

# Herausforderungen bei Vorhersage und Reduktion der Schallemission von Windenergieanlagen

Michaela Herr

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Windenergie, 38108 Braunschweig, E-Mail: michaela.herr@dlr.de

## Einleitung

Bei der Planung, Genehmigung und Akzeptanz von Onshore-Windparks steht das Thema Lärm häufig im Fokus der Diskussion, denn Windenergieanlagen erzeugen, vor allem an den sich durch die Luft drehenden Rotorblättern, Schallemissionen. Moderne Rotortechnologien ermöglichen bereits den leisen und effizienten Betrieb von Windrädern und es wird kontinuierlich an weiteren Verbesserungen geforscht mit dem Ziel, Wirtschaftlichkeit und Befürwortung der Windstromerzeugung über das erreichte Maß zu steigern.

Der vorliegende Beitrag adressiert heutige Herausforderungen bei der Vorhersage und Minderung von aerodynamisch erzeugten Schallemissionen von Windenergie rotoren [1]. Es werden aktuelle und zukünftige Forschungsfelder der DLR-Windenergieforschung im Bereich Aeroakustik vorgestellt.

## Kopplung multi-disziplinärer Effekte unter multiplen Randbedingungen

Analog zu den bestehenden großen Herausforderungen, den „Grand Challenges“ [2] in der Windenergieforschung, ist der Schall von Windturbinen ein komplexes, multiphysikalisches Phänomen. Dieses umfasst eine Wirkkaskade mit einer Spanne von relevanten Längen- und Zeitskalen über mehrere Größenordnungen. Die vollständige Beschreibung sämtlicher Mechanismen der Schallerzeugung durch aerodynamische oder mechanische Quellen verlangt einerseits die Charakterisierung der instationären atmosphärischen Zuströmung (das standortspezifische Wettergeschehen), andererseits der detaillierten Strömungsvorgänge in der Grenzschicht um das Rotorblatt. Sowohl für die Quellbeschreibung als auch für die nachgeschaltete Schallausbreitung mit verschiedenen Arten der Interaktion mit der atmosphärischen Grenzschicht und dem umgebenden Gelände sind die wechselnden Randbedingungen zu beachten, Abbildung 1.

Die Zukunft liegt vermutlich in einem verbesserten physikalischen Verständnis der Kausalzusammenhänge der skizzierten Phänomene, damit sich die Schallemissionen aus Sicht des Beobachters am Immissionsort noch besser kontrollieren lassen. Im Idealfall können (auch anhand sukzessive weiter verfeinerter psychologischer Bewertungsmaße für die Schallwahrnehmung) maßgeschneiderte Zielfunktionen für lärmarmes Design und lärmarme Betriebsmodi abgeleitet und damit bestehende Unsicherheiten bzw. Sicherheitsfaktoren in der Produktentwicklung reduziert werden. Entsprechend ergeben sich erweiterte Forschungsbedarfe in den Bereichen

- Simulationsmethoden für die gesamte Kaskade,
- Multi-disziplinärer Entwurf und Optimierung der Betriebsführung, inklusive Lärmmetriken
- Experimenteller Nachweis und Validierung.

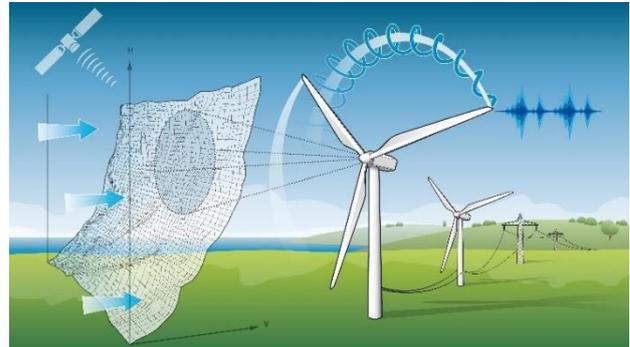


Abbildung 1: Aspekte des Virtuellen Windparks. Bild: DLR, CC BY-NC-ND 3.0.

## Schallquellen am Rotorblatt

Das Gros der vergangenen Forschungs- und Entwicklungsbemühungen konzentrierte sich auf den breitbandigen Schall der Tragflächenhinterkante, der als die dominierende Schallquelle anerkannt ist. Weitere Schallquellen sind Vorderkantengeräusch, das infolge der Interaktion des Rotorblatts mit der atmosphärischen Einströmerturbulenz entsteht, Geräusch infolge Strömungsablösung bzw. Interaktionsgeräusch bei der Passage des Blattes vorbei am Turm (alle bei niedrigen Frequenzen) oder das durch den Druckausgleichswirbel an der äußeren Blattspitze / am Winglet induzierte Blattspitzengeräusch (bei mittleren bis hohen Frequenzen). Entscheidend hierbei ist, dass die relative Wichtigkeit der Schallquellen untereinander im Betrieb der Anlage variiert und dabei fall-spezifische Off-Design-Schallquellen auftreten können.

## Modulare Modellierungs- und Analysewerkzeuge

Windenergieanlagenhersteller wenden routinemäßig schnelle semi-empirische Schallvorhersagemethoden an, welche mit zufriedenstellender Genauigkeit innerhalb bekannter Designräume kalibriert wurden. Aufgrund der Beschränkung ihrer Gültigkeitsbereiche sind solche empirischen Modelle jedoch nicht für die entwurfsunterstützende Analyse komplett neuartiger Konfigurationen geeignet.

Strömungsschallvorhersagen beruhen entweder auf aero-servo-elastischen Simulationen für Aerodynamik, Regler und Struktur oder monodisziplinär auf Strömungssimulationen für ausgewählte Betriebspunkte. Hieraus werden die für die Schallentstehung wichtigsten aerodynamischen Merkmale, z. B. relative Geschwindigkeit und Anstellwinkel der auf einen Blattabschnitt auftreffenden Strömung, als Eingaben für die Aeroakustiksimulation abgeleitet. Methoden zur Simulation der Rotorumströmung liefern Hinweise auf bestimmte Phänomene wie Ablösung, instationäre Zustände und andere relevante Wechselwirkungen, unterliegen aber je nach Modellierungsgrad spezifischen Grenzen.

Aktuelle Forschungsaktivitäten am DLR beziehen sich auf die Bereitstellung interdisziplinärer, modularer Entwicklungsumgebungen, die vorhandene monodisziplinäre Simulationswerkzeuge unterschiedlicher Modellierungskomplexität für gesamtsystemische Analysen im *Virtuellen Windpark* verknüpfen, Abbildung 1. Hierdurch sollen standortspezifische, weitestmöglich physikbasierte Vorhersagen über die gesamte Kette von der Schallentstehung über die -Ausbreitung bis zur Schallimmission, inklusive gezielter Sensitivitätsanalysen ermöglicht werden. Je nach untersuchtem Teilaspekt des *Virtuellen Windparks* können Modellierungsgrade und damit benötigte HPC-Ressourcen entsprechend der Fragestellung gewählt und Modulketten selektiv angepasst werden.

High-Fidelity-Methoden in der numerischen Strömungsmechanik (CFD) und Aeroakustik (CAA) führen einen Schritt weiter in Richtung der nächsten Generation leiserer Turbinen. Die heutigen Berechnungsmöglichkeiten mittels skalenauflösender Verfahren bieten neue Perspektiven, um detaillierte Einblicke in die physikalischen Phänomene zu erhalten. Es sind jedoch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich, um die Zuverlässigkeit und Effizienz der aktuellen CAA-Ansätze zu verbessern, damit sie im Kontext schneller industrieller Designzyklen oder in Optimierungsumgebungen anwendbar sind.

Einerseits werden nicht-empirische, aber dennoch schnelle Vorhersageschemata als Werkzeug benötigt, um den gesamten Designraum für lärmarme Entwürfe auszunutzen. Andererseits werden hochpräzise Verfahren für die Analyse bestimmter Entwurfsdetails benötigt. In diesem Sinne finden bereits vermehrt skalenauflösende Verfahren im Rahmen von Designstudien an komplexen Rotorkomponenten Verwendung, während hybride Verfahren zur Abschätzung des resultierenden Gesamtanlagengeräuschs unter Betriebsbedingungen eingesetzt werden, vgl. Abbildung 2.

Künftige Methoden sollten alle aktiven Geräuschquellen über den gesamten relevanten Frequenzbereich konsistent darstellen, einschließlich der Wirkung komplexer Geräuschminderungsmaßnahmen, und sollten auch die instationären Anström- und Ausbreitungsbedingungen berücksichtigen. Amplitudenmodulation, tieffrequenter Schall und die jeweils fallspezifischen Richtcharakteristiken sind in dieser Hinsicht wichtige Aspekte.

Das Verständnis und die Quantifizierung der Schallausbreitungsphase ist entscheidend für die Vorhersage der genehmigungsrelevanten Immissionspegel. Ein besseres Verständnis der Schallausbreitung unter atmosphärischen Bedingungen ist hier von besonderer Bedeutung. Die in der Industrie verwendeten Modelle basieren in der Regel auf empirischen oder halb-analytischen Strahlungsmethoden und funktionieren gut für Standard- und typische Bedingungen, können aber für bestimmte Geländeformen und atmosphärische Bedingungen ungenau sein. Numerische Methoden zur Verbesserung der Vorhersage von Schallimmissionen sind auf dem Vormarsch, beschränken sich aber noch auf die akademische Welt. Die Vertiefung des Verständnisses der Schallausbreitung zusammen mit der Industrialisierung fortschrittlicher numerischer Methoden zur Schallausbreitung für beliebig komplexe Standortbedingungen ist einer der Schlüssel für eine bessere

Planung und Akzeptanz von Windparks. Ein weltweit und allgemein akzeptiertes, schnelles technisches Ausbreitungsmodell würde sicherlich dazu beitragen, die Unsicherheit zu verringern und gleichzeitig die Effizienz der Planungsprozesse zu verbessern.

Bislang wurde dem Aspekt der Vorhersageunsicherheiten nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Eine detaillierte Bewertung und Dokumentation der Unsicherheiten, der Gültigkeitsbereiche der Daten und der Empfindlichkeit der Parameter (z.B. im Zusammenhang mit Modellannahmen oder verwandten Aspekten) würde dazu beitragen, Einschränkungen für insgesamt robuste Entwürfe zu definieren.

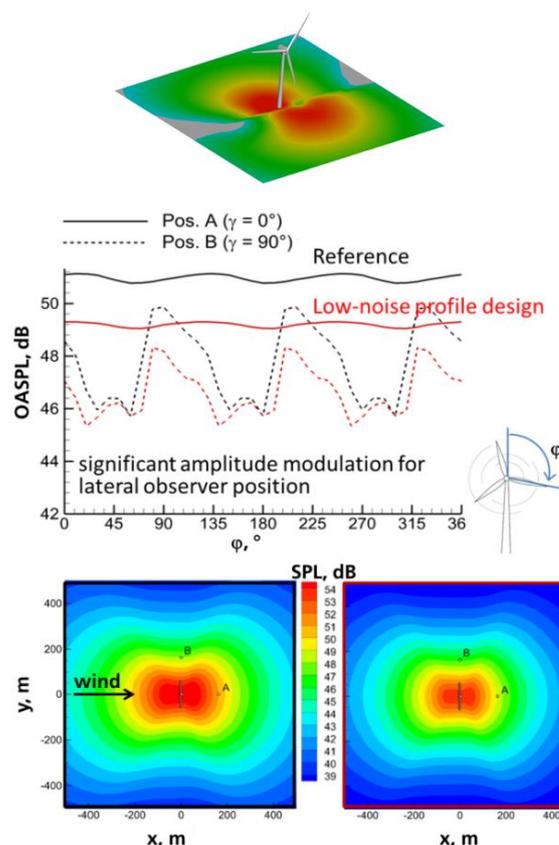


Abbildung 2: Simulation der Schallsignatur am Boden aus vereinfachter Propagationsrechnung der Emission von Hinterkantengeräusch (oben: exemplarisch instantan; unten: gemittelt über Rotorumlauf) sowie (Mitte) Variation des Gesamtschalldruckpegels OASPL mit Beobachterposition und Drehwinkel für zwei generische Turbinen [1, 3].

## Lärmarmer effizienter Windpark

Der Schall von Onshore-Windkraftanlagen wird von strömungsinduzierten Geräuschquellen an den Rotorblättern dominiert und kann daher durch eine Begrenzung der Blattspitzengeschwindigkeiten reduziert werden. Diese begrenzt jedoch die jährliche Energieproduktion und erhöht folglich die Kosten. Die Konstruktion geräuscharmer Windturbinen ermöglicht die Kontrolle der Schallerzeugung bei höheren Blattspitzengeschwindigkeiten und unterstützt damit das wichtige Ziel, die Kosten der Stromerzeugung aus Windenergie weiter zu senken.

## Design von Lärminderungsmaßnahmen

In den letzten Jahrzehnten haben ein besseres physikalisches Verständnis und technologische Fortschritte zu einer erheblichen Verringerung des Umströmungsgeräuschs der Blätter und damit des Gesamtschalls von Windkraftanlagen geführt.

Ein wichtiger technologischer Schritt in jüngster Zeit ist der inzwischen weit verbreitete Einsatz von geräuscharmen Flügelprofilen und Hinterkantenzahnungen (Sägezähnen nahe den Rotorblattspitzen, sogenannten Serrations). Diese Technologien können eingesetzt werden, um den absoluten Geräuschpegel zu senken oder um höhere Blattspitzengeschwindigkeiten zu ermöglichen.

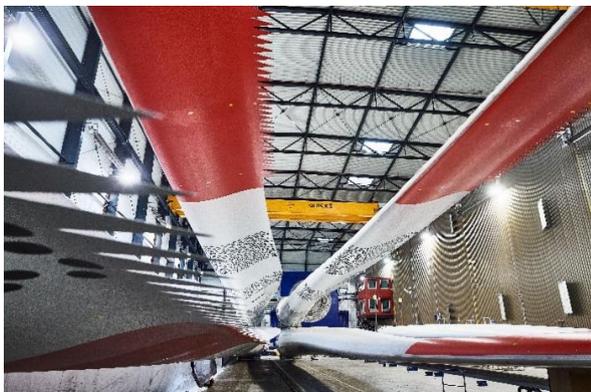


Abbildung 3: Serrations an den Rotorblättern (hier: für die Turbinen im Forschungspark *WiValdi*). Bild: DLR, CC BY-NC-ND 3.0.

Auch wenn bereits messbare Erfolge erzielt wurden, ist jede weitere Geräuschreduzierung an der Quelle ein wichtiger zusätzlicher Beitrag zur Senkung der Kosten. Denn eine Verringerung der Geräuschemission führt direkt zu höheren Blattspitzengeschwindigkeiten und damit zu einem höheren Energieertrag. Die künftige Forschung sollte sich daher mit fortschrittlicheren geräuscharmen Lösungen befassen und den Technologiereifegrad bereits positiv im Windkanal vortesteter Konzepte bis zur Anwendungsreife erhöhen. Solche alternative Geräuschminderungsmaßnahmen, wie z. B. die in Abbildung 4 gezeigten Hinterkantenbürsten, müssen sich unter den komplexen Randbedingungen des Feldversuchs erst noch bewähren. Aufgrund der bisher erreichten Reduktion des aerodynamisch erzeugten Schalls kann der Maschinenschall, z. B. von Getrieben, Generatoren und Kühlsystemen, unter bestimmten Umständen deutlicher hervortreten. Da dessen Beiträge tonal und damit störend sein können, ist auch seine Betrachtung, wieder wichtiger geworden.

Das Thema der Amplitudenmodulation wird seit über einem Jahrzehnt diskutiert. Ihr Ursprung und ihre Auswirkungen wurden teilweise (im Zusammenhang der Richtwirkung des breitbandigen Hinterkantengeräuschs) verstanden, vgl. Abbildung 2. Ihre Interaktion mit atmosphärischen Effekten oder im Windparkkontext benötigt allerdings weiterführende Untersuchungen, um gezielte Minderungsstrategien, beispielsweise eine geeignete Betriebsführung, oder unkonventionelle Rotoranordnungen abzuleiten. Ein wesentliches Problem in diesem Zusammenhang besteht in der unzureichenden Datenlage aus Feldexperimenten.

## Qualität und Verfügbarkeit von Validierungsdaten

Erreichte Simulations- und Messfähigkeiten werden anhand von systematischen Benchmarks, wie sie beispielsweise im Rahmen des IEA Wind TCP Task 39 "Quiet Wind Energy Technology" der Internationalen Energieagentur durchgeführt werden, kontinuierlich dokumentiert [4].

Die zur Verfügung stehenden Datensätze weisen allerdings in Bezug auf eine lückenlose Validierung erhebliche Defizite auf, welche im Folgenden skizziert werden.

### Windkanalstudien

Die heutigen Möglichkeiten, typische Geräuschquellen von Windturbinen in Windkanälen zu quantifizieren, sind aufgrund der im Allgemeinen sehr geringen Schallintensität des Blattumströmungsgeräuschs im Verhältnis zum Eigengeräusch des Windkanals limitiert. Es ist zwar möglich, das breitbandige Hinterkantengeräusch in Windkanälen zu messen, es sind aber zusätzliche Anstrengungen erforderlich, um den tiefen Frequenzbereich des Spektrums bei industriell relevanten Größenordnungen und Geschwindigkeiten, d.h. einen wichtigen Teil der Emission, korrekt zu extrahieren.

Für klassisches Hinterkantengeräusch besteht eine gut dokumentierte Validierungsdatenbasis aus den AIAA/CEAS BANC Workshops (BANC = Benchmark Problems for Airframe Noise Computations) [5]. Die vorhandenen Daten werden aktuell im Rahmen des IEA Wind TCP Task 39 um einen „Serrations Benchmark“, d.h. um Datensätze mit Geräuschminderungsmaßnahmen erweitert. Hierzu wurden identische Windkanalmodelle mit und ohne Serrations in verschiedenen Windkanälen über große Reynoldszahlbereiche untersucht, um die Streubreite der Messungen zu ermitteln. Eine Veröffentlichung des konsolidierten Datensatzes ist vorgesehen, sobald diese Kreuzvergleiche abgeschlossen sind.

Darüber hinaus gibt es heute nur wenige Testmöglichkeiten für Vorderkanten-Interaktionsgeräusch, Ablösegeräusch und Blattspitzengeräusch, siehe z. B. in Abbildung 4 gezeigte Blattspitzenexperiment. Die Testmöglichkeiten in Windkanälen und im Feldversuch müssen entsprechend erweitert werden, um valide Erkenntnisse über die Auswirkung atmosphärischer Turbulenz auf die Aerodynamik oder Aeroakustik zu gewinnen.

Ähnlich wie bei den Simulationstechniken ist die Frage der Messunsicherheit von Bedeutung, um die oben genannten Simulationsmethoden umfassend zu validieren. Ohne solche Informationen ist es unmöglich, die tatsächliche Simulationsunsicherheit zu ermitteln. Es besteht ein erheblicher Forschungsbedarf, um diese Lücken zu schließen. Hier empfiehlt sich die kombinierte unterstützende Anwendung von Simulations- und Messtechnologien, um die im Windkanal vorhandenen Möglichkeiten über die gegebenen Grenzen hinaus zu erweitern. Eine gesteigerte Zusammenarbeit zwischen Industrie und Wissenschaft ist wünschenswert, um diese Herausforderungen zu bewältigen.

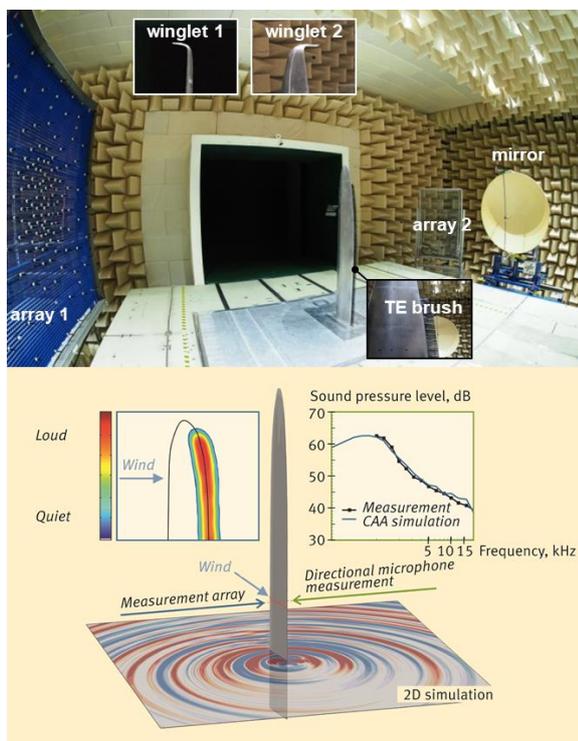


Abbildung 4: Blattspitzenexperiment im Windkanal DNW-NWB (oben) und Validierungskonzept für 2D-basierte Methode zur Vorhersage des Hinterkantenschalls (unten) [3].

### Forschungsplattform Windenergie *WiValdi*

Mit den neuen Forschungsplattformen *WiValdi* [6] im Norden und *WINSENT* im Süden Deutschlands ist eine einzigartige Forschungsinfrastruktur für zukünftige gesamtsystemische Untersuchungen geschaffen worden.

Kernziel von *WiValdi*, bestehend aus zwei 4,26-MW-Enercon-E115-EP3-Anlagen (ab 2023) und einer 0,5-MW-Experimentalturbine (ab 2025, noch im Aufbau) mit umfangreicher Anlagen- und Feldinstrumentierung, ist es, die multi-disziplinären Wirkmechanismen in einem Windpark auf höchstem wissenschaftlichem Niveau unter realen Randbedingungen zu erfassen.

Es steht in *WiValdi* eine umfassende meteorologische Feldinstrumentierung aus Anordnungen von Wind-Messmasten, Lidaren und Eddy-Kovarianzstationen zur Charakterisierung der Zuströmturbulenz zur Verfügung. Der Zugriff auf die Anlagensteuerung/-regelung sowie die weitreichende Strukturinstrumentierung der Rotorblätter können, ergänzt durch nachrüstbare aerodynamische und akustische Blattsensoren, einen signifikanten Beitrag zu den erläuterten Herausforderungen liefern.

### Zusammenfassung und Ausblick

Fortschrittliche Simulationen und Testmöglichkeiten im interdisziplinären Kontext sind wichtige Voraussetzungen für die weitere Erforschung und Entwicklung geräuscharmer und dabei gesamtsystemdienlicher Windkraftanlagen.

Notwendige Simulationen und Experimente umfassen parametrische Untersuchungen von Komponenten unter kontrollierten Windkanalumgebungen bis hin zu gesamtsystemi-

schen Analysen im neuen Forschungswindpark *WiValdi*. Das mittel- bis langfristige Ziel ist die zielgerichtete Fusionierung von Simulation und Experiment zur bestmöglichen Beschreibung der komplexen multi-disziplinären, weite Skalenbereiche umfassenden physikalischen Zusammenhänge.



Abbildung 5: Forschungswindpark *WiValdi*. Bild: DLR, CC BY-NC-ND 3.0.

### Literatur

- [1] Bertagnolio, F., Herr, M., Madsen, K. D.: A Roadmap for Required Technological Advancements to further Reduce Onshore Wind Turbine Noise Impact on the Environment. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 12 (3). Wiley -Blackwell, 2023, DOI: 10.1002/wene.469
- [2] Veers, P. et al.: Grand Challenges in the Science of Wind Energy, *Science*, 6464 (366), 2019, DOI: 10.1126/science.aau2027
- [3] Dillmann, A., Rossow, C.-C. et al.: Status Report 2015 - 2020 Part I: Research. Report of the Institute of Aerodynamics and Flow Technology. DLR-Bericht, 2020, EB 124-2020/911; EB 224-2020 C 46
- [4] Bertagnolio, F., Fischer, A., Herr, M., Appel, C., Seel, F., Lutz, T., Boorsma, K., Schepers, G., Restrepo Botero, M., Casalino, D., van der der Velden, W., Sucameli, C. R., Bortolotti, P.: Wind Turbine Noise Code Benchmark: A Comparison and Verification Exercise. *Wind Turbine Noise*, 21.–23. Juni 2023, Dublin, Irland
- [5] Herr, M., Ewert, R., Rautmann, C., Kamruzzaman, M., Bekiropoulos, D., Iob, A., Arina, R., Batten, P. Chakravarthy, S., Bertagnolio, F.: Broadband Trailing-Edge Noise Predictions—Overview of BANC-III Results. 21<sup>st</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 22.–26. Juni 2015, Dallas, TX, USA. DOI: 10.2514/6.2015-2847
- [6] *WiValdi* Homepage, URL: <https://forschungspark-windenergie.de/>