Thekla Walker, beide Baden-Württemberg, trugen Vertreterinnen und Vertreter des PTJ und des Landkreises Göppingen, die Bürgermeister der Standortgemeinden Geislingen und Donzdorf, die Landwirte samt Familien sowie die zahlreichen Gäste aus Forschung (u.a. WindForS-Partner), Politik und Presse und sämtliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ZSW u.a. mit Vorträgen zu dieser Eröffnung bei.¹⁷¹⁸



Abbildung 8: Offizielle Einweihung des WINSSENT Testfelds am 15.09.2023 [ZSW/David Arzt]

Das WINSSENT Testfeld stand auch im Mittelpunkt der offiziellen Eröffnung der Naturschutzforschung¹⁹, welche am Testfeldstandort dank der einzigartigen Ausstattung und Lage durchgeführt werden kann. Am 22. April 2024 wurde die Naturschutzforschung mit VertreterInnen des Bundesamts für Naturschutz (BfN), des Umweltministeriums Baden-Württemberg, des Landratsamts Göppingen, der Naturschutzverbände BUND und NABU sowie der Forschungspartner des Vorhabens NatForWINSSENT (Schweizerische Vogelwarte, OekoFor, FrInaT, UMIT, Fachbüro für ökologische Planungen) offiziell eröffnet. An die Grußworte schloss sich eine Begehung des Testfelds samt Erläuterungen zu den spezifischen Gerätschaften (Vogelradar, Erfassungsgeräte für die Fledermaus- und Insektenuntersuchungen, u.a.m.) durch die Projektpartner an.

¹⁶ <https://www.strom-forschung.de/aktuelles/news/2023/neues-forschungstestfeld-fuer-windenergieanlagen-winsent-eroeffnet>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

¹⁷ <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/stuttgart/windkraft-testfeld-bei-geislingen-eroeffnung-durch-ministerpraesident-kretschmann-100.html>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

¹⁸ <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/startschuss-fuer-das-windenergetestfeld-winsentwinfried-kretschmann-und-thekla-walker-eroeffnen-die.html>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

¹⁹ <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/start-der-naturschutzforschung-am-windenergetestfeld-geislingendonzdorf.html>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

AP 0.3.2 (Inter-)Nationale Kooperation & Austausch

Fa. DEIF A/S: Austausch und Besuch

Bei der Messe und Konferenz „WindEurope“ in Amsterdam wurde Ende November 2017 ein Treffen mit der dänischen Firma DEIF A/S arrangiert. Dr Stötter von der Fa. S&G Engineering GmbH war ebenfalls zu dem Treffen angereist. Die Firma DEIF A/S liefert sowohl die Hard- als auch Software der Betriebsführung, Sicherheitskette, Steuerung und Regelung der Serien-Windenergieanlage basierend auf dem Typ SG750.54. Entsprechend wichtig war der Austausch, um den Verantwortlichen das Forschungscluster WindForS, das Testfeld, das Projekt WINSent und die darin verankerten Ziele aufzuzeigen. Es folgte ein Besuch im Januar 2018 in Odense, Dänemark, bei dem die grundsätzlichen Anforderungen des WINSent-Testfelds an die Steuerung der Windenergieanlagen vorgetragen wurden. Im Gegenzug gewährte die Firma DEIF einen Einblick in das serienmäßig verbaute Steuerungssystem, sodass erste Ansätze zur Realisierung der WINSent-spezifischen Anforderungen besprochen werden konnten (vgl. AP 1.2.4).

Ende April: PAG Sitzung NatForWINSent, Stuttgart, ZSW

Ende April 2018 fand eine Sitzung der projektbegleitenden Arbeitsgruppe (PAG) statt. Es fand ein reger Austausch zwischen dem ZSW als Betreiber des WindForS-Testfeldes und den Mitgliedern der PAG zu dem vom BfN geförderten Vorhaben NatForWINSent statt. Zur PAG gehören Vertreterinnen und Vertreter folgender Institutionen:

- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)
- Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE)
- Fachagentur Windenergie an Land
- Bundesverband Windenergie e. V. (BWE)
- Naturschutzbund Deutschland e. V. (NABU)
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V. (BUND)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)
- Bundesamt für Naturschutz (BfN)
- Schweizerische Vogelwarte Sempach
- Freiburger Institut für angewandte Tierökologie (FRINAT) GmbH
- ARGE Fauna WindForS

Expertenworkshop Windatlas, Berlin, Umweltbundesamt (UBA), Mai 2018?

Bei dem Workshop des UBA ging es um die Erstellung eines bundesweiten Windatlases. Hierbei wurde von Experten diskutiert welche Arten der numerischen Modellierung es gibt, welche Gitterweiten und Auflösungen für die Windenergienutzung relevant sind und welche Messdaten zur Verfügung stehen. Hierbei konnte neben der messtechnischen Expertise auch das WindForS-Testfeld als Plattform ins Gespräch gebracht werden, um Messdaten bereitzustellen, aber auch um die im WINSent Vorhaben entstehende Windkette (Teilprojekt Mikroklima) mit den Methoden des Windatlases zu vergleichen.

Sitzung der Bund-Länder-Initiative Windenergie (BLWE), Stuttgart, Neues Schloss

Andreas Rettenmeier hielt Mitte Juni 2018 einen Vortrag über das WindForS Testfeld bei einer Sitzung der Bund-Länder-Initiative Windenergie (BLWE) und informierte die teilnehmenden Personen über den aktuellen Planungsstand, die technischen Forschungsziele sowie die Naturschutzbegleitforschung. Neben Vertretern der Umweltministerien der einzelnen Bundesländer waren seitens des BMWK Frau Plappert, Herr Falk und Herr Hölzl in Stuttgart anwesend.

Besichtigung des zukünftigen Forschungswindenergieanlagentyps, Italien

Vom 2.-4. April 2019 waren J. Anger, F. Haizmann und A. Rettenmeier des ZSW auf einer Dienstreise in Italien, um einen baugleichen Windenergieanlagentyp (ATB 750.54) der zukünftigen Forschungswindenergieanlage (FWEA) bei Molinara in der Nähe von Benevento zu besichtigen (vgl. AP 1.2.3 „Modifikationen der FWEA vor der Installation“). Hierbei war es möglich, sich mit dem Verantwortlichen des italienischen WEA-Herstellers ATB Riva Calzoni SpA auszutauschen, ihm das geplante Testfeld und die bevorstehenden Arbeiten zu präsentieren. Es wurde des Weiteren über mögliche zukünftige Kooperationen in Bezug auf Speicherintegration und Entwicklung einer neuen Betriebsführung diskutiert. Ebenfalls vor Ort war der Geschäftsführer des deutschen Ingenieurbüros S&G Engineering GmbH, von welchem u.a. das Know-How im Zuge des WINSent-Vorhabens beschafft wurde. S&G soll im Zuge des WINSent-Vorhabens den Aufbau und die Inbetriebnahme der Forschungsanlagen koordinieren. Dies sind Aufgaben, die sie auch in Molinara übernommen und ausgeführt haben.

“Complex Terrain Flow Modeling and Measurement Workshop” in Stuttgart

Am 17.05.2019 veranstaltete WindForS den “Complex Terrain Flow Modeling and Measurement Workshop” in Stuttgart, zu dem zahlreiche Externe von Seiten der Forschung aber auch der Industrie kamen. Es gab neben einem eigenen Vortrag zum WINSent Vorhaben weitere Vorträge, unter anderem von Dr. Astrid Ziemann (TU Dresden), Dr. Sarah Barber (Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz) oder apl. Prof. Dr. Siegfried Raasch, dem Leiter der PALM Arbeitsgruppe des Instituts für Meteorologie und Klimatologie an der Leibniz Universität Hannover. In den Pausen und Breakout-Sessions gab es ebenfalls die Gelegenheit sich mit Vertretern der Industrie (Enercon, EnBW, u.a.) sowie anderen Forschungseinrichtungen (DLR e.V.) auszutauschen. Speziell mit einem Mitarbeiter des DLR e.V. wurde ein gemeinsames Treffen vereinbart, bei dem es um den zukünftigen engeren Austausch in Bezug auf die FWEA gehen wird.

Sitzung des Ortschaftsrats des Geislinger Teilorts Stötten

Am 16. Juni 2020 fand eine Ortschaftsratsitzung des Geislinger Teilorts Stötten statt, welcher sich in nächster Nähe zum Testfeld befindet. In der öffentlichen Sitzung wurde vom WINSent Projektleiter über den aktuellen Stand der Testfeldrealisierung berichtet. Gemeinsam mit einem Mitarbeiter des Projektierers W-I-N-D Energien GmbH wurde im weiteren Verlauf die geplante Trassenplanung für die Erdleitungen (Netzanschluss und Breitband) als auch für die Zufahrt vorgestellt. Hintergrund für den Termin war, dass die Ortschaft Stötten für den Erhalt der existierenden Feldwege zuständig ist und aufgrund der für die Errichtung des Testfelds notwendigen Verbreiterung zweier Wege ein Mitspracherecht hat. Auch sollen im Bankett dreier Wege die Erdleitungen verlegt werden. Der für die Ausführung zuständige Leiter des Tiefbauamts der Stadt Geislingen war bei der Sitzung ebenfalls anwesend. Der Ortschaftsrat stimmte einstimmig unter Auflagen den Trassenplanungen zu.

Mitte Januar 2024 fand ein Austausch mit Frau Dr. Möhrlein der Fa. Weprog statt, welche für die Vorhaben WIKKI (gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Project ID: 37549/01 24/0) und EARS4WindEnergy (EU Horizon) Daten vom WINSent Testfeld (Windmessmast- und Lidar-Daten) genutzt hatte. Die Fa. Weprog ist spezialisiert auf Vorhersagen im Windbereich, und es wurde über weitere mögliche Zusammenarbeit gemeinsam mit Vertretern der Uni Stuttgart diskutiert.

Mitte Februar 2024 fand in Donzdorf das Jahrestreffen der WindForS-Institutionen statt. Vertreter der unterschiedlichen Hochschulen, Universitäten und Forschungseinrichtungen hatten die Möglichkeit, sich das WINSent-Testfeld vor-Ort anzuschauen. Insbesondere für Vertreter der Hochschule München, als neues WindForS-Mitglied, waren die vor-Ort Besichtigung aber auch die Diskussionen über die Nutzung des Testfelds sehr interessant.

Beim Windbranchentag Baden-Württemberg am 5. Juni 2024 fanden Gespräche mit unterschiedlichen Akteuren (z.B. Projektentwicklern, Anlagenherstellern, Start-Ups) im Hinblick auf das Testfeld und damit verbundene mögliche Zusammenarbeiten statt.

Das Testfeld und die an den Forschungswindenergieanlagen verbauten, gebrauchten Komponenten wurden am 10. Juni 2024 beim Präsenzworkshop „End-of-Life-Szenarien für Windenergieanlagen“ des Forschungsnetzwerks Erneuerbare Energien in Frankfurt thematisiert.

Im Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) feierten am 17.10.2024 rund 200 Teilnehmende aus Forschung, Wirtschaft, Verbänden und Politik das zehnjährige Jubiläum der Forschungsnetzwerke und stellten die erfolgreiche Arbeit heraus.²⁰ Das ZSW arbeitet seit dem Startschuss des Forschungsnetzwerks Erneuerbare Energien im Fachausschuss „Windenergie: Onshore“ sowie in den Arbeitsgruppen „Akzeptanz / Begleitforschung“, „Anlagentechnik“, „Betrieb“ und „Physikalische Faktoren“ mit.

Austausch mit Vertretern des DLR in Bezug auf die Windenergieanlage OPUS 3

Im Januar 2020 fand ein erstes virtuelles Treffen mit Vertretern des DLR statt. Hintergrund des Treffens war die Auslotung gemeinsamer Kooperationen und Entwicklungen der beiden Forschungstestfelder in Deutschland, dem Forschungspark Windenergie WiValdi in Krummendeich (DLR) und WINSent (ZSW) des süddeutschen Forschungsclusters WindForS. Insbesondere bei der Experimentalturbine des DLR und der beiden FWEA des ZSW zeichnen sich Möglichkeiten der Zusammenarbeit ab, da beide Maschinen auf dem Design des Ingenieurbüros S&G Engineering beruhen.

Weitere Treffen mit Vertretern des DLR fanden während den Folgemonaten und -jahren der Vorhabenlaufzeit statt. So waren es zahlreiche virtuelle Meetings, die Besichtigung des WINSent Standorts mit den Windmessmasten und Trafostationen sowie die Besichtigung der Montagehalle in Königsbrunn mit den Maschinenhäusern und Naben.

²⁰ <https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/de/aktuelles/news/2024/forschungsnetzwerke-feiern-zehnjahriges-jubilaeum>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

In den Gesprächen und Meetings ging es um die Themen Anlagensteuerungssoftware, HIL Teststand und Zertifizierung der prototypischen Forschungsanlagen und den damit verbundenen Fragen rund um die Weiternutzung der gebrauchten Anlagenkomponenten wie Naben und Rotorblätter (vgl. AP 1.2.3.). Das ZSW hatte das DLR von dem Abbau der alten Pfeleiderer-WEA im Windpark Altenheerse informiert, so dass das DLR auch von diesen Altteilen profitieren konnte. Die für die Weiterverwendung notwendigen rechnerischen Nachweise wurden im Zuge des WINSent Vorhabens erbracht und könnten zu einem großen Teil auch für die Forschungsanlage OPUS3 des DLR herangezogen werden.

Bachelorarbeiten zum Thema Hybrid Power Plants in Zusammenarbeit mit dem SWE

Zusammen mit dem Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie SWE der Universität Stuttgart wurde eine Bachelorarbeit in der zweiten Jahreshälfte 2020 am ZSW durchgeführt und betreut. In der Arbeit mit dem Titel „Scenarios for the Development of the WINSent Research Facility into a Hybrid Power Plant“ wurden Szenarien zur Weiterentwicklung des WINSent Testfelds in ein hybrides Kraftwerk (hybrid power plant) entwickelt. Es wurde unter Berücksichtigung des vorhandenen Wind- und Sonnenangebots, der Möglichkeit von Speicherimplementierung und der Nutzung einer Gaspipeline unterschiedliche Weiterentwicklungspotenziale untersucht.

Im Herbst 2021 wurde eine weitere Studienarbeit „Sensitivity study of levelized cost of energy, net present value, and internal rate of return for hybrid power plants“ abgeschlossen, die gemeinsam mit dem Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie SWE betreut wurde. Das Softwarepaket der vorausgegangenen Bachelorarbeit wurde erweitert, um die wirtschaftlichen Kennzahlen, levelized cost of energy, net present value und internal rate of return für ein Hybridkraftwerk berechnen zu können. Die WINSent Forschungsplattform wurde als Fallstudie genommen, und es wurden mehrere Auslegungen des Hybridkraftwerks mit unterschiedlich installierten PV- und Batteriekapazitäten simuliert. Die anschließend durchgeführte Sensitivitätsanalyse hatte zum Ziel, jene Aspekte des Hybridkraftwerks zu ermitteln, welche die finanzielle Tragfähigkeit am stärksten beeinflussen.

Austausch und Kooperation in Bezug auf das Vorhaben SwabianMOSES

Von Seiten des WindForS Partners IMK, dem Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), wurde im November 2020 an das ZSW die Frage nach messtechnischer Unterstützung und einem nachfolgenden Datenaustausch im Zuge der Swabian MOSES Campaign²¹ gestellt. Innerhalb der MOSES Kampagne arbeiten verschiedene Helmholtz Institute zusammen, um zwei hydro-meteorologische Extreme zu untersuchen. So werden lokalskalige konvektive Zellen (Gewitter), die mit Starkregen und Hagel verbunden sind und großräumige Hitzewellen sowie die damit verbundenen Dürren betrachtet. Die permanent am Testfeldstandort erhobenen Messdaten der meteorologischen Masten, der Eddy-Kovarianz Stationen aber auch der Lidar Systeme steuert das ZSW der Swabian MOSES Kampagne bei. Im Gegenzug erhalten das ZSW und seine Partner zugängliche Daten der Kampagne.

Anfang November 2021 richtete das Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) einen Workshop zur Swabian MOSES Kampagne in Präsenz in Karlsruhe

²¹ <https://www.swabianmoses.de>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

aus, an dem Vertreter des ZSW teilnahmen. Hierbei wurden Ergebnisse präsentiert und das weitere Vorgehen hinsichtlich Datenbereitstellung, -analyse und -archivierung festgelegt. Die an der Swabian MOSES Kampagne teilnehmenden Institute und Partner veröffentlichten mehrere wissenschaftliche Paper, wobei das ZSW an einem mitwirkte²².

Anfragen zur Nutzung des Testfelds

Über die WindForS-Geschäftsstelle wurde 2021 die Frage an das ZSW herangetragen, ob denn nicht ein an der Ostschweizer Fachhochschule entwickelter Rotorblattsensor²³ an einer der beiden Forschungs-WEA des WINSent-Testfelds getestet werden könnte. Vertiefende Gespräche hierzu haben im Berichtszeitraum stattgefunden.

Des Weiteren wurde von einem süddeutschen Ingenieurbüro eine weitere Anfrage an das ZSW gestellt, ob Tests von neuentwickelten Serrations (Hinterkantenprofile) an den Rotorblättern einer FWEA durchgeführt werden könnten. Diese Tests wären Bestandteil eines geförderten Entwicklungsprojekts.

Im Zuge des vom BMWi geförderten Vorhabens MultiRadar (FKZ 0324323 A-D) entwickelte die Universität Frankfurt ein Radargerät zur Erfassung von Vögeln und Fledermäusen. Dies wurde 2021 am WINSent Standort im Freifeld getestet. Zusätzlich zum eigentlichen Test (Montage an einem Messmast, Stromanbindung, u.a.m.) und der damit verbundenen Validierung wurden Daten der meteorologischen Masten und Daten der Laser-Range-Finder Messungen (durchgeführt und aufbereitet im Zuge von NatForWINSent, BfN) zur Verfügung gestellt.

Das WINSent Testfeld soll auch als Plattform für die Erhebung von Messdaten mithilfe verschiedener Lidar System im Zuge des öffentlich vom BMWK geförderten Vorhabens LoTar (FKZ 03EE3052A, B) dienen, an dem sowohl der WindForS Partner SWE als auch das Fraunhofer IEE, Kassel, beteiligt sind.

Aktivitäten innerhalb des Wind Technology Collaboration Programms der Internationalen Energie Agentur (IEA Wind TCP)

Im Dezember 2019 fand das General Meeting des IEA Wind Task 32 am Risø Campus der Dänischen Technischen Universität (DTU) in Roskilde, Dänemark, statt. Der Task beschäftigt sich mit der Anwendung von Wind Lidar in der Windenergie. Von Seiten des ZSW wurde das Multi-Scanning-Lidarsystem auf dem Testfeld vorgestellt, und es wurde sich bezüglich zukünftiger Weiterentwicklungen und wissenschaftlicher Fragestellungen auf dem Testfeld ausgetauscht.

Teilnahme am zweitägigen, virtuellen "Topical Expert Meeting #101" des IEA Wind TCP Tasks 11 zum Thema „Hybrid Power Plants: Challenges and Opportunities“ am 24./25. August 2020. Am zweiten Tag hatte sich die Gelegenheit geboten, das Testfeld und mögliche Arbeiten in Bezug auf Hybridkraftwerk den internationalen Teilnehmern vorzustellen.

²² <https://doi.org/10.3389/feart.2022.999593>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

²³ <https://www.ost.ch/de/projekt/aerosense>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

Am 29. März 2022 fand das Kick Off Meeting des IEA Wind TCP Tasks 50 “Hybrid Power Plants”²⁴ virtuell statt. Das ZSW nimmt als deutscher Taskleader an diesem Task teil und plant die Positionierung des WINSent Testfelds als mögliche skalierte Plattform.

Ende November 2022 wurde bei einem virtuellen Vortrag das Testfeld im Gesamten sowie das Design und die Ausstattung der Forschungs-Windenergieanlagen bei einem Treffen des IEA Wind Tasks 47 Turbinia (ex Mexnext) vorgestellt. Teilnehmer dieses Tasks sind insbesondere an frei zugänglichen Konstruktions- und Designdaten, hauptsächlich von den Rotorblättern sowie Umgebungsbedingungen interessiert, und zeigten entsprechendes Interesse an den Forschungsanlagen sowie den meteorologischen Masten des WINSent Testfelds.

Ein physisches Meeting des IEA Tasks 50 Hybrid Power Plants fand am Montag, den 22. Mai 2023 im Vorfeld zur Wind Energy Science Conference (WESC, 23.-26. Mai 2023) in Glasgow statt. Die über das Vorhaben WINSentvalid finanzierte Teilnahme an der WESC erlaubte auch die Teilnahme an diesem physischen Task-Treffen und bot Gelegenheit, das Testfeld den Task-Partnern vorzustellen. Zahlreiche Vorträge während der WESC befassten sich mit den Arbeiten im IEA Wind Task 50.

Aktivitäten innerhalb der European Academy of Wind Energy EAWC

Anfang 2022 wurde zum ersten virtuellen Treffen des neugegründeten Test Wind Turbine Committee²⁵ der European Academy of Wind Energy (EAWC) eingeladen. Das ZSW, als Betreiber des WindForS-Testfelds, hatte sich um die Teilnahme am Committee im Vorjahr beworben und brachte sich in den bereits stattgefundenen virtuellen Treffen aktiv mit ein. Ziel des Komitees ist es, die weltweit existierenden Windenergie-Forschungstestfelder publik zu machen sowie einen wissenschaftlichen als auch technischen Austausch zwischen den europäischen und außereuropäischen (u.a. USA und China) Testfeldbetreibern herzustellen.

²⁴ <https://iea-wind.org/task50/>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

²⁵ <https://eawc.eu/committee/eawc-windeurope-scientific-track-west-committee/>, zuletzt zugegriffen am 23.04.2025

AP 1 Aufbau und Betrieb

Die im Vorhaben WINSent-BW durchgeführten, grau hinterlegten Arbeitspakete von „AP 1 Aufbau und Betrieb“ wurden bis zur dessen Beendigung in den Zwischenberichten des Vorhabens WINSent nachrichtlich mitaufgeführt und sind dem Schlussbericht²⁶ des Vorhabens WINSent-BW zu entnehmen. Entsprechend wurden diese Arbeiten in diesem hier vorliegenden Schlussbericht nicht noch einmal aufgeführt.

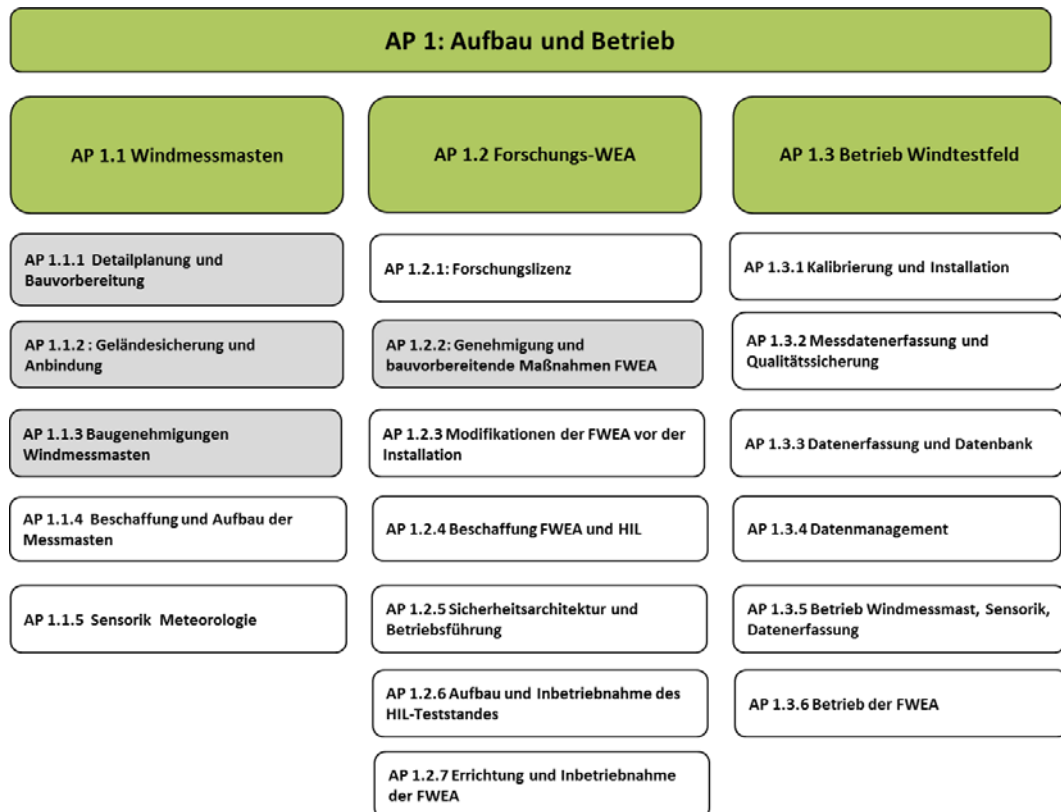


Abbildung 9: Struktur des Arbeitspakets „Aufbau und Betrieb“

AP 1.1 Windmessmasten

AP 1.1.4: Beschaffung und Aufbau der Messmasten

2017

Es wurden Vorbereitungen getroffen, den Windmessmast (WMM) des Projektpartners Universität Stuttgart – Lehrstuhl für Windenergie gemäß Projektantrag einer Generalüberholung zu unterziehen. Dieser Mast soll als erster der insgesamt vier meteorologischen Windmessmasten am nordwestlichen Testfeldstandort errichtet und in Betrieb genommen werden. Der Mast wird vom Hersteller mit rotweißem Flugwarnanstrich und rotweißen Flugwarnkugeln versehen, sowie Abspannungen, Fundamente und Ausleger überholt bzw. ausgetauscht.

Der WMM-NW konnte nach erteilter Baugenehmigung und den damit verbundenen Auflagen im November 2017 unter erschwerten Bedingungen errichtet werden. Eine Instrumentierung konnte

²⁶ <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10418>, zuletzt zugegriffen am 17.04.2025

aufgrund schlechter Witterungsverhältnisse nicht mehr im Jahr 2017 umgesetzt werden, die Arbeiten mussten auf das Frühjahr 2018 verschoben werden.

2018

Die Stromversorgung des ersten Windmessmastes über einen in der Nähe des NaturFreunde-Hauses Immenreute installierten Baustromverteiler konnte in Betrieb genommen werden. Hierzu konnte die ca. 230m lange Zuleitung unterirdisch in eine stillgelegte Wasserversorgungsleitung verlegt werden. Durch den Anschluss an diese Stromversorgung konnte zunächst das Flughindernisfeuer von Solarbetrieb auf Netzbetrieb umgerüstet werden.

Die Instrumentierung des WMM-NW erfolgte im Frühjahr 2018. Zur Erleichterung von Hubarbeiten, sowie zur Erhöhung der Arbeitssicherheit (Evakuierungskonzept) wurde eine mobile, akkubetriebene Seilwinde angeschafft.

Der zweite Messmast ist baugleich zum ersten bereits errichteten Mast. Lediglich wurde bei diesem auf die Montage- und Messplattform auf einer Höhe von 73m verzichtet. Nachdem die Baugenehmigung des zweiten Masts erteilt worden war, wurde dieser Mitte September 2018 am dafür vorgesehenen nordöstlichen Standort errichtet. Die Errichtung erfolgte bei trockenem und gutem Wetter, nachdem die aus Artenschutzgründen vorliegende Schonzeit vorbei war. Zum Einsatz kam auf den letzten Metern über den Acker eine sechs Meter breite mobile Straße, welche von den Kränen und Tiefladern genutzt wurde.



Abbildung 10: Aufbau des zweiten Windmessmasts WMM-NO Mitte September 2018 [ZSW]

2019

Die beiden nördlichen Masten WMM-NW und WMM-NO konnten mithilfe temporärer Baugenehmigungen errichtet werden. Die Genehmigung zur Errichtung der beiden verbleibenden südlichen Masten wurde in die BImSchG-Genehmigung für das Gesamt-Testfeld, bestehend aus insgesamt vier Messmasten und zwei Forschungs-Windenergieanlagen inkludiert. Die BImSchG-Genehmigung löst entsprechend die temporären Genehmigungen ab, doch konnte aufgrund fehlender Genehmigung im Jahr 2019 kein weiterer WMM errichtet werden.

Im März 2019 wurden die beiden bereits errichteten Windmessmasten einer ersten Standsicherheitsprüfung unterzogen. Hierzu war die Herstellerfirma vor Ort, um die Masten einer Sichtprüfung zu unterziehen. Im Allgemeinen sind beide Masten in einem sehr guten Zustand. Einige Abspannseile wurden in Folge der Kontrolle nachgespannt sowie Teile der Steigschutzleitern geringfügig überarbeitet. Am nordöstlichen Mast wurde zudem im Zuge der Standsicherheitsprüfung noch ein weiterer Messausleger zur Aufnahme eines Anemometers auf 72,5m Höhe installiert.

Im September 2019 wurden die beiden bestehenden Windmessmasten von einem Ingenieurbüro vermessen. Die Vermessung umfasste die Koordinaten und Höhen der Mastfußpunkte und der Flugwarnkugeln an den Abspannseilen. Letztere werden für die Hard-Target-Kalibrierung des Multi-Scanning Lidar-Systems auf dem Testfeld benötigt. Außerdem konnte die Ausrichtung der Mastausrichtung gegen Norden exakt bestimmt werden, welche für die Korrektur der Windrichtung benötigt wird.

2020

In der ersten Jahreshälfte konnten noch weitere Komponenten für den südwestlichen Windmessmast beschafft werden. Hierbei handelt es sich um Strukturelemente des Masts aber auch um Mess-Sensorik und Erfassungssysteme.

Weitere Großkomponenten wurden in der zweiten Jahreshälfte trotz erteilter BImSchG-Genehmigung nicht mehr beschafft, da aufgrund des gegen die Genehmigung eingelegten Widerspruchs sparsam mit der Mittelverausgabung umgegangen und keine Anschaffungen mehr getätigt werden durften.

2021

Nach der Klärung von noch offenen Fragen in Bezug auf die Statik und auf eigenes Risiko wurden nach der Bewilligung der Aufstockung die weiteren Großkomponenten der verbleibenden Windmessmasten beschafft. Es konnten in der zweiten Jahreshälfte für die beiden südlichen Messmasten die 14 Fundamente verortet und eingebracht werden.



Abbildung 11: Vorbereitung der Gruben für die sechs Abspannfundamente eines WMM [ZSW]



Abbildung 12: Ein als Stahlkonstruktion ausgeführtes Abspannfundament [ZSW]



Abbildung 13: Abspannfundament nach dem Eingraben und Auflasten. [ZSW]



Abbildung 14: Zentrales Fundament des WMM, auf dem der gelichseitige , dreieckige Mast gestellt und zu den äußeren Fundamenten hin abgespannt wird. [ZSW]

2022

Ende März/Anfang April 2022 wurde der südwestliche Windmessmast noch vor der Vegetationsperiode erfolgreich errichtet. Zusätzlich zu den behördlich genehmigten Zufahrtswegen auf den Orts- und Verbindungsstraßen, musste zur Errichtung wieder eine mobile Straße eingesetzt werden, welche über den Acker für den Zeitraum der Kranarbeiten ausgelegt wurde. Im Nachgang zur Errichtung konnte mit der Instrumentierung des Messmasts gestartet werden.

Anfang August 2022 wurde der südöstliche Windmessmast erfolgreich errichtet, nachdem auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche die Erntevorgänge abgeschlossen waren. Aufgrund personeller Engpässe konnte im Nachgang nicht wie geplant unmittelbar danach mit der Instrumentierung des Messmasts gestartet werden.



Abbildung 15: Errichtung des südöstlichen Windmessmasts nach der Ernte 2022. [ZSW]

AP 1.1.5 Sensorik Meteorologie

2017

Die sensorische Ausstattung des ersten der vier Windmessmasten wurde mit Unterstützung des Projektpartners Universität Stuttgart (Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE)) auf Basis der Arbeitsergebnisse aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben KonTest (FKZ: 0325656A-D) überarbeitet, erneut diskutiert und abschließend festgelegt. Im Wesentlichen wurden hierbei die Art, Ausführung und Position der verschiedenen, erforderlichen Sensoren festgelegt.

Die Beschaffung der erforderlichen Ultraschallanemometer für die Windmessmasten wurde im europäischen Ausschreibungsblatt TED – eNotices unter der Ausschreibungsnummer 2017/S 120-242194 veröffentlicht. Alle weiteren Sensoren konnten auf Grund der niedrigeren Gesamtsumme entsprechend der geltenden Vergaberichtlinien beschafft werden.

Die Beschaffung der Freifeldsensorik wurde 2017 abgeschlossen. Die zu beschaffenden Long-Range LiDAR Messgeräte wurden hierzu im europäischen Ausschreibungsblatt TED – eNotices unter der Ausschreibungsnummer 2017/S 085-165289 ausgeschrieben. Bis Ablauf der Bewerbungsfrist waren hierzu zwei Angebote eingegangen, von denen ein Anbieter das Lastenheft, sowie den Budgetrahmen voll erfüllen konnte. Daraufhin wurde der Zuschlag erteilt und die Geräte bestellt. Die Eddy-Kovarianz-Stationen, sowie das Ceilometer-System konnten auf Grund der Beschaffungssumme entsprechend den geltenden Vergaberichtlinien ebenfalls beschafft werden. Die Eddy-Kovarianz-Stationen wurden nach Lieferung der einzelnen Komponenten im Labor aufgebaut und für die Installation vorbereitet. Weitere Komponenten wie bspw. Batterien mussten beschafft und angeschlossen werden.

2018

Die beschafften Eddy-Kovarianz-Stationen wurden im Januar für einen ersten Initial- und Vergleichstest im Freien auf dem Dach des ZSW aufgebaut. Zwei der drei Systeme konnten parallel zur Instrumentierung des ersten Windmessmastes im Mai 2018 im Feld installiert werden. Die dritte Station verblieb noch am ZSW, um die Datenanbindung mit dem Messsystem zu automatisieren. Zunächst wurden die Messdaten lokal auf der Station gespeichert und regelmäßig vor Ort abgeholt. Später wurden die Daten der EC-Stationen per remote-Verbindung direkt in das zentrale Messsystem miteingebunden.

Die Anbindung der sogenannten Multi-Path-Ultraschall-Anemometer in das Messsystem erfolgt digital. Hierzu wurde mit dem Anemometer-Hersteller das Ausgabeformat der RS485 Bus-Schnittstelle von ASCII auf ein binäres Format geändert, um die Sensorsignale in das Messsystem einbinden zu können. Der Hersteller des Messsystems lieferte hierzu entsprechende Konfigurations-Skripte und leistete Unterstützung bei technischen Fragen. So konnte die Kommunikation zwischen Sensor und Messsystem erfolgreich umgesetzt werden. Im Nachgang erfolgte die erfolgreiche Installation und Inbetriebnahme von insgesamt vier Ultraschallanemometern des Typs „Metek uSonic MP Class A“ am nordwestlichen Windmessmast auf verschiedenen Messhöhen zwischen 23m bis 95m. Die zuvor erfolgreich im Labor getestet und entwickelte Anbindung an die Messtechnik konnte erfolgreich auf das Mastsystem übertragen und in die Messdatenerfassung eingebunden werden. Seit Inbetriebnahme im September 2018 werden je Ultraschallanemometer 3D-Windkomponenten in u-, v- und w-Richtung, virtuelle Temperatur, sowie Inklinationswinkel und Schwingungen des Ausleger-Sensorsystems in einer Taktrate von 20 Hz erfolgreich aufgezeichnet. Die in den Ultraschallanemometern eingebaute Sensorkopfheizung (eines der entscheidenden Ausschreibungskriterien bei der Auswahl des Sensortyps) konnte bereits Anfang November 2018 ausgiebig getestet werden. Hierzu wurde das Statussignal der Sensorkopfheizung als Messwert mit aufgezeichnet und anschließend die Messwerte der Sensoren gegen unbeheizte Schalenkreuzanemometer verglichen. Es zeigte sich eine sichtbare Funktionalität der Sensorkopfheizung und deren Werkseinstellungen, sodass trotz niedriger Temperaturen und Vereisungsbedingungen eine hohe Verfügbarkeit der Ultraschallanemometer gewährleistet werden konnte.

Im Dezember 2018 mussten in Folge starken Eisansatzes und daraus resultierendem Eisabfall an den Masten Schäden an Teilen der Messsensorik festgestellt werden. Hierbei wurden zunächst Mikrofone des installierten Fledermauserkennungssystems am WMM-NW durch herabfallende Eisstücke beschädigt (WINSent-BW). Kurz darauffolgend wurden an beiden Messmasten WMM-NW und WMM-NO Beschädigungen von insgesamt vier Windrichtungsgebern festgestellt. Diese Messgeber sollten sobald als möglich im Frühjahr 2019 gegen Ersatzsensoren ausgetauscht werden. Parallel hierzu sollen Lösungsansätze gegen weitere Beschädigungen durch Eisschlag erarbeitet werden. Des Weiteren wurden Ausfälle bei zwei von insgesamt zehn Luftfeuchtigkeitsgebern verzeichnet, welche ebenfalls zeitnah im Frühjahr 2019 beim Hersteller in Revision gegeben wurden.

2019

Die zwei beschafften H₂O/CO₂-Gasanalysatoren konnten nach erfolgreichen Labortests im März 2019 wie geplant am nordwestlichen Windmessmast auf 25 und 72m Höhe installiert und in Betrieb genommen werden. Die Aufzeichnung der erfassten Gaskonzentrationen erfolgt seither mit einer Taktrate von 20Hz über das am Mast installierte Messsystem.

Im Juni 2019 erfolgte die erfolgreiche Installation und Inbetriebnahme von vier weiteren Ultraschallanemometern des Typs „Metek uSonic MP Class A“ am nordöstlichen Windmessmast auf Messhöhen zwischen 23m bis 95m. Die bereits am nordwestlichen Windmessmast eingesetzte Anbindung an die Messtechnik konnte erfolgreich auf das Messsystem des Nordostmastes übertragen und in die Messdatenerfassung eingebunden werden. Wie auch am Nordwestmast werden je Ultraschallanemometer 3D-Windkomponenten in u-, v- und w-Richtung, virtuelle Temperatur, sowie Inklinationswinkel und Schwingungen des Ausleger-Sensorsystems in einer Taktrate von 20 Hz aufgezeichnet.

Des Weiteren mussten drei Hygro-/Thermogeber wegen Defektes ausgetauscht werden. Die defekten Geber wurden zur Analyse und Reparatur an die Herstellerfirma gesendet. Zwei der drei Sensoren wiesen laut Bericht einen irreparablen Wasserschaden auf und mussten daraufhin durch neue Geber ersetzt werden. Da seitens ZSW bewiesen werden konnte, dass die Messgeber ordnungsgemäß und nach Vorgabe des Herstellers montiert wurden, wurden die Geber bislang auf Kulanz ohne weitere Kosten ersetzt.

Im Zuge der im November 2019 am Standort durchgeführten Intensivmesskampagne (IOP: intensive operation period), wurde der nordwestlich errichtete Windmessmast für die Installation eines Lidar-Systems auf 72m Höhe vorbereitet. Hierzu wurden erforderliche Haltepunkte sowie ein Kragarm für eine elektrische Seilwinde am Mast installiert. Mitte November erfolgte dann die erfolgreiche Installation eines Lidar-Systems des Projektpartners KIT-IMK.

Im November 2019 konnte ein an das Testfeld angeschlossenes, eingezäuntes Freifeldmessareal fertiggestellt werden (vgl. Abbildung 17). Dieses eingezäunte Areal wird über einen Hausanschluss dauerhaft mit Strom versorgt. Eine Internetanbindung und die Kommunikation wurde zunächst über eine WLAN-Richtfunkstrecke zum WMM-NW gewährleistet. In dem Areal sind seit Fertigstellung das für das WINSent-Vorhaben beschaffte Ceilometer sowie das aus dem BfN-Vorhaben NatForWINSent finanzierte Vogelradar installiert. Im weiteren Projektverlauf sollen hier auch seismische Sensoren des Projektpartners KIT-GPI zum Einsatz kommen.



Abbildung 16: Eingezäuntes Freifeldmessareal auf dem Grundstück des Naturfreundehauses mit installiertem Vogel-Radar und Ceilometer. [ZSW]

Im September 2019 mussten alle bis dahin an den Windmessmasten installierten Ultraschallanemometer vom Typ Metek uSonic MP Class A einer gründlichen Revision unterzogen werden. Hintergrund der Revision waren zeitweise Ausfälle der Anemometer bei oder nach längeren Regenereignissen. Eine erste Fehlersuche im Mai 2019 bestätigte den Verdacht, dass die IP67-zertifizierte Steckverbindung zwischen Sensorkopf und Auswerteelektronik keinen dauerhaften Schutz gegen Feuchtigkeit bietet. In Folge dessen trat an beinahe allen Sensoren Korrosion an der Kontaktfläche der Leiterbahnen auf welche dann zum Ausfall des Sensors führte. Gemeinsam mit dem Hersteller der Ultraschallanemometer wurde beschlossen, alle acht Anemometer einer Revision zu unterziehen und die alte, fehlerhafte Steckverbindung durch eine Steckverbindung eines anderen Typs zu ersetzen. Hierzu wurden alle acht installierten Anemometer vom Mast demontiert und vor Ort an einem eigens eingerichteten Arbeitsplatz am Testfeld überprüft, überarbeitet und repariert. Ein Mitarbeiter des Herstellers war hierzu für die Revision und Reparatur vor Ort. Die Demontage und anschließende Wiedermontage der Sensorik erfolgte durch erfahrene Mitarbeiter des ZSW sowie des

Projektpartners USTUTT-SWE. Im Zeitraum nach der Revision bis zur Erstellung dieses Berichtes traten keine Fehler oder Ausfälle der Ultraschallanemometer mehr auf. Es kann somit festgestellt werden, dass das Problem nachhaltig gelöst wurde.

2020

Aus Aufstockungsmitteln des Landesprojekts WINSent-BW konnte bereits 2019 ein Sichtweitenmessgerät sowie ein Niederschlagsradar beschafft werden, welches auch die Erfassung der Niederschlagsart (Regen, Hagel, Schnee), Menge und Intensität ermöglicht. Für die Installation der beiden intelligenten Wettersensoren musste zunächst eine Schnittstelle für das Messsystem neu programmiert und im Labor getestet werden. Nach erfolgreichem Test war der Bau eines Sensorstatives für das Regenradar neben der östlichen Abspannung des Windmessmastes-NW, sowie die Verlegung von Leitungen für Stromversorgung und Datenübertragung auf das Mastmesssystem zur Installation des Radars notwendig. Das Sichtweitenmessgerät wurde an einem Ausleger des nordwestlichen Windmessmasts erfolgreich installiert und in Betrieb genommen.

Neben den regelmäßigen und wiederkehrenden Instandhaltungsarbeiten für die meteorologische Sensorik (vgl. AP 1.3.1 und AP 1.3.2) wurde im Jahr 2020 keine weitere Sensorik beschafft.

2021

Neben den regelmäßigen und wiederkehrenden Instandhaltungsarbeiten für die meteorologische Sensorik (vgl. AP 1.3.1 und AP 1.3.2) wurde die im Aufstockungsantrag bewilligte „Feldmühle“ (magnetisches Feld und Blitzdetektion) beschafft.

2022

Im Zuge eines studentischen Praxissemesters wurde basierend auf der zuvor beschafften Feldmühle ein Warnsystem entwickelt, das die elektrische Feldstärke in der Atmosphäre erfassen und die Bedrohungslage durch ein Gewitter einordnen kann. Im Falle eines nahenden Gewitters werden per E-Mail verschiedene, zuvor definierte Zustände ausgegeben (0 = keine Warnung / Entwarnung, 1 = Warnung, 2 = Blitzeinschlag). Das Frühwarnsystem unterstützt das sicherere Arbeiten auf dem Testfeld.

2023

Neben den regelmäßigen und wiederkehrenden Instandhaltungsarbeiten für die meteorologische Sensorik (vgl. AP 1.3.1 und AP 1.3.2) wurde die noch fehlende Sensorik für den WMM-SO (vgl. AP 1.1.4) beschafft. Aus Kapazitätsgründen im Team Wind (Elternzeit, personeller Abgang, Zusammenbau und Errichtung der Forschungswindenergieanlagen) konnte die Instrumentierung des WMM-SO nicht finalisiert werden.

2024

Die endgültige Instrumentierung des verbliebenen WMM-SO erfolgte im letzten Jahr des Vorhabens.

AP 1.2 Forschungs-WEA

AP 1.2.1: Forschungslizenz

2016/2017

In den Monaten Dezember 2016 bis Januar 2017 wurden die vertraglichen Inhalte der Forschungslizenz ausgearbeitet und nach mehreren Iterationen in einen Know-How-Überlassungsvertrag überführt, der Mitte Februar 2017 zwischen S&G Engineering GmbH und dem ZSW geschlossen werden konnte. In Abstimmung mit der Firma S&G Engineering GmbH und der im Teilprojekt FoWEA beteiligten Partner wurde das uns zur Verfügung gestellte Know-How in vertrauliche Daten und freigegebene Daten unterschieden.

Aufgrund der zu einem späteren Zeitpunkt geplanten Kooperation mit anderen (inter-)nationalen Partnern und dem open-access Zugang zu einem für die Öffentlichkeit zugänglichen, abgeleiteten Forschungsmodell wurde auch der Umgang mit Anfragen Dritter mit der Firma S&G Engineering GmbH diskutiert. Der abgestimmte Vorgang wurde in den geschlossenen Know-How-Überlassungsvertrag mitaufgenommen. In enger Abstimmung mit den WindForS Partnern und der WindForS Geschäftsstelle sollen strategische Partnerschaften durch langfristige Kooperationen entstehen und die in der ursprünglichen Antragsstellung des WINSent-Vorhabens aufgezeigten Synergien genutzt werden.

Mitte April 2018 wurden sämtliche Know-How Daten mithilfe des OwnCloud Servers seitens des ZSW den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Der zwischen S&G Engineering GmbH und dem ZSW geschlossene Vertrag sah nach der Bereitstellung eine Prüfung der Daten durch die im Teilprojekt „FoWEA“ beteiligten Institute und Lehrstühle der TUM und der USTUTT vor. Die abschließende Prüfung und Bereitstellung noch weiterer, zugesicherter Daten erfolgte im August/September 2017. Eine Liste aller bereitgestellten Daten wurde erstellt, welche als Protokoll zur Erfüllung der Know-How Überlassung, als auch zur Orientierung in Bezug auf vertrauliche und freigegebene Daten diene.

AP 1.2.3 Modifikationen der FWEA vor der Installation

2018

Für den Einsatz auf dem Testfeld waren neben umfangreicher messtechnischer Ausstattung auch weitere Modifikationen gegenüber der geplanten Serienausführung der Anlage „ATB750.54“ notwendig. Diese sollten möglichst bereits bei der Fertigung berücksichtigt werden. In einem ersten Schritt wurde damit begonnen die zusätzlichen Verkabelungen zu planen, um diese entsprechend spezifizieren zu können und ggf. Synergien mit vorhandenen Verkabelungen zu nutzen. Weiterhin wurde damit begonnen, auf Basis der Ergebnisse zweier Meetings aller WindForS-Partner, eine Auflistung der geplanten messtechnischen Ausstattung zu erstellen und diese um neue Ideen und Anforderungen gegenüber dem im Antrag dargestellten Umfang zu ergänzen. Neben Vorschlägen zu zusätzlicher Sensorik sowie der Diskussion über die optimale Positionierung der verschiedenen Messstellen, wurden auch Ideen eingebracht, welche die Durchführung verschiedener Tests einzelner Anlagenkomponenten vor der Montage zur Gesamtanlage vorsahen. Beispielsweise könnten mittels Eigenfrequenzmessungen der Rotorblätter oder von Turmsegmenten wichtige Eigenschaften und Kenngrößen ermittelt werden, welche nach dem Zusammenbau und nach der Errichtung der Anlagen nicht mehr experimentell festgestellt werden können. Solche Tests sowie zusätzliche Sensorik, die sich

nur vor der Errichtung bzw. Fertigung einzelner Komponenten einbringen lässt, könnten wertvolle Daten für den Abgleich bzw. das Feintuning der numerischen Anlagenmodelle liefern.

Weiterhin wurden intensive Gespräche mit der Firma S&G Engineering GmbH durchgeführt, in deren Verlauf alle notwendigen Modifikationen und Anpassungen der FWEA bis ins kleinste technische Detail besprochen und abgestimmt wurden. Den Auftakt dazu bildete eine zweitägige Telefonkonferenz. Diese Gespräche wurden kontinuierlich in Form von Telefonkonferenzen und Arbeitstreffen fortgesetzt.

2019

Im April 2019 war es möglich eine WEA vom Typ ATB750.54 der Fa ATB Riva Calzoni SpA in Italien zu besichtigen. Die Besichtigung trug dazu bei, die Konzeptionierung des Mess- und Regelungssystems sowie die Positionierung verschiedener Sensoriken weiter voranzubringen. Zudem war es möglich, zusammen mit zwei Ingenieuren der Fa. S&G Engineering GmbH vor-Ort Lösungen für die bis dato noch offenen, technisch-mechanischen Fragestellungen zu finden. Zudem konnte der neue Controller AWC 500 der Fa. DEIF A/S in Augenschein genommen werden, der für die Regelung und Betriebsführung dieser Anlage zum Einsatz kommt. Mit dem AWC500 plant auch das ZSW den Hardware-in the-Loop Teststand sowie den Anlagenbetrieb. Im Nachgang zur Besichtigung wurde damit begonnen, alle für die Forschung notwendigen Modifikationen in einer umfangreichen Liste zusammenzutragen. Die Modifikationsliste umfasste ca. 60 Punkte angefangen von der Neupositionierung einzelner Komponenten (z.B. Kühlpumpe, Hilfsstrafo, Schmierungskompressor, u.a.), über den Einbau zusätzlicher Komponenten (Dachträgerkonstruktion, Kettenzug im Turm, Leerrohre im Fundament, u.a.), und den Einbau zusätzlicher Infrastruktur für die geplante messtechnische Ausstattung der beiden Forschungswindenergieanlagen (Schaltschränke, Stromleitungen, Datenleitungen, etc.) bis hin zu konstruktiven Änderungen der Anlage (z.B. Verstärkung der Dachkonstruktion, Messtechnikschächte im Fundament, Neupositionierung der Kabeltrasse im Turm, u.a.m.). Am Ende lag ein vollständig ausgearbeitetes Spezifikationsdokument zusammen mit allen notwendigen Konstruktionsunterlagen für den Hersteller der beiden Anlagen, die Firma ATB Riva Calzoni SpA vor, welches für diesen dann die Grundlage zur Produktion der beiden Anlagen sein sollte. Außerdem hätten die Modifikationen in einer bestimmten Weise Eingang in den zu schließenden Kaufvertrag zwischen ATB und ZSW finden sollen, um entsprechende Gewährleistungsansprüche regeln zu können. Die Liste konnte 2019 noch nicht abschließend finalisiert werden.

Gemeinsam mit dem Ingenieurbüro S&G Engineering GmbH wurde ein für die WEA geeignetes Fundamentdesign erarbeitet, welches sowohl den Anforderungen des Standortes als auch denen der Forschung bestmöglich Rechnung trägt. Hierzu wurden zunächst die zu erwartenden Lasten auf Basis des beim TÜV-Nord in Auftrag gegebenen Wind- und Turbulenzgutachtens berechnet. Darauf folgend wurden die erforderliche Größe und Masse des Fundamentes ermittelt und bestimmt. In weiterer Zusammenarbeit mit dem Projektpartner KIT-IBF wurden zusätzliche Besonderheiten für Einbauten und die geplante Fundamentmesstechnik und Sensorik iterativ erarbeitet. Das abschließende Design des Fundamentes sah einen kreisrunden Grundkörper vor, in dessen Außenbereich insgesamt sechs gleichmäßig verteilte Schächte für die Positionierung von Messgebern eingebracht sind. Des Weiteren war in der Mitte des Fundamentes ein zentraler Schacht innerhalb des Ankerkorbes vorgesehen. Zudem sollten die Schächte für spätere Wartungsarbeiten von außen zugänglich sein und genügend

Platz für eine Person bieten, um jeder Zeit an die messtechnischen Komponenten zu gelangen. Für die Verdrahtung der einzelnen messtechnischen Komponenten sind die sechs außenliegenden Schächte über Leerrohre mit dem Zentralschacht in der Mitte verbunden. So kann die eingebaute Sensorik sternförmig an ein zentrales Messsystem angeschlossen werden. Für die Fundamentsensorik war zunächst ein eigenes, kleines Messsystem vorgesehen, welches über eine geeignete Schnittstelle in das Hauptmesssystem der WEA zeitsynchron eingebunden werden sollte. Hiervon wurde final Abstand genommen und die Sensorik direkt an das Hauptmesssystem angeschlossen.

Die noch im Juni 2019 mit Vertretern des Messtechnikherstellers imc sowie des Sensorherstellers fos4X erarbeitete Topologie der Messtechnik für die beiden FWEA konnte auf Seiten der beiden Firmen von technischen Spezialisten grundsätzlich bestätigt werden. Im weiteren Verlauf wurde mit fos4X die detailliertere Ausarbeitung der faseroptischen Rotorblattsensorik in Form von faseroptischen Dehnungsmesssensoren vorangetrieben. Parallel wurden Anstrengungen unternommen, um noch weitere Konstruktionsunterlagen des Rotorblatts vom Hersteller EUROS zu erhalten. Aufgrund der Insolvenz des Mutterkonzerns Senvion gestaltet sich der Kontakt zu EUROS jedoch sehr schwierig und langwierig. Gemeinsam mit dem Partner TUM-LST war es dennoch gelungen, noch einige offene Fragen in Bezug auf die Eigenschaften der Rotorblätter zusammen mit EUROS (mittlerweile TPI Composites GmbH, Berlin) zu klären. Diese Informationen waren auch für die Planungen der Rotorblattsensorik wichtig.

Die Tragweite der Insolvenz der Fa. Senvion und damit des Rotorblattherstellers war zu diesem Zeitpunkt noch nicht absehbar, da die Produktion neuer Rotorblätter an den ursprünglichen EUROS Standorten noch nicht gefährdet schien.

2020

Nachdem 2019 damit begonnen wurde die Modifikationen im Bereich des Fundaments der FWEA gemeinsam mit S&G Engineering GmbH und dem Projektpartner KIT IBF zu spezifizieren, wurde diese Arbeit in mehreren Abstimmungsrunden fortgesetzt. Nach Klärung aller Details wurde seitens S&G Engineering GmbH ein angepasster Fundamentplan vorgelegt, welcher dann nochmals von allen Beteiligten überprüft wurde. Nachdem nochmals einige Anpassungen notwendig wurden, konnten schließlich die vorerst finalen Fundamentpläne erstellt werden. Diese wurden durch ZSW dann bei der Genehmigungsbehörde eingereicht und im weiteren Verlauf dem Prüfstatiker zur Prüfung vorgelegt. Parallel konnten seitens ZSW mit den Plänen Angebote bei Tiefbaufirmen zum Bau der beiden modifizierten Fundamente eingeholt werden. Das Design des Fundaments wurde aus Mitteln des Bundes, der Bau hingegen aus Landesmitteln im Zuge des WINSent-BW-Vorhabens finanziert.

Die Windenergieanlage wäre vom Hersteller standardmäßig mit einem reibschlüssigen Steigschutzsystem ausgestattet worden. Um den PSA-Materialeinsatz im späteren Testfeldbetrieb überschaubar zu halten, wurde eine Möglichkeit gesucht, das formschlüssige Steigschutzsystem der bereits errichteten Windmessmasten auf die Windenergieanlagen zu adaptieren. Die Schwierigkeit dieser Adaptierung war an dieser Stelle die Zulassung und Freigabe einer herstellereigenen Steigschutzschiene auf eine bestehende Leiter. Mit Hilfe der Firma, welche das ZSW schon seit einiger Zeit bei der Schulung seiner Mitarbeiter in der Nutzung von PSA betreut, konnte ein Weg gefunden werden, das Steigschutzsystem der WMM auf die in der Anlage vorgesehene Leiter zu adaptieren. Der Steigschutz sollte während der Produktion des Turmes vom Turmhersteller eingebaut und im Nachgang geprüft und freigegeben werden.

Die Arbeiten zur Definition der Anforderungen insbesondere an die Rotorblattsensorik aber auch an die übrige Sensorik der beiden FWEA wurde 2020 fortgesetzt. In Rahmen eines weiteren Workshops am ZSW in Stuttgart konnte mit allen Partnern des Teilprojekts FoWEA die gesamte angedachte Sensorik durchgesprochen werden und dabei die technischen Anforderungen seitens der Partner mit in die Planungen aufgenommen werden. Hinsichtlich der Rotorblattsensorik wurde aufgrund aktualisierter Angebote des Herstellers fos4X deutlich, dass die ursprünglichen Anforderungen zu erheblichen Mehrkosten und Mehraufwand führen würden. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die wesentliche zur Validierung der unterschiedlichen Modelle relevante Messgröße, nämlich die Verformung der Rotorblätter, mit Hilfe des Systems von fos4X nicht direkt erfasst werden kann. Aus diesem Grund wurde nach weiteren alternativen Messsystemen durch das ZSW recherchiert und gemeinsam mit den Partnern hinsichtlich der technischen Machbarkeit und der Erfüllung der wissenschaftlichen Anforderungen ausgewertet und verglichen. Als Ergebnis dieser Arbeiten stand fest, neben dem bereits ursprünglich vorgesehen System von fos4X (in reduzierter Form) ein weiteres faseroptisches Messsystem in den FWEA zu verbauen. Es handelte sich dabei um das System einer portugiesischen Firma (vgl. Abbildung 20), welches direkt die Verformungen erfasst.

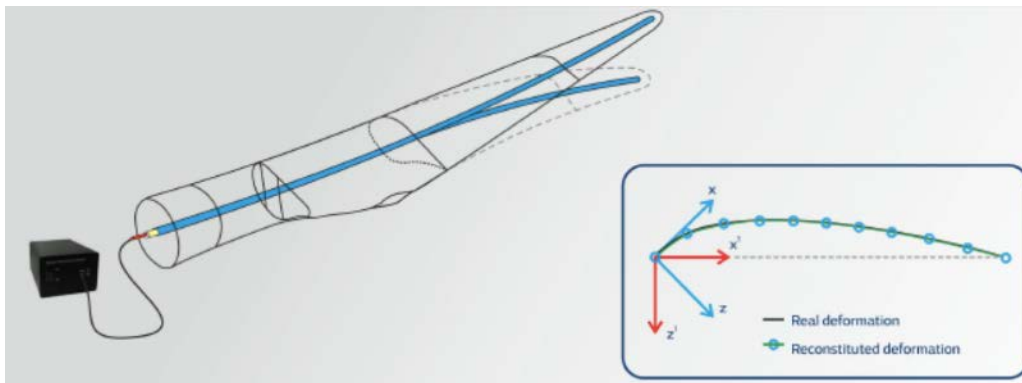


Abbildung 17: Ein faseroptischer Biegestab erfasst die für die Validierung der numerischen Modelle notwendige Verformung direkt und wird von der Blattwurzel bis in die Spitze des Rotorblatts appliziert [Fibersail].

Da dieses System noch sehr neu ist, wurde ein Validierungstest im Originalmaßstab an einem Rotorblatt ähnlicher Größe beim italienischen Rotorblatthersteller eTa Blades durchgeführt. Die Ergebnisse waren sehr vielversprechend, weshalb entschieden wurde, die Instrumentierung der Rotorblätter zum Großteil mit Hilfe dieses Sensortyps auszuführen. Die vom ZSW initiierte und ebenfalls erprobte Messung der Ovalisierung im Bereich des Blattwurzelanschlusses bzw. Rotorblattlagers wurde ebenfalls beim Testaufbau in Italien durchgeführt. Auch diese Ergebnisse waren vielversprechend.

Zunehmend wurde klar, dass die bisherigen Produktionsstandorte des Rotorblattherstellers EUROS geschlossen werden würden, und es keine Rotorblätter mehr geben wird, welche eine Instrumentierung während der Fertigung der Rotorblätter erlauben. Entsprechend mussten Vorbereitungen dafür getroffen werden die Instrumentierung nachträglich – als quasi Retro-Fit-Lösung – in bereits gebaute Rotorblättereinzubringen.

Die Abstimmungsrunden zwischen ZSW, S&G Engineering GmbH sowie dem Windenergieanlagenhersteller ATB bezüglich der Liste aller Modifikationen der beiden FWEA gegenüber der Standard-WEA wurden regelmäßig weitergeführt. Es erfolgte eine weitere technische Ausarbeitung der einzelnen Punkte bzw. Spezifikation von gewünschten Lösungen. Immer wieder wurden neue Ideen von allen Beteiligten eingebracht, sodass an vielen Stellen iterativ eine möglichst

optimale Lösung erarbeitet werden konnte. Gemeinsam wurde auch festgelegt, welche Modifikationen bereits vom Hersteller der Anlagen umgesetzt werden und welche erst durch ZSW zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen werden. Die Modifikationsliste konnte finalisiert werden und hätte auch Eingang in den zwischen ZSW und ATB zu schließenden Kaufvertrag für die beiden FWEA finden sollen, damit dort wo nötig eine klare Abgrenzung der Gewährleistungsansprüche erfolgen kann. Von den Ausarbeitungen wurden unter anderem 3D-Zeichnungen und Stücklisten abgeleitet, welche für die Angebotseinholung bzw. Ausschreibung der jeweiligen Komponenten benötigt wurden.

2021

Bestellung und Lieferung der Umrichter in die Trafostationen

Nach der Ablehnung des Widerspruchs im März 2021 konnten wieder Beschaffungen für den Bau des WINSent-Testfelds durchgeführt werden. Zeitlich am kritischsten war zunächst die Bestellung der Umrichter, welche während des Baus der beiden Trafostationen bereitgestellt werden mussten. Nachdem der bisherige Umrichterlieferant gegenüber der Fa ATB angekündigt hatte, keine Umrichter mehr in der bisherigen Leistungsklasse anzubieten, wurde entschieden, sich auf den deutschen Hersteller Freqcon zu konzentrieren. Der Vorteil des von Freqcon angebotenen MSC-Umrichters ist, dass weitere (erneuerbare) Energiequellen (z.B. PV), oder Speicher implementiert und angeschlossen werden können. Vor der Bestellung mussten jedoch noch sämtliche Details zur elektrischen Anbindung und Kühlung in mehreren Iterationsschritten zwischen Freqcon, S&G Engineering GmbH und ZSW abgestimmt werden. Weiteren Abstimmungsbedarf gab es beispielsweise auch hinsichtlich der Anlagensteuerungssoftware, der Topbox (Gondelsteuerschrank), dem Gleichrichterschrank und andern von Freqcon gelieferten Dingen, weshalb alle drei Wochen ein Jour Fixe mit den genannten Institutionen stattfindet.

Lastrechnung durch Fa. morewind

Im Jahr 2021 wurden durch die Fa. morewind numerische Lastfallrechnungen durchgeführt. Hierbei wurde der neue WINSent Basisregler in das Computermodell der FWEA implementiert und verschiedene Lastfälle, z.B. Starkwind, Netzausfall, Schräganströmung, etc. simuliert und die Ergebnisse mit den Auslegungslasten verglichen, um so abschätzen zu können, ob die Strukturkomponenten wie Turm, Rotorblätter u.a.m. einem Betrieb von 20+ Jahren standhalten.

Bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung (BNK)

Die FWEA sind laut Nebenbestimmung der erteilten BImSchG-Genehmigung mit einer Tages- und Nachtkennzeichnung zu versehen. Aufgrund der Pflicht und der Neuregelungen der „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen“ sind auch bedarfsgerechte Nachtkennzeichnungen (BNK) für den Betrieb der beiden FWEA in Erwägung zu ziehen, insbesondere vor dem Hintergrund einer späteren EEG-Vergütung, welche ebenfalls an die Ausstattung mit einer BNK gekoppelt ist. Aus Akzeptanzgründen spricht auch dafür, die vier meteorologischen Masten mit ihrer Gesamthöhe von 100 m an das BNK-System zu koppeln. Im Umfeld des Windenergie-testfelds gibt es noch weitere Windenergieanlagen und Windparks, welche bis Ende 2024 mit einer BNK nachgerüstet werden müssen. Aus diesem Grund wurden gemeinsame Gesprächsrunden seitens ZSW initiiert, um mögliche Synergien bei der Auswahl und Beschaffung von BNK-Systemen abzustimmen.

Zunächst galt es Kontakt zu den BNK-Herstellern aufzunehmen und die unterschiedlichen Systeme im Hinblick auf technische und finanzielle Gesichtspunkte zu vergleichen. Die Betreiber der benachbarten Windparks entschieden sich aus unternehmerischer Sicht für das System eines Herstellers, welches jedoch am Forschungstestfeld nicht die unmittelbare Einbindung der Messmasten erlaubt. So hätten für alle vier Messmasten und zwei FWEA in Summe sechs Systeme beschafft werden müssen, weshalb nach einer erfolgten Marktsondierung die Entscheidung für ein BNK-System der Fa. ProteaTech gefallen war.

Ausführungsplanung und Applikation der seismischen Messsensorik

Für die Installation der drei im Vorhaben beschafften seismischen Messgeräte im Gebiet des Testfelds wurde eine Ausführungsplanung für die Bohrungen und für die Ausgestaltung der Schächte seitens ZSW ausgearbeitet und mit dem KIT-GPI abgestimmt (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22). Die Bohrungen der zwei nördlichen Sensorstandorte wurden im Mai 2021 niedergebracht (vgl. Abbildung 23) und die Schächte im Juni eingebaut. Die Instrumentierung erfolgte im Juli 2021 (vgl. Abbildung 24). Der südliche Schacht wurde nach der Ernte im September nach erfolgter Bohrung eingebaut und im Anschluss mit dem Seismometer bestückt. Die Schächte befinden sich innerhalb der Wiese im nördlichen Teil des Testfelds bzw. innerhalb eines Ackers im südwestlichen Teil des Testfeldgebiets. Die entsprechenden Leerrohre für die Anbindung an die Stromversorgung und Internetanbindung wurden bereits bei den testfeldinternen Arbeiten im Zuge des WINSSENT-BW Vorhabens berücksichtigt.

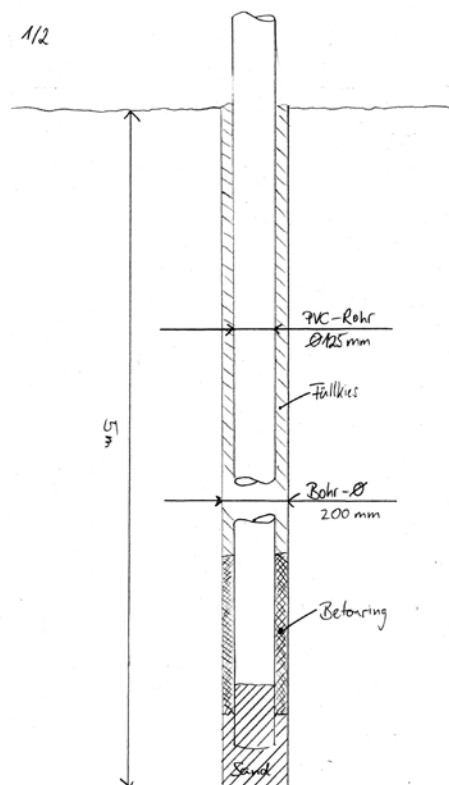


Abbildung 18: Skizze zur Niederbringung der Bohrungen und zur Vorbereitung des Seismikschachts [ZSW]

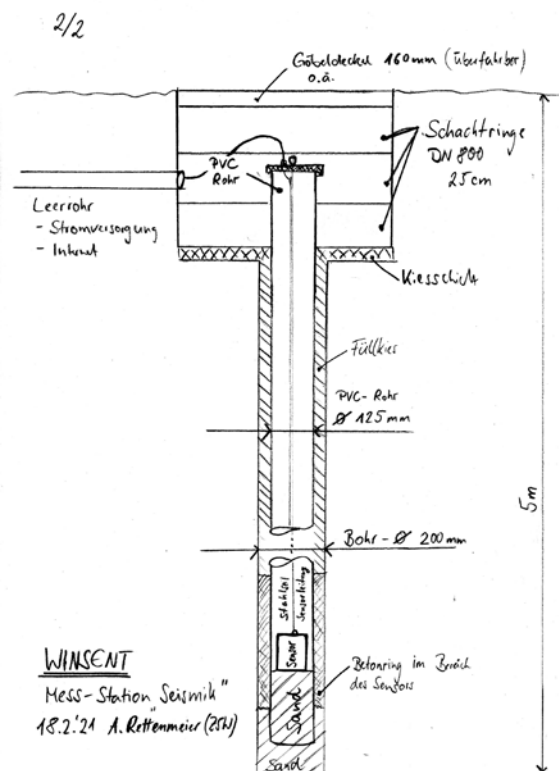


Abbildung 19: Skizze zur Ausgestaltung der drei Seismikschächte [ZSW]



Abbildung 20: Die Bohrung eines Loches zur Sensorapplizierung im felsigen Untergrund in eine Tiefe von 5 m [ZSW]



Abbildung 21: Einbringen des seismischen Messgeräts durch Wissenschaftler des Geophysikalischen Instituts GPI des KIT in den vorbereiteten Schacht. [ZSW]

Ausführungsplanung der geotechnischen Messsensorik

Es wurde ebenfalls die seitens ZSW erarbeitete Ausführungsplanung für die Applikation der geotechnischen Sensoren „Extensometer“ und „Sohldruckgeber“ sowohl mit dem Verbundpartner dem Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (KIT-IBF) als auch mit dem Sensorhersteller, der Fa. Glötzl., abgestimmt. Hintergrund der engen Abstimmung war sowohl die Verortung der Sensorik unterhalb des späteren Fundaments als auch der zeitliche Ablauf der Applikation. Die Extensometer mussten in den zwei unterschiedlichen Tiefen 3,5 m und 6,5 m jeweils abwechselnd in Bohrungen einzementiert und verankert werden (vgl. Abbildung 26). Es wurde hierzu geplant, das Bohrgerät auf die sogenannte Ausgleichsschicht einzuheben und von der Ausgleichsschicht beginnend die Bohrungen niederzubringen. Direkt auf die Ausgleichsschicht aufgebracht werden sollten im Anschluss die Sohldruckgeber in der Nähe der Extensometer-Bohrungen (vgl. Abbildung 25)

- 6 Extensometer: 3 Bohrlöcher á 3,5m (80°, 200°, 320°) und 3 Bohrlöcher á 6,5m (20°, 140°, 260°)
- 6 Sohldruckgeber (8°, 68°, 128°, 188°, 248°, 308°)

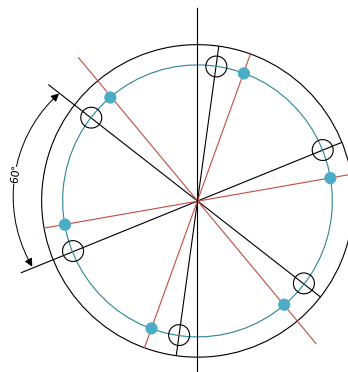


Abbildung 22: Verortung der Sohldruckgeber und der Extensometer unterhalb des späteren, kreisrunden Fundaments in jeweils 60° Abständen [ZSW]

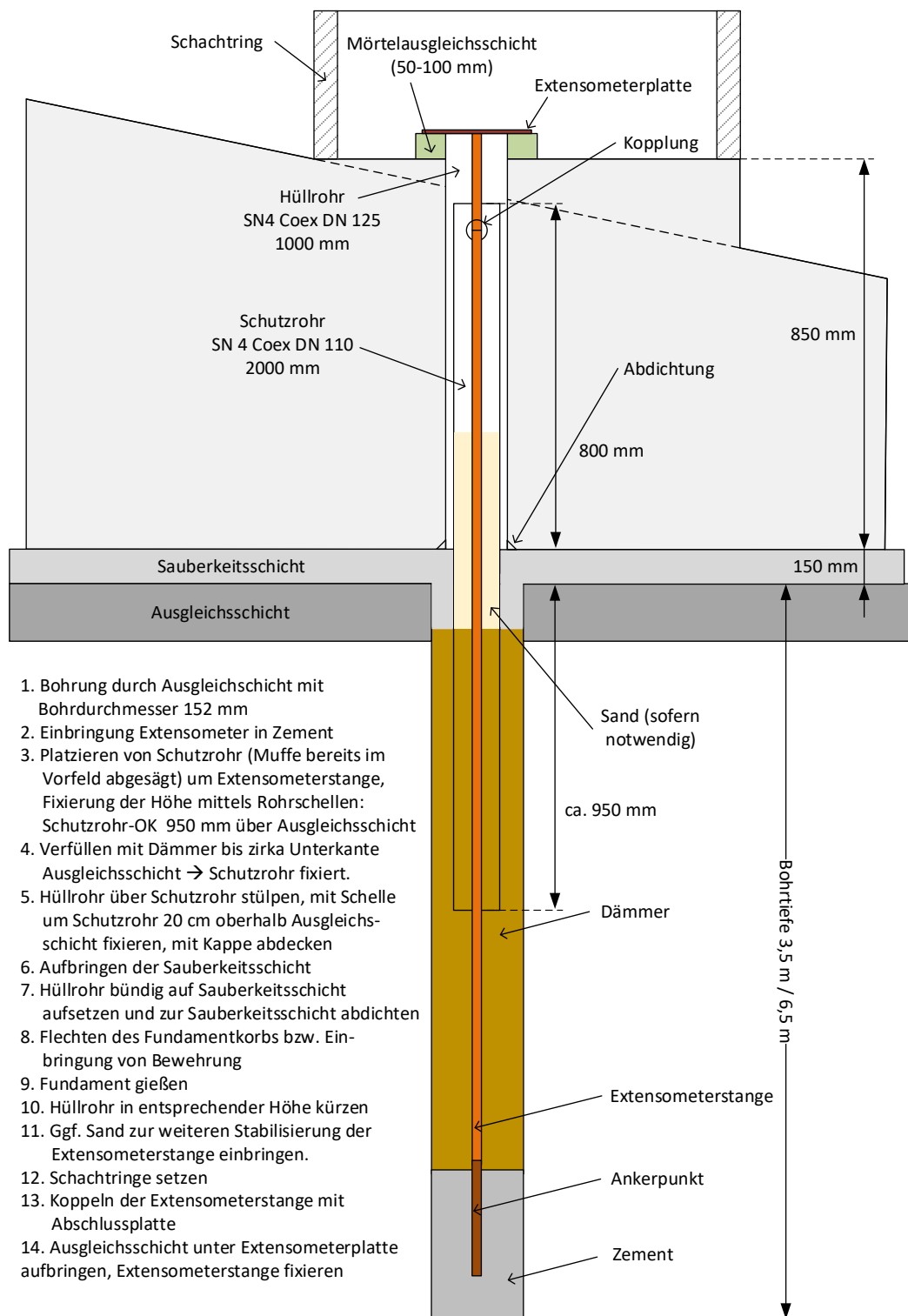


Abbildung 23: Ausführungsplanung zur Einbringung der Extensometer in die entsprechenden Bohrlöcher [ZSW]

Im Juli 2021 begannen die Arbeiten, und es wurde wie geplant zunächst das Bohrgerät auf die Ausgleichsschicht eingehoben und von der Ausgleichsschicht beginnend die Bohrungen niedergebracht. Direkt auf die Ausgleichsschicht aufgebracht wurden die Sohldruckgeber in der Nähe der Extensometer-Bohrungen. Die Sensorleitungen der Sohldruckgeber wurden durch ein flexibles Rohr geschützt, die Extensometerstangen hingegen durch sogenannte KG-Rohre.



Abbildung 24: Einheben des Bohrgeräts in die Fundamentgrube auf die Sauberkeitsschicht mithilfe eines Mobilkrans [ZSW]



Abbildung 25: Bohrung der sechs unterschiedliche tiefen Löcher durch Beton und Fels für die Applikation der Extensometerstangen (vgl. 1. Punkt der Ausführungsplanung) [ZSW]



Abbildung 26: Die Extensometerstangen (blauer Pfeil) wurden in die Bohrlöcher eingebracht und die Anker einzementiert [ZSW]



Abbildung 27: Ebenfalls wurden in der Nähe der Bohrlöcher die Sohldruckgeber auf ein Mörtelkissen gebettet. [ZSW]



Abbildung 28: Zum Schutz wurde über den Sohldruckgeber eine Mörtelschicht aufgebracht und die Sensorleitungen zu einem späteren Zeitpunkt durch ein flexibles Rohr geschützt. [ZSW]



Abbildung 29: Die Bohrlöcher wurden mithilfe eines Füllbinders/Dämmers verschlossen und auch ein Schutzrohr für das Extensometer im selben Arbeitsschritt eingebracht (3. Punkt der Ausführungsplanung) [ZSW]

Bau der Ankerkörbe

Vor dem Bau der beiden Fundamente (im Landesvorhaben WINSSENT-BW verortet) mussten noch beide Ankerkörbe auf der nachträglich aufgetragenen Sauberkeitsschicht gebaut werden. Die Ankerkörbe stellen das Verbindungselement zwischen FWEA und Fundament dar. Sie bestehen aus einem unteren Stahlring und 160 im Umfang verteilte und mit dem Stahlring verschraubte Ankerbolzen, welche an beiden Seitenenden ein Gewinde M36 besitzen. Eine weitere Komponente ist eine Holzschablone, welche die Ankerbolzen im oberen Bereich in einem bestimmten Lochbild fixieren. Nach dem Bau der Fundamente und dem Aushärten des Betons wurde vor der Errichtung der Stahlrohrtürme (mit demselben Lochbild) diese Schablonen entfernt.



Abbildung 30: Bau der Ankerkörbe mit unterem Stahlring und den Ankerbolzen. Zu sehen sind die durch die Sauberkeitsschicht geführten KG/Hüll-Rohre und das flexible Rohr der Sohldruckgeber [ZSW]

Während dem Betonieren der Fundamente (vgl. Abschlussbericht WINSSENT-BW) wurden die Hüllrohre durch die Bewehrung geführt (vgl. Abbildung 34).



Abbildung 31: Das Hüllrohr (Punkt 5 und 7 der Ausführungsplanung) der Extensometerstangen sowie das flexible Schutzrohr der Sohldruckgeber ragen aus dem betonierten Fundament heraus [ZSW].



Abbildung 32: Nach dem Setzen der Zugangsschächte sind das schwarze Schutzrohr sowie das orange Hüllrohr zugänglich. Zu erkennen im Hüllrohr ist der obere Teil der Extensometerstange [ZSW]



Abbildung 33: Fertiges, noch nicht verfülltes Fundament einer FWEA mit den im Umfang verteilten sechs Zugangsschächten zur geotechnischen Instrumentierung [ZSW]

AP 1.2.4: Beschaffung FWEA und HIL

2018

Zu Beginn des Jahres wurde die Firma DEIF A/S in Odense, DK besucht. Mit dabei waren neben dem ZSW auch Vertreter der Universitäten Stuttgart und München sowie S&G Engineering GmbH. Ziel dieses Arbeitstreffens war zunächst neben einem gegenseitigen Kennenlernen einen Erstkontakt auf Arbeitsebene zu DEIF herzustellen. Außerdem wurde DEIF eine genaue Vorstellung der Anforderungen, die sich aus dem WINSent-Projekt an die Steuerung der Anlagen ergeben, präsentiert. In der Vorbereitung dieses Arbeitstreffens wurde zusammen mit den Projektpartnern ein detaillierter Fragenkatalog erstellt, der u.a. den Auslieferungszustand der Anlage, mögliche Hard- und Software Modifikationen sowie Hardware-in-the-loop-testing umfasste. Ein großer Teil des Treffens bestand in der Präsentation des DEIF-Systems. Das Fazit des Treffens war, dass voraussichtlich alle Ansprüche der Projektpartner an die Anlagensteuerung realisierbar sind und diese in einer Art Lastenheft spezifiziert werden müssen um Änderungen am System im Nachhinein zu vermeiden. Es wurde jedoch auch deutlich, dass ein Zugriff auf den gesamten Quellcode der Steuerung und damit eine Einflussnahme auf alle Parameter vermutlich nicht zu realisieren sein wird.

2019

Die Erstellung eines detaillierten Spezifikationsdokuments, welches die Schnittstellen zur Anlagensteuerung des Zulieferers DEIF A/S, sowie alle Hard- und Softwaremodifikationen an der Anlagensteuerung beschreibt, welche für die spätere Durchführung von Forschungsarbeiten aber auch zur Erfüllung von zu erwartenden artenschutzrechtlichen Genehmigungsaufgaben notwendig sind, wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SWE der Universität Stuttgart abgeschlossen. Anschließend wurde dieses Dokument zur Prüfung und Abstimmung zunächst an die Firma S&G Engineering GmbH geschickt. Nachdem seitens S&G Engineering GmbH ein Feedback vorlag, wurde das Dokument nochmals in erheblichem Maße überarbeitet und komprimiert, sodass die wesentlichen Punkte klarer erfasst werden können. Es wurde beschlossen, dass S&G Engineering GmbH als Vermittler zwischen dem ZSW und DEIF A/S fungieren soll und in dieser Rolle das Spezifikationsdokument mit der Bitte um ein entsprechendes Angebot an DEIF A/S heranträgt. Erst gegen Ende des Jahres fand für den weiteren Austausch eine Telefonkonferenz zwischen S&G Engineering GmbH, DEIF und ZSW statt. Im Rahmen dieser Telefonkonferenz erläuterte das ZSW die einzelnen Punkte des Spezifikationsdokuments nochmals genauer und beantwortete Rückfragen, damit DEIF daraufhin ein Angebot erstellen konnte.

Parallel wurde 2019 der Kontakt zu ATB, dem Hersteller der beiden WEA, intensiviert. In regelmäßigen Telefonaten wurden einerseits die Arbeiten zur DIBt-Typenzertifizierung sowie die Entwicklungen hinsichtlich der Insolvenz des Rotorblattherstellers EUROS, aber auch die Problematik einer bei dem Besuch der baugleichen Anlage in Italien festgestellten Tonhaltigkeit des Getriebes besprochen. Auch die oben angesprochenen Spezifikationen an die Steuerung der Anlagen wurden mit ATB diskutiert. Im Verlauf der Diskussionen erklärte ATB, dass sie über einen Lieferantenwechsel in Verbindung mit der Neuentwicklung einer eigenen Steuerung nachdenken. In diesem Zuge wäre ATB auch an einer Mitwirkung bei der Reglerentwicklung durch die WINSent-Partner interessiert. Da dieser Umstand große Auswirkungen auf das WINSent-Vorhaben hätte, wurden seitens ZSW umgehend Gespräche mit dem Partner USTUTT-SWE geführt und verschiedene Szenarien ausgearbeitet. Es bestand seitens S&G Engineering GmbH erhebliche Bedenken gegenüber einer kompletten Neuentwicklung der

Steuerung, weshalb nach einigem Hin und Her der bevorzugte Ansatz doch wieder die Beibehaltung der bisherigen Steuerung von DEIF A/S war.

2020

Implementierung des WINSent-Reglers und der Betriebsführung

Zu Beginn des Jahres wurde seitens des dänischen Zulieferer DEIF A/S ein Angebot über die notwendigen Modifikationen der Anlagensteuerung an den Hersteller der WEA übermittelt. Der Preis war so hoch, dass seitens S&G Engineering GmbH und ZSW beschlossen wurde, einen alternativen Weg zu suchen, da die Kosten in dieser Höhe nicht nachvollziehbar und auch nicht gerechtfertigt schienen, wenn am Ende zwar eine modifizierte aber nach wie vor nicht zugängliche Anlagensteuerung dabei herauskommen würde. Zudem überstiegen die veranschlagten Kosten das für diese Arbeiten bewilligte Budget im Vorhaben erheblich. Nachdem eigentlich sowohl seitens S&G Engineering GmbH als auch seitens ZSW die vom Hersteller ATB ins Spiel gebrachte Neuentwicklung einer eigenen Anlagensteuerung auf Basis von Steuerungshardware eines alternativen Lieferanten vor allem wegen unabwägbarer Risiken zunächst abgelehnt worden war, musste nun aufgrund des völlig überhöhten Angebots von DEIF A/S für die Modifikationen der Anlagensteuerung eine neue Möglichkeit gesucht werden.

In diesem Zusammenhang wurde eine Diskussion über einen möglichen Wechsel des Umrichters der Anlage wieder interessant, da der bisherige Umrichterhersteller *TheSwitch* die für die FWEA notwendige Größe (750 kW) seit Juni 2020 nicht mehr produzierte. Dies war insbesondere im Hinblick auf eine mögliche Ersatzteilbeschaffung im Falle eines Defekts, in Bezug auf mögliche zukünftige Weiterentwicklungen, z.B. die Integration von weiteren Erneuerbaren Energien (Stichwort Hybride Kraftwerke) und der Herstellung weiterer (F)WEA desselben Typs auch ein Grund dafür, dass sich das Ingenieurbüro S&G Engineering GmbH dazu entschloss, auf ein anderes, Zukunft trächtigeres Umrichter-System zu wechseln. Der vom ZSW vorgeschlagene neue Umrichterlieferant, die deutsche Firma *Freqcon*, würde nicht nur einen sehr viel moderneren und flexibel erweiterbaren Umrichter liefern, sondern könnte auch eine komplette Anlagensteuerung dazu liefern. Hierbei handelt es sich neben der Software auch um die Hardware, welche bereits im Umrichtersystem verbaut ist. Nach ersten Gesprächen wurde schnell klar, dass dies eine ganz andere Situation als bei der zuvor von ATB ins Spiel gebrachten eigenen Neuentwicklung der Steuerung wäre, sodass dies sehr bald der favorisierte Weg – auch seitens S&G Engineering GmbH – war.

Ein wesentlicher Punkt aus Sicht des WINSent-Vorhabens war, dass der innerhalb des Teilprojekts FoWEA von der Universität Stuttgart entwickelte Forschungsbasis-Regler direkt von Beginn an in der neuen Steuerung integriert werden und auch durch die noch laufende DIBt-Typenprüfung als Standard-Regler zertifiziert werden soll. Der größte Vorteil des Umstiegs auf eine Anlagensteuerung von Freqcon war jedoch, dass die Anlagensteuerungssoftware für das ZSW quelloffen ist und damit jegliche Anpassungen zu einem späteren Zeitpunkt durch ZSW selbst implementiert werden können. Im Vergleich dazu müsste beim Verbleib der Anlagensteuerung bei DEIF A/S das dänische Unternehmen bei etwaigen Folgeänderungen indes immer mit einbezogen werden.

Seitens Freqcon wurden Angebote für die Komplettlösung vorgelegt. Nach entsprechender Evaluierung wurde entschieden, dass der Weg mit Freqcon weiterverfolgt und realisiert werden soll. Zwar sind die anfänglichen Investitionskosten für die Neuentwicklung der kompletten Anlagensteuerung ebenfalls hoch, jedoch bot sich hier über eine mögliche spätere Lizenzierung für

eine kommerzielle Weiternutzung durch S&G Engineering GmbH eine entsprechende Verwertungsmöglichkeit für das ZSW und Partner. Darüber hinaus könnte die Softwareentwicklung auch als Basis für die Experimentalturbine des DLR dienen, da diese auf demselben Anlagentyp von S&G Engineering GmbH basiert. Schließlich ergaben sich aus Sicht des ZSW auch Vereinfachungen in der Realisierung des Hardware-In-The-Loop-Teststands, welcher ein zentraler Baustein für den späteren Testfeldbetrieb darstellt.

Rotorblatt

Nachdem die Produktionsstätten von EUROS geschlossen worden waren, bestand die bislang vorgesehene Lösung darin, dass mithilfe der von ATB gekauften Formen zur Herstellung von Rotorblättern neue Blätter des relevanten Blatt-Typs bei der Firma eTa-Blades in Italien gebaut werden. Es stellte sich jedoch nach ZSW-seitigem Hinwirken heraus, dass die aus der Insolvenzmasse gekauften Formen falsch sind und daraus keine Blätter des richtigen Rotorblatttyps gebaut werden können. Die Rotorblätter müssen vom Typ „EU54.1250.1-B“ sein, da sie Teil der Zertifizierung, der Genehmigung und der Lastrechnungen sind. Die Anpassung der gekauften, falschen Formen für lediglich zwei Rotorblattsätze für das ZSW hätte der Fa. ATB eine Unsumme gekostet. Da auch der Verkauf des ATB-Modells ATB750.54 nach dem Wegfall des Rotorblattherstellers stockt, war an keine weitere Investition zu denken. ATB befand sich an dieser Stelle quasi in einer Sackgasse, da keine Chance bestand, die „richtigen“ Blätter an das ZSW zu liefern. ATB bot daraufhin zwei noch auf Lager befindliche Sätze Rotorblätter vom Typ EU54.1250-2 an, die jedoch nicht von jenem Typ waren, wie es die Zertifizierung, die Anschlussmaße an die Rotorblattlager und die Anlagenmodelle in FoWEA forderten (Abbildung 37, links).



Abbildung 34: Rotorblätter bei ATB vom „falschen“ Blatt-Typ EU54.1250-2 (links) sowie Möglichkeit zur nachträglichen Implementierung von Sensormessstellen (mittig, rechts) [ATB Riva Calzoni Spa., Dencam].

An dieser Stelle drohte auch der Bau der FWEA für das WINSent Testfeld zu scheitern. In einer Telefonkonferenz wurde von ZSW die Frage an S&G Engineering GmbH gerichtet, ob denn nicht noch an anderer Stelle, z.B. beim indischen Lizenznehmer Garuda Rotorblätter des richtigen Typs vorhanden sein könnten. Ein Telefonat später war klar, dass neun Sätze (à 3 Rotorblätter) noch ungebraucht in Indien verfügbar wären (Abbildung 38). Der Zugriff auf diese Sätze, von denen zwei für die FWEA gebraucht würden, konnte jedoch nur über S&G Engineering GmbH und nicht über ATB erfolgen. Die für die FWEA notwendige Implementierung und Kalibrierung der Rotorblattmesstechnik müsste in diesem Fall nachträglich erfolgen, was zwar möglich, aber aufwändiger sein würde (Abbildung 37, mittig und rechts). Im Umkehrschluss war die Beschaffung der indischen Blätter jedoch zunächst die einzige Möglichkeit, die FWEA überhaupt mit dem entsprechenden Blatt-Typ zu bauen.



Abbildung 35: Vorhandene Rotorblatt-Sätze in Indien vom „richtigen“ Blatt-Typ [Garuda]

Hersteller der FWEA

Aufgrund der notwendigen Beschaffung der Rotorblätter mithilfe des Lizenzgebers S&G Engineering GmbH kam die Frage auf, ob und für welche Arbeiten überhaupt noch ATB als Hersteller der FWEA notwendig sein würde. Da das ZSW selbst die Forschungslizenz besitzt und mithilfe von S&G Engineering GmbH sowie deren Schwesterfirma GEKRU GmbH in der Lage wäre, die FWEA selber zu bauen, war der Gedanke nicht mehr so abwegig, die beiden FWEA selbst herzustellen. Das DIBt-Typenzertifikat müsste ohnehin mit dem WINSent-Basisregler neu erstellt werden und die Fragen der Gewährleistung waren mit ATB bislang nur andiskutiert worden, weshalb hier noch erheblicher Aufwand bevorstehen würde. Parallel zur Beschaffung der FWEA durch ATB wurde der Plan B „Eigenbau“ entwickelt, der in erster Linie durch den direkten Kosten-Nutzen-Vergleich entschieden werden musste. Aus diesem Grund wurde ATB aufgefordert, das bisherige Angebot vor dem Hintergrund der Modifikationen, des Umrichterwechsels, der Rotorblatt-Beschaffung u.a.m. zu aktualisieren. ATB selbst zeigte indes kein Interesse an der neuen Umrichterlösung und sagte entsprechend auch keine Unterstützung zu, weshalb diese Arbeiten als Dienstleistung mit angeboten wurden.

Am 30.12.2020 ging seitens ATB ein Kostenvoranschlag (also kein verbindliches Angebot) ein. Die Kostenschätzung lag höher als in den bisherigen Angeboten aus den Jahren 2016 und 2019. Exkludiert gegenüber den bisherigen Angeboten waren jedoch Transport, Errichtung und Inbetriebnahme der Forschungsanlagen. Zusätzlich nicht vorgesehen waren Kostensteigerungen im angebotenen Turmpreis und Ingenieursdienstleistungen in Bezug auf die neue Anlagensteuerung. Aufgeführt waren jedoch die nicht brauchbaren Rotorblätter vom falschen Typ. Aufsummiert ergab sich ein viel zu hoher Mittelbedarf, weshalb der Weg mit ATB keine realistische Lösung mehr darstellte. Auch vor dem Hintergrund der zurückliegenden, mehrmaligen Umstrukturierung der ATB Firmengruppe und der inzwischen bekannt gewordenen spärlichen Auftragslage in der ATB-Windsparte, würde im Falle einer Schließung/Insolvenz keine Back-Up Lösung für den Bau der FWEA zur Verfügung stehen.

Parallel ausgearbeitet wurde Plan B, der besagte, dass das ZSW die Großkomponenten (u.a. Turm, Rotorblätter, Getriebe, Umrichter etc.) selbst beschafft und S&G Engineering GmbH bzw. GEKRU GmbH mit Angebotseinholung, Beschaffung von Kleinkomponenten, Logistik, Zusammenbau,

Errichtung und Inbetriebnahme beauftragt. Für den Zusammenbau und die Errichtung der Forschungsanlagen würde in dieser Konstellation externe Firmen als Back-Up Lösungen zur Verfügung stehen. Es wurden Zahlen für den Plan B zusammengetragen und seitens S&G Engineering GmbH eine Kostenschätzung genannt. Hierbei waren im Gegensatz zur ATB Kostenschätzung Transport, Errichtung und Inbetriebnahme, Hallenmiete und Arbeitsunterstützung sowie die „richtigen“ Rotorblätter aus Indien inkludiert. Nach Abwägung aller Kosten und Risiken und vor dem Hintergrund der Laufzeit war dies die einzige Lösung die FWEA bauen, errichten und in Betrieb nehmen zu können.

Getriebe

Ein weiterer, kritisch zu betrachtender Punkt bei der Beschaffung der FWEA war die Tatsache, dass das derzeitige Getriebe des chinesischen Herstellers DHHI im laufenden Betrieb der Anlage in Italien eine Tonhaltigkeit aufwies, was bedeutet, dass eine Tonfrequenz heraussticht und dieser Ton laut zu hören ist. Im Betrieb der beiden FWEA sollte auf keinen Fall Tonhaltigkeit nachzuweisen sein – dies auch vor dem Hintergrund einer erforderlichen Schallmessung, welche gemäß der Nebenbestimmung der erteilten BImSchG-Genehmigung nach der Inbetriebnahme der Forschungsanlagen durchgeführt werden muss. Mithilfe der Unterstützung der Stuttgarter Firma MesH Engineering konnte in einer Mehrkörpersimulation (MKS) die Ursache der Tonhaltigkeit im Getriebe bestätigt werden. Im Weiteren wurde der Hersteller des Getriebes mit den Simulationsergebnissen konfrontiert und um eine Lösung gebeten.

DHHI arbeitete an einer konstruktiven, aus der Simulation abgeleiteten Lösung. Hierzu wurden zunächst Beschleunigungsmessungen auf der im April 2019 besichtigten WEA in Molinara, Italien, durchgeführt, welche zur Validierung des Computermodells des Herstellers DHHI dienen sollten. Auch in deren Simulation war die Getriebe-Tonhaltigkeit zu sehen. Die Messungen hatten gezeigt, dass das numerische MKS-Modell des Herstellers mit der Realität übereinstimmt und sich die aktuellen Schwingungen reproduzieren lassen. Die in der Simulation gezeigten Verbesserungsmaßnahmen sollten in der Realität ebenfalls die Tonhaltigkeit eliminieren. Konstruktiv war dies durch die Änderung der internen Übersetzung inklusive Schrägverzahnung möglich.

2021

Rotorblatt

Die Beschaffung der Rotorblätter aus Indien gestaltete sich schwierig, da unmittelbar zu Jahresbeginn und über mehrere Monate hinweg in Indien das Corona Virus heftig wütete. Es wurde zunächst ein Angebot unterbreitet, welches jedoch noch nicht die anfallenden Hafen- und Zollgebühren beinhaltete. Parallel wurde mit der Finanzbuchhaltung des ZSW Lösungswege eruiert, um einen sicheren Zahlungsvorgang nach Auftragserteilung zu gewährleisten.

Der Kontakt und ein Gespräch mit der indischen Kontaktperson der Fa. S&G Engineering GmbH hinsichtlich der in Indien lagernden Rotorblätter verliefen während der Corona-Pandemie sehr schleppend und ernüchternd. Die im Vorfeld des Gesprächs aufgerufenen Kosten für die sechs Rotorblätter (ohne Transport) überstiegen bei weitem das ursprünglich vorgesehene und bewilligte Budget. Es wurden zudem Angebote für den Transport der sechs Rotorblätter aus Indien eingeholt und allein die Frachtkosten waren unglaublich teuer. Aufgrund dieser immens gestiegenen

Transportkosten und –zeiten wurde auf dem europäischen Markt nach weiteren Rotorblattsätzen – leider erfolglos – gesucht.

Im Gegensatz zur ursprünglichen Planung, den richtigen Typ Rotorblätter EU54.1250.1-B zu verbauen, kam nach Rücksprache mit den Forschungspartnern der Universitäten der Gedanke auf, etwas kürzere Rotorblätter, die jedoch ebenfalls von der Fa. Euros und von derselben Blattfamilie stammen, zu nutzen. Dieser Typ besitzt dieselben aerodynamischen Rotorblattprofile und ist an zahlreichen Windenergieanlagen verbaut, die zunehmend abgebaut werden. Die Restlebensdauer der Rotorblätter würde, je nachdem wie windstark der bisherige Standort war, noch mehrere Jahre betragen, so dass auch mit gebrauchten Blättern Forschungsarbeiten am Testfeldstandort durchgeführt werden könnten. Am Ende des Jahres wurde bekannt, dass im ersten Quartal 2022 ein Windpark abgebaut werden soll, deren Anlagen mit dem kürzeren Blatt ausgerüstet sind.

Hersteller der FWEA

Mit dem Projektträger Jülich wurde sich im Februar auf das weitere Vorgehen verständigt, das besagt, dass das ZSW die Großkomponenten (u.a. Turm, Rotorblätter, Getriebe, Umrichter etc.) selbst beschafft und die Firmen S&G Engineering GmbH bzw. GEKRU GmbH mit der Angebotseinholung, der Beschaffung von Kleinkomponenten, der Logistik, dem Zusammenbau, der Errichtung und der Inbetriebnahme der FWEA beauftragt. Die mit dieser Lösung einhergehenden Kostensteigerungen wurden in einem Aufstockungsantrag geltend gemacht. In diesem Antrag berücksichtigt wurde auch der stark gestiegene Stahlpreis, der sich z.B. enorm auf die Kosten des Turmes auswirkte.

Nach der Ablehnung des Widerspruchs und der damit verbundenen Mittelfreigabe wurde S&G Engineering GmbH für die Beschaffungsunterstützung beauftragt und es konnten folgende Komponenten bestellt werden:

- Yaw- und Blattlager
- Umrichter
- Ankerkorb
- Geotechnische Sensorik
- Generatoren

In regelmäßigen Telefonkonferenzen mit S&G Engineering GmbH wurde die Angebotseinholung und Beschaffung von Komponenten eng abgestimmt. Die Ausschreibung und Beauftragung erfolgte ebenfalls für die im Landesvorhaben WINSent-BW verorteten Fundamente.

Getriebe

Zum Jahresbeginn wurde vom chinesischen Getriebehersteller DHHI ein Angebot über die zu beschaffenden Getriebe unterbreitet. Aufgrund des Widerspruchs und der damit verbundenen Mittelsperre konnte die Beschaffung nicht unmittelbar in die Wege geleitet werden. Nach Aufhebung der Sperre reagierte der chinesische Anbieter nicht auf die Wiederaufnahme der Gespräche, und es konnte weder der Kontakt direkt nach China noch zur deutschen Niederlassung hergestellt werden. Auch nach einem hoffnungsvollen Web-Meeting Mitte Mai stockte die Kommunikation erneut, und es wurde von chinesischer Seite nicht auf Anfragen und E-Mails reagiert. Erst Mitte des Jahres wurde seitens des chinesischen Getriebeherstellers DHHI ein aktualisiertes, lang ersehntes Angebot zugeleitet. Das Angebot konnte als Abwehrangebot interpretiert werden: der Einzelpreis pro Getriebe war gegenüber dem Angebot vom Januar 2021 verdoppelt, die Mindestabnahmemenge von zwei auf vier erhöht und die Lieferzeit um weitere zwei Monate verlängert worden. Darüber hinaus war nicht ersichtlich, ob dieses Getriebe eine neue Zertifizierung aufgrund der bisher konstruktiv verursachten Tonhaltigkeit hätte durchlaufen müssen. Kosten für eine mögliche Neu-Zertifizierung wurden zumindest im Angebot ausgewiesen.

Aufgrund dieses Angebots mussten auch hier Alternativlösungen gesucht werden. Deshalb fanden im Oktober erste Gespräche mit der deutschen Firma Multigear statt, welche in der Lage ist, auch prototypische Getriebe bzw. Getriebe in kleiner Stückzahl zu fertigen. Bei dem Treffen wurde vereinbart, dass möglichst viele Zeichnungen und Unterlagen des bisherigen Getriebes und auch dessen Vorgängerversionen beschafft werden müssen. Das ursprüngliche Design des Getriebes stammt nicht von DHHI, sondern von der deutschen Firma Zollern, welche jedoch keine Windkraftanlagenhauptgetriebe mehr fertigt und aus dem Marktsegment ausgestiegen ist. Aus diesem Grund und vor dem Hintergrund, auf Basis des ursprünglichen Zollern-Designs neue Getriebe fertigen zu lassen, konnte von Zollern seitens ZSW das Know-How gegen eine Aufwandsentschädigung erstanden werden. Vertraglich wurde geregelt, dass das Know-How für den Bau von prototypischen Getrieben für Forschungsanlagen genutzt werden darf.

In weiteren Gesprächen mit der Fa. Multigear und vor dem Hintergrund des beschafften Zollern Know-How's wurde klar, dass der Bau von neuen Getrieben am einfachsten, schnellsten und kostengünstigsten vonstattengehen wird, wenn der Gusskörper des Getriebes, zum Beispiel von Altanlagen, weiterverwendet werden könnte. Das Innenleben, also Lager, Wellen und Zahnräder, würde neu gefertigt und zusammengebaut werden. Wie bereits erwähnt, wurde am Ende des Jahres bekannt, dass im ersten Quartal 2022 ein Windpark abgebaut werden soll, deren Anlagen mit jenen Getrieben ausgestattet sind, deren Gusskörper weiterverwendet werden könnten.

Die Anbindung des Getriebes an den bereits fertig designten aber noch nicht beschafften Maschinenträger müsste jedoch seitens von S&G Engineering GmbH überarbeitet werden.

Ausschreibungen und Beschaffungen

Es wurden nach Fertigstellung eines umfangreichen Leistungsverzeichnisses und nach einer Ausschreibung die zwei Stahlrohtürme für die beiden FWEA bei der Magdeburger Firma SAM im September bestellt.

Für die noch offene Beschaffung der Nabe und der Gondelverkleidung wurde der italienische Lizenznehmer der Fa. S&G Engineering GmbH, die Fa. ATB Riva Calzoni, mehrfach kontaktiert. Leider

wurde von italienischer Seite weder auf zahlreiche, an verschiedene Personen adressierte E-Mails noch auf Telefonanrufe reagiert. Es ist daher schlicht nicht zu erwarten, dass hier eine Beschaffung von Einzelkomponenten möglich sein wird.

Gondelverkleidung

Weder der Firma S&G Engineering GmbH, noch deren indischen Kontaktmann, noch dem ZSW gelang es, den Kontakt zum Hersteller der in Indien gefertigten Gondelverkleidungen aufzunehmen. Fünf von sieben E-Mails, welche seitens ZSW an verschiedene Adressen geschickt wurden, konnten nicht zugestellt werden. Von den Empfängern der zwei zugestellten E-Mails blieb eine Antwort aus. Da davon auszugehen ist, dass es auch an dieser Stelle zu keinem nennenswerten Fortschritt kommen wird, mussten Alternativlösungen gesucht werden.

Nabe

Gegen Ende des Jahres wurde der Weg verfolgt, von gebrauchten Altanlagen Komponenten wie die Getriebegehäuse und Rotorblätter weiter zu nutzen, sofern keine Sicherheitsrisiken bestehen und entsprechende Prüfungen und Berechnungen durchgeführt würden. Es könnten demnach auch die Gussnaben weiterverwendet werden. Dies würde jedoch eine Restlebensdauerberechnung und Rissprüfung voraussetzen.

Besichtigung und Anmietung einer Montagehalle in Königsbronn

Gegen Ende des Jahres konnte eine mögliche Montagehalle in Königsbronn (Landkreis Heidenheim), zirka 45 km entfernt vom Testfeldstandort und in der Nähe der Bundesautobahn A7 besichtigt werden. Die Halle verfügt über eine für den Bau der Anlage notwendige Fläche, Zufahrtsmöglichkeiten für lange und schwere Transporte, eine entsprechende Deckenhöhe, Kräne und Vieles mehr. Nach der Besichtigung und einer Kostenkalkulation wurde eine Anmietung für das kommende Jahr vereinbart und ein Mietvertrag ausgearbeitet.



Abbildung 36: Montagehalle (grau im Hintergrund) in der Nähe zum ÖPNV [ZSW].



Abbildung 37: Zufahrtstor mit ausreichender Breite und Höhe für Schwerlasttransporte [ZSW]



Abbildung 38: Hallenkräne mit 16 bzw. 105 Tonnen Traglast [ZSW]



Abbildung 39: Umkleide- und Sanitarräume [ZSW]



Abbildung 40: Verfügbare Maschinenbette, welche u.a. für die Tests der Rotorblätter genutzt wurden. [ZSW]



Abbildung 41: Optional bestand die Möglichkeit, einen drei Tonnen, gasbetriebenen Gabelstapler anzumieten. [ZSW]

Aufgrund der Verwendung von gebrauchten Komponenten für den Bau der beiden FWEA sind Modifikationen an diesen notwendig, weshalb ab dem Jahr 2022 die Arbeitspakete 1.2.3 und 1.2.4 im Folgenden gemeinsam beschrieben werden.

AP 1.2.3 Modifikationen der FWEA vor der Installation und AP 1.2.4: Beschaffung FWEA und HIL

2022

Die Beschaffung von Komponenten für den Bau der beiden für die Forschung modifizierten Windenergieanlagen gestaltet sich seit einigen Monaten sehr schwierig. So sind Auswirkungen im Welthandel beim Anstieg der Rohstoff- und Energiepreise, aber auch lange Lieferzeiten und stockende Lieferketten zu verzeichnen.

Im Forschungsvorhaben KonTest (FKZ 0325656A-D), welches dem Vorhaben WINSent vorausging und in dem unter anderem Kriterien für eine „ideale Forschungsanlage“ definiert wurden, wurde seinerzeit die Windenergieanlage vom Typ Fuhrländer FL-600/ Pfeleiderer PWE650 als ein möglicher Anlagentyp für die Durchführung der geplanten Forschungsarbeiten auf dem Testfeld identifiziert. Die Anlage SG750.54, welche nun im laufenden Vorhaben WINSent als Forschungsanlage gebaut und zukünftig genutzt werden soll, ist eine Weiterentwicklung genau dieser PWE650, weshalb Komponenten zum Teil ähnlich und identisch sind. Folgende gebrauchte, schwierig zu beschaffende Großkomponenten könnten von gebrauchten Windenergieanlagen vom Typ PWE650 weitergenutzt werden:

- Gußnabe: die Naben müssten auf Schäden geprüft werden
- Getriebegehäuse mit Niederhalter: die Getriebegehäuse müssten geprüft und das Innenleben größtenteils aus Neuteilen wiederaufgebaut werden.
- Rotorblätter: hierbei handelt es sich um etwas kürzere Blätter, die jedoch ebenfalls von der Fa. Euros und von derselben Blattfamilie stammen

Zu Beginn des Jahres wurde im Zuge eines Repowering-Projekts der Windpark Altenheerse bestehend aus mehreren Windenergieanlagen vom Typ PWE650 zurückgebaut. Der Abbau der acht verbliebenen Windenergieanlagen vom Typ PWE650 begann ab der 10. Kalenderwoche, und es war Eile bei den notwendigen Absprachen und der Beauftragung geboten. Aufgrund der Witterungsverhältnisse und dem möglichst reibungslosen und zügigen Ab- und Rückbau sah das beauftragte Abbauunternehmen nur die Lösung als sinnvoll und machbar an, dass die gesamten Maschinenhäuser (ohne GFK-Verkleidung), die Rotorblätter und Naben (inkl. GFK-Verkleidung) von der Baustelle direkt in die vom ZSW angemietete Montagehalle transportiert werden.

In Gesprächen mit möglichen Ingenieurbüros, welche sich mit dem Weiterbetrieb von Windenergieanlagen über eine Laufzeit von 20 Jahren hinaus beschäftigen, wurde häufig die Aussage getätigt, dass insbesondere die Naben und die Rotorblätter aufgrund der auftretenden Wechsellasten bei jeder Rotorumdrehung am ehesten Einbußen bei der Restlebensdauer zu verzeichnen haben. Daher wurde entschieden, anstatt der ursprünglich geplanten drei doch vier Naben und anstatt von drei in Summe vier Rotorblattsätze des WP Altenheerse zu beschaffen. Die Entscheidung, die entsprechenden Anzahlen zu erhöhen, erwies sich im Folgenden als richtig.

Es wurden der Abbau und der Transport zur Montagehalle von folgenden Baugruppen und -teilen beauftragt:

- Vier komplette Maschinenhäuser
 - o Verbaut in einem Maschinenhaus sind neben dem Getriebe weitere notwendige Teile wie beispielsweise der Niederhalter und die Momentenstützen, die beim Bau der FWEA weitergenutzt werden können.
 - o Zunächst sollen zwei Maschinenhäuser demontiert und hierbei auch die Getriebe ausgebaut werden. Für den Fall, dass sich bei der Rissprüfung des Getriebegehäuses eine Schädigung herausstellt, wäre durch ein/zwei weitere/s Getriebe für Ersatz gesorgt. Dasselbe gilt für den Niederhalter, der für die Montage des Getriebes an den Maschinenträger notwendig ist.
 - o Für den Fall, dass lediglich die Demontage von zwei Maschinenhäusern durchzuführen ist – und auch nur hierfür Kosten entstehen –, würden Möglichkeiten eruiert, die zwei weiteren Maschinenträger für andere wissenschaftliche Arbeiten zu verwenden.
- Vier Gussnaben
 - o Zwei Naben sollen für den Bau der beiden FWEA verwendet werden. Zwei Naben sind als Reserve vorgesehen, sollte sich bei der Rissprüfung eine schadhafte Stelle ergeben.
 - o Sollten alle vier Naben in Ordnung sein, so wird eine Nabe zum Aufspannen der Rotorblätter auf dem Maschinenbett für die Kalibrierung eingesetzt werden.
- Vier Sätze Rotorblätter
 - o Zwei Sätze Rotorblätter sollen für den Bau der beiden FWEA verwendet werden. Zwei Sätze, bestehend aus je drei Blättern, sind als Reserve vorgesehen, sollten schadhafte Stellen bei der Inspektion bei einem der beiden Sätze auftauchen. Es ist zudem stets sinnvoll, zueinander gewuchtete Rotorblätter eines Satzes zu verwenden.
 - o Sollten alle vier Rotorblattsätze weiterverwendet werden können, so werden zwei Sätze instrumentiert und lackiert. Der dritte und vierte Satz wird eingelagert und kann für weitere wissenschaftliche Arbeiten in der Zukunft verwendet werden.

Dem ZSW war bekannt, dass auch die Experimentalturbine OPUS 3 des DLR auf dem S&G Design aufbauen soll. Das ZSW setzte daraufhin das DLR von dem Abbau der alten Pfeleiderer Anlagen in Kenntnis, so dass dieses auch von diesen Altteilen profitieren konnte.

Abbau von WEA im WP Altenheerse

Der Abbau erfolgte über mehrere Tage und die Auswahl der WEA wurde mit dem DLR und dem Ingenieurbüro S&G Engineering GmbH nach bestimmten Kriterien abgestimmt. Die Kriterien umfassten die verbauten Getriebe, der äußerlich erkennbare Zustand der Rotorblätter sowie einem vorhandenen (für WINSent eher hinderlichen) Flugwarnanstrich.

Für den sicheren Transport der Rotorblätter wurden seitens ZSW Transportgestelle entworfen und deren Bau beauftragt. Das DLR profitierte von den ZSW-seitigen Vorarbeiten und ließ sich die Transportgestelle entsprechend nachfertigen. Der Abbau der ersten Anlage gestaltete sich noch schwierig, da die Abläufe des Abbauteams bei diesem seltenen Anlagentyp noch nicht klar und eingespielt waren. Die folgenden Anlagen konnten indes weitaus zügiger abgebaut werden.



Abbildung 42: Transportgestelle für den Abtransport der Rotorblätter (Blattwurzel-seitige Befestigung) [ZSW]



Abbildung 43: Blattspitzen-seitige Transportgestelle [ZSW]



Abbildung 44: Abbau der ersten WEA vom Typ PWE650 [ZSW]

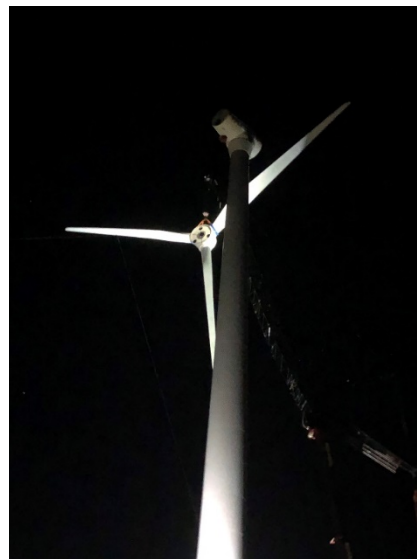


Abbildung 45: Nach anfänglichen Schwierigkeiten hing der Rotorstern am Abend am Haken [ZSW]

Transport und Anlieferung in die Montagehalle Königsbronn

Am 22. und 24. März 2022 erfolgte die Anlieferung der ersten beiden Maschinenträger, am 29. März erreichten der dritte Maschinenträger und die erste Nabe die Montagehalle. Am 31. März erreichte der letzte Maschinenträger, die Naben zwei, drei und vier sowie sämtliche Nabenverkleidungen Königsbronn. Am 8. und 12. April kamen die vier Rotorblattsätze in der Montagehalle in Königsbronn an. Mit der Zerlegung der Maschinenträger wurde aufgrund des beengten Platzes unmittelbar begonnen. Hierbei wurden Komponenten, welche möglicherweise noch Weiterverwendung in den beiden FWEA finden, beiseitegelegt. Schmieröle, Fette und nicht weiterzuverwendende Teile wurden entsorgt.



Abbildung 46: Ein Maschinenträger und drei der vier Naben in der Montagehalle Königsbrunn. [ZSW]



Abbildung 47: Insgesamt vier Nabeverkleidungen wurden angeliefert. [ZSW]



Abbildung 48: Die zur Inspektion durch externe Gutachter angelieferten und vorbereiteten Rotorblätter. [ZSW]



Abbildung 49: Drohnenflug in der Halle mit den final ausgewählten zwei Rotorblattsätzen. [ZSW]

Überarbeitung und Bau des Maschinenträgers

Die Anbindung des Getriebes an den bereits fertig konstruierten aber noch nicht beschafften Maschinenträger musste seitens von S&G Engineering GmbH hinsichtlich der neuen Getriebeaufhängung nochmals überarbeitet werden. Dies betraf insbesondere den Niederhalter („Downholder“) und die zwei Keile („Wedges“), welche links und rechts des Niederhalters die Elastomer-gelagerte Momentenstütze des Getriebes bilden.

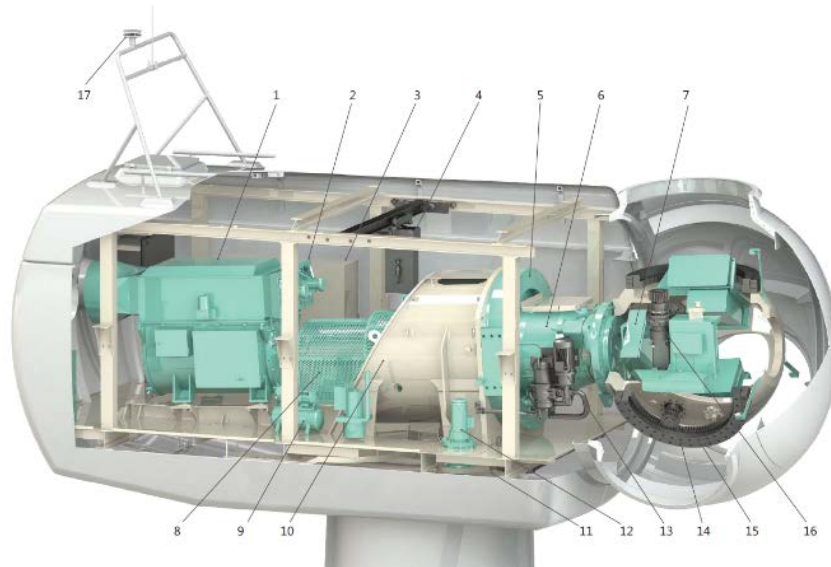


Abbildung 50: Der Niederhalter (Pos. 5) und die Gussnabe samt Pitchschrankhalterung (Pos. 7) können aus den gebrauchten Altanlagen weiterverwendet werden. [Garuda]

Die Fa. SAM wurde entsprechend der Vergaberichtlinien im Folgenden mit dem Bau und der Lieferung der neuen Maschinenträger und der beiden Gondelrahmen beauftragt.



Abbildung 51: Einzelne Schweißteile des Maschinenträgers (links) und Anlieferung des fertigen Maschinenträgers in die Montagehalle Königsbronn (oben). [SAM]

Die beiden Maschinenträger wurden von Grund auf neu in der Montagehalle zusammengebaut. Sukzessive wurden die beschafften Komponenten (z.B. Drehkranz für die Azimutverstellung, Generator, Topbox, Gleichrichter, Schaltschränke, Sensoren, Gondelrahmen) montiert. Anpassungen und Nacharbeiten im Stahlbau aber auch bei Halterungen waren hier und da notwendig, was unter anderem der Verknüpfung der ursprünglichen und alternativen, neuen Gondelverkleidung geschuldet war.



Abbildung 52: Montage des Gondelrahmens an den geschweißten Maschinenträger. [ZSW]



Abbildung 53: Aufbau der Kranbahn, welche den Portalkran oberhalb des Maschinenträgers trägt. [ZSW]



Abbildung 54: Der Drehkranz als Teil des Azimutsystems unterhalb des Maschinenträgers erlaubt das spätere Nachführen des Maschinenträgers in Windrichtung. [ZSW]



Abbildung 55: Platzierung des Maschinenträgers samt Gondelrahmen und Komponenten in die überarbeitete Gondelverkleidung. [ZSW]

Nachdem der Maschinenträger mit der Gondelverkleidung verbunden wurde und sich auch das Dach über der Kranbahn schließen ließ, war zu sehen, dass die CAD-Modelle genau gepasst haben und auch die Anpassungen in der Gondelverkleidung entsprechend gut ausgeführt wurden.

Getriebe

Es war davon auszugehen, dass der Bau von neuen Getrieben am einfachsten, schnellsten und kostengünstigsten vonstattengehen wird, wenn der Gusskörper des Getriebes der Altanlagen weiterverwendet werden könnte. Das Innenleben, also Lager, Wellen und Zahnräder, würde seitens der Fa. Multigear auf Basis und Hintergrund des beschafften Zollern Know-How's neu gefertigt und zusammengebaut werden.

Unmittelbar nach Ankunft des zweiten Maschinenträgers wurden daher Ende März zwei Getriebe ausgebaut und direkt zur Fa. Multigear transportiert. Multigear wurde zunächst mit dem Zerlegen, Reinigen, Maßnahmen und Rissprüfungen beauftragt, um dann für den Wiederaufbau der Getriebe die Arbeiten und Kosten anbieten zu können.



Abbildung 56: Ausgewählte Maschinenträger zum Ausbau der Getriebe. [ZSW]



Abbildung 57: Ausbau des Getriebes nach der Demontage des Niederhalters und der Momentenstützen. [ZSW]



Abbildung 58: Zwei ausgebauten Getriebe vor den „ausgehöhlten“ Maschinenträgern. [ZSW]



Abbildung 59: Beide Getriebe wurden per LKW zur Fa. Multigear für weitere Arbeiten transportiert. [ZSW]

Leider war die Fa. Multigear seit Erhalt der Getriebe Anfang April 2022 bis in den Sommer hinein – u.a. aufgrund Corona-bedingter Ausfälle – nicht in der Lage, den Auftrag vollständig zu bearbeiten und abzuschließen. Das Angebot für den Folgeauftrag, um die Getriebe mit neuen Wellen, Lagern und Zahnrädern auf- und zusammenzubauen, zu testen und zurückzuliefern wurde Ende Juli zugestellt. Die darin abgeschätzten Kosten und Lieferzeiten überstiegen unvorhersehbar nicht nur die für die Getriebe vorgesehenen Mittel signifikant, sondern auch den ursprünglich vorgesehenen Zeitplan des Vorhabens – auch weil noch eine mögliche Neuzertifizierung im Raum stand.

Ein alternativer Plan, zwei für den inzwischen modifizierten und zum Bau beauftragten Maschinenträgertyp passende Getriebe aus China bei der Fa. DHHI zu beschaffen, wurde parallel verfolgt und die Getriebe im September 2022 bestellt. Diese Lösung war auch nach intensiven Gesprächen mit dem Zertifizierer der FWEA vor dem Hintergrund des Zeit- und Kostenrahmens zu präferieren. Seitens DHHI wurden die Getriebe, welche zwar neu waren, aber bereits längere Standzeiten aufwiesen, nochmals zerlegt, maschinenbaulich kritisch konstruierte Komponenten (Hohlrohr) getauscht und einem sogenannten Back-to-Back Test unterzogen. Aufgrund der in der Region Dahlian stark gestiegenen Corona-Infektionen zum Ende des Jahres, zog sich die Fertigstellung und Verpackung der Getriebe zeitlich in die Länge.



Abbildung 60: Back-to-Back Anordnung zum Test beider Getriebe. [DHHI]

Für den Transport der beiden bei der chinesischen Firma DHHI beschafften Getriebe standen zwei Möglichkeiten im Raum. Die zunächst als schneller anvisierte und beauftragte Variante an das Logistikunternehmen Gebr. Weiss beinhaltete den Transport über Land per LKW. Die Spedition verfügt hierzu über diverse Umschlagplätze entlang der neuen Seidenstraße und der Transport wäre dadurch vergleichsweise schnell. Die stark gestiegenen Corona-Infektionen zum Ende 2022 sorgten jedoch dafür, dass sich an der Landesgrenze China-Kasachstan enorme zeitliche und unkalkulierbare Verspätungen aufgrund schleppender Zollabwicklungsverfahren bemerkbar machten. Aus diesem Grund wurde seitens der Spedition der Transport auf dem Seeweg vorgeschlagen und eine Lieferung der Getriebe Anfang März versprochen. Aufgrund des besser zu kalkulierenden Zeitpunkts wurde auf diese Variante umdisponiert, welche zudem um einiges günstiger war als der Transport über den Landweg. Die Getriebe wurden am 8. März 2023 in Königsbronn angeliefert und unmittelbar in die vorbereiteten Maschinenträger eingebaut.



Abbildung 61: Getriebe auf einem Transportgestell unmittelbar nach der Anlieferung. [ZSW]



Abbildung 62: Beide Getriebe wurden in die Maschinenträger eingebaut. [ZSW]

Gussnaben, Niederhalter und Drehmomentstützen

Sämtliche verbaute Komponenten, wie bspw. die Pitchlager und -motoren, mussten von den gebrauchten Naben für die notwendige Rissprüfung demontiert werden. Die Prüfung erfolgte zunächst mit einem Ultraschallverfahren, welches mithilfe eines kreuzenden Musters flächig über dem gesamten Gusskörper zur Anwendung kam. Es konnten keine schadhafte Stellen im Rückstreusignal erkannt werden, doch wurde seitens der beauftragten Prüftechnik-Firma empfohlen, den Übergangsbereich zwischen der Kugelform der Nabe und den Aufnahmekonsolen für die Pitchgetriebe mithilfe der Magnetpulverprüfung (MT) – einem weiteren zerstörungsfreien Prüfverfahren – nochmals intensiver zu prüfen. Auch hier konnten keine Risse o.ä. festgestellt werden, so dass die Naben für eine gewisse Restlebensdauer weiterverwendet werden können. Diese wurde parallel von der Fa. morewind berechnet (s.u.). Zusätzlich zu den Naben wurden die weiterzuverwendenden Niederhalter und Keile rissgeprüft und zur Weiternutzung freigegeben.

Schleifringkörper

Der Schleifring ist essentiell für die Verstellung der Rotorblätter und damit für den Betrieb der Anlagen, da die Pitchantriebe und -sensoren über die Spuren des Schleifrings versorgt werden und Sensordaten der sogenannten Pitchgeber an die Anlagensteuerung von der Nabe in das Maschinenhaus und zurückgesendet werden. Die Beschaffung adäquater Schleifringe gestaltete sich bereits über Monate hinweg als sehr schwierig. Die Anforderung, zusätzlich eine große Menge an Messdaten zur Bestimmung der Rotorblattverformung und Momente aus der drehenden Nabe in das feststehende Maschinenhaus zu schicken, konnten Standard-Schleifringe der verschiedenen angefragten Herstellernicht erfüllen. Aufgrund der geringen Stückzahl von zwei waren zudem die jeweiligen Kosten für die notwendige Anpassung von Serienschleifringen verhältnismäßig hoch, so dass ein eigenes Design und ein Eigenbau die beste Alternative darstellten. Der modulare Aufbau des Schleifrings ist entsprechend flexibel und erleichtert Anpassungen in der Zukunft. Der Bau des Schleifrings war auf der einen Seite zwar kostengünstig, auf der anderen Seite wurden jedoch durch den Eigenbau Personalressourcen gebunden.

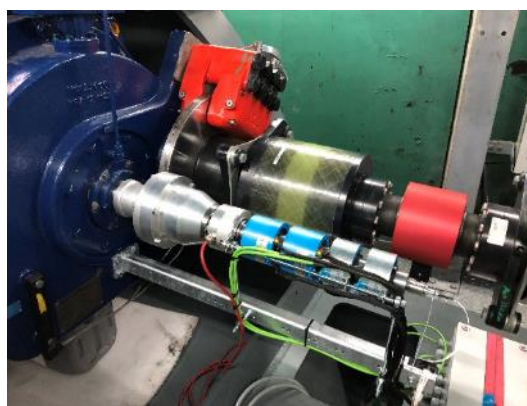


Abbildung 63: Eingebauter Schleifring auf der langsamen Welle hinter dem Getriebe. [ZSW]

Berechnung der Restlebensdauer der Altkomponenten und Zertifizierung

Parallel zur Beschaffung der Altkomponenten wurden die entsprechend sich daraus ergebenden Schritte im Hinblick auf die standortspezifische Typenzertifizierung der FWEA eingeleitet. Sie wird gemäß den Nebenbestimmungen der BImSchG-Genehmigung gefordert und ist für den Regelbetrieb eine zwingende Voraussetzung.

Zunächst musste dazu das Vorgehen für den Nachweis der Restlebensdauer und die Lastrechnung mit der Fa. morewind erarbeitet und besprochen werden. Da das ZSW keine Expertise bzw. Erfahrung mit der Zertifizierung von Windenergieanlagen besitzt, wurde entschieden mit der Fa. ADC ein externes Ingenieurbüro beratend mit hinzuzuziehen. Ergebnis der gemeinsamen Beratungen war, dass ähnlich wie bei der Erstellung eines Weiterbetriebsgutachtens die Restlebensdauer der relevanten Komponenten der Anlagen des WP Altenheerse ermittelt werden muss. Hierfür wurden so viele Unterlagen und Informationen wie möglich über die Pfeleiderer-Anlagen vom Typ PWE650 und den konkreten Windpark von verschiedenen Stellen beschafft. Außerdem musste ein neues Turbulenzgutachten für den Standort Altenheerse erstellt werden. Auf Basis aller dieser Informationen begann die Fa. morewind mit der Berechnung der Restlebensdauer der relevanten Komponenten. Demnach können die Rotorblätter, die Naben und Nabenverkleidungen von den im WP Altenheerse abgebauten WEA am Standort des WINSent Testfelds weitere 20 Jahre betrieben werden. Ebenfalls unkritisch ist der Weiterbetrieb der Gondelverkleidungen.

Sowohl die Berechnungen der Restlebensdauer als auch die neue standortspezifische Lastrechnung für das Testfeld wurde an den beauftragten Zertifizierer UL übergeben. An UL wurden ebenfalls die Unterlagen zu den Rotorblättern als auch die neuerstellte Blattanschlussberechnung übergeben, welche von TPI erstellt worden war. Aufgrund zahlreicher Diskussionen zwischen den beteiligten Ingenieur- und Designbüros sowie dem Zertifizierer konnte die Zertifizierung im Vorhabenzeitraum jedoch nicht abgeschlossen werden. Sie wird nun vorhabenunabhängig seitens ZSW auf eigene Kosten zum Abschluss gebracht.

Gondel- und Nabenverkleidung

Nachdem bekannt geworden war, dass der indische Hersteller der Gondelverkleidung Corona-bedingt Fertigungsstandorte schließen musste, war auch er nicht mehr in der Lage, zwei Verkleidungen für die FWEA zu fertigen und zu liefern. Verschiedene Alternativen und Optionen wurden eruiert, um eine Verkleidung um den Maschinenträger samt Getriebe und Generator, den Gondelrahmen u.v.m. zu bauen und den Anschluss an den Rotor und die Nabenverkleidung realisiert zu bekommen. Ein Neubau schied auf Grund von Kosten (Formenbau, Materialverfügbarkeit (Schäume, Epoxidharze)) aus, weshalb gemeinsam mit dem Ingenieurbüro windwise GmbH die Weiterverwendung einer Verkleidung von Windenergieanlagen des Typs GE1.5s geprüft wurde. Dieser Typ passte sehr gut über die gegebenen maschinenbaulichen Strukturen der FWEA und wurde an mehreren Standorten im Zuge zahlreicher Repowering Projekte abgebaut. Neben den konstruktiven Anpassungen der Verkleidung an den vorhandenen Maschinenbau durch die Fa. windwise stand noch der rechnerische Nachweis (u.a. Finite-Element-Berechnungen) aus, welcher für die Zertifizierung und damit für die Baufreigabe notwendig ist. Hintergrund sind u.a. die Eis- und Windlasten, welche am WINSent-Standort zu erwarten sind. Dieser Nachweis konnte nicht durch die Fa. windwise, sondern durch das Ingenieurbüro ADC erbracht werden. Auch sollten die Berechnungen zeigen, ob die konstruktiven Anpassungen

hinsichtlich der Stabilität und Festigkeit ausreichend sind, oder ob es noch weiterer Änderungen bedarf.

Die Berechnungen für den Nachweis, welcher für die Zertifizierung und damit für die Baufreigabe notwendig ist, zeigten, dass zum Beispiel an den Holmen des Daches konstruktive Anpassungen in Form von Laminataufdickungen notwendig waren. Entsprechend der Vorgaben der beiden Ingenieurbüros wurden die Gondelverkleidungen überarbeitet. Nachfolgend aufgeführt sind Änderungen an der gebrauchten Gondel- und Nabenverkleidung.

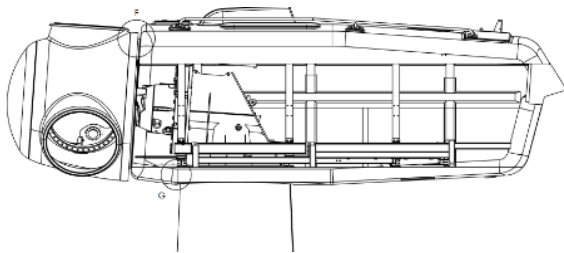


Abbildung 64: Verlängerung des bisherigen Gondelrahmens in Richtung Heck um ca. 1,5m. Der gewonnene Platz dient der Unterbringung z.B. von Messtechnik in der FWEA.

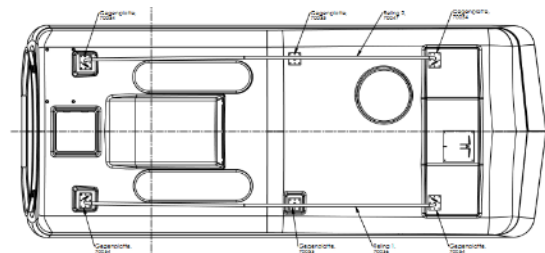


Abbildung 65: Zweite Reling zum sicheren Arbeiten auf dem Gondeldach auf der gegenüberliegenden Seite der bestehenden Reling.

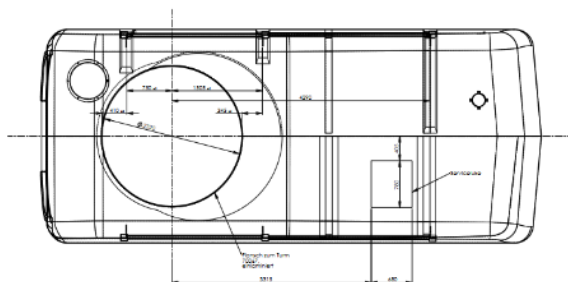


Abbildung 66: Verkleinerung und Versetzung der Öffnung für den Turmanschluss auf dem Boden der Gondelverkleidung.

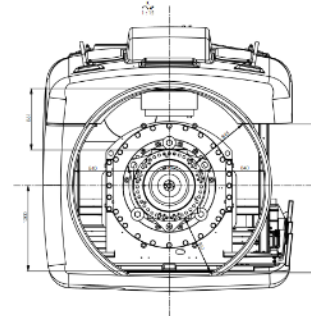


Abbildung 67: Vergrößerung der vorderen Öffnung und Adaption eines Regenabweisers, um die gebrauchte Nabenverkleidung an die Gondelverkleidung anzubinden.

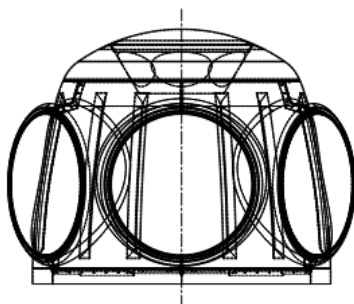


Abbildung 68: Einkürzen des umlaufenden Ringspans der Nabenverkleidung zur Anbindung an die Gondelverkleidung.

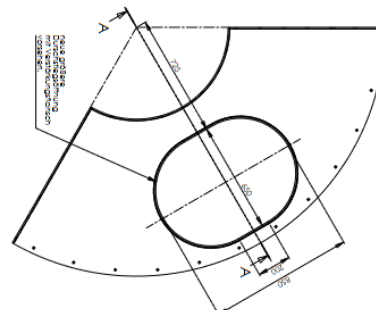


Abbildung 69: Vergrößerung der Durchstiege in der Nabenverkleidung, um auch bei horizontalen Stellungen der Rotorblätter von der Gondel in die Nabe steigen zu können.

Zunächst konnte lediglich nur eine Gondelverkleidung beschafft und überarbeitet werden, die Beschaffung einer zweiten gestaltete sich entgegen der Prognosen und Erwartungen vom Frühjahr 2022 schwierig: Grund hierfür war die Lage auf dem Strommarkt, da auch mit älteren Windenergieanlagen gute Gewinne erzielt werden konnten und entsprechend kaum Anlagen abgebaut wurden. Des Weiteren stockten die Errichtung und Inbetriebnahme von neuen Anlagen in Repowering-Projekten, da auch hier zum Teil Komponenten, insbesondere elektronische Bauteile, auf dem Markt fehlten. So wurden weit weniger Anlagen abgebaut, als noch im Frühjahr zu erwarten war. Im Januar 2023 wurden im WP Schöppingen bei Münster weitere Windenergieanlagen des richtigen Typs und mit der „B“-Variante der Gondelverkleidung abgebaut. Zusätzlich zu der Gondelverkleidung wurden aus dem Windpark noch zwei Relings für die Montage auf dem Gondeldach beschafft, nachdem die Fertigung neuer Relings aufgrund der vorgegebenen Stahlsorten (Kaltschlagzähigkeit, u.a.m.) und der Biegeradien der Rohre wirtschaftlich und zeitlich ausgeschlossen werden musste. Die jeweils zweite Relling auf dem Gondeldach dient als weiterer Anschlagpunkt für Arbeiten auf dem Dach und war bereits Bestandteil der ursprünglichen Modifikationsliste. Mitte Februar 2023 wurde die zweite Verkleidung in Königsbronn angeliefert und von der Fa. CSS begonnen, die benötigten Modifikationen entsprechend des rechnerischen Nachweises und der Notwendigkeit (Laminataufdickungen, Öffnungen, Lackierarbeiten, u.a.m.) durchzuführen.



Abbildung 70: Zustand der ersten gebrauchten Gondelverkleidung bei Anlieferung (1). [ZSW]



Abbildung 71: Zustand der gebrauchten Gondelverkleidung bei Anlieferung (2). [ZSW]



Abbildung 72: Bisherige Öffnung zur Nabe hin (3). [ZSW]



Abbildung 73: Zustand nach der Überarbeitung der Gondelverkleidung und erster Test, ob auch das Dach gut über die Kranbahn geht und sich schließen lässt. [ZSW]

Naben und Nabenverkleidung

Die beiden Naben wurden bis in den März 2023 hinein mit den entsprechenden Komponenten wie Pitchlager, Pitchgetriebe, -motoren und -geber, den Schaltschränken mit der Pitchsteuerung und den Schränken mit den Ultracaps bestückt und aufwändig verkabelt. Auch die Bestückung und Positionierung der Center-Box, welche zum einen verschiedene Messmodule und Stromverteilung, zum anderen aber auch die Switche zur Kommunikation zur Nabe hin und zwischen den Pitchschränken und Schaltschränken der Interrogatoren in den Blättern beinhaltet, konnte bis in den März abgeschlossen werden.



Abbildung 74: Positionierung des Blattwinkelgebers neben einem Pitch-Schaltschrank in der Nabe. [ZSW]



Abbildung 75: Nabenkörper mit angepasster Verkleidung (rechts). [ZSW]

Ein Test in der Montagehalle am Wochenende vor der Errichtung sollte zeigen, ob die veränderte Nabenverkleidung zur neuen Gondelverkleidung und zum Maschinenträger mit dem mechanischen Rotorlock passt. Der Test wurde bestanden, wodurch weder größere Probleme auf der Baustelle noch Zeitverzug zu erwarten waren.



Abbildung 76: Initialtest: Fixierung der Nabe (mit den montierten, vergrößerten Durchstiegslöchern im GFK) an den Maschinenträger in der Montagehalle Königsbronn. [ZSW]

Stahlrohrtürme

Die bei der Magdeburger Firma S.A.M. in Auftrag gegebene Fertigung der beiden Stahlrohrtürme, bestehend aus jeweils drei Segmenten, für die Forschungsanlagen konnten nach zahlreichen Rückfragen und Verspätungen in den Monaten davor schließlich direkt zu Beginn des Jahres 2023 im Werk in Magdeburg gemeinsam mit einem Vertreter des Ingenieurbüros S&G Engineering GmbH abgenommen werden. In den Gesprächen vor Ort wurden die fertigungsbedingten Schwierigkeiten und Herausforderungen angesprochen, die aufgrund der relativ dünnen Blechdicken während der Fertigung der Stahlrohre entstanden sind. Zur Abnahme gehörten neben der Dokumentation der einzelnen Arbeitsschritte als Teil der Qualitätssicherung auch die Sichtprüfung der Einbauten (Leiter, Leitungen, Licht und Podeste). Beim Rundgang in der Halle (vier Segmente) und im Freien (zwei Segmente) fielen noch vereinzelt notwendige Nacharbeiten auf, welche bis zum Transport zum Testfeldstandort Mitte Januar größtenteils gelöst wurden.



Abbildung 77: Besichtigung und Abnahme der Stahlrohrturmsegmente bei der Fa. S.A.M. in Magdeburg. [ZSW]



Abbildung 78: Blick in das Innere eines Stahlrohrturms mit den vorinstallierten Leitersegmenten, Kabeltrassen und Leistungskabel. [ZSW]



Abbildung 79: Abnahme der Segmente im Außenbereich. [ZSW]



Abbildung 80: Ebenfalls abgenommen wurden die Podeste und Einbauten, wie z. B. vormontierte Bleche zur Anbringung der Messtechnikschränke, Anschlagpunkte zur Sicherung oder Kranluken. [ZSW]

Rotorblatt

Inspektion der Rotorblätter, Auswahl der zwei Blattsätze

Die Inspektion der vier angelieferten Rotorblattsätze erfolgte am 13. April 2022 durch insgesamt vier Personen unterschiedlicher Firmen. Fa. ADC und TPI Composites wurden als Ingenieurbüros mit der Auswahl und Begutachtung der Rotorblätter beauftragt, während die Firmen Dencam/CSS und cpMax als mögliche weitere Auftragnehmer zum Öffnen, Schließen und Finishen der Blätter bei der Inspektion dabei waren. Das Berliner Entwicklungsteam der Fa. TPI Composites besteht aus vielen ehemaligen Mitarbeitern des Ingenieurteams der Fa. EUROS, d.h. sie kennen sowohl den aerodynamischen als auch den strukturellen Aufbau der gebrauchten Rotorblätter vom Typ Euros EU 51. An der Inspektion teilgenommen hat der technische Leiter des Blattdesigns.

Bei der Inspektion wurden neben der Auswahl der zwei weiter zu nutzenden Rotorblattsätze auch die Anzahl und Positionen der Öffnungen festgelegt, welche für das nachträgliche Einbringen der Sensoren in die Rotorblätter notwendig wurden.

Öffnen, Instrumentierung, Schließen der Rotorblätter

Ende Mai 2022 wurden die jeweils sieben Öffnungen in alle sechs Rotorblätter durch die Firma Dencam/CSS geschnitten, so dass die Gewebesläuche, die sogenannten Sleeves, der Fa. Fibersail über die gesamte Blattlänge eingeklebt werden konnten. Diese Sleeves dienen als Führung für die eigentlichen Biegesensoren, die in einem zweiten Schritt und erst nach dem Wiederverschließen der Rotorblätter eingeführt wurden. Vor dem Wiederverschließen der Blätter wurden auch die Beschleunigungssensoren aus dem parallellaufenden Vorhaben Flamingo²⁷ mit Unterstützung durch das Ingenieurbüro ADC nahe der Blattspitze positioniert und appliziert, sowie die faseroptischen Leitungen in die Blattwurzel innerhalb des jeweiligen Rotorblatts geführt. Anschließend wurden die Öffnungen in den Rotorblättern geschlossen und die Rotorblätter überarbeitet. Hierzu wurden Schäden ausgebessert, die Regenabweiser aufgrund der neuen, breiteren Pitchlager verlängert, die Oberflächen abgeschliffen und die Rotorblätter inklusive der Tageskennzeichnung neu lackiert.

²⁷ <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=%2201196252/1%22>, zuletzt zugegriffen am 25.4.2025



Abbildung 81: Zur Applikation der faseroptischen Sensoren wurden an dezidierten Stellen Öffnungen an allen sechs Rotorblätter eingebracht. [ZSW]



Abbildung 82: Im Bereich der Rotorblattspitze wurden die faseroptischen Beschleunigungssensoren appliziert und mit dem Rotorblatt verklebt. [ZSW]



Abbildung 83: Die Öffnungen wurden nach der Installation der Sensoren wieder verschlossen. [ZSW]



Abbildung 84: Im Nachgang wurden die Rotorblätter aufwändig geschliffen, lackiert und die Tageskennzeichnung sowie die Erosionsschutzfolie aufgebracht. [ZSW]

Rotorblatt-Teststand

Für den Test und die Kalibrierung der neu eingebauten Sensorik in die gebrauchten Rotorblätter war der Bau eines Rotorblatt-Teststandes im Zuge des Vorhabens vorgesehen. Die Anforderungen an den Teststand wurden seitens ZSW definiert und erste Gedanken auf Basis vorhandener Maschinenbette in der Montagehalle (vgl. Abbildung 43) und Naben in Skizzen überführt. Nach Diskussionen mit dem Berliner Entwicklungsbüro TPI Composites (ehemals EUROS GmbH und Hersteller der Rotorblätter) wurde festgelegt, dass die Einspannung des Rotorblatts möglichst in einer Original-Nabe und an einem Original-Blattlager erfolgen soll. Entsprechend wurde der Teststand seitens des Ingenieurbüros ADC konstruiert. ADC verantwortete neben der Auslegung auch den rechnerischen Nachweis für den Bau des Teststands.

Die Kalibrierung und die Tests der neu verbauten Sensoren zur Erfassung der Blattwurzelbiegemomente, der Durchbiegung und der Beschleunigung waren ein Ziel der Messungen. Die Tests dienten jedoch auch der Validierung des rechnerischen Nachweises für den neuen Rotorblattanschluss. Dieser war aufgrund des neuen, breiteren Pitchlagers notwendig, da die Rotorblattbolzen, welche das Rotorblatt mit dem Innenring des Pitchlagers verbinden, gegenüber den ursprünglichen Blattbolzen der PWE-Anlagen an der Blattwurzel verlängert werden müssen. Der

rechnerische Nachweis des neuen Rotorblattanschlusses wurde von der Fa. TPI Composites unentgeltlich durchgeführt und für die Zertifizierung beigesteuert.

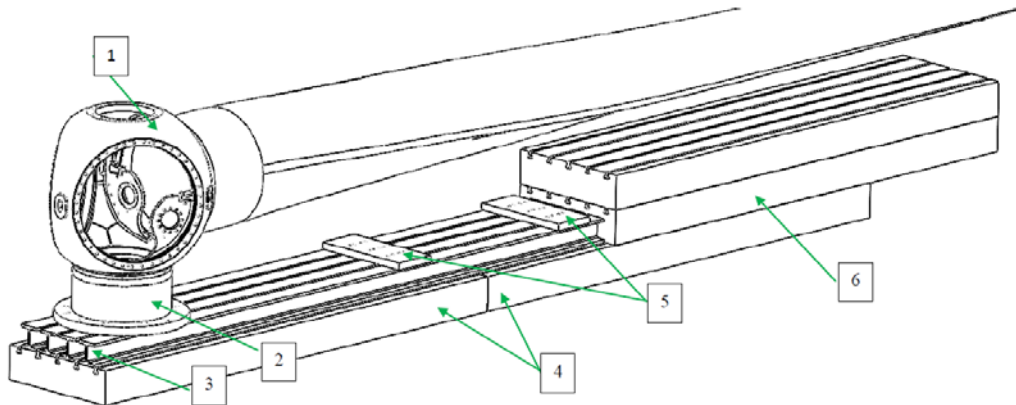


Abbildung 8: Gerader Adapter; Ziehen nach oben (3D-Ansicht mit Komponenten)

1	Nabe	3	T-Träger (4 Stück; lasttragend)	5	Niederhalter (über 2x12x M30 mit MaschBett verbunden)
2	Adapter (über 24x M30 mit MaschBett verbunden)	4	Maschinenbette 1 u 2 (lasttragend)	6	Maschinenbette 3 u 4 (als statische Masse; auch andere Teile mögl.)

Abbildung 85: Skizze und Bauteile des Rotorblatt-Teststands [ADC GmbH]

Es wurde beschlossen, die mechanische Last mit dem in der Montagehalle vorhandenen Deckenkran auf das Rotorblatt an zwei Stellen mithilfe zweier Lastscheren und einer Traverse einzuleiten. Zwischen der Traverse und den Lastscheren wurde jeweils eine sogenannte Kraftmessdose eingebaut, um die Zugkraft an den Blattstellen messtechnisch zu erfassen. Das entsprechende Gegengewicht wurde durch zwei Maschinenbette erzeugt, welche auf den lasttragenden Maschinenbetten verankert wurden. Zum Einsatz kam des Weiteren eine der gebrauchten Naben, welche rissgeprüft war und nicht auf den Forschungsanlagen verbaut werden sollte. Der finale rechnerische Nachweis für den Teststand wurde nach FEM-Simulationen seitens ADC erstellt und Zeichnungen für Niederhalter, Adapter sowie Stücklisten abgeleitet.

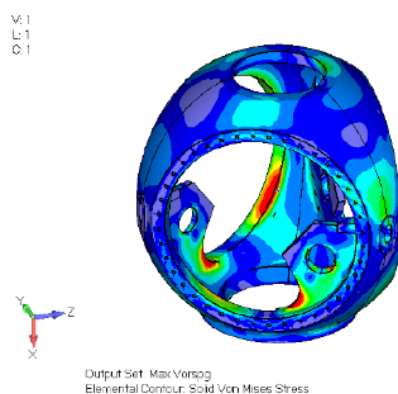


Abbildung 86: Ermittelte Vergleichsspannung der Nabe im Zuge einer FE-Simulation und Berechnung [ADC GmbH]

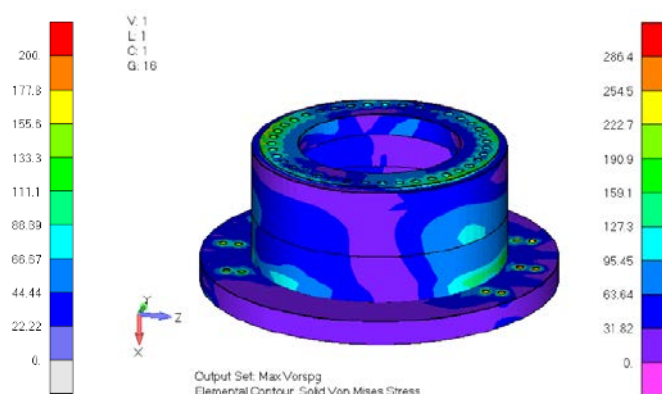


Abbildung 87: Ermittelte Vergleichsspannung des Adapterflansches [ADC GmbH]

Der Zusammenbau erfolgte in der Montagehalle in Königsbrunn. Die Rotorblatt-Teststand- Messungen wurden im Zuge des AP 1.3.1. durchgeführt.



Abbildung 88: Der zusammengebaute Rotorblatt-Teststand mit Spanbetten, Stahlträgern, Niederhaltern, dem Flanschadapter sowie einer Originalnabe samt Blattlager und Pitch-Antrieb. [ZSW]



Abbildung 89: Durch Verstellen des Blattwinkels konnten sowohl Messungen in Schlag- als auch Schwenkrichtung durchgeführt werden. [ZSW]

Oberflächenscan der modifizierten Rotorblätter vor der Montage

Durch die Verwendung von gebrauchten Rotorblättern, deren aufwändige Instrumentierung und durch das Öffnen und Schließen der GFK-Oberfläche waren Oberflächenmessungen der aerodynamischen Profile vor der Errichtung der FWEA im Vorhaben vorgesehen. Entgegen der ursprünglichen Planung wurden die Oberflächenmessungen nicht in der Montagehalle, sondern draußen am Testfeldstandort mit Mitarbeitern des Instituts für Photogrammetrie (IfP) und des Instituts für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG) der Universität Stuttgart durchgeführt. Hierzu wurden in einem Initialtest zunächst zwei Messmethoden miteinander verglichen: die erste Messung erfolgte mithilfe eines stationären Lasers. Die Laserscan-Methode wurde verglichen mit Ergebnissen aus Photogrammetriemessungen, welche mithilfe einer Drohne als zweite Messung durchgeführt wurden. Nach der Auswertung der Daten wurde entschieden, die finalen Messungen mithilfe des Laserscanverfahrens im montierten Zustand der Rotorblätter durchzuführen. Hintergrund ist eine mögliche Messung der Verformung der Blätter unter Eigengewicht im waagrechten Einbauszustand.

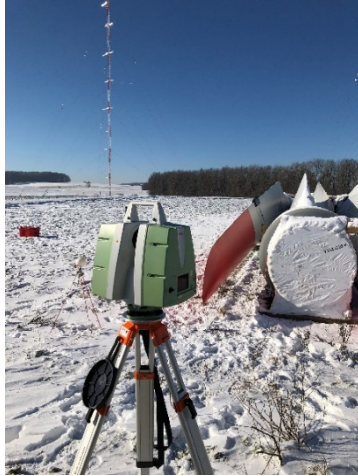


Abbildung 90: Stationäre Laserscanmessung am Rotorblatt. [ZSW]

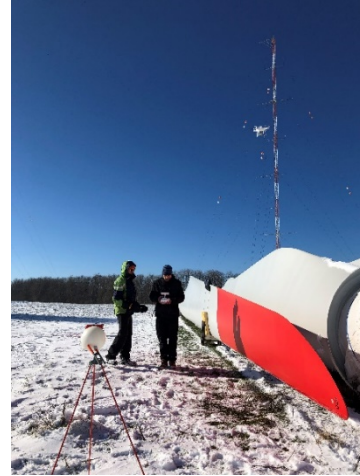


Abbildung 91: Photogrammetriemessungen mittels einer Drohne. [ZSW]

Nach der Montage an der Nabe konnten die Blätter als ausbalancierter „Rotorstern“ sowohl im senkrechten als auch im waagrechten Zustand einzeln gedreht und vermessen werden. Aus logistischen Gründen war lediglich die Vermessung des Rotorsterns der nördlichen FWEA am Abend vor deren finalen Errichtung möglich, was jedoch aufgrund der Messungenaugigkeit und der nahezu gleichen Oberflächenbeschaffenheit keinerlei Nachteile mit sich gebracht hatte.



Abbildung 92: Laserscanmessungen der Oberfläche im montierten Zustand (Rotorstern). [ZSW]

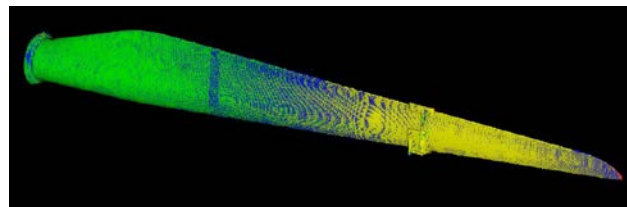


Abbildung 93: Exemplarisches Ergebnis einer Laserscanmessung. [USTUTT-IAG]

AP 1.2.5: Sicherheitsarchitektur und Betriebsführung

Nachdem sich der oben beschriebene Weg hin zu einer neuen Anlagensteuerung von Freqcon abgezeichnet hatte, wurde gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Windenergie (SWE) der Uni Stuttgart, welcher für die Entwicklung des WINSent-Basisreglers verantwortlich war, darauf hingearbeitet, den Regler an die veränderten Anforderungen anzupassen und für die geplante Lastrechnung im Zuge der Zertifizierung vorzubereiten. Dazu mussten einerseits zunächst gemeinsame Gespräche mit Freqcon geführt werden, um die Schnittstellen und Anforderung seitens der Betriebsführung an den Regler zu klären und andererseits die Architektur des Reglers angepasst werden. Im engen Austausch mit dem SWE wurde der WINSent-Basisregler nochmals sauber implementiert und eine vollständige Lastrechnung mit nahezu allen erforderlichen Lastfällen aufgebaut. Parallel wurde mit dem externen Ingenieurbüro morewind die unabhängige Lastrechnung, welche Grundlage für die Zertifizierung ist, vorbereitet und angestoßen.

Nach dem Weggang des verantwortlichen Personals am SWE musste zunächst eine Übergabe der bereits geleisteten Arbeiten an das ZSW erfolgen. Im weiteren Verlauf wurden weiterhin regelmäßige Arbeitstreffen zusammen mit der Fa. Freqcon sowie dem Ingenieurbüro S&G Engineering GmbH abgehalten, um die Entwicklung der Anlagensoftware bei Freqcon zu begleiten. Inhalt der Gespräche waren auch alle Belange im Hinblick auf die von Freqcon bereits gelieferte Hardware für die Anlagensteuerung.

Das beim Ingenieurbüro S&G Engineering GmbH in Auftrag gegebene Lastenheft für die Pitch-Steuerung für die FWEA wurde nach der Fertigstellung an die Fa. KEB übermittelt. KEB ist der Lieferant der in der Nabe verbauten Pitch-Umrichter, der zentralen Komponente des Pitch-Systems. KEB hatte in Vorgesprächen die Bereitschaft signalisiert, die notwendige Software für diese Pitch-Umrichter nach entsprechender Vorgabe zu programmieren. In mehreren gemeinsamen Gesprächsrunden wurde das Lastenheft diskutiert und die Aufgabenstellung soweit konkretisiert, so dass KEB in der Lage war, nach entsprechender Beauftragung durch das ZSW mit der Programmierung der Software zu beginnen.

Eine erste Beta-Version der Pitch-Software wurde umgehend programmiert und vollumfänglich bereitgestellt. Der frei zugängliche Programmcode wurde in gemeinsamen Videokonferenzen sukzessive erläutert. Nach dem gemeinsamen Aufspielen der Software mit KEB auf den Pitch-Umrichter, der im Hardware-in-the-Loop Teststand (vgl. AP. 1.2.6) integriert ist, konnte dieser und der HIL in Betrieb genommen werden.

Seitens Freqcon wurde eine erste Beta Version der Anlagensteuerung zur Verfügung gestellt, die einen frei zugänglichen Programcode umfasst. Nachdem der bisherige und für die Beta-Version verantwortliche Programmierer Freqcon verlassen hatte, fand ein Wechsel der Zuständigkeiten statt. Der neue Softwareentwickler der Fa. Freqcon kannte sich zwar sehr gut mit der Programmiersprache an sich aus, verfügte aber über wenig bis gar keine Erfahrung im Bereich Windenergie. Dies führte zu weiteren Verzögerungen bei der Anpassung und Weiterentwicklung der Anlagensoftware. Auch wirkte sich dieser Personalwechsel im weiteren Verlauf erheblich auf die Inbetriebnahmen der Software in der Montagehalle und der FWEA auf dem Testfeld aus.

Aufgrund der Tatsache, dass nicht alle für die Betriebsführung notwendigen Hardwaremodule (unter anderem auch für die Sicherheitskette) in den Topboxen und Umrichtern bei deren Auslieferung verbaut worden waren, verzögerte sich die Konfiguration und Inbetriebnahme der zum Teil sicherheitsrelevanten Module noch zusätzlich.

Fehler in der Verdrahtung der Topbox, welche beim Anschluss diverser Motoren, Sensoren etc. auffielen, verzögerten ebenfalls die Arbeiten. Die Fehlersuche zog sich auch nach der Errichtung der beiden FWEA hinaus inklusive der permanenten Aktualisierung der damit verbundenen Schaltpläne. Erst Ende 2023 konnten alle Subsysteme inkl. des Umrichters für sich einzeln auf Ihre Funktionalität erfolgreich getestet und in Betrieb genommen werden.

Nach der Errichtung der beiden FWEA im Frühjahr 2023 wurden die regelmäßigen Arbeitstreffen mit der Fa. Freqcon fortgeführt, um die Entwicklung der Anlagensoftware weiterhin voranzutreiben. Das Ingenieurbüro S&G Engineering GmbH wurde aufgrund mangelnder Kenntnis und Ressourcen nicht weiter in diesen Prozess involviert.

Zu Beginn des Jahres 2024 konnte die Steuerung und weitere Komponenten der bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung (BNK) auf dem Dach des Maschinenhauses der nördlichen FWEA, im Maschinenhaus selbst, sowie in der nördlichen Trafostation installiert und gemeinsam mit dem Hersteller des BNK-Systems, der Fa. Protea Tech, in Betrieb genommen werden. Der Einbau der BNK-Steuerung ist in der Nebenbestimmung der erteilten BImSchG-Genehmigung als Auflage vorgeschrieben und dient dazu, dass die Nachtkennzeichnung in Form roter Leuchtfuer nur dann eingeschaltet werden, wenn sich Flugzeuge den Windenergieanlagen in einem gewissen Abstand nähern. Ansonsten sind die roten Leuchtfuer ausgeschaltet und nur für den Menschen unsichtbare Infrarotleuchten (zwei je FWEA) senden Leuchtsignale.

Ebenfalls konnte der EZA-Regler in der zum Testfeld 2,5 km entfernten Übergabestation hardwareseitig eingebaut und per Lichtwellenleiter mit den Anlagensteuerungen in den jeweiligen Trafostationen der beiden FWEA verbunden werden. Für die softwareseitige Konfiguration des EZA-Reglers mussten viele Daten seitens des Direktvermarkters Quadra, des Verteilnetzbetreibers Albwerk und Freqcons angefragt, zusammengetragen und abgestimmt werden. Nachdem die Kommunikation zwischen den beteiligten Komponenten getestet werden konnte, stand der Test der stufenweisen Leistungsdrosselung nach erfolgter finaler Inbetriebnahme der Forschungsanlagen an.

AP 1.2.6 Aufbau und Inbetriebnahme des HIL-Teststandes

Für den Aufbau des HIL-Teststandes wurden 2022 die ersten Hardware-Komponenten beschafft. So wurde von der Fa. Freqcon eine zusätzliche Anlagensteuerung der Fa. Siemens (Simotion) geliefert, welche im HIL-Teststand verbaut wurde. Die nahezu identische Beta-Version der Anlagensteuerungssoftware wurde zunächst auf die Simotion aufgespielt, die finale Softwareversion folgte. Weiterhin wurde für den Einsatz im HIL ein zusätzlicher Pitch-Umrichter der Fa. KEB bestellt und eingebaut. Auch hier wurde zunächst die erste Beta-Version der Pitch-Software aufgespielt und getestet.



Abbildung 94: Der HIL- Teststand mit Siemens Steuerung, Monitoren und PC (rechts und unten), sowie der Pitch-Schrank mit integrierten Umrichter zur Ansteuerung des Pitch-Motors. [ZSW]



Abbildung 95: Pitch-Schaltschrank, Ultra-Caps sowie der Pitch-Motor (schwarz) und das Pitch-Getriebe (blau). [ZSW]

Ein original Pitch-Ritzel aus Stahl, welches in den innen-verzahnten Ring des Blattlagers greift, wurde aus Gewichts- und Kostengründen nicht am HIL-Teststand montiert. Anstatt dessen wurde ein Kunststoff-Ritzel, welches über die gleiche Zähnezahl und das gleiche Modul wie das Original verfügt, am HIL-Teststand auf der Abtriebswelle des Pitch-Getriebes verbaut. Das Kunststoff-Ritzel greift direkt in den Pitch-Encoder ein, der den sogenannten Pitch-Winkel als Messwert herausgibt und der mithilfe sogenannter Nockenendschalter den maximalen Verfahrweg des Pitchantriebs im Blattlager begrenzt.



Abbildung 96: Das originale, schwere Pitch-Ritzel aus Stahl. [ZSW/David Arzt]



Abbildung 94: Kunststoff-Ritzel auf der Abtriebswelle des Pitch-Getriebes sowie Pitch-Encoder am HIL. [ZSW]

Nachdem der HIL hardwareseitig fertiggestellt worden war, wurde im weiteren Verlauf der Fokus auf die Einbindung der echtzeitfähigen, numerischen Anlagensimulation auf die Steuerung gelegt. Für diese Aufgaben wurde das Ingenieurbüro Sowento hinzugezogen. Der HIL war mit Abschluss der Einbindung der Echtzeitkommunikation einsatzbereit.

AP 1.2.7 Errichtung und Inbetriebnahme der FWEA

Im Januar 2023 wurden zunächst die an der Blattwurzel gegen Witterungseinflüsse versiegelten sechs Rotorblätter von der Montagehalle zum Testfeldstandort transportiert und mithilfe eines Baustellenüberwachungssystems gegen Vandalismus bis zur Errichtung gesichert.



Abbildung 97: Anlieferung der Rotorblätter am Testfeldstandort. [ZSW]



Abbildung 98: Abladen der Rotorblätter an dem dafür vorgesehen Standort. Zu sehen ist die mit Folie eingeschweißte Blattwurzel (links). [ZSW]



Abbildung 99: Die Rotorblätter wurden gegen äußere Windeinflüsse gesichert und versetzt zueinander gelagert. [ZSW]

Ebenfalls im Januar 2023 konnten die jeweils unteren beiden Segmente der Türme mit erheblichen Schwierigkeiten und Verzögerungen errichtet werden. Hintergrund waren Planungsfehler der vom Turmhersteller beauftragten Transportfirma, falsche Anschlagmittel zum Anheben und Wenden der Turmsegmente, sowie bauseitige Mängel am Fundament, welche bei den verschiedenen Bauabnahmen dem dafür zuständigen Ingenieurbüro S&G Engineering GmbH nicht aufgefallen waren. An beiden unteren Turmflanschen mussten Löcher aufgebohrt werden, um die Türme mit dem ovalisierten Ankerkorb des Fundaments verschrauben zu können. Dieses Vorgehen war mit dem Turm- und Fundamentstatiker abgestimmt worden und wird keinerlei Auswirkungen auf die zukünftige Standfestigkeit der beiden FWEA haben. Allerdings waren hierdurch Mehrkosten entstanden, welche den Aufwand für die Bohrungen an den Turmflanschen, zusätzliche Wartezeiten für den Kran, die LKWs und das Montageteam sowie Kosten für die Entwicklung, Herstellung und Einbau spezieller Unterlagscheiben beinhalten.



Abbildung 100: Der Transport der Türme erfolgte in der Nacht. [ZSW]



Abbildung 101: Die drei LKWs mit den zwei sogenannten Kesselbrücken und einem Auflieger am Morgen. [ZSW]



Abbildung 102: Nachdem die richtigen Anschlagmittel beschafft wurden, konnten die LKWs entladen werden. [ZSW]



Abbildung 103: Für die Errichtung ist ein Haupt- und ein Hilfskran zum Wenden des Segments notwendig. [ZSW]



Abbildung 104: Installation des zweiten Turmsegments. [ZSW]



Aufgrund der langen Planungszeit in Bezug auf den Schwertransport, die notwendigen Fahrgenehmigungen und die Bereitstellung von Kränen, Fahrzeugen und einem Errichter-Team wurde im Januar 2023 die Planung der finalen Errichtung der Anlagen konkretisiert – also die Errichtung der dritten Turmsegmente, der Gondeln und Rotoren. Es wurden seitens ZSW entsprechend Kran- und Logistikunternehmen, sowie ein Errichter-Team hierfür beauftragt. Die Gesamtbauleitung hatte nach wie vor die Fa. S&G Engineering GmbH inne. Die Errichtung der beiden FWEA fand im Zeitraum vom 13. bis 24. März 2023 statt.



Abbildung 105: Verladung des ersten Maschinenträgers. [ZSW]



Abbildung 106: Sicherung vor der Überführung zum Testfeld. [ZSW]



Abbildung 107: Installation des dritten, konischen Stahlrohrsegments. [ZSW]



Abbildung 108: Anlieferung der Naben. [ZSW]



Abbildung 109: Nachdem das dritte Turmsegment verschraubt wurde, musste noch am selben Tag bei wenig Wind das Maschinenhaus als notwendige Turmkopffmasse installiert werden. [ZSW]



Abbildung 110: Der Zusammenbau des Rotorsterns erfolgte im unmittelbaren Anschluss an die Gondelmontage. [ZSW]



Abbildung 111: Die Montage des Rotorsterns wurde am Folgetag bei besten Witterungsbedingungen vollzogen. [ZSW]

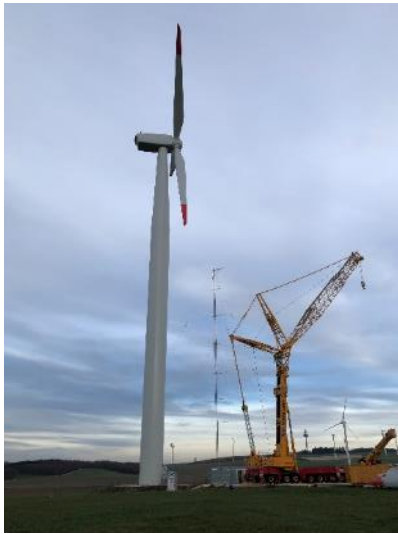


Abbildung 112: Die erste, fertig errichtete FWEA. [ZSW]



Abbildung 113: Ein glückliches Team Wind des ZSW am Tag der Errichtung der ersten FWEA. [ZSW]



Abbildung 114: Die Errichtung der zweiten Anlage erfolgte analog an den Folgetagen. [ZSW]



Abbildung 115: Das hardwareseitig fertige Testfeld mit den vier meteorologischen Masten und den beiden Forschungsanlagen. [ZSW]

Die Errichtung der beiden FWEA konnte am 24. März 2023 erfolgreich abgeschlossen werden. An die Errichtung schloss sich die Verlegung und Anschlüsse der Leistungskabel, der Datenleitungen des Messsystems und der Leitung der Brandmeldeanlage innerhalb der Türme und in den Maschinenhäusern (Gondeln) an. Aufwändig war die Verlegung der Glasfaserleitungen, da diese vom Steuerschrank in der Trafostation, durch das Fundament hindurch, den Turm hinauf, über den Kabel-Loop bis zur Topbox in der Gondel ohne Unterbrechung an einem Stück verlegt werden mussten.

Probleme gab es bei der Inbetriebnahme der im März gelieferten und vor der Errichtung eingebauten Windkraftanlagen-Hauptgetriebe. Hierbei traten Schwierigkeiten mit erhöhtem Öldruck und Leckage aufgrund – bereits im Werk – verstopfter Schmierdüsen auf. Die Verstopfungen konnte im Verlauf weniger Wochen diagnostiziert werden und die Fehler mit dem Einbau neuer Düsen behoben werden.

Die Firmen zur Installation der verbliebenen Messtechnik konnten nach dem Verlegen und Anschluss der Leitungen, sowie dem Einbau und Bestückung der entsprechenden Schaltschränke ihre Arbeiten

aufnehmen. Hierzu waren die Messstellen im Turm sowie die faseroptischen Biegemessstellen in den Rotorblättern zu zählen.

Aufgrund der Verzögerungen bei der Programmierung der Anlagensteuerungssoftware, der Sicherheitsfunktionen und der Betriebsführung wurden zu Beginn des Jahres 2024 weitere Firmen in Abstimmung mit der Fa. Freqcon zur Unterstützung herangezogen. Recase, ein erfahrenes Ingenieurbüro, hatte zunächst mit weiterer Unterstützung durch die Fa. Aerovide den bestehenden Softwarecode analysiert. In den Kalenderwochen 15/16 konnten beide Windenergieanlagen am WINSent Testfeld sicher zum Drehen gebracht werden, nachdem noch im Februar und März die Anlagensoftware inklusive Sicherheitsfunktionen und -kette gemeinsam mit Mitarbeitern der Fa. Recase gesichtet, angepasst bzw. in Teilen gänzlich neu programmiert werden musste, was erheblich aufwändiger war als zunächst eingeschätzt. In den genannten Aprilwochen wurden dann vor-Ort am Testfeld alle Sicherheitsfunktionen und Aggregate sowie die neuprogrammierten Softwarepakete implementiert und sukzessive getestet. Mithilfe eines Inbetriebnahme-Protokolls, welches auch für die Zertifizierung notwendig ist, wurden die durchgeführten Arbeiten dokumentiert. Die Anlagen drehten in diesen zwei Wochen im Leerlauf, d.h. es wurde das für die Einspeisung notwendige Gegenmoment über das Generator-Umrichter-System noch nicht erzeugt. Grund hierfür war die bis dato noch nicht fertiggestellte Schnittstelle zur Einbindung des Anlagenreglers.

Während des erstmaligen Drehens der Rotoren tauchten bei beiden FWEA sporadische und nicht reproduzierbare Fehler bei der Feldbuskommunikation zwischen der Steuerungseinheit im Maschinenhaus und der Pitchsteuerung in der Nabe auf, so dass mehrmals die verbauten Sicherheitsketten die Anlagen stoppten. In den Folgewochen wurden mithilfe anderer, neuer Komponenten (z.B. neue Switches, besser geschirmte Kabel) und Einstellungen in der Software die Fehler so gut es ging minimiert. Mit zwei neu beschafften optischen Drehübertragern konnte schlussendlich eine fehlerfreie Feldbuskommunikation hergestellt werden – und damit verbunden ein störungsfreier Anlagenbetrieb.

Aufgrund behördlicher Nebenbestimmungen müssen die FWEA während der Aufzuchtzeit der Jungvögel des Rotmilans im Zeitraum zwischen 1. Mai bis 31. Juli (sensible Brutperiode) eines jeden Jahres während der Tagzeit von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang abgeschaltet werden. Dies führte dazu, dass die weiteren notwendigen Arbeiten zur Inbetriebnahme in diesem Zeitraum nur sehr eingeschränkt durchgeführt werden konnten. Mithilfe von menschlichen Beobachtern (geschulte Ornithologen) war es immerhin möglich, zwei Mal pro Woche zu je sechs Stunden die Anlagen drehen zu lassen. Im Falle einer drohenden Kollision – wenn sich ein Vogel den Anlagen auf weniger als 300 m näherte und die Flugbewegung eine weitere Annäherung erwarten ließ – wurde die betreffende FWEA nach einem Funkspruch der Ornithologen abgeschaltet. Befand sich kein Rotmilan mehr innerhalb des 300m Radius, wurden die Anlagen wieder eingeschaltet. Diese behördlichen Bestimmungen verzögerten die Inbetriebnahmearbeiten erheblich. Aufgrund der früheren Brutzeit im Jahr 2024 war es in Abstimmung mit den Behörden möglich, bereits ab dem 22. Juli 2024 gemeinsam mit der Fa. Recase die Inbetriebnahme fertigzustellen. Die Inbetriebnahme konnte in den darauffolgenden Tagen abgeschlossen werden, nachdem bei ausreichend Wind unterschiedliche Tests der Sicherheitskette, der Betriebsführung und der Anlagensoftware erfolgreich absolviert werden konnten. Die Ersteinspeisung erfolgte Anfang August 2024.

Während der Inbetriebnahme der beiden FWEA im April 2024 und Juli/August 2024 wurde festgestellt, dass die Getriebe über den gesamten Drehzahlbereich tonhaltig sind, d.h. es traten Resonanzen und Vibrationen auf, die sich sowohl mechanisch als auch akustisch stark bemerkbar machten. ZSW-seitige Messungen mit Beschleunigungssensoren und Mikrofonen hatten ergeben, dass die drehzahlabhängige Zahneingriffsfrequenz der letzten Getriebestirnraststufe hierfür hauptverantwortlich ist. Es bestand dringender Handlungsbedarf, da

- die Anlagen sehr laut sind und sich Anrainer daran bereits gestört hatten.
- für den Regelbetrieb eine behördlich auferlegte Schallmessung (diese ist im Vorhaben WINSent validiert) durchgeführt werden muss. Eine tonhaltige WEA hätte die Grenzwerte der Schallmessung sehr wahrscheinlich überschritten. Ein Regelbetrieb der Anlagen wäre damit gefährdet.
- unter Umständen aufgrund der oben beschriebenen Resonanzen und damit verbundenen Bauteilschwingungen die Getriebe oder andere Komponenten geschädigt werden könnten.

Die Beseitigung der Tonhaltigkeit war nicht mehr während der Laufzeit des Vorhabens WINSent möglich. Es sei angemerkt, dass die Tonhaltigkeit im Frühjahr 2025 durch die Modifikation der Getriebe eliminiert werden konnte.

AP 1.3 Betrieb Windtestfeld

AP 1.3.1: Kalibrierung und Installation

Ausstattung der Windmessmasten

In der Vorhabenlaufzeit wurden alle vier meteorologischen Masten mit der beschafften Sensorik (vgl. AP 1.1.5) bestückt, welche an die jeweiligen Messsysteme angeschlossen und wiederkehrend kalibriert wurden. Nach der Kalibrierung erfolgte die Installation, die Wieder-Inbetriebnahme sowie die Anpassung der Kalibrierwerte in den Messdatenerfassungsgeräten gemäß den neuen Kalibrierprotokollen.

Zunächst wurde jeweils die Basisausstattung (analoge Sensorik bestehend aus Schalenkreuzanemometer, Windfahnen, Barometern sowie Hygro-Thermogebern) entsprechend des Peripheriekonzepts (vgl. AP 1.3.2) installiert und in Betrieb genommen werden. Die Installation und Implementierung weiterer Sensorik (z.B. Ultraschallanemometer) erfolgte im Nachgang. Immer konnte aus den Erfahrungen der Errichtung des ersten Mastes profitiert werden, weshalb letztlich die Zeit für die weiteren Inbetriebnahmen erheblich verkürzt werden konnte.

Im ersten Drittel der Vorhabenlaufzeit wurden Unregelmäßigkeiten bei der Gasmessung mit den am Windmessmast-NW installierten H₂O/CO₂-Gasanalysatoren festgestellt. Eine darauffolgende Analyse der Daten ergab, dass eine Nachkalibrierung der Sensoren erforderlich ist. Diese Kalibrierung muss mit Hilfe einer Apparatur und Einleitung von Kalibriergasen mit bekannter CO₂- und H₂O-Konzentrationen erfolgen. Es wurde ein Verfahren entwickelt, um diese Kalibrierung direkt auf dem Mast durchführen zu können, ohne die Sensorik dafür demontieren zu müssen. Hierzu musste die gesamte Apparatur

bestehend aus Prüfgasadapter, einem Taupunktgenerator und den Kalibriergasen in kleinen 2l-Flaschen auf den Mast gebracht und am Sensor installiert werden.

Freifeldmesstechnik

Lidar-Systeme

Für die Installation der drei im Vorhaben beschafften Lidar-Geräte im Freifeld wurden umfangreiche Vorarbeiten und Absprachen mit Projektpartnern getroffen. Zunächst mussten geeignete Installationsorte identifiziert werden. Anschließend wurden diese auf ihre Realisierbarkeit überprüft. Im weiteren Verlauf mussten technische Details wie Stromversorgung, Installation und Datenanbindung eruiert werden. Für einen Standort wurde die Beschaffung eines Containers als Plattform für das Lidargerät beschlossen und in Absprache mit dem Projektträger umgesetzt. Gleichzeitig wurde damit begonnen für die Installationsorte Gestattungsverträge mit den entsprechenden Eigentümern auszuhandeln.

2019 konnten alle drei beschafften Long Range Lidar Systeme vom Typ „StreamLine XR“ um den Testfeldstandort installiert werden. Hierzu wurden drei Standorte mit einer 230V AC-Stromversorgung im Umkreis von 1,5km um das Testfeld ausfindig gemacht. Im Einzelnen sind dies eine Transformatorstation des örtlichen Netzbetreibers im Norden, eine Windkraftanlage im Südosten sowie das Schieberhaus eines Stausees im Westen vor der Steilstufe des Testfeldstandortes. Alle drei Standorte konnten nach Zustimmung der Eigentümer/Pächter und Unterzeichnung entsprechender Gestattungsverträge realisiert werden. Am Standort „Windkraftanlage“ wurde der aus Projektmitteln finanzierte Container aufgestellt, auf dessen Dach das Lidargerät installiert wurde. Für alle drei Standorte wurden geeignete Versicherungskästen mit integrierten Stromzählern gefertigt und installiert.



Abbildung 116: Lidar-Installationen im westlich vom Testfeld gelegenenen Tal (li.) und auf dem Container bei einer südlich zum Testfeld gelegenen Windenergieanlage (re.). [ZSW]

Collidar

Im Zuge einer am ZSW stattfindenden und vom Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE) der Universität Stuttgart mitbetreuten Studienarbeit mit dem Arbeitstitel „Collidar – Entwicklung kollektiver Doppler-Lidar-Messungen für komplexes Gelände“ konnte eine Software zur Synchronisation der drei beschafften Lidar-Systeme entwickelt werden.

Um eine synchrone Messung desselben Zielpunkts der drei Geräte sicherstellen zu können, mussten diese präzise ausgerichtet werden. Dafür wurde eine Kalibrier-Routine mittels Hard-Target-Erkennung

entwickelt. In dieser wird das Abtastmuster des Scanners so gewählt, dass der Laserstrahl auf exponierte Objekte im Feld trifft, die durch ein hohes Rückstreuungssignal in der Messung detektiert werden können. Auf dem Testfeld eignete sich dafür beispielsweise die Flugwarnkugeln an den Abspannseilen der Windmessmasten, die von jedem der drei Standorte aus sichtbar waren. Aus den bekannten Positionen und den bestimmten Trajektorien dieser Objekte wurden die Roll-, Nick- und Gier-Winkel des jeweiligen Geräts bestimmt.

Im regulären Betrieb würden die drei synchronisierten Lidar-Systeme die Windgeschwindigkeit in Strahlrichtung und am gleichen Punkt im Raum messen, um den dreidimensionalen Windvektor zu bestimmen. Für einen Test des Messprinzips wurde über mehrere Tage in unmittelbarer Nähe des Ultraschallanemometers am WMM-NW auf einer Höhe von 100m über Grund gemessen. Ein Ausschnitt aus der Vergleichsmessung über 12 h, dargestellt in Abbildung 120, weist auf eine gute Übereinstimmung der Lidar- und der In-situ-Messung hin. In diesem Zeitraum beträgt der Fehler im Vergleich zur geglätteten Sonic-Kurve, als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme, 0,5 m/s und der lineare Korrelationskoeffizient liegt bei 92%.

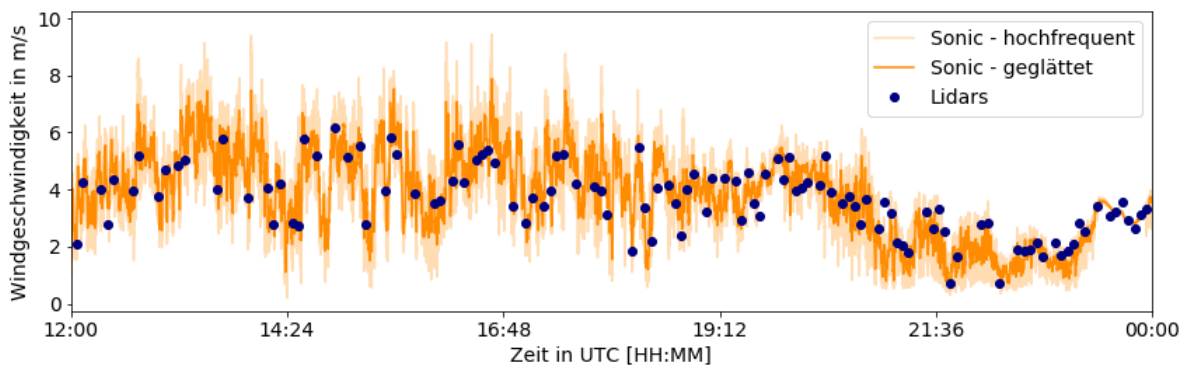


Abbildung 117: Vergleich der Windgeschwindigkeit aus Lidar-Messung und Ultraschallanemometer (Sonic) auf 100m am WMM-NW. [ZSW]

Die genauere Auswertung eines weiteren Vergleichstests zwischen Mast-Windmessung und Lidarmessung im August zeigte im Mittel eine gute Übereinstimmung beider Messinstrumente für die horizontale Windmessung (Abbildung 121 bzw. Tabelle 2). Allerdings wurden auch kurze Perioden mit einem Offset zwischen beiden Messungen detektiert. Für die zukünftige Fehlerabschätzung wurde ein Langzeitvergleich eines Lidar-Messpunktes mit einem Mastanemometer gestartet, der in die regulären Messungen integriert wurde, um mögliche Abhängigkeiten von Windrichtungen, -geschwindigkeiten oder Stabilität zu erfassen.

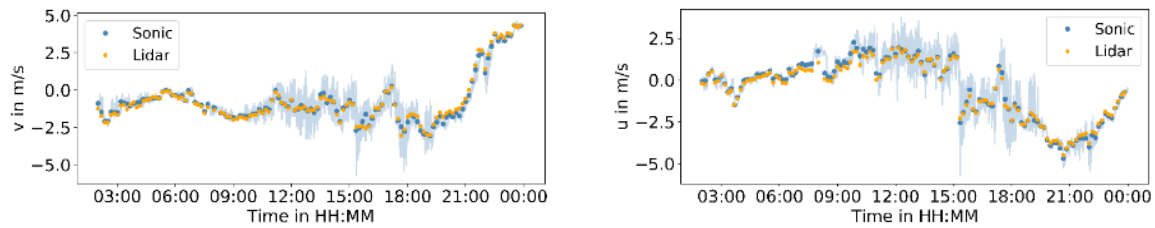


Abbildung 118: Vergleich der horizontalen Windkomponenten u und v von Lidar (gelb) und Sonic-Anemometer (blau) am 25. August 2019. Dargestellt sind Mittelwerte über 10 Minuten und die Rohdaten des Sonic-Anemometers (hellblau). [ZSW]

Tabelle 1: Wurzel der mittleren Fehlerquadrate (RMSE) und linearer Korrelationskoeffizienten (R) des Vergleichs von Lidar und Sonic-Messung am 25. August 2019. Ausgewertet wurden die Größen horizontale Windgeschwindigkeit (WS), die horizontalen Windkomponenten u und v , sowie die vertikale Windkomponente w . [ZSW]

	WS	u	v	w
RMSE [m/s]	0.19	0.20	0.20	0.37
R [%]	99.0	99.6	99.2	73.4

Für eine Weitergabe der Lidar-Messergebnisse und Aufnahme in die Datenbank, wurden Routinen entwickelt, um die Rohdaten effizient in das Lidar-FAIR Format (vorgeschlagen von Vasiljevic et al. 2018) zu überführen. Die Windmessungen wurden von nun an als standardisierte NetCDF-Datei gespeichert (Abbildung 122).

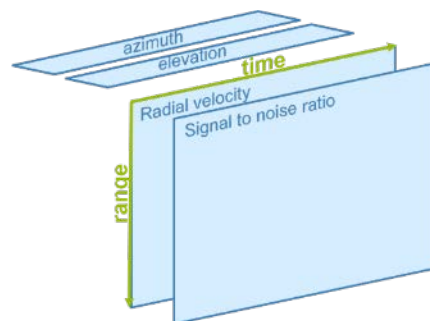


Abbildung 119: Visualisierung der zukünftigen, standardisierten Lidar-Datenspeicherung im NetCDF-Format. Die gemessenen Variablen Radialwindgeschwindigkeit und „signal to noise ratio“ spannen sich zwischen den Dimensionen Zeit und „range“, der Entfernung zum Lidargerät, auf. [ZSW]

Zwischenzeitlich musste aufgrund endender und neuer Gestattungsverträge zwei der drei Lidar-Geräte neu positioniert werden (siehe Abbildung 123). Der Standort 2 wurde ausgewählt, da er näher am Testfeld als der ursprüngliche Standort weiter südöstlich lag, so dass sich von diesem Standort eine höhere Datenverfügbarkeit versprochen wurde. Nachdem die WEA an diesem Standort 2 jedoch vom Netz getrennt worden war., konnte auch das Lidar nicht mehr entsprechend betrieben werden. Der

Standort 1 (Wasserhochbehälter) wurde gewählt, da dieser einen optimalen Messbereich bietet, Auch dieser Standort konnte leider nicht dauerhaft in der Vorhabenlaufzeit betrieben werden.

Das synchronisierte System der drei Scanning-Lidare ging dennoch damit in eine neue Testphase. Zusätzlich zur neuen Messkonfiguration und Geometrie der Trajektorien, macht eine Überarbeitung des Codes nun eine schnellere Messung möglich.

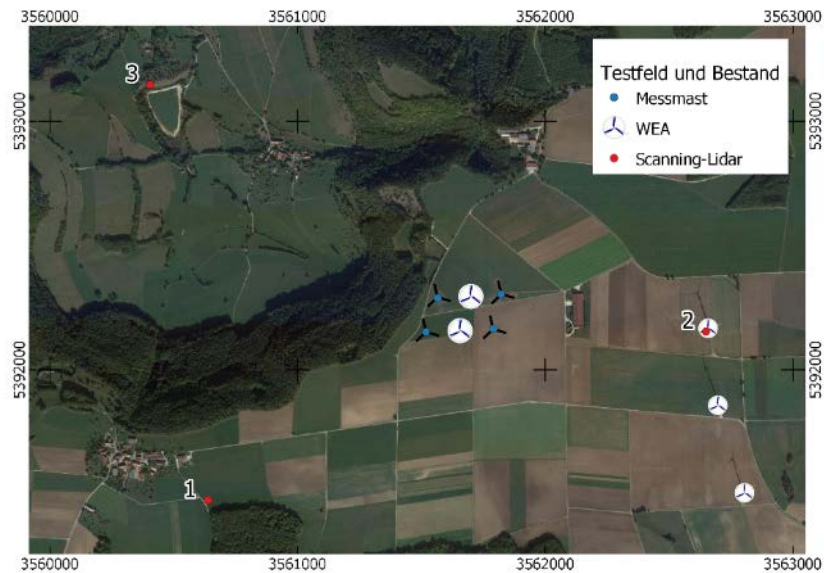


Abbildung 120: Standorte der Scanning-Lidar-Geräte (Abb.: ZSW GIS).

Probleme im Messbetrieb fielen beim Lidar- Profiler auf, welcher am Standort 3 im Tal aufgebaut wurde. Bei hoher Außentemperatur (etwa ab 30°C) stieg die Temperatur im Inneren des Gehäuses über einen Schwellenwert von 40°C was zum automatischen Abschalten der Messung führte. Kontaktaufnahme mit dem Hersteller ergaben, dass die passive Kühlung des Geräts nicht für hohe Temperaturen ausreicht, eine Nachrüstung allerdings nicht ökonomisch sinnvoll sei. Als erster preisgünstiger Lösungsansatz wurde daher ein Sonnenschutz für das Gerät angefertigt (Abbildung 124). Der Sonnenschutz ermöglichte den Betrieb bei höheren Außentemperaturen, allerdings konnte auch dieser Schutz ein Abschalten an heißen Tagen nicht 100%ig verhindern.



Abbildung 121: Installierter Sonnenschutz am Lidar-Profiler [ZSW].

Von September 2020 bis März 2021 wurden die Geräte für das Parallelvorhaben Inter-Wind genutzt. Eines der Scanning-Geräte und der Profiler wurden dafür am Testfeld abgebaut. Im ersten Quartal 2021 wurden die Geräte wieder an ihre ursprünglichen Standorte installiert.

Der Standort 3 liegt im Tal und befindet sich auf dem Flachdach des Betriebsgebäudes des Hochwasser-Rückhaltebeckens Simonsbachtal. Das Betriebsgebäude wird vom Wasserverband Fils mit Sitz in Göppingen betrieben. Ein zwischen dem Wasserverband Fils und dem ZSW geschlossener Gestattungsvertrag wurde erneuert und über den Vorhabenzeitraum hinaus verlängert. Von diesem Standort aus ließen und lassen sich das aus westlicher Richtung einströmende Windfeld mithilfe des Lidar Profilers sehr gut erfassen und auch sogenannte RHI Scans mit dem scannenden Lidar den Albtrauf hinauf zu den Windmessmasten durchführen. Deshalb sollte dieser Standort auch in Zukunft für Folgevorhaben zur Verfügung stehen und längerfristig gesichert werden. Der Wasserverband Fils forderte entsprechend eine gut geplante und vom Betriebsgebäude getrennte Stromanbindung der beiden Lidar-Systeme. Gemeinsam mit dem Wasserverband und dem Stauerwerk als ortsansässiger Netzbetreiber wurde eine Lösung in Form einer extern liegenden Zähleranschluss säule geplant und umgesetzt, welche separat abgesichert ist und damit eine sichere Stromanbindung für die beiden Lidar Geräte darstellt

EC-Stationen

Nach dem Initialtest einer EC-Station auf dem Dach des ZSW und der anschließenden Installation von zwei EC-Stationen am Testfeldstandort musste die Datenaufzeichnung angepasst werden, welche autark auf dem Logger CR6 von Campbell Scientific läuft. Das entsprechende Skript wurde abgeändert um in Zukunft alle verfügbaren Rohdaten, auch die der langsamen Sensoren, mit einer Frequenz von 0,2 Hz aufzuzeichnen. Hierdurch war es möglich, die Datenauswertung im Postprocessing durchzuführen und somit unterschiedliche Auswertelgorithmen (EddyPro oder TK3) zu nutzen. Zusätzlich wurde eine Routine für die Wartung der beiden EC-Stationen entwickelt, welche regelmäßig durchgeführt wird. Diese umfasst z.B. das Säubern der Regenkippschale oder des Solarpanels.

Für die Kalibrierung der EC-Stationen konnten die Kalibriergase beschafft werden. Fortwährend wurden regelmäßige Wartungsarbeiten der Geräte und ein händischer Transfer der Daten im Feld durchgeführt. In einem Jahr der Vorhabenlaufzeit musste der Standort der EC-Station im angrenzenden Acker als kritisch eingestuft werden, da Mais eingesät worden war. Um weiterhin verlässliche Daten zu messen, war es notwendig, die Messhöhe zu vergrößern, weshalb eine Verlängerung des Standfußes angefertigt werden musste. An diesem neuen Standfuß konnten nun die Messgeräte auf einer Höhe bis zu 4m angebracht werden und er ermöglichte damit Messungen bei hohem Bewuchs (Abbildung 125).



Abbildung 122: EC-Station am angrenzenden Maisfeld mit einer Messhöhe von 4m. [ZSW]

IOP – Intensive Operating Period

Im Vorhabenzeitraum wurden mehrere sogenannte Intensive Operating Period, kurz IOP, am WINSSENT Testfeld durchgeführt. Während der IOP standen über einen zuvor definierten Zeitraum alle verfügbaren Messinstrumente zur Verfügung, und es wurden parallel zu den Windmessmasten und Lidar-Systemen UAV Messflüge der Tübinger Wissenschaftler durchgeführt. Die Messdaten der IOP dienen der Validierung der Modellkette, welche im Zuge des Teilprojekts Mikroklima entwickelt wurde. Innerhalb des Teilprojekts „Aufbau und Betrieb“ war die Platzierung sowie der Betrieb der Instrumente wie Lidar-Systeme, Eddy-Kovarianz-Stationen und Windmessmasten während der IOP verortet. Die Partner der Universität Tübingen mussten sich für deren UAS (unmanned aircraft systems), also Flächenflugzeuge und Copter, um Flug- Start- und Landegenehmigungen kümmern.

Im Jahr 2019 konnten auf dem Testfeld zwei Intensive Operation Periods (IOP) durchgeführt werden. Die erste IOP fand im Juli statt, und entsprechend war der Albtrauf, der in der Zuströmung liegt, belaut. Die Messkampagne umfasste fünf Tage mit koordinierten in-situ Flugzeug- und Multicoptermessungen der Universität Tübingen, sowie abgestimmten Lidarmessungen (PPI- und RHI-Scans). Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten IOP im Sommer 2019, wurde eine zweite IOP im Winter 2019 durchgeführt mit dem Ziel, höhere Windgeschwindigkeiten sowie jahreszeitliche Variationen (z.B. durch Laubabwurf) zu erfassen. In diesem Zeitraum wurde erstmals das Scanning-Lidar-System Collidar (s.o.) in Betrieb genommen. Außerdem wurden für die Kampagne drei weitere Lidar-Geräte des Verbundpartners KIT-IMK-IFU zur Verfügung gestellt. Somit umfasste die Koordination der IOP zusätzlich zur Festlegung der abgestimmten Messstrategien (Abbildung 126), die Organisation von geeigneten Freifeldstandorten mit möglicher Infrastruktur für die KIT-Lidare. Die zweite IOP startete Ende November 2019 und endete im Januar 2020.

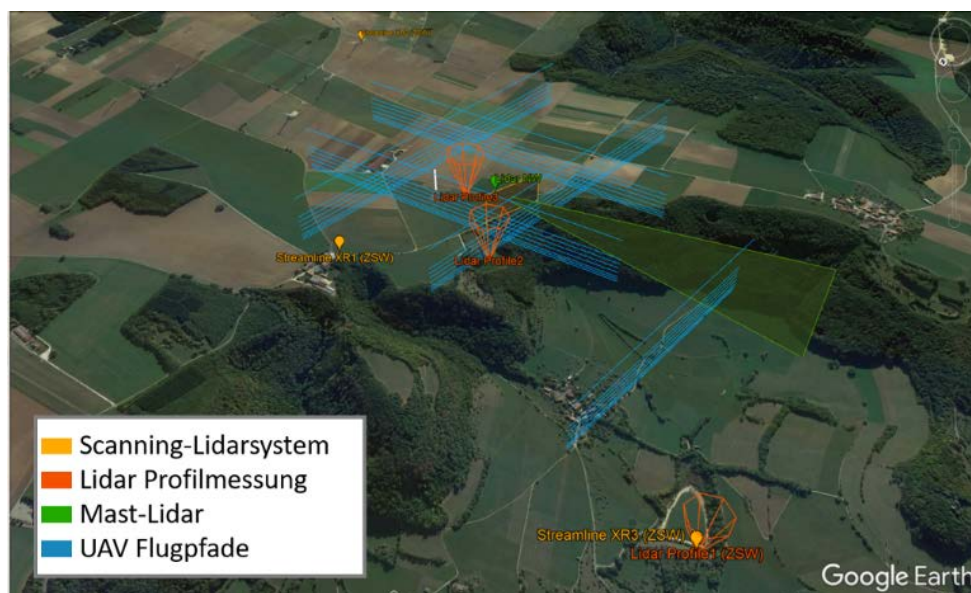


Abbildung 123: Messstrategie der zweiten IOP. Blau: Flugpfade des MASC der Universität Tübingen, rot: Lidar-Profilmessungen, gelb: Standorte der drei Geräte des Scanning-Lidarsystems, die 24 Messpunkte auf der gelben Fläche an der Hangkante vermessen, grün: Scanning-Lidar des KIT auf der Plattform des Messmasts NW auf 72m mit einer RHI-Messung ins Tal. [ZSW, Google Earth, 2019]

Die während der IOP erfassten Lidar-Daten wurden am ZSW ausgewertet und in das wissenschaftlich anerkannte Lidar-FAIR-Format konvertiert, welches seitens ZSW bereits in die Datenauswerteroutinen implementiert worden war. Dieses Format ermöglichte den Austausch der Daten mit den Projektpartnern und theoretisch über das Projekt hinaus. Konkret wurden folgende Daten bereitgestellt:

- Für die Universität Tübingen wurden Daten für einen Vergleich mit deren Messflugzeugen aufbereitet. Dabei wurden alle Zeiträume in denen Flugmessungen stattfanden bereitgestellt. Parallel fanden Diskussionen über die bestmögliche Nutzung der Daten und das methodische Vorgehen für einen Vergleich, sowie Weitergabe von Code für die Datenverarbeitung statt.
- Weiter wurden dem KIT IMK-IFU Daten zur Verfügung gestellt. Es wurde sich in Absprache mit den Partnern auf eine Fallstudie im Zeitraum der IOP vom 04.01.2020 bis 05.01.2020 mit hohen Windgeschwindigkeiten aus Westen und einer hohen Datenverfügbarkeit geeinigt. Für diese Studie werden die virtuellen Mastmessungen der Lidar-Geräte genauer analysiert und von Seitens des KIT IMK-IFU mit dem Modell verglichen.

Ursprünglich waren weitere IOP geplant, in dem auch die Einflüsse der beiden FWEA auf die Windströmung untersucht hätten werden sollen. Aufgrund der erheblichen Verzögerung bei der Errichtung und Inbetriebnahme der FWEA wurde beschlossen, diese Arbeiten in das Folgevorhaben WINSentvalid zu transferieren.

Rotorblatt-Tests

In der Woche vom 10. bis 14 Oktober 2022 fanden Tests an jenem Rotorblatt, welches mit sämtlichen Messstellen bestückt wurde, in der Montagehalle in Königsbronn statt.

Die Tests dienten primär der Kalibrierung der Blatt-internen Messtechnik: hierbei handelte es sich um faseroptische Sensoren zur Erfassung der Biegelinie (Fa. Fibersail), der Beschleunigung in drei Raumkoordinaten (Fa. HBK) und der Blattwurzelbiegemomente in Schlag- und Schwenkrichtung (Fa. HBK). Als Referenz für die letztgenannten Sensoren wurden am Testblatt seitens ZSW zusätzliche Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert.

Die Ergebnisse aus dem statischen Belastungstest aber auch aus den Ausschwingversuchen zur Ermittlung der Eigenfrequenzen dienten zur Anpassung der numerischen Modelle (Balken- und Strukturmodell) der WINSent Partner.

Die Messungen dienten aber auch der Validierung des rechnerischen Nachweises für den neuen Rotorblattanschluss. Dieser ist aufgrund des neuen, breiteren Pitchlagers notwendig, da die Rotorblattbolzen, welche das Rotorblatt mit dem Innenring des Pitchlagers verbinden, gegenüber den ursprünglichen Blattbolzen an der Blattwurzel verlängert werden mussten. Der rechnerische Nachweis des neuen Rotorblattanschlusses wurde von der Fa. TPI Composites unentgeltlich durchgeführt und für die Zertifizierung beige-steuert. Die Fa. TPI applizierte hierzu an ausgewählten Rotorblattbolzen und im Zwischenbereich der Querbolzen zahlreiche DMS, welche an das mobile Messsystem des ZSW mit angeschlossen wurden. TPI legte zudem rechnerisch die Lastscheren aus und leitete Zeichnungen ab, um die Kräfte auf die sogenannten Gurte des Rotorblattes einleiten zu können. Die Gurte, welche sich auf der Saug- und Druckseite des Rotorblattes befinden und von der Blattwurzel bis in die Blattspitze verlaufen, nehmen im Betrieb der Windenergieanlage die Biege-lasten auf und sind entsprechend stabil.

Im 17-seitigen Design Dokument „EU50.1250-2-PF Specification Static Load Test“ wurden gemeinsam mit der Fa. TPI die Testprozeduren geplant und dokumentiert. Während der Einleitung der zirka 7 Tonnen wurden knapp 100 Sensoren zeitsynchron im mobilen Messsystem erfasst und teilweise online verrechnet, so dass in Summe von 133 Messkanälen Daten aufgezeichnet wurden. Neben den erwähnten Sensoren am und im Rotorblatt wurden zusätzlich zu den Kraftmessdosen auch die Auslenkung mithilfe von Entfernungslasern als auch die Umgebungstemperatur und –feuchte erfasst.



Abbildung 124: Rohbau der Lastscheren [ZSW]



Abbildung 125: Holzblöcke mit dem geformten Negativ-Profil des Rotorblatts an unterschiedlicher Blatt- und Profiltiefe. [ZSW]



Abbildung 126 Einleitung der Kräfte mittels Traverse und Lastscheren an zwei berechneten Punkten am Rotorblatt. Die Messung der eingeleiteten Kräfte erfolgt jeweils mittels entsprechender Kraftmessdosen zwischen Traverse und Lastschere. [ZSW]



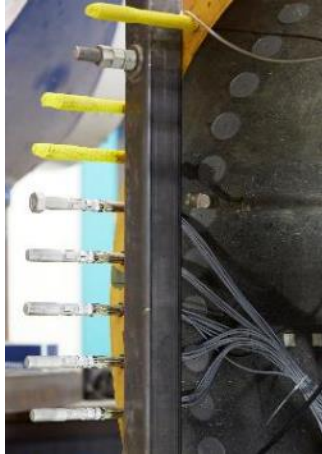


Abbildung 127: Von TPI mit DMS präparierte Rotorblattbolzen. [ZSW]



Abbildung 128: Erfassung von Dehnungen mittels DMS in den Zwischenräumen der Querbolzen. [ZSW]

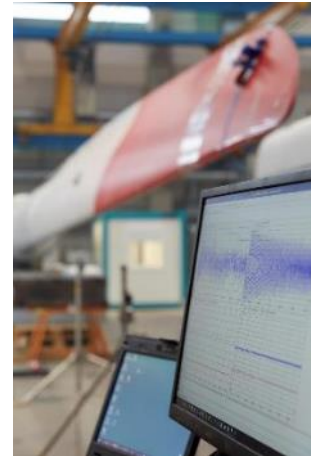
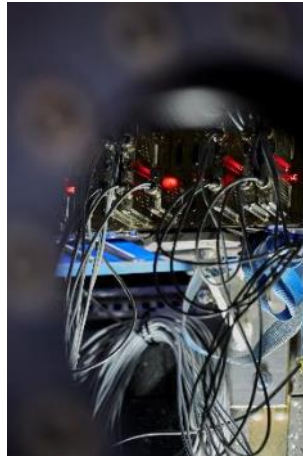


Abbildung 129: Zeitsynchrone Erfassung von knapp 100 Sensoren am Rotorblatt und in der Montagehalle. [ZSW]



Abbildung 130: Fotografisch festgehaltener Verlauf des statischen Biegetests in Schwenkrichtung bei der Einleitung unterschiedlicher Lasten auf das im Teststand eingespannte Rotorblatt. [ZSW]

Messstellen der FWEA

Bereits noch vor der Errichtung der beiden FWEA konnten in der Montagehalle in Königsbronn zahlreiche Messstellen durch das beauftragte Messinstitut wind-consult appliziert werden. So wurden an allen sechs Rotorblättern als Referenz zu den bereits installierten faseroptischen Sensoren (aus dem Flamingo-Vorhaben) jeweils vier DMS zur Erfassung der Blattwurzelbiegemomente in Schlag- und Schwenkrichtung geklebt. Zudem konnten die DMS-Messstellen zur Erfassung des Rotordrehmoments und der Rotor-Biegemomente an der Hauptwelle der Windkraftanlagengetriebe appliziert werden, nachdem die Getriebe Anfang März 2023 geliefert und in die Maschinenträger eingebaut worden waren.

Nach der Errichtung der beiden FWEA im Frühjahr 2023 schloss sich die Instrumentierung der Forschungsanlagen an. So wurden die Turmmessstellen zur Erfassung der Turmfuß- und Turmkopfbiegemomente, der Turmtorsion und der Turmkopfbeschleunigung installiert. Es folgte der Anschluss aller Messstellen an das Messsystem und die Kalibrierung der Messstellen. Hierfür wurden zu einen die verschiedenen DMS-Brücken durch einen sogenannten Shunt-Widerstand definiert verstimmt. Zum anderen wurden durch bestimmte Vorgänge („Azimutrunden“, Rotorblattverstellung) und durch die Eigenlasten der Anlagenkomponenten Kräfte und Momente aufgebracht, welche ebenfalls zur Kalibrierung der Messstellen herangezogen wurden.

Die zwischen dem Getriebeausgang und dem Generator verbaute KTR-Messwelle zur Erfassung des Rotordrehmoments und der Rotordrehzahl konnte über entsprechende Messmodule und Auswertelgorithmen direkt an das Messsystem angeschlossen werden.

Aufgrund des parallellaufenden Vorhabens WINSentvalid und den darin verorteten Arbeiten wurden ab 2024 keine Inhalte dieses Arbeitspakets mehr im Vorhaben WINSent bearbeitet.

AP 1.3.2 Messdatenerfassung und Qualitätssicherung

Das für den Windmessmast erforderliche Messsystem wurde gemeinsam mit dem Datenerfassungssystem für die beiden FWEA im europäischen Ausschreibungsblatt TED – eNotices unter der Ausschreibungsnummer 2017/S 120-242195 veröffentlicht. Das Lastenheft zur Ausschreibung wurde zuvor mit Unterstützung des Projektpartners Universität Stuttgart – Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie (SWE) ausgearbeitet. Nach erfolgter Ausschreibung, wurde zunächst ein Teil des Gesamt-Messsystems in einer ersten Bestellung für einen der Windmessmasten beschafft. Sensoren, welche ihre Daten per seriellen Bus senden - beispielsweise die 3-D Ultraschallsensoren – wurden in weiteren Konfigurationen und Tests in das Messsystem integriert und eingebunden. Analog zu den Ultraschallanemometern konnten nach Entschlüsselung des seriellen Ausgabecodes auch die beschafften Gasanalysatoren vom Typ „Campbell Scientific - IRGASON“ ebenfalls erfolgreich an die imc-Messtechnik angebunden werden.

Für die Instrumentierung des ersten Windmessmastes (WMM-NW) wurde ein Peripheriekonzept bestehend aus einem zentralen Logger-Schaltschrank, vier Stromversorgungsschränken, sowie vier Sammelkästen entwickelt und ausgearbeitet. Ziel hierbei war zum einen die Trennung von Stromversorgungs- und Datenleitungen, sowie zum anderen das Zusammenfassen der Sensorleitungen auf zentrale Sammelleitungen. Des Weiteren wurde ein Erdungs- und Blitzschutzkonzept entwickelt, welches im Wesentlichen auf einer galvanischen Trennung von

Maststruktur und elektrischer Peripherie basiert. Nach Ausarbeitung einer umfangreichen, technischen Dokumentation in Form von Stromlauf- und Schaltplänen wurden die einzelnen Peripheriekomponenten zunächst am ZSW aufgebaut und später am Mast installiert. Das Peripheriekonzept wurde im weiteren Verlauf verbessert, angepasst und auf die drei weiteren Messmasten übertragen.

In Zusammenarbeit mit dem Stuttgarter Lehrstuhl für Windenergie SWE wurde wie in AP 0.3.1 erwähnt eine Online-Visualisierung entwickelt, welche die Messdaten der beiden installierten Windmessmasten WMM-NW und WMM-NE in Form aktueller Messwerte sowie Zeitreihen der 10min Mittelwerte der letzten 48h auf der Webseite des WindForS Forschungsclusters anzeigen. Diese Visualisierung diente unter anderem der schnellen Sichtprüfung bzgl. der Funktionsfähigkeit der sich in Betrieb befindenden Sensorik und konnte sowohl am PC als auch am Smartphone jederzeit abgerufen werden. Vor allem zum Zweck der täglichen Qualitätssicherung und Datenkontrolle, sowie als Hilfsmittel vor Ort, hatte sich die Visualisierung bereits nach kurzer Zeit bewährt. Nach der Umstellung der WindForS-Homepage und der veränderten Datenpipeline wurde die Visualisierung auf der Internetseite eingestellt. Eine weiterführende Lösung wurde am ZSW mithilfe der Software Grafana entwickelt und implementiert. Diese ermöglicht es, zeitnah einen Ausfall von Sensoren oder andere Unregelmäßigkeiten bei der Datenerfassung zu erkennen und entsprechend darauf reagieren zu können.

Dank der graphischen Qualitätssicherung wurden Unregelmäßigkeiten im Datenschieb, eines der an WMM-NW installierten uSonics festgestellt. Im direkten Vergleich zu anderen Windgebern am selben Mast konnte eine driftende Veränderung der vertikalen Windkomponente beobachtet werden. Eine Kontrolle des Sensors vor Ort hatte daraufhin schnell Aufschluss über dieses Verhalten gebracht. Der Sensorkopf war um ca. 45° zur normalen Installationsposition entlang der Rollachse verdreht. Eine genauere Untersuchung des Sensors zeigte dann, dass eine Schweißnaht in der Verbindung zwischen Sensorkopf und -arm gerissen war. Der Sensor wurde daraufhin abgebaut, beim Hersteller repariert, überarbeitet und anschließend wieder am Mast installiert. In Folge der Reparatur wurde das Produkt an der Problemstelle grundlegend überarbeitet. Vom Hersteller wurde eine kostenfreie Überarbeitung aller weiteren, installierten uSonics vor-Ort durchgeführt.

Zusätzlich zu den eingeplanten Sensoren und Daten der Messmasten, der Freifeldsensorik und der FWEA, wurden im Laufe des Vorhabens weitere Sensoren der Verbundpartner des Vorhabens (z.B. KIT-GPI), aber auch Sensoren der Partner des Vorhabens NatForWINSent I/II – der begleitenden Naturschutzforschung am Testfeld – in das Messsystem eingebunden. Sowohl die hierzu notwendige Hardware (Messmodule, Schaltschränke, Speicherkarten, etc.) als auch die notwendigen Arbeiten wurden über das Vorhaben NatForWINSent finanziert.

Ein weiteres Peripheriekonzept wurde für die Instrumentierung und Messdatenerfassung der beiden FWEA entwickelt. Hierzu wurden Fragestellung und Diskussionen des AP 1.2.3 miteinbezogen und Ergebnisse abgeglichen. Dies galt insbesondere für die Dimensionierung und Verortung der verschiedenen Schaltschränke im Turmfuß, auf den verschiedenen Podesthöhen im Turm sowie im Maschinenhaus. Nach Ausarbeitung einer umfangreichen, technischen Dokumentation in Form von Stromlauf- und Schaltplänen wurden die einzelnen Peripheriekomponenten beschafft und insbesondere die EtherCat-Verbindung zwischen den verschiedenartigen Messmodularten zunächst im Labor am ZSW getestet und anschließend in den beiden FWEA installiert.

AP 1.3.3 Datenerfassung und Datenbank

Im Rahmen des AP 1.3.3 wurde ein umfassendes System zur Verwaltung der auf dem Testfeld anfallenden Mess- und Metadaten entwickelt und in weiten Teilen implementiert. Das Datenmanagement beinhaltet sämtliche Prozesse, die für eine effiziente und sichere Nutzung der Daten erforderlich sind. Dazu gehören die Erfassung, Speicherung und Pflege sowie die Bereitstellung und Archivierung der Daten. Die Verantwortung für das Arbeitspaket lag beim ZSW. Die Konzeption des Datenmanagements wurde zu Beginn des Vorhabens mit allen Projektpartnern diskutiert und im Verlauf des Vorhabens überarbeitet und verfeinert.

Zu den zentralen Arbeiten zählten:

1. die Entwicklung und Umsetzung eines Datenhaltungskonzepts inklusive des Aufbaus einer relationalen Datenbank zur Speicherung von Mess- und Metadaten,
2. die Programmierung automatisierter Prozesse zur Erfassung, Verarbeitung und Integration der generierten Daten,
3. die Programmierung einer Management-Schnittstelle zur Verwaltung von Metadaten,
4. die Programmierung einer Webanwendung (Web-App) und Web-Schnittstelle (Web-API) zum Abruf von Messdaten
5. die Beschaffung und Inbetriebnahme der für die Punkte 1 bis 4 erforderlichen IT-Infrastruktur auf dem Testfeld und am ZSW in Stuttgart (Hard- und Software).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Arbeiten detaillierter beschrieben.

Datenhaltungskonzept

Auf dem Testfeld werden fortlaufend große Datenmengen generiert, die dauerhaft und sicher gespeichert und für die weitere Nutzung zugänglich gemacht werden müssen. Eine zentrale Herausforderung ergibt sich dabei aus der Heterogenität der anfallenden Daten. Die nachfolgende Liste (nicht abschließend) verdeutlicht die Breite an unterschiedlichen Datenquellen:

- Messmast-Instrumente (Meteorologie, Avifauna)
- Anlagensensoren (mechanische Belastung, elektrische Leistung etc.)
- Anlagenbus (SCADA, supervisory control and data acquisition)
- Eddy-Konvarianz-Stationen
- Seismometer
- Lidar-Systeme (light detection and ranging)
- Sodar-Systeme (sonic detection and ranging)
- Radar-Systeme (radio detection and ranging)
- Schallsensoren
- Kamerabilder/-filme
- Unbemannte Luftfahrzeuge (unmanned aerial vehicle, UAV) und Drohnen
- Strömungssimulation (computational fluid dynamics, CFD)
- Finite-Elemente-Simulationen von Anlagenkomponenten
- MERRA-2 Reanalyse
- Numerische Wettervorhersagen (numerical weather predictions, NWP)

Je nach Datenquelle sind zudem verschiedene Aufbereitungsstufen zu berücksichtigen: Rohdaten aus dem Datenlogger in proprietärem Format (Level 0), kalibrierte, in physikalische Größen umgerechnete Daten (Level 1), Qualitätswerte von ungültig bis gut (Level 2) sowie statistische Kennzahlen (Mittelwert, Varianz etc.) (Level 3).

Da die Daten bestimmter Datenquellen, wie beispielsweise CFD-Simulationen oder Wettermodelle, von Natur aus so umfangreich sind, dass eine sinnvolle Speicherung in einer relationalen Datenbank nicht möglich ist, wurde im Verlauf des Vorhabens ein zweiteiliges Datenhaltungskonzept für die Messdaten entwickelt. Demnach werden alle Daten – Rohdaten und verarbeitete Daten – in einem Dateisystem abgelegt und archiviert. Ergänzend dazu werden in einer relationalen Datenbank aggregierte Messdaten (10-Minute-Daten), verschiedene Metadaten sowie Referenzen auf die abgelegten Dateien gespeichert.

Für die relationale Datenbank wurde das freie und weit verbreitete Datenbankmanagementsystem PostgreSQL ausgewählt und mit den Plugins PostGIS²⁸ und TimescaleDB²⁹ um nützliche Funktionen erweitert. Während PostGIS Funktionen zur Speicherung, Indizierung und Abfrage von Geodaten mitbringt, vereinfacht TimescaleDB die Verwaltung von Zeitreihendaten, indem entsprechende Tabellen automatisch und für den SQL-Benutzer transparent in Zeilen- und Spaltenblöcke vordefinierter Größe zerlegt werden können.

Die Datenbankstruktur wurde im Verlauf des Vorhabens stetig weiterentwickelt und ist in ihrer heutigen Form in verschiedene Ebenen/Bereiche untergliedert:

1. Daten (Zeitreihendaten, Dateireferenzen, Metadaten zu Messungen)
2. Infrastruktur (Messinstrument, Kanäle, Kalibrierwerte etc.)
3. Nutzungsrechte (Rollenbasierte Zugriffsrechte)

Ein ursprünglich geplanter Bereich zur Nutzerverwaltung wurde mit der Implementierung von Keycloak (Open-Source-Lösung zur Identitäts- und Zugriffsverwaltung) überflüssig (siehe unten).

Wachsende Anforderungen haben im Verlauf des Vorhabens die Komplexität der Datenbankstruktur steigen lassen. Insbesondere der Anspruch des Projektteams, auch lange nach Projektende jede Änderung der Instrumentation und Konfiguration in den Datenreihen nachvollziehen zu können, erwies sich in der Praxis als aufwendiger als ursprünglich geplant, wird aber weiterhin als essenziell angesehen. Auch die Einordnung von Messzeitreihen in zusammengehörige Gruppen (Daten plus Fehlermaße, Qualität, Hilfsmessungen usw.) erwies sich in der Umsetzung als relativ komplex.

Die Erstellung und Interaktion mit der Datenbank erfolgte über das weit verbreitete SQL-Toolkit SQLAlchemy, das Entwicklern ermöglicht, Datenbanktabellen als Python-Klassen zu definieren und Datenbankzeilen als Instanzen dieser Klassen zu behandeln. Dies erleichtert die Programmierung grundlegender Operationen zum Erstellen, Lesen, Aktualisieren und Löschen von Datensätzen (create, read, update, delete, CRUD) und erlaubt eine vollständige Umsetzung in der Programmiersprache Python.

²⁸ <https://postgis.net/>, zuletzt zugegriffen am 15.04.2025

²⁹ <https://www.timescale.com/>, zuletzt zugegriffen am 15.04.2025

Ergänzend zur Datenhaltung der Messdaten wurde für den Austausch von Software und Modellen im Rahmen des Teilprojekts FoWEA ein GitLab-Server³⁰ am ZSW aufgesetzt und für autorisierte Projektpartner zugänglich gemacht. GitLab ist eine webbasierte DevOps-Plattform, die Funktionen für die Softwareentwicklung und -bereitstellung bietet.

Automatisierte Erfassung, Verarbeitung und Integration von Messdaten

Die Prozesse zur Erfassung, Verarbeitung und Integration von Messdaten wurden im Verlauf des Vorhabens automatisiert, so dass die auf dem Testfeld generierten Rohdaten in regelmäßigen Abständen von den stationären Messsystemen zusammengetragen, auf dem testfeldseitigen Datenspeichersystem zwischengespeichert und anschließend über eine gesicherte Verbindung auf das Datenspeichersystem am Standort des ZSW in Stuttgart übertragen werden. Nach der Übertragung werden die Daten je nach Datenursprung aufbereitet (kalibriert, transformiert, in physikalische Größen umgerechnet), definierten Tests unterzogen und im Zielsystem (Datenbank und/oder Dateisystem) gespeichert.

Zur Automatisierung und Überwachung der Prozesse wurde eine Prefect-Instanz³¹ aufgesetzt. Prefect ist eine Open-Source-Orchestrierungs-Engine, mit deren Hilfe sich in Python programmierte Funktionen zu Datenpipelines zusammensetzen und nach definierten Zeitplänen ausführen lassen. Über eine integrierte Web-Anwendung können die Prozesse ferner überwacht werden.

Für einen Teil der Datenquellen ist die Prozesskette bereits implementiert, so dass insbesondere die Messdaten der nördlichen Messmasten für den Abruf über die Webanwendung (siehe unten) zur Verfügung stehen. Die Einbindung weiterer Datenquellen (u. a. Messdaten der südlichen Messmasten und der Forschungswindenergieanlagen) steht noch aus und wird begleitend zur Aufnahme des Regelbetriebs im laufenden Vorhaben WINSentvalid vollzogen. Zudem sind die im Rahmen des Vorhabens erarbeiteten Prozesse und Methoden zur Qualitätskontrolle (statistische und KI-basierte Ansätze (vgl. AP 2.3.3) weiter auszubauen.

Management-Schnittstelle zur Verwaltung von Metadaten

Für die Verwaltung und Dokumentation der auf dem Testfeld installierten Messinfrastruktur wurde im Rahmen des Projekts die erste Version einer Management-Schnittstelle entwickelt und getestet. Diese ermöglicht es autorisierten ZSW-Mitarbeitern unter anderem neue Messinstrumente und -kanäle in der Datenbank anzulegen, ihren Betriebszustand und Ort zu verändern sowie Kalibrierwerte einzupflegen.

Die Management-Schnittstelle wurde als Webanwendung mit dem Web-Framework Flask³² in der Programmiersprache Python umgesetzt. Ergänzend dazu besteht die Möglichkeit grundlegende Operationen auch über die Kommandozeile auszuführen (Kommandozeilenschnittstelle). Der Funktionsumfang der Management-Schnittstelle soll mit der Aufnahme des Testfeld-Regelbetriebs und den dabei gesammelten Erfahrungen stetig weiterentwickelt werden.

³⁰ <https://about.gitlab.com/>, zuletzt zugegriffen am 15.04.2025

³¹ <https://www.prefect.io/>, zuletzt zugegriffen am 15.04.2025

³² <https://flask.palletsprojects.com/>, zuletzt zugegriffen am 15.04.2025

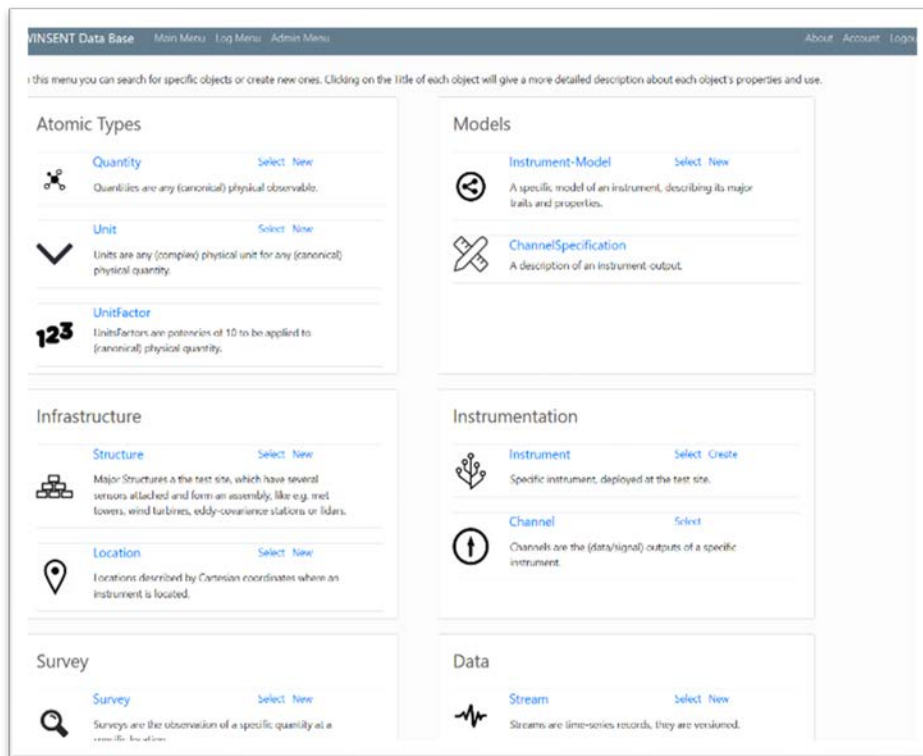


Abbildung 131: Ausschnitt des Hauptbildschirms der Management-Schnittstelle für die WINSent-Datenbank. [ZSW]

Web-App und Web-API zum Abruf von Messdaten

Für den Zugriff auf die Messdaten wurden eine Webanwendung (Web-App) und eine Web-Schnittstelle (Web-API) entwickelt und freigeschaltet³³. Diese ermöglichen es registrierten und autorisierten Nutzern sowohl aggregierte 10-Minuten-Daten als auch hochaufgelöste Messdaten herunterzuladen.

Das Nutzer- und Berechtigungsmanagement erfolgt über eine eigene Instanz der frei zugänglichen Software Keycloak³⁴. Keycloak ist ein Single Sign-On Identity und Access Management-Tool, das sich für unterschiedliche Arten von Anwendungen konfigurieren lässt und verschiedene Authentifizierungs-Protokolle wie OAuth 2.0 unterstützt. Nutzer, die über die Web-App oder Web-API auf Daten des WINSent Testfelds zugreifen möchten, müssen sich zunächst auf dem Keycloak-Server registrieren. Über die „Admin Console“ von Keycloak lassen sich dem neu registrierten Nutzer rollenbasiert Rechte und Attribute zuweisen, mit denen sich der Zugriff auf die Inhalte des Datenportals steuern lässt. Ferner können Nutzer über die „Account Console“ von Keycloak ihr Benutzerprofil anpassen und löschen oder ihr Passwort ändern. Werden im weiteren Verlauf des Testfeldbetriebs weitere Anwendungen mit Authentifizierungsanforderungen entwickelt, lassen sich diese an die bestehende Keycloak-Instanz koppeln.

Nach der Registrierung und Anmeldung können Nutzer in der Webanwendung die ihnen zugänglichen Mess-Zeitreihen einsehen, filtern und für den Download auswählen. Aggregierte 10-Minuten-Daten (Mittelwerte, Varianzen etc.) können direkt im CSV-Format heruntergeladen werden. Die

³³ <https://winsent-gui.zsw-bw.de/>, zuletzt zugegriffen am 15.04.2025

³⁴ <https://www.keycloak.org/>, zuletzt zugegriffen am 15.04.2025

Bereitstellung von Rohdaten kann dagegen längere Zeit in Anspruch nehmen. Der Nutzer erhält in diesem Fall lediglich eine Bearbeitungsbestätigung und erhält nach Abschluss der Datenverarbeitung einen Downloadlink per E-Mail zugeschickt. Für wiederkehrende Datenanfragen kann sich der Nutzer die URL der zugrundeliegenden Web-API anzeigen lassen und diese für automatisierte Prozesse verwenden. Die Authentifizierung dieser Datenanfragen erfolgt über einen Token, den der Nutzer in der Oberfläche der Web-Anwendung abrufen kann.

WINSent Data Account API Usage Getting Started Logout



WINSent Data

Welcome to the data access interface of the WINSent wind energy research test site.
For explanations how to download data and the FAQ section visit the [getting started](#) page.

Surveys

Filter by Survey ?

Filter by Physical Quantity ?

Filter by Structure ?

Filter by Height above Ground: 2 .. 98

	Survey	Structure	Physical Quantity	Start Date	End Date	Height above Gro
▶	☐ MMNE_B_004	met mast NE	static air pressure	2018-09-10 00:00:00		
▶	☐ MMNE_B_095	met mast NE	static air pressure	2018-09-10 00:00:00		
▶	☐ MMNE_Dir_025_uS	met mast NE	horizontal wind direction (vectorial)	2019-06-05 00:00:00		
▶	☐ MMNE_Dir_036	met mast NE	horizontal wind direction (vectorial)	2018-09-10 00:00:00		
▶	☐ MMNE_Dir_046_uS	met mast NE	horizontal wind direction (vectorial)	2019-06-05 00:00:00		
▶	☐ MMNE_Dir_060	met mast NE	horizontal wind direction (vectorial)	2018-09-10 00:00:00		
▶	☐ MMNE_Dir_073_uS	met mast NE	horizontal wind direction (vectorial)	2019-06-05 00:00:00		
▶	☐ MMNE_Dir_087	met mast NE	horizontal wind direction (vectorial)	2018-09-10 00:00:00		
▶	☐ MMNE_Dir_097_uS	met mast NE	horizontal wind direction (vectorial)	2019-06-05 00:00:00		
▶	☐ MMNE_H_003	met mast NE	relative humidity	2018-09-10 00:00:00		

First Prev 1 2 3 4 5 Next Last

Add to Cart

Shopping Cart

☐	Survey	Structure	Physical Quantity	Start Date	End Date	Height above Ground

First Prev 1 Next Last

Remove from Cart

Time & Resolution

Date Range

Time resolution

Download

Show API URL Path

Abbildung 132: Ausschnitt der Web-Anwendung zum Zugriff auf Messdaten aus der WINSent-Datenbank. [ZSW]

Wie die Management-Schnittstelle sind auch die Web-App und die Web-API mit dem Web-Framework Flask in der Programmiersprache Python umgesetzt. Basierend auf den ersten Erfahrungen aus dem Produktiv-Betrieb soll die Benutzerfreundlichkeit des Datenportals schrittweise verbessert und der

Funktionsumfang erweitert werden (z. B. Filter für bestimmte Windrichtungen, Verfügbarkeitsanzeigen und grafische Darstellung aggregierter Messdaten).

Beschaffung und Inbetriebnahme benötigter IT-Infrastruktur

Zur Umsetzung der oben skizzierten Datenmanagement-Prozesse wurde im Rahmen des Projekts die benötigte IT-Infrastruktur beschafft, konfiguriert, getestet und in Betrieb genommen. Die Arbeiten umfassten:

- die Beschaffung und Inbetriebnahme der auf dem Testfeld erforderlichen Server-Infrastruktur,
- die finale Anbindung des Testfelds über eine Glasfaserverkabelung an das kommunale Breitbandnetz (inklusive interner Verkabelung innerhalb des Testfelds)
- die Beschaffung und Inbetriebnahme der auf dem Testfeld benötigten Netzwerkinfrastruktur (u. a. Netzwerk-Switches),
- die Beschaffung und Inbetriebnahme von USV-Systemen, um den Betrieb der Netzwerk-Infrastruktur und Messtechnik auch bei Störungen im Stromnetz gewährleisten zu können,
- die Beschaffung und Inbetriebnahme eines leistungsfähigen Datenbankservers am Standort des ZSW in Stuttgart,
- das Aufsetzen mehrerer virtueller Maschinen für die Datenerfassung und -verarbeitung sowie für die beschriebenen Web-Services (Web-App, Web-API, Authentifizierungsserver, Prefect-Server, GitLab),
- die Beschaffung und Einbindung der zentralen Speichersysteme (NetApp) auf dem Testfeld und am Standort des ZSW in Stuttgart.

AP 1.3.5 Betrieb Windmessmast, Sensorik, Datenerfassung

Im Berichtszeitraum wurden fortdauernd die Mess- und Datenerfassungssysteme betrieben und gewartet, weshalb eine fast unterbrechungsfreie Messdatenerfassung möglich war.

Aufgrund des parallellaufenden Vorhabens WINSentvalid und den darin verorteten Arbeiten wurden ab Februar 2023 keine Inhalte dieses Arbeitspakets im Vorhaben WINSent bearbeitet.

AP 1.3.6 Betrieb der FWEA

Im Vorhabenzeitraum wurden keine Inhalte dieses Arbeitspakets bearbeitet. Es wurde in das Folgevorhaben WINSentvalid transferiert.

AP 2 Mikroklima

AP 2.3 Analysen

Die durchgeführten Arbeiten des ZSW im Teil-AP 2.3 „Analysen“ umfassten die Modellierung und die meso- und mikroskalige Charakterisierung des Testfeldstandorts unter Einbeziehung unterschiedlicher Messdaten. Zudem wurden Vorhersagen- und MCP-Verfahren für bergig-komplexes Gelände, sowie die Anwendung von verschiedenen Modellansätzen zur statistischen Auswertung der Messdaten und der Qualitätssicherung der Daten mittels Ableitung von Modelltransferfunktionen sowie Transferfunktionen zwischen einzelnen Sensoren auf verschiedenen Messhöhen der verschiedenen Windmessmasten untereinander verwendet.

Die ursprünglich im AP 2.3.5 verorteten Arbeiten konnten aufgrund der am Ende der Vorhabenlaufzeit erfolgreichen Inbetriebnahme der beiden FWEA nicht begonnen werden. Sie werden indes im Vorhaben WINSentvalid bearbeitet werden.

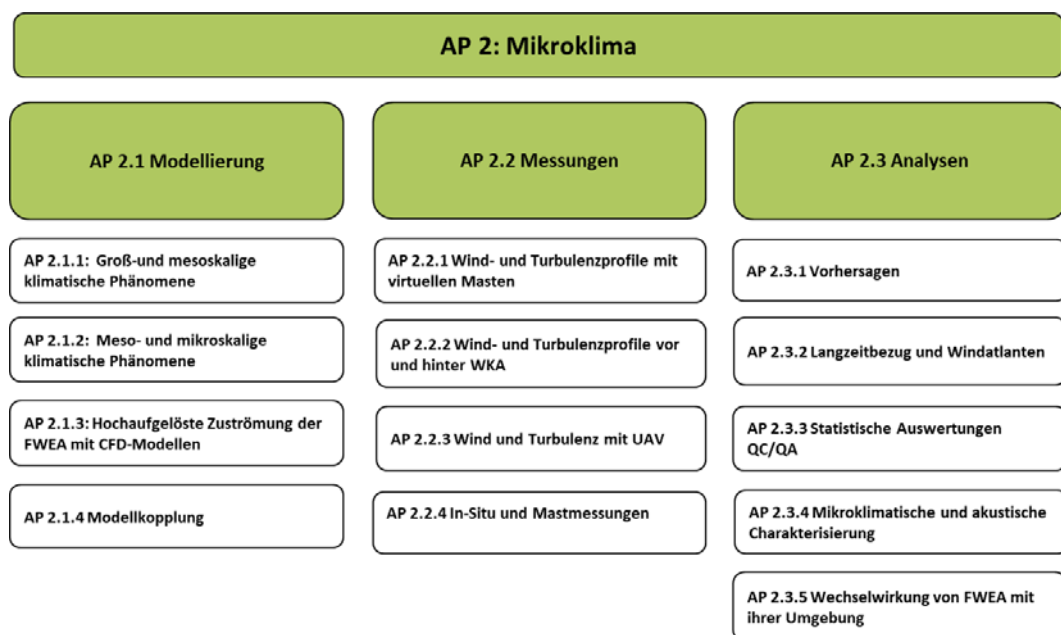


Abbildung 133: Struktur des Arbeitspakets „Mikroklima“ [ZSW]

AP 2.3.1 Vorhersagen

Datenbeschaffung

Zu Beginn des Vorhabens standen folgende Wettermodelle für WINSent zur Verfügung:

- GFS Modell des National Center for Environment Prediction (NCEP), USA
- CMC Model des kanadischen Wetterdienst Environment Canada
- AREGE Modell von Meteo France
- IFS Modell von ECMWF, Europa

Über die gesamte Vorhabenlaufzeit hinweg wurden weitere aktuelle Daten für verschiedene Wettermodelle beschafft. Es wurde auch eine Kooperation mit der Firma WEPROG vereinbart, die ein eigenes Ensemble Wettermodell mit bis zu 75 Mitgliedern betreibt. Damit standen für die Vorhersage nicht nur deterministische Vorhersagemodelle zur Verfügung, sondern auch ein umfassendes

Ensemblevorhersagemodell für probabilistische Prognosen. Für den Bezug der Daten von WEPROG wurde eine entsprechende Geheimhaltungsvereinbarung geschlossen

Mit der Änderung des DWD-Gesetzes hatte der DWD eine kostenfreie Versorgung mit DWD-Geodaten³⁵ eingeführt. Dies umfasst auch die Wettervorhersagemodelle (NWP), die vom DWD betrieben werden. Für WINSent sind hierbei die Modelle ICON-EU und COSMO-DE von Bedeutung. Die NWP-Daten des DWD sind online immer nur für den aktuellen Tag verfügbar. Daher wurde eine Software entwickelt, um die verfügbaren Daten automatisch auf das Massendatenspeichersystem des ZSW mehrmals täglich zu spiegeln und zu archivieren. Im Mai 2018 hatte der DWD darüber hinaus sein bisheriges Lokalmittel COSMO-DE auf die aktuellere Version COSMO-D2 mit einer geänderten Auflösung von 2,2 km umgestellt.

In diesem AP war auch die Nutzung von Wetterradardaten als zusätzliche Eingangsdaten für die Windleistungsprognose vorgesehen. Mit der Open Data Initiative des DWD standen entsprechend auch die Wetterradardaten des DWD online zur Verfügung. Der Standort des Windtestfelds liegt im Messbereich des Wetterradars in Türkheim (ca. 9km entfernt). Für die spätere Verwendung der Wetterradardaten für die Prognosen, wurde ebenfalls Software für die automatische Übertragung und Archivierung der DWD-Wetterradardaten zum ZSW entwickelt.

Durch Anpassungen der Wettermodelle seitens der Betreiber sind immer wieder Aktualisierungen der Softwareumgebung für den Download und die Archivierung notwendig. Im Berichtszeitraum hat z.B. der DWD größere Umstellungen bei den Modellen ICON-EU und COSMO-D2 vorgenommen, die Anpassungen der Datenprozesskette und Archivierung notwendig machten.

Eine weitreichende Umstellung beim amerikanischen Modell Gfs4 machten ebenfalls Anpassungen der Datenprozesskette und Archivierung notwendig. So hat sich durch die Umstellung des Gfs4-Modells die Datenmenge des globalen Modells verdoppelt. Die bis zum Vorhabensende aufgelaufene Datenmenge für die Wettermodelle des amerikanischen Wetterdienst NCEP, des französischen Wetterdienst Meteo France, des kanadischen Wetterdienst Environment Canada, des ECMWF und der beiden NWP Modelle COSMO-DE und ICON-EU des DWD beträgt ca. 900 TB.

Mit der Beschaffung der im Vorhaben bewilligten Systeme zur Massendatenhaltung und Datensicherung (Tapelibrary) wurde die Konsolidierung der Datenablagestrukturen stetig fortgeführt und die schon vorhandenen Daten auf das neue Datenhaltungssystem für WINSent übertragen.

Softwareentwicklung und Belernung

Es wurden erste Belernungen für ein Windparkportfolio mit allen 75 Ensemblemitgliedern durchgeführt. D.h. es wurden 75 Einzelvorhersagen für jeden Member durchgeführt und mit Belernungen mit verschiedenen deterministischen Modellen (ECMWF, Arpège Meteo France, Gfs NECP, ICON-EU DWD und HIRLAM) verglichen. Speziell im Intraday zeigen die einzelnen Member eine sehr gute Performance (vgl. Abbildung 137 für Member 20).

³⁵ <https://opendata.dwd.de/>, zuletzt zugegriffen am 09.04.2025

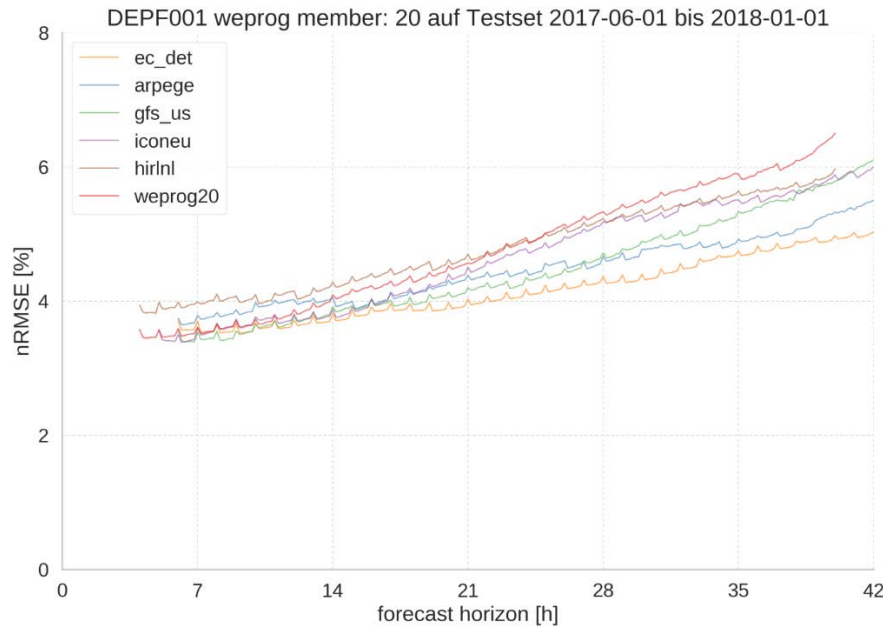


Abbildung 134: Vergleich von Windleistungsvorhersagen für ein Windparkportfolio auf Basis von Berlerungen tiefer neuronale Netze mit verschiedenen deterministischen Wettervorhersagemodellen (ECMWF, Arpège, GFS, ICON-EU, Hirlam) und Member 20 des probabilistischen Modells der Firma WEPROG. [ZSW]

Im Rahmen von verschiedenen Arbeiten im Bereich Prognosen wurde das übergeordnete Software-Framework zum Training von neuronalen Netzen für Windgeschwindigkeit- und Windleistungsprognosen wesentlich erweitert und das Training teilweise automatisiert. Die Entwicklung der neuen Softwareversion Learn-O-Matic Version 3.0 (LOM-V3) für die Automatisierung der Trainings von neuronalen Netzen wurde im Vorhabenzeitraum abgeschlossen. Hierzu wurden für die meisten Softwarekomponenten bzw. -module sog. Unittests implementiert, so dass bei später notwendigen Anpassungen und Weiterentwicklungen des Softwareframeworks die einzelnen Softwaremodule einfach und möglichst vollständig getestet werden können. Es wurden auch sogenannte End-to-End Tests für die gesamte Prozessierungskette erfolgreich durchgeführt. LOM-V3 konnte anschließend in den Produktivbetrieb für die Belernung der verschiedenen neuronalen Netze für die Prognose (AP 2.3.1), für den Langzeitbezug (AP 2.3.2) und für die statischen Auswertungen und Outlier-Detektion (AP 2.3.3) überführt werden.

Während der Laufzeit wurden Verfahren für die Komprimierung von Wettermodelldaten durch Convolutional Neural Network (CNN) Schichten getriebene Variational Auto-Encoder (VAE) entwickelt. Da es sich bei den Wettermodelldaten um 4-dimensionale Felder handelt (3 Raumdimensionen plus Vorhersage(zeit)dimension), wird dieser neue Ansatz für Prognosen intern unter dem Namen „Tesseract“ geführt. Die CNN-VAE Kombination wandelt dabei sechs Stunden lange Vorhersagezeitreihen eines meteorologischen, prognostischen Parameters mit 128x128x7 Modellknoten in einen sogenannten „Z-Code“ um, der je nach Experiment zwischen 128 und 2048 Werte umfasst. Zumindest im Intraday- und Day-ahead-Bereich ergeben sich durch die komprimierten Wettermodelldaten nach Tesseract Verbesserungen von bis zu 0,3 Prozentpunkten gegenüber bisherigen Prognosemodellen.

Insbesondere für Messkampagnen sollte eine Möglichkeit bestehen, meteorologische sowie Windleistungsprognosen für das Testfeld in Echtzeit zu beziehen.

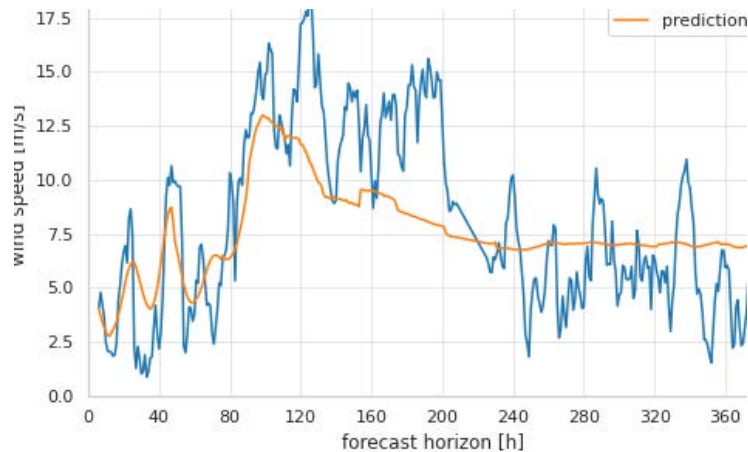


Abbildung 135: Beispielprognose für die Windgeschwindigkeit auf einer Höhe von 72 m über Grund.

Es ist zu erkennen, dass das Vorhersagemodell in den ersten Stunden noch kurzfristige Schwankungen der Windgeschwindigkeit nachvollzieht, während es später nur noch wenig vom langjährigen Mittelwert abweicht. [ZSW]

Obwohl die Prognosen natürlich auch in der WINSSENT-Datenbank archiviert werden, hängt deren Aktualität maßgeblich von verschiedenen externen Wetterdiensten ab, die entsprechende Wettermodelle betreiben und mit unterschiedlicher Verzögerung auf deren Servern bereitstellen. Über eine Clientsoftware konnten gezielt Anfragen für eine bestimmte Art von Prognose (z.B. Windgeschwindigkeit, Leistung WEA, etc.) an das Prognosesystem gestellt werden, so dass die aktuell verfügbare Prognose für die angefragten prognostischen Variablen ausgeliefert wurde. Hauptaufgabe des Prognosesystems am ZSW in einem derartigen Ablaufschema war dann

1. die aktuellen Wettermodelldaten sofort nach Verfügbarkeit von den externen Servern der Wetterdienste herunterzuladen,
2. Wettermodelldaten zu extrahieren und als Eingabedaten für die ML-basierten Prognosemodelle aufzubereiten,
3. die Prognosen mit Hilfe der am ZSW trainierten ML-Modelle zu berechnen,
4. diese in der Datenbank abzulegen, sowie
5. den Abonnenten des Prognoseservice die gewünschten Prognosen per Message Passing zukommen zu lassen.

Um die Grenzen des Machbaren im Bereich der Leistungsprognosen auszuloten wurde das Wetter eines ganzen Jahres über dem Testfeld mit dem Wettermodell WRF simuliert. Das WRF Setup der beiden Arbeitspakete 2.1.1 und 2.1.2 diente dabei als Basis und die Daten als Referenzsimulation. Die ERA5 Daten des ECMWF dienten hingegen als Randdaten. Die Simulation umfasste das gesamte Jahr 2020. Das WRF Setup bestand aus drei Domänen mit Maschenweiten von jeweils 9000, 3000 und 1000 m. Die äußerste Domäne umspannte dabei praktisch ganz Europa. Der Umfang der innersten Domäne ist in Abbildung 139 dargestellt.

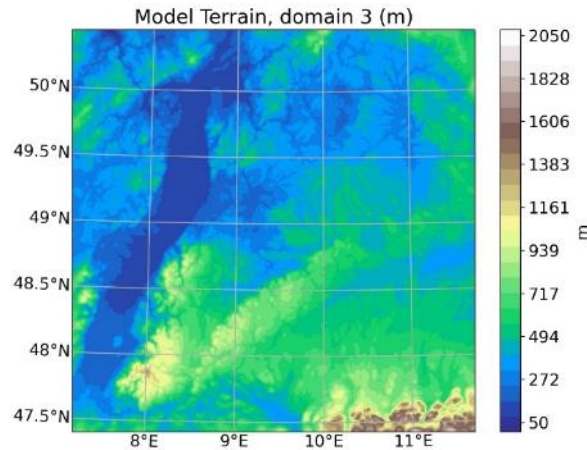


Abbildung 136: Die dritte Domäne des Jahreslaufes. [ZSW]

Zur Validierung des Jahreslaufes wurden Zeitserien an den Punkten der beiden Messmasten, sowie an den Koordinaten von DWD-Stationen im Umfeld von WINSent erstellt und mit Messdaten verglichen. Für die Messmasten wurde der Wind auf 100-m über Grund verglichen; für die DWD Stationen der Wind aus 10-m Höhe, da von den DWD Stationen keine Daten aus größerer Höhe vorlagen. Die hinzugezogenen, weiteren DWD-Stationen waren: Stötten, Winterbach/Remstal, Kaisersbach-Cronhütte, Stimpfach-Weipertshofen, Harburg, Günzburg, Ulm-Mähringen, Münsingen-Apfelstetten und Stuttgart-Echterdingen. Als statistische Maße dienten Bias, mittlerer absoluter Fehler (mae), Korrelationskoeffizient (r), mittlerer absoluter prozentualer Fehler (mape) und mittlerer quadratischer Fehler (rmse: root mean square error). Kurz zusammengefasst zeigte die Analyse, dass die WRF-Simulation mit den Messungen relativ gut übereinstimmt. Speziell am WINSent Standort fand sich nur ein sehr kleines Bias (-0.11 und 0.04 m/s) und eine hohe Korrelation von etwa 74 %. Angesichts der immer noch relativ groben Auflösung von 1 km und dem komplexen Gelände am Standort waren diese Werte sehr zufriedenstellend. Bei den DWD-Stationen zeigten sich höhere Abweichungen, welche auf die Tatsache, dass der 10-m Wind und nicht der 100-m Wind verglichen wird, zurückzuführen sind. Grundsätzlich sind nahe am Boden aufgrund der Reibung sowie nicht aufgelöster topographischer Variationen deutlich höhere Abweichungen normal. Biase, welche 0.7 m/s nicht überstiegen, lagen daher durchaus im zu erwarteten Bereich. Einen Einblick für den WINSent-Standort zeigt Abbildung 140. Die Histogramme der Windgeschwindigkeit am nordwestlichen Messmast in 100 m Höhe und der WRF-Modellsimulation liegen praktisch übereinander. Damit waren diese WRF-Simulationen als Referenz für das Testfeld geeignet.

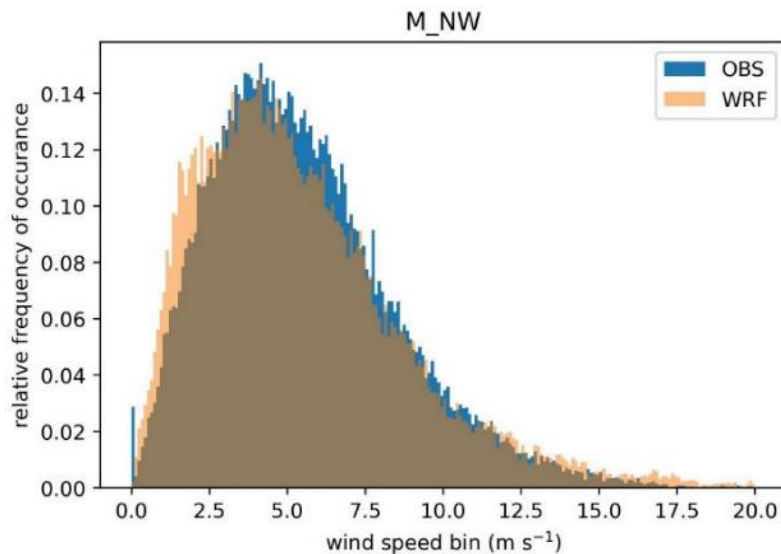


Abbildung 137: Histogramme der gemessenen (OBS) und simulierten (WRF) Windgeschwindigkeit im Vergleich. [ZSW]

Ferner wurde die Untersuchung des Einflusses von Wetterradar-Aufnahmen auf die Windleistungsvorhersagen anhand der DWD-Wetterrardaten Türkheim³⁶ abgeschlossen und in einer zweiten Experimentreihe von 2-dimensionalen auf 3-dimensionale Messungen erweitert. Hierzu wurden Volumenscans der DWD-Wetterradarstation Türkheim in einem ersten Schritt über den Zeitraum vom 2019-01-01 bis 2020-08-31 aufbereitet. Da die Datenmenge als Ganzes nicht mehr von der Serverinfrastruktur des ZSW zu verarbeiten war, wurden die aufbereiteten Daten in ein gängiges binäres Datenformat überführt und zwischengespeichert, so dass diese stückweise für die Belernung eingelesen werden konnten. Die bisherigen Modelle wurden auf 3-Dimensionale CNN-Faltungsschichten (folgend Conv3D) angepasst. Hierbei wurde iterativ vorgegangen und schrittweise verschiedene Modellvarianten trainiert und ausgewertet. Auch dieser Ansatz konnte keine wesentliche Verbesserung der Modelle aufzeigen. Da weder mit den Radarkomposit-Daten, noch mit den Volumen-Scans eine gegenüber den COSMO-D2-Daten verbesserte Vorhersage prognostiziert werden konnte, wird davon ausgegangen, dass mit klassischen CNN-Varianten der bereits sehr guten allgemeinen Vorhersage keine Verbesserung in den seltenen, aber relevanten Bereichen stark ansteigender Windspitzen abgewonnen werden kann. Neue Ansätze über Transformer-Modelle³⁷ könnten hier Abhilfe schaffen, da diese sich nicht nur auf den Gesamtkontext der Daten konzentrieren, sondern situationsabhängig Entscheidungen treffen, welche bei entsprechendem Design genau diese Windspitzen enthalten könnten. Transformer-Netzwerke sind allerdings aufwändig zu parametrisieren und ihre Applikation in diesem Kontext ist wissenschaftliches Neuland, weshalb sie den Rahmen des WINSent-Vorhabens für diese Untersuchung gesprengt hätten.

³⁶ <https://www.dwd.de/DE/leistungen/radarprodukte/radarprodukte.html>, zuletzt aufgerufen am 10.04.2025

³⁷ <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/file/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Paper.pdf>, zuletzt aufgerufen am 10.04.2025

AP 2.3.2 Langzeitbezug und Windatlanten

Der Langzeitbezug von Windmessdaten oder Erzeugungsdaten von Windkraftanlagen wird mit dem sogenannten Measure-Correlate-Predict (MCP) Verfahren hergestellt. Bei diesem Verfahren werden zwei Datensätze verwendet. Ein klimatologischer Datensatz, welcher mindestens 30 Jahre umfasst, sowie ein Datensatz von Messdaten, welcher mindestens ein Jahr umfassen sollte um jahreszeitliche Variationen einzubeziehen. Dieser Zeitraum muss auch im klimatologischen Datensatz vollständig enthalten sein. Standortspezifische Besonderheiten schlagen sich in den Messdaten nieder, jedoch wird die Variabilität der Jahre nicht erfasst da die Zeitreihen zu kurz sind. Der klimatologische Datensatz wiederum enthält diese Variabilität, ist aber in der Regel zeitlich und räumlich gröber aufgelöst, weshalb standortspezifische Besonderheiten nicht oder nur unzureichend enthalten sind. Besonders im komplexen Gelände wäre ein Langzeitbezug der ausschließlich auf klimatologischen Daten beruht, fehlerhaft. Im MCP Verfahren werden nun die Zeitreihen der beiden Datensätze im Überlappungszeitraum miteinander korreliert. Damit können die standortspezifischen Messzeitreihen auf einen klimatologischen Zeitraum ausgedehnt werden. Die ermöglicht eine wesentlich genauere Abschätzung der Windressource bzw. der erwarteten produzierten Leistung als es nur mit einem klimatologischen Datensatz möglich wäre.

Im Vorhaben WINSent wurden für die MCP für die klimatologischen Zeitreihen Reanalysedaten des MERRA-2³⁸ der NASA und des ERA5³⁹ Datensatzes des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) verwendet. Diese Datensätze basieren auf meteorologischen Modellen mit einer Auflösung von 50 bzw. 31 km und liegen stündlich vor. Der MERRA-2 ist ein sehr häufig verwendeter Datensatz, daher wurde dieser verwendet um eine Vergleichbarkeit unserer Analysen mit anderen zu gewährleisten. Es ist jedoch zu erwarten, dass der ERA5 Datensatz aufgrund der feineren Auflösung bessere Ergebnisse liefert. Wir haben uns dazu entschlossen, die MCP mit beiden Datensätzen durchzuführen um diese vergleichen zu können.

Aus beiden Reanalysemodellen wurden die 4 nächsten Modellgitterpunkte um das Testfeld extrahiert und auf den Ort des NW-Messmasts linear interpoliert. Für diese Punkte wurden Druck, Temperatur, Feuchte, Windrichtung, horizontaler Wind und für MERRA-2 auch Grenzschichthöhe auf allen verfügbaren Leveln in den untersten 250 m über Grund als Inputs gewählt. Als Targets dienten stündliche Daten für Turbulenz, horizontale oder vertikale Windgeschwindigkeit des nordwestlichen Messmasts des WINSent-Standorts. Die Messdaten wurden – sofern nicht anders angegeben – auf Nabenhöhe (73m über Grund) gewählt. Für einen Vergleich der beiden Reanalysemodelle, wurden DNNs im Zeitraum 31.07.2018 – 31.12.2019, wie in *Sehnke et al. (2013)* beschrieben, trainiert. Das Validationsset umfasste ca. 15% dieses Zeitraums und besteht aus nicht zusammenhängenden Sequenzen über den gesamten Zeitraum verteilt. Das Testset umfasste den Zeitraum 01.01.2020 – 31.12.2020.

Die Qualität der MCP wurde anhand des normierten RMSE bewertet. Dieser betrug für das Validationsset für das mit MERRA-2 trainierte Netz 8,73 % und für jenes mit ERA5 Daten 7,23 %. Die bessere Vorhersagegüte mit ERA5 Daten spiegelte sich auch im Testzeitraum wieder. Hier beträgt der RMSE mit MERRA-2 Daten 9,45 % und bei ERA5-Daten 7,09 %. Bei der Analyse der Windverteilungen (Abbildung 141) zeigte sich, dass bei Verwendung von MERRA-2 Daten die Windgeschwindigkeit

³⁸ <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/merra-2/>, zuletzt zugegriffen am 22.04.2025

³⁹ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era5>, zuletzt zugegriffen am 22.04.2025

zwischen 2 und 4 m/s, sowie über 12 m/s überrepräsentiert ist. Die ERA5 Daten wiederum zeigten eine zu große Häufung zwischen 4 und 6 m/s.

Sehr niedrige und sehr hohe Windgeschwindigkeiten wurden also von beiden Netzen unterrepräsentiert, ein für neuronale Netz typisches Verhalten. Da das Netz lernt den RMSE zu minimieren werden sehr niedrige und sehr hohe Werte, die in der Regel auch weniger oft vorkommen, vom Netz aufgrund der Unsicherheit eher vermieden. Für die Vorhersage der Windressource bzw. des Jahresertrags ist eine korrekte Verteilung jedoch extrem wichtig. Aus diesem Grund wurde auf die Ergebnisse der Netze eine Relative Distribution Error Skalierung angewendet. Dabei wurden die normierten Verteilungen so zwischen 0 und 1 skaliert und beschnitten, dass der RMSE der Verteilungsvektoren von Netz und Messung minimal wurde. Diese relativ einfache Methode hatte sich auch gegenüber komplizierteren Ansätzen als zielführend und robust erwiesen.

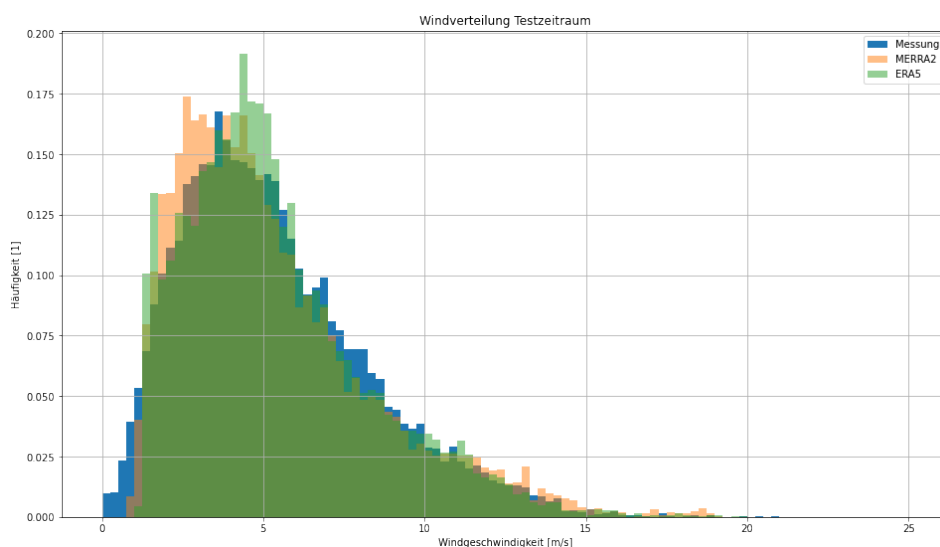


Abbildung 138: Windverteilung der Messdaten auf Nabenhöhe, der DNN Berechnungen mit MERRA-2 Daten und der Berechnungen mit ERA5-Daten im Testzeitraum. [ZSW]

Aufgrund der besseren Vorhersagegüte des Netzes mit ERA5-Daten wurden die folgenden Auswertungen ausschließlich für diese Daten durchgeführt.

Da die Bewertung eines potentiellen Standortes mit hohem Messaufwand verbunden ist, wurde im Folgenden evaluiert, wie viele Monate Messdaten benötigt werden, um eine belastbare Aussage über den Langzeitbezug zu erstellen. Für die MCP wurden daraufhin DNNs mit ERA5-Daten von 6, 9, 12 und 18 Monaten trainiert. Die Zeiträume wurden so gewählt, dass sie an den Testzeitraum anschließen. Tabelle 3 zeigt die sich ergebenden Energiefehler und RMSE bezogen auf den Testdatensatz.

Tabelle 2: Energiefehler und RMSE auf dem Testzeitraum für verschiedene Trainingszeiträume

	6 Monate	9 Monate	12 Monate	18 Monate
Mittlerer Energiefehler	-12,64 kWh	1,65 kWh	1,2 kWh	-0,32 kWh
RMSE Testdatensatz	8,4%	8,8%	7,2%	7,09%

Wie erwartet, war der RMSE mit mindestens einem Jahr Trainingsdaten besser als mit 6 oder 9 Monaten. Es zeigte sich auch, dass die Vorhersagegüte besser wird, wenn mehr als ein Jahr an Trainingsdaten verwendet wird, jedoch kann bei 18 Monaten nicht ausgeschlossen werden, dass sich ein Winterbias einschleicht. Die Vorhersage mit 12 Monaten sollte daher als Referenz herangezogen werden, bis zwei Jahre an Trainingsdaten zur Verfügung stehen.

Neben dem mittleren Energieertrag wurde die Vorhersagbarkeit der Turbulenz untersucht. Für den Standort WINSent ist diese wegen der bewaldeten Hangkante höher als im Flachland. Mit Hilfe der MCP wurde auch dieser Parameter über 28 Jahre zurückgerechnet. Wie erwartet korreliert die Turbulenz sehr stark mit der Windgeschwindigkeit, weshalb diese in den Winterhalbjahren und windstarken Jahren erhöht ist.

Zuletzt wurde noch untersucht, wie stark der Vorhersage sich mit der Höhe ändert. Wegen der Reibung nimmt die Windgeschwindigkeit in Bodennähe rasch ab. Da es in der Nähe des Standortes auch Wald gibt, tritt dieser Effekt bereits in höheren Schichten auf (El Bahlouli, 2019). Die MCP wurde für die Höhen 10, 45, 50, 59, 75, 86 und 100 m über Grund durchgeführt und der normierte RMSE ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Der RMSE nimmt zu, je geringer der Abstand zum Boden ist. Näher am Boden ist die natürliche Variabilität wegen zunehmender Reibung wesentlich höher, was eine gute Vorhersage schwieriger macht. Trotz dieser Schwierigkeiten ist der RMSE auch für das unterste Level unter 10 %.

Tabelle 3: Normierter RMSE für verschiedene Höhen

Höhe	10 m	25 m	50 m	59 m	75 m	86 m	100 m
nRMSE [%]	8,817	8,71	8,86	7,53	7,55	7,82	7,8

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Vorhersage des Langzeitbezuges mit Hilfe von MCP für den Standort WINSent gut funktioniert. Der Fehler lag auf Nabenhöhe bei unter 8 % und kann mit einem 2-jährigen Trainingsdatensatz vermutlich noch verbessert werden. Damit sind belastbare Vorhersagen des zu erwarteten Energieertrages sowie der Variabilität möglich.

Erwähnte Literatur:

Sehnke, F.; Strunk, A.; Felder, M.; Brombach, J.; Kaifel, A.; Meis, J. (2013). Wind Power Resource Estimation with Deep Neural Networks. 563-570. 10.1007/978-3-642-40728-4_70.

El Bahlouli, A.; Rautenberg, A.; Schön, M.; zum Berge, K.; Bange, J.; Knaus, H.; Comparison of CFD Simulation to UAS Measurements for Wind Flows in Complex Terrain: Application to the WINSent Test Site. *Energies* **2019**, *12*, 1992. <https://doi.org/10.3390/en12101992>

AP 2.3.3 Statistische Auswertungen und QC/QA mit Modellen

Für das kontinuierliche Monitoring der Messdaten wurde im Software-Framework Learn-O-Matic Version 3.0 (LOM-V3) des ZSW (vgl. AP 2.3.1) eine sogenannte Outlier-Detection entwickelt und eingebunden. Dieser Detektionsmechanismus schließt selbstständig von numerischen Wettermodelldaten, zum Beispiel WRF oder WRF-LES, oder anderen korrelierten Messungen auf die gemessenen Daten und deren Unsicherheiten. Somit kann zum einen die Qualität der Daten überprüft werden, indem modellierte Größen und deren Unsicherheiten genutzt werden, um auffällige Datenpunkte zu detektieren und gegebenenfalls zu markieren oder zu entfernen. Zum anderen können die trainierten Modelle in einer sogenannten Anomaly-Detection verwendet werden, welche bei laufender Datenaufzeichnung einen Alarm triggert, wenn beispielsweise ein Sensor ausfällt oder Messwerte „verdächtig“ sind.

Eine erste Version des Detektionsmechanismus konnte zunächst mit Windgeschwindigkeitsdaten eines anderen Windparks getestet werden. Hintergrund war, dass bis zur Errichtung des ersten Messmasts und zur Aufzeichnung eines für die Detektion notwendigen, langen Messzeitraums einige Monate verstrichen waren, der Detektionsmechanismus jedoch bereits entwickelt war. Die Datenmenge des ausgewählten Windparks war so groß, dass sie mit Gauß-Prozessen nicht mehr bearbeitet werden konnte weshalb die auf neuronale Netze basierende Outlier-Detection erfolgreich eingesetzt werden konnte.⁴⁰

Um offensichtliche Fehler in den Messwerten einfach detektieren zu können wurden zudem Heuristiken entwickelt, welche beispielsweise den Komplettausfall eines Sensors, oder Ausreißer in den Messungen direkt selektieren können. Für die Belernung des neuronalen Netzes wurden diese Heuristiken nicht angewendet, um so die Erkennung auch dieser offensichtlichen Fehlerfälle durch die Regressionsmodelle zu ermöglichen. Die Messdaten der beiden Windmessmasten wurden für die Entwicklung der ML-basierten Qualitätskontrolle aufbereitet und in die hierzu notwendigen Datenformate überführt. Durch ein Parameter-Optimierungsverfahren (hier PGPE) wurde eine auf den Problemfall zugeschnittene Architektur eines ML-Modells erstellt und belernt, welches eine Genauigkeit von 2,045% RMSE aufweist. Anhand der Vorhersage dieses Modells konnten bereits Fehlerfälle in den Messungen detektiert werden (Abbildung 142).

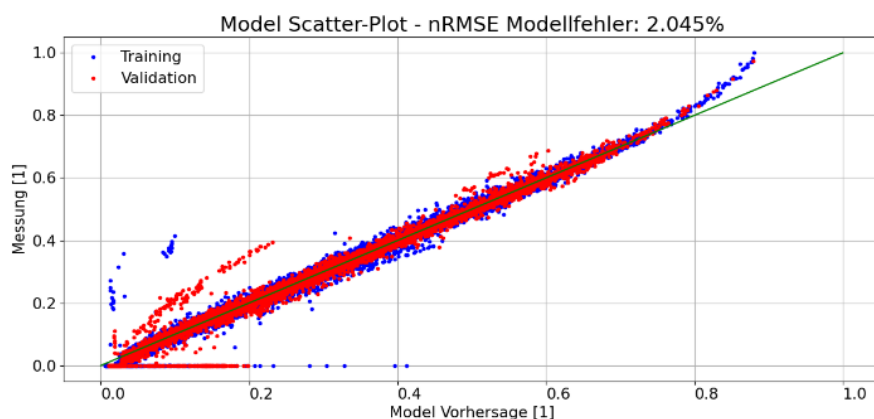


Abbildung 139: Gegenüberstellung Messung und Prädiktion der Windgeschwindigkeit für den Sensor NW-V-100. Der normierte RMSE beträgt 1,5%. [ZSW]

⁴⁰ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118302258>, zuletzt zugegriffen am 24.04.2025

Anhand der Betrachtung der Modell-Parameter (hier Gewichte des Neuronalen Netzes) konnte der Einfluss der einzelnen Eingangsgrößen bestimmt werden. Hierbei zeigt sich durchgehend die Gemeinsamkeit, dass Messungen der benachbarten Windgeschwindigkeits-Sensoren die größten Einflüsse auf die Prädiktion der Modelle haben.

Die Überprüfung der Messwerte nach bisher beschriebener Methode lieferte bereits gute Ergebnisse. Die Betrachtung der Eingangsparameter zeigte jedoch, dass Messungen der Windrichtung kaum Einfluss auf die Prädiktionsgüte haben. Um den Modellen das Erlernen von Zusammenhängen zwischen unterschiedlichen Messmasten zu erleichtern, wurden die Eingangsdaten in Zeitfenster von 60 s Auflösung und jeweils 10 gemittelte Messungen vom Abstand 6 s aufgeteilt. Für den Ziel-Messwert, welcher geschätzt werden soll, wurden für die Belernung die Messwerte entfernt. Somit ergab sich ein ML-basiertes Modell mit 240 Eingangsgrößen. Auch dieses Modell wurde anhand des PGPE-Optimierungsverfahren vortrainiert, die Metaparameter wie Tiefe und Breite des Netzes bestimmt und anschließend belernt. Durch das Einbeziehen der Zeitreihen konnte der Modellfehler auf 1,5% nRMSE minimiert werden.

Im weiteren Verlauf wurde ein zusätzliches Fehler-Modell belernt, welches anhand des absoluten Schätzfehlers die Fehlertoleranz in der jeweiligen Situation erlernt. Anschließend können anhand dieser Modellvorhersage zu Beispiel durch 4-fach Standardabweichung Fehlerfälle (Messfehler der Windgeschwindigkeit) mit einer Sicherheit von 99,7 % erkannt werden. Abbildung 143 zeigt zusätzlich im orangenen Bereich die Toleranz des Fehlernetzes und mit gelben und roten Punkten markiert knapp tolerierte Messwerte bzw. vermeintliche Fehlmessungen.

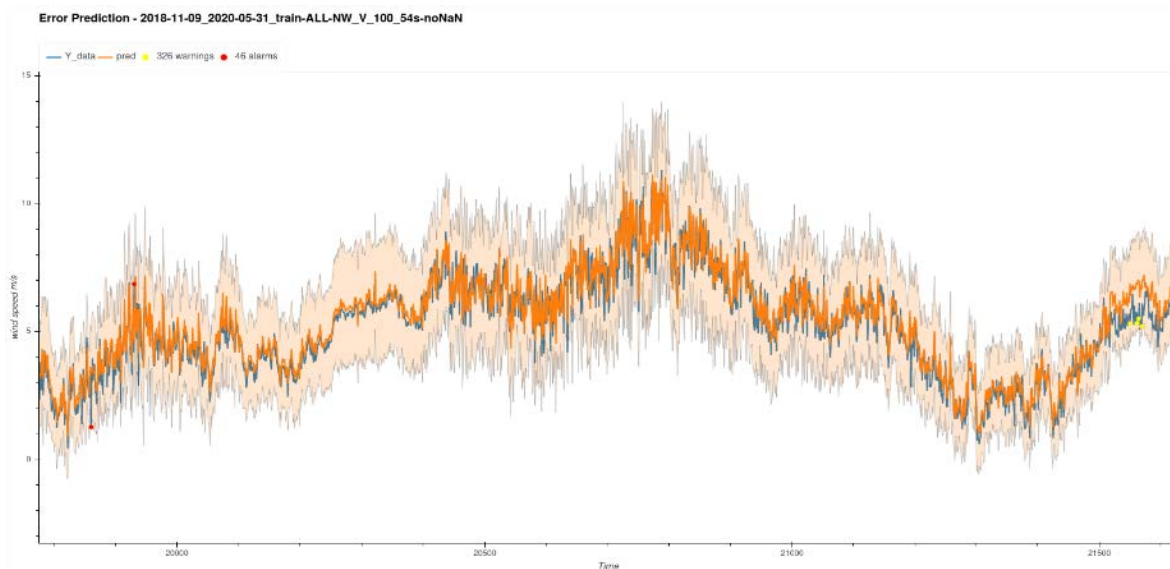


Abbildung 140: Messung der Windgeschwindigkeit (y_{data} , blau) und prädizierte Windgeschwindigkeit des DNN (pred, orange) sowie das Konfidenzintervall für der Messungen (vierfache Standardabweichung) in der 99,7% der Messungen liegen. Das Modell bewertet die Messung mit Warnung (warnings - gelbe Punkte) oder Messfehler (alarms - rote Punkte) automatisch. [ZSW]

Das Fehler-Modell in Kombination der Schätzungen anhand der ML-Modelle bietet eine weitere Möglichkeit die Messgenauigkeit im Live-Betrieb zu bewerten. Es löst aber noch nicht das Problem der Abhängigkeit benachbarter Sensoreinflüsse auf die Prädiktion, welche beispielsweise beim Ausfall dieses Sensors auch in die Qualitätsbewertung anderer Messungen streuen würde.

Um dieses Problem der gegenseitigen Einflüsse zu entkoppeln, wurden weitere Modelle untersucht. Als eine geeignete Methode wurde ein Autoencoder ausgewählt, welcher in erster Linie die Aufgabe der Datenbereinigung im Hinblick auf Fehlmessungen übernimmt. Auch hier dienten dieselben 240 Eingangsgrößen aus den Zeitreihen der o.g. ML-Modelltrainings, welche zusätzlich an einigen Stellen durch Rauschen oder Ausfall der Werte verfälscht wurden. Abgebildet werden diese Eingangswerte durch den Autoencoder auf dieselben korrekten unverfälschten Werte als Ausgangsgrößen. Somit erlernt dieses Modell möglichst das Bereinigen der Messwerte.

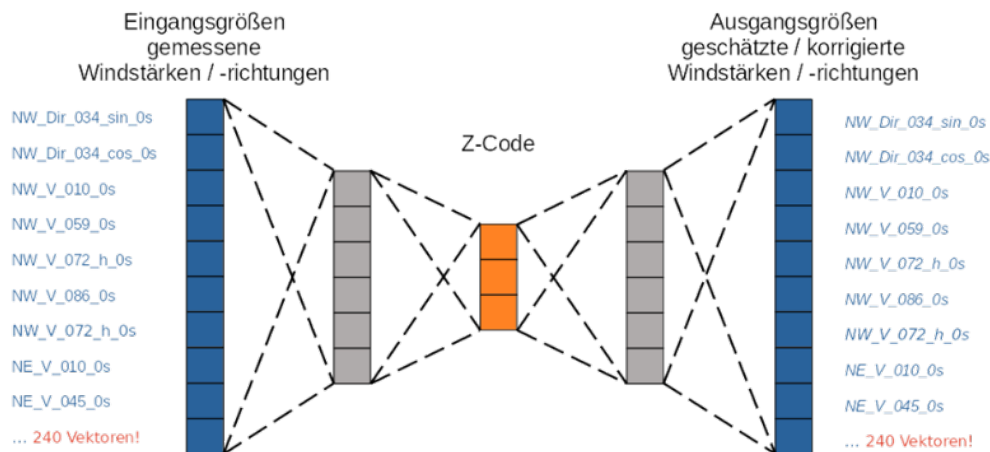


Abbildung 141 Autoencoder Architektur zur „Bereinigung“ der Messdaten. Alle 240 Eingangsgrößen werden hier teilweise naturell, teilweise künstlich fehlerbehaftet auf dieselben nur naturell fehlerbehafteten Messungen abgebildet. Durch mehrere Iterationen wird somit das „Bereinigen“ der Daten erlernt und auch ein Modell für einen virtuellen Sensor erstellt. [ZSW]

Das Modell bricht die Eingangsinformation über mehrere Faltungsschichten auf eine niedrigere Dimension herunter (Z-Code), aus welcher die neue Information im Modellausgang wieder rekonstruiert werden müssen (Abbildung 144). Dieses Vorgehen ermöglichte die Entkopplung der gegenseitigen Abhängigkeit einzelner Eingangsgrößen.

In der direkten Gegenüberstellung wies das Autoencoder-Modell eine schlechtere Schätzgenauigkeit auf, als die klassischen ML-Modelle (1,98% RMSE). Allerdings erwies es sich als deutlich robuster bei Ausfall einzelner Messsensoren. Weiterer Vorteil ist, dass ein einzelnes Autoencoder Modell direkt alle Sensorwerte schätzen kann, wohingegen die o.g. dedizierten ML-Modelle für jeden Sensor separat trainiert und in der Qualitätssicherung verwaltet werden müssen. Die neuen ML-basierten Methoden auf Basis von Autoencodern für die Qualitätskontrolle der Windmessmastdaten wurden in einem weiteren Schritt in die gesamte Datenprozesskette auf Basis von Prefect (vgl. AP 1.3.3) eingebunden.

II. Eingehende Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zu den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind gemäß der Liste der Gegenstände folgende zu zählen:

1	Windmessmast 1
2	Windmessmast 2
3	Windmessmast 3
4	Windmessmast 4
5	WMM Sensorik und Betriebsmittel
6	FWEA Lizenz
7	FWEA (2 Stück)
8	Messtechnik FWEA 1
9	Messtechnik FWEA 2
10	Eddy-Kovarianz
11	3 Long-Range Lidargeräte
12	Ceillometer
13	Arbeitssicherheit
14	Feldausstattung und Arbeitsmittel
15	HIL-Steuerung
16	Hardware Seismik
17	Datenbankserver, Speichersysteme und Archivierung
18	DEM von LGL
19	GPU Server für DNN/CNN Belernungen
20	Server für Messdatenaufnahme und Steuerung
21	GPU K80 Server für WRF
22	Messsensorik
23	Dachkonstruktion
24	HIL und Modifikation FWEA

II. Eingehende Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Während der Vorhabenlaufzeit wurden die ursprünglichen Arbeitsziele im Zuge der zwei bewilligten Aufstockungen zum Teil erweitert, angepasst oder auch aus dem ursprünglichen Vorhaben genommen, um im Vorhaben WINSentvalid (FKZ:03EE2048A-F, BMWK) bearbeitet zu werden. Die Inhalte samt den gesteckten Zielen der Arbeitspakete wurden zum überwiegenden Großteil erreicht.

Zusätzlich sei hier angemerkt, dass trotz unvorhersehbarer und unverschuldeter Vorkommnisse, wie zum Beispiel Widerspruch und Klage gegen die erteilte BImSchG-Genehmigung, Firmeninsolvenzen, die COVID-19 Pandemie und der Angriffskrieg auf die Ukraine das Testfeld schlussendlich mit all seinen Infrastrukturen und seiner geplanten Ausstattung an dem im Vorhaben KonTest (FKZ:0325656A-D, BMWi) eruierten Standort nahe der Steilstufe, dem Albtrauf, auf der Schwäbischen Alb realisiert werden konnte – wenngleich auch mit erheblich zeitlichem Verzug. Kostensteigerungen konnten zum Beispiel durch den Eigenbau der FWEA und durch die Verwendung gebrauchter Komponenten vermindert werden, oder wurden durch weitere Aufstockungsmittel weitestgehend kompensiert.

Durch die Tatsache, dass die FWEA schlussendlich nicht nur mechanisch selbst gebaut wurden, sondern auch die für den Betrieb notwendige Anlagensteuerungssoftware gemeinsam mit einem externen Ingenieurbüro entwickelt und im Nachgang selbst optimiert wurde, kennen die MitarbeiterInnen am ZSW buchstäblich nicht nur jede Unterlegscheibe, sondern auch jedes Fragment im Softwarecode. Dies wird für weitere Forschungsvorhaben von enormem Vorteil sein. Mit der Errichtung des WINSent Testfelds können nun weitere Forschungsaktivitäten – wie ursprünglich vorgesehen – durchgeführt werden. Die am Testfeld erhobenen Daten finden bereits heute sowohl national als auch international großes Interesse in verschiedenen Forschungsprojekten und in Tasks des IEA Wind Technology Collaboration Programms.

II. Eingehende Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Nach dem Ende des Vorhabens können sowohl wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten aufgeführt werden.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Nach dem Vorhaben (ab 2024) steht der gesamten Windenergie-Community (WEA-Hersteller, Zulieferern, Start-ups, Hochschulen, Forschungseinrichtungen, etc.) eine in dieser Form einzigartige Windenergie-Forschungsplattform in bergig-komplexem Gelände zur Verfügung. Die Plattform bietet der Industrie die Möglichkeit, technische Innovationen zu testen und weiterzuentwickeln.

Durch den uneingeschränkten Zugriff auf die Anlagensteuerung und Betriebsführung können beispielsweise neue Sensoren, Regleralgorithmen oder Komponenten durch das ZSW als Betreiber implementiert und getestet werden. Durch das eigene, aufgebaute Know-How ist diese Implementierung direkt und vergleichsweise unkompliziert umsetzbar, da man nicht auf das Wissen und die Verfügbarkeit externer Dienstleister angewiesen ist. Dies scheint gegenüber anderen Forschungsparks von Vorteil zu sein.

Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber, Stadtwerke und Direktvermarkter können von verbesserten Wind- und Einspeisevorhersagen für Standorte in bergig-komplexem Gelände profitieren, welche im Zuge des Vorhabens weiterentwickelt und optimiert wurden. Durch die Verbesserung der Vorhersagbarkeit der Windgeschwindigkeit und Windleistung an Standorten in bergig-komplexem Gelände wird ein wesentlicher Beitrag zur Netzintegration der Windenergie geleistet, die mit zunehmender Durchdringung der erneuerbaren Energie im Strommarkt immer wichtiger wird. Die Weiterentwicklungen werden in das vom ZSW betriebene, operationelle Prognosesystem implementiert und auf dem Markt als Dienstleistung angeboten (ab Mitte 2025).

Nach dem Vorhabenende können Windparkprojektierer und -betreiber sowie Gutachter von den während des Vorhabens weiterentwickelten MCP-Verfahren für Langzeitbezug für Standorte in bergig-komplexem Gelände profitieren, welche gegen Mitte 2025 der Vermarktung zugeführt werden sollen. Die Verfahren sind auch auf andere Gebiete in berg-komplexem Gelände übertragbar und tragen damit zum weiteren wirtschaftlichen Ausbau der Windenergie in den deutschen Mittelgebirgen sowie vergleichbaren Regionen in Europa und weltweit bei: Die Vermarktung dieser MCP-Verfahren soll wie auch die Vermarktung der Wind- und Einspeisevorhersagen über einen Wetterdienstleister erfolgen.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Durch die Veröffentlichung eines Großteils der Messdaten (open-data) und im Folgenden (ab Mitte/Ende 2026 im Zuge des Vorhabens WINSentvalid) auch eines validierten, numerischen, aero-elastischen Computermodells samt Basis-Forschungsregler (open-source) bietet das Testfeld Vorteile

gegenüber anderen Forschungsparks und Testfeldern. Bereits schon jetzt finden die Daten in geförderten nationalen und europäischen Vorhaben Verwendung und werden in Tasks des IEA Wind Technology Collaboration Programms genutzt. Es ist davon auszugehen, dass in den folgenden Jahren die Nutzung der Daten und des Testfelds steigen wird (ab Vorhabensende bis mind. 2030).

Ein Alleinstellungsmerkmal ist neben der besonderen Ausstattung — zwei für die Forschung modifizierte und zugängliche Windenergieanlagen, Messmasten, Lidar-Systeme und weitere Freifeld-Sensorik — auch die besondere Lage an einer Steilstufe (Albtrauf) im bergig komplexen Gelände. Die Strömungsbedingungen sind entsprechend herausfordernd, jedoch nicht außergewöhnlich, so dass unterschiedliche numerische Strömungsmodelle für Standorte in bergig-komplexem Gelände mithilfe von Messdaten verbessert werden können. So sind für 2025/26 Benchmarks im Zuge des IEA Wind TCP Tasks 57 „JAM“ geplant, in dem Daten der Messmasten, Lidar-Systeme und Forschungsanlagen vom WINSent Standort genutzt werden und Strömungsmodelle der Industrie und Wissenschaft verglichen und verbessert werden.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Vorhabens wurden in Fachzeitschriften, im Rahmen von nationalen und internationalen Vorträgen und Posterbeiträgen, Fachtagungen, Konferenzen und Messen veröffentlicht. Seit Beginn des Gesamtvorhabens wurde zudem die wissenschaftliche Kompetenz der im süddeutschen Forschungscluster WindForS vereinigten Partner (öffentlich geförderte Forschungseinrichtungen, Universitäten und Hochschulen) im Hinblick auf die Windenergienutzung im Binnenland gestärkt. Damit werden der Windenergiebranche und anderen Nutzergruppen zusätzliche, kompetente Ansprechpartner im eigenen Land geboten

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die weitere Nutzung des WINSent-Testfeldes durch die Industrie und Forschungseinrichtungen wird aufgrund der während der Vorhabenlaufzeit zahlreich geführten Gespräche und Rückmeldungen bei nationalen und internationalen Veranstaltungen als intensiv eingeschätzt. Die Initiierung von Folge- und Parallelvorhaben durch das ZSW wurde bereits während der bisherigen Laufzeit verfolgt. Aber es wurden auch externe Initiativen seitens der Industrie und anderen wissenschaftlichen Einrichtungen gestartet und Skizzen an unterschiedlichen Stellen eingereicht, die entweder Daten nutzen wollen oder auch einen Zugang zum Testfeld und der Ausstattung mit einplanen (seit 2023).

Das Folgevorhaben WINSentvalid wurde im Frühjahr 2023 gestartet und es werden Arbeiten fortgeführt, welche im Vorhaben WINSent nicht fertiggestellt oder aufgrund der Verzögerungen nicht begonnen werden konnten. WINSentvalid wird zum 31.12.2026 enden, und es werden bis dahin die von den Verbundpartnern entwickelten numerischen Modelle zur Modellierung der mechanischen Anlagenbelastung und zu Strömungssimulation validiert. Ein aero-elastisches Anlagenmodell und der Basis-Forschungsregler werden daraufhin der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Modelle werden für die effiziente Planung der Windenergienutzung nicht nur in Süddeutschland, sondern nahezu weltweit für komplexes Gelände eingesetzt werden können (ab Mitte/Ende 2026).

Auch für die Naturschutzforschung bietet das Testfeld einzigartige Möglichkeiten, denn durch die ZSW-seitige Zugriffsmöglichkeiten auf die Anlagensteuerung und -betriebsführung können die Effekte der Windenergieanlagen auf das Verhalten von Vögeln und Fledermäusen erstmals detailliert untersucht, beeinflusst und vor allem technische Maßnahmen zum optimierten Artenschutz entwickelt und getestet werden. Das Verschneiden der Flugdaten der Vögel und Fledermäuse mit den meteorologischen Daten und weiteren Umweltdaten soll beispielsweise dazu dienen, gängige Abschaltalgorithmen zu verbessern. Das vom BMU/BfN geförderte Vorhaben „NatForWINSent-II“ wird auch nach der Vorhabenlaufzeit von WINSent fortgesetzt werden.

II. Eingehende Darstellung der während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden während der Durchführung des Vorhabens des ZSW keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.

II. Eingehende Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.

Nutzer des Testfelds und der Daten präsentieren ihre Ergebnisse des Öfteren auf Konferenzen wie der „Wind Energy Science Conference“ (WESC) und der „Science of Making Torque from Wind“ (TORQUE), welche von der europäischen Akademie für Windenergie (EAWE) im alternierenden Zweijahresrhythmus veranstaltet wird. Die Universität Stuttgart, ein Partner im WindForS-Forschungscluster, wird sich um die Ausrichtung der TORQUE-Konferenz für das Jahr 2028 bewerben. Seitens ZSW wird geplant, entweder auf der TORQUE oder auch im Zuge einer WESC ein Mini-Symposium speziell zum WINSent Testfeld auszurichten.

Des Weiteren boten und bieten Fachjournals (z.B. Wind Energy Science) die Möglichkeit wissenschaftliche Paper, zum Teil auch peer-reviewt, mit Ergebnissen von WINSent-Forschungsarbeiten zu veröffentlichen.