

Interner Bericht

DLR-IB-SY-BS-2024-207

**Untersuchung des Ausmaßes
von Vorderkantenerosion an
Rotorblättern von
Windkraftanlagen und die
damit verbundenen
Umweltauswirkungen**

Masterarbeit

Clara Gümbel

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Systemleichtbau



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Dokumenteigenschaften

Titel	<u>Untersuchung des Ausmaßes von Vorderkantenerosion an Rotorblättern von Windkraftanlagen und die damit verbundenen Umweltauswirkungen</u>
Betreff	<u>Masterarbeit</u>
Institut	<u>Systemleichtbau</u>
Erstellt von	<u>Clara Gümbel</u>
Beteiligte	<u>Jens Bachmann, Dr. Christina Appel</u>
Geprüft von	<u>Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann</u>
Freigabe von	<u>Dr.-Ing. Steffen Opitz</u>
Zugänglichkeit	<input checked="" type="checkbox"/> Stufe 1: Allgemein zugänglich (in elib ohne Zugangsbeschränkung) <input type="checkbox"/> Stufe 2: DLR intern zugänglich (in elib mit Beschränkung „nur DLR-intern zugänglich“)
Datum	<u>03.09.2024</u>
Version	<u>1.0</u>
Datei Info	<u>IB_2024_207_MA_Gümbel.pdf</u>



**Technische
Universität
Braunschweig**



**Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt**

Untersuchung des Ausmaßes von Vorderkantenerosion an Rotorblättern von Windkraftanlagen und die damit verbundenen Umweltauswirkungen

Masterarbeit

Clara Gumbel

Technische Universität Braunschweig
Institut für Mechanik und Adaptronik

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig
Institut für Systemleichtbau
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik

Prüfer: Prof. Martin Wiedemann, DLR e.V., Institut für Systemleichtbau
Prof. Markus Böhl, Technische Universität Braunschweig,
Institut für Mechanik und Adaptronik
Betreuung: Dr. Christina Appel, DLR e.V., Institut für Aerodynamik und
Strömungstechnik
Jens Bachmann, Institut für Systemleichtbau, DLR e.V.
Datum: 03.09.2024

Zusammenfassung

Vorderkantenerosion kann erhebliche Schäden an Rotorblättern von Windkraftanlagen hervorrufen, welche bisher kaum untersuchte Umweltauswirkungen mit sich bringen. Dabei handelt es sich zum einen um einen Materialeintrag in die Umwelt und zum anderen um eine veränderte Lärmbelastung durch die Anlage. Das abgetragene Material, welches in den meisten Fällen aus Kunststoff besteht, gelangt direkt in die Umgebung der Windkraftanlage. Zur besseren Bewertung der potentiellen negativen Auswirkungen auf die Umwelt wird eine Abschätzung dieser Materialmenge vorgenommen. Durch die hohe Komplexität der Entstehung von Vorderkantenerosion gibt es derzeit keine ausreichend validierte Modellierung des Vorgangs. Die Annahme der Erosionsschäden erfolgt durch die Verwendung von Beschreibungen aus der Literatur, welche auf Felddaten beruhen. Das Ergebnis ist eine von der Blattlänge und Standort einer horizontalen Windkraftanlage abhängige Funktion. Für eine durchschnittliche dreiblättrige Onshore – Anlage in Deutschland wird ein maximaler Materialabtrag von 139 kg über 20 Jahre Lebensdauer bestimmt. Als Erweiterung der Abschätzung wird die Berücksichtigung des Materialeintrags durch Arbeiten am Rotorblatt vor Ort vorgeschlagen. Die zweite untersuchte Umweltauswirkung ist die Lärmbelastung durch eine veränderte Umströmung und die damit verbundene Schallentstehung an der Hinterkante. Ziel ist die Bereitstellung einer geeigneten Vorhersagemethode der veränderten Akustik. Die Umströmung des Profils mit beschädigter Vorderkante und die Auswirkung auf den Hinterkantenschall werden mithilfe einer zweidimensionalen hybriden RANS/CAA Simulation modelliert. Die Simulation erfolgt an der NREL 5MW Anlage bei Nennbetrieb an einem Profilschnitt am äußeren Radius des Blattes, an dem eine NACA64-A17 Profilform vorliegt. Es wird ein glattes Profil mit natürlicher Transition sowie vollturbulenter Grenzschicht und eine veränderte Geometrie mit vollturbulenter Grenzschicht bei gleichen Anströmparametern untersucht. Die Oberflächenveränderung durch die Erosion wird in Form einer an der Profilmase eingebrachten Stufe im CFD-Gitter dargestellt. Die Schalldruckpegel der Umströmung mit vollständig turbulenter Grenzschicht liegen über denen der Strömung mit natürlicher Transition, jedoch bei annähernd gleicher Frequenzverteilung. Das Einbringen der Stufe an der Blattspitze verschiebt das Schalldruckmaxima um ca. 100 Hz zu niedrigeren Frequenzen und erhöht ebenfalls den Gesamtschalldruckpegel. In den Richtcharakteristiken der verschiedenen Untersuchungsfälle lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Der Vergleich mit Literaturdaten zeigt ähnliche Tendenzen in den Spektren, die jedoch unter abweichenden Strömungsbedingungen ermittelt wurden und daher keine vollständige Validierung der Simulation erlauben. Die Überströmung der Stufe wird gut dargestellt mit Anhaltspunkten für eine Überschätzung der Turbulenz in der Simulation. Insgesamt sind keine signifikanten Fehler erkennbar, was darauf hinweist, dass diese Methode Potenzial besitzt als einfache Abschätzung des Hinterkantenschalls infolge von Erosion zu dienen.

Abstract

Leading edge erosion can cause significant damage to wind turbine rotor blades, which may lead to environmental impacts that have been scarcely studied until now. These impacts include both material release into the environment and altered noise emissions from the turbine. The eroded material, which is mostly made of plastic, directly enters the surroundings of the wind turbine. To better assess the potential negative environmental impacts, an estimation of this material quantity is conducted. Due to the high complexity of leading edge erosion, there is currently no sufficiently validated model for this process. The assumption of erosion damage is based on descriptions from the literature, which are derived from field data. The result is a function dependent on the blade length and location of a horizontal-axis wind turbine. For an average three-bladed onshore turbine in Germany, a maximum material loss of 139 kg over a 20-year lifespan is estimated. As an extension of the estimation, the inclusion of material release due to on-site rotor blade maintenance is proposed. The second environmental impact investigated is the noise pollution caused by altered flow and the resulting sound generation at the trailing edge. The goal is to provide a suitable prediction method for the altered acoustics. The flow around the profile with a damaged leading edge and the impact on trailing edge noise are modeled using a two-dimensional hybrid RANS/CAA simulation. The simulation is conducted on the NREL 5MW turbine under nominal operation at a cross-section of the blade's outer radius, which features a NACA64-A17 profile. A smooth profile with natural transition and fully turbulent boundary layer and a modified geometry with fully turbulent boundary layer are investigated with the same inflow parameters. The surface change due to erosion is represented by a step at the profile nose in the CFD grid. The sound pressure levels of the fully turbulent boundary layer flow exceed those of the flow with transition, though with nearly the same frequency distribution. The introduction of the step at the blade tip shifts the sound pressure maximum by approx. 100 Hz to lower frequencies and also increases the overall sound pressure level. No significant differences are observed in the directional characteristics of the various test cases. The comparison with literature data shows similar trends in the spectra, but these were determined under different flow conditions and therefore do not allow the simulation to be fully validated. The overflow of the step is well represented with indications of an overestimation of turbulence in the simulation. Overall, no significant errors are recognizable, which indicates that this method has the potential to serve as a simple estimation of the trailing edge noise due to erosion.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	III
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungen und Formelzeichen.....	IX
1 Einleitung.....	1
2 Theorie und Forschungsstand.....	3
2.1 Aufbau und Funktion von Rotorblättern.....	3
2.2 Vorderkantenerosion.....	6
2.3 Materialeintrag in die Umwelt.....	18
2.4 Lärmbelastung durch Windkraftanlagen.....	24
2.5 Schallentstehung am Rotorblatt.....	26
3 Forschungsbedarf.....	32
4 Bestimmung von Erosionsschäden.....	33
5 Quantifizierung des Materialeintrags.....	38
6 Akustiksimulation.....	50
6.1 Untersuchungsszenario und Eingangsparameter.....	51
6.2 Numerische Strömungsberechnung.....	53
6.3 Fast Random Particle Mesh Methode.....	56
6.4 Aeroakustische Simulation.....	57
6.5 Ergebnisse.....	59
6.6 Auswertung und Diskussion.....	65
7 Fazit und Ausblick.....	73
Literaturverzeichnis.....	LXXVIII
Anhang.....	LXXIX
A Vergleich der Terzspektren an Mikrofonposition 274°.....	LXXIX
B Spektren der Umströmung mit Stufe an verschiedenen Mikrofonen.....	LXXXI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Aufbau der äußeren Schichten eines Rotorblatts.....	4
Abbildung 2.2: Abtrag der Oberflächenschicht und Beschädigung des Verbundwerkstoffs.....	7
Abbildung 2.3: Löcher in der Oberflächenschicht an der Vorderkante	7
Abbildung 2.4: Erosionsverlauf.....	8
Abbildung 2.5: Abhängigkeit der Schadensrate von Aufprallgeschwindigkeit Regenmenge. .	10
Abbildung 2.6: Erosionsschäden an der Blattspitze bei 99 % Rotorradius.....	16
Abbildung 2.7: Erosionsschäden bei 88 % Rotorradius.....	16
Abbildung 2.8: Berücksichtigte Wirkungskategorien in Ökobilanzierungen.....	19
Abbildung 4.1: Messaufbau eines Blattabschnitts für den Scan der Vorderkante.....	36
Abbildung 5.1: Schadensformen Löcher, Kerben und Delaminierung der Vorderkante.....	39
Abbildung 5.2: Gewichtete Schadensverteilung entlang des Rotorradius.....	40
Abbildung 5.3: Abtrag Onshore-Anlage (pessimistische Annahme).....	46
Abbildung 5.4: Abtrag Onshore-Anlage (pessimistische und optimistische Annahme).....	47
Abbildung 5.5: Abweichung durch die Beschreibung mithilfe quadratischer Funktionen.....	48
Abbildung 6.1: Position der Profilschnitte am Rotorblatt der NREL 5MW Turbine.....	52
Abbildung 6.2: Aufbau des CFD Gitters.....	53
Abbildung 6.3: Vergleich der Fernfeldstruktur des Gitters ohne und mit Erosionsstufe.....	53
Abbildung 6.4: Form und Größe der Gitterzellen an der Erosionsstufe auf der Saugseite.....	54
Abbildung 6.5: Berechneter Punkt der laminar-turbulenten Transition am Schnitt 1.....	55
Abbildung 6.6: Vergleich der kinetischen Turbulenzenergie aus RANS und FRPM.....	56
Abbildung 6.7: Aufbau des CAA-Gitters um die Hinterkante.....	57
Abbildung 6.8: Richtcharakteristik der 12,5 Hz Frequenzen an Schnitt 7.....	59
Abbildung 6.9: Richtcharakteristik an Schnitt 1 im vollturbulenten Fall.....	60
Abbildung 6.10: Vergleich der Gesamtschalldruckpegel an Schnitt 7.....	61
Abbildung 6.11: Vergleich der Terzfrequenzspektren bei 216° an Schnitt 1.....	62
Abbildung 6.12: Vergleich der Terzfrequenzspektren bei 216° an Schnitt 7.....	62
Abbildung 6.13: Gesamtschalldruckpegel aller drei untersuchten Simulationsfälle.....	63
Abbildung 6.14: Vergleich der Terzfrequenzspektren aller Fälle an Schnitt 1.....	64
Abbildung 6.15: Verlauf der x-Geschwindigkeit über die z-Achse an der Hinterkante.....	67
Abbildung 6.16: Verteilung der turbulenten kinetischen Energie an der Hinterkante.....	68
Abbildung 6.17: Stromlinien und x-Geschwindigkeit entlang der Stufen auf der Saugseite..	69
Abbildung 6.18: Stromlinien und x-Geschwindigkeit entlang der Stufen auf der Druckseite.	69
Abbildung 6.19: Turbulente kinetische Energie entlang der Stufe auf der Druckseite.....	71
Abbildung 6.20: Turbulente kinetische Energie entlang der Stufe auf der Saugseite.....	71
Abbildung A1: Terzspektrum bei 274° an Schnitt 7.....	LXXIX

Abbildung A2: Terzspektrum bei 274° bei Schnitt 6.....	LXXIX
Abbildung A3: Terzspektrum bei 274° bei Schnitt 5.....	LXXIX
Abbildung A4: Terzspektrum bei 274° bei Schnitt 4.....	LXXIX
Abbildung A5: Terzspektrum bei 274° bei Schnitt 2.....	LXXX
Abbildung A6: Terzspektrum bei 274° bei Schnitt 3.....	LXXX
Abbildung B7: Schmalbandspektrum mit natürlicher Transition und mit Stufe	LXXXI
Abbildung B8 Terzspektrum mit Stufe an verschiedenen Positionen (Druckseite).....	LXXXI
Abbildung B9: Terzspektrum mit Stufe an verschiedenen Positionen (Saugseite).....	LXXXI

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittliche Maße der beobachteten Schäden von Sareen et al.....	48
Tabelle 2: Schadenseinteilung nach Sareen et al. DL: Delaminierung.....	49
Tabelle 3: Berechnung des Volumenverlust pro Blatt bei einer Blattlänge von 42 m.....	50
Tabelle 4: Abgetragene Materialmenge bei einer Blattlänge von 42 m bzw. 65 m.....	53
Tabelle 5: Faktoren b für die Funktion (12) der Abtragsmassen je WKA über die Blattlänge.	57
Tabelle 6: Eigenschaften der simulierten Erosionsszenarien.....	60
Tabelle 7: Betriebs- und Geometrieigenschaften der NREL 5 MW Anlage bei Nennbetrieb.	61
Tabelle 8: Anströmbedingungen an den verschiedenen Profilschnitten.....	61

Abkürzungen und Formelzeichen

CAA	Computational Aeroacoustics
CFD	Computational Fluid Dynamics
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FEM	Finite Elemente Methode
GWP	Global Warming Potential
IWES	Institut für Windenergiesysteme
LCA	Life Cycle Assessment
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
WKA	Windkraftanlage
A	Abstand zum Beobachter
a	Schallgeschwindigkeit
b	Faktor für die Berechnung der Abtragsmasse
c	Schallgeschwindigkeit
l	Blattlänge
l_c	Sehnenlänge
l_{turb}	charakteristische Turbulenzlänge
m	Masse
n	Rotordrehzahl
p_{rms}	Schalldruckeffektivwert
R	Rotorradius
St	Strouhalzahl
t	physikalische Zeit
t_{CAA}	dimensionslose Zeitschrittlänge
\bar{u}	mittlere Geschwindigkeit der turbulenten Strukturen
U	Strömungsgeschwindigkeit
v	Windgeschwindigkeit
x	Variable (Koordinate) entlang der Sehnenlänge
λ	Schnellaufzahl
ρ	Fluidichte
θ	Winkelposition um die Hinterkante

1 Einleitung

Windkraftanlagen (WKA) sind ein wichtiger Bestandteil der emissionsärmeren Stromproduktion aus erneuerbaren Energien. In Deutschland wurden im Jahr 2023 31,1 % des erzeugten Stroms mittels Windenergie erzeugt [7]. Derzeit sind rund 31.000 Anlagen in Betrieb, welche an verschiedenen Standorten on- und offshore bei unterschiedlichen Umweltbedingungen Strom generieren [8]. Die Einflüsse aus der Umwelt, in Verbindung mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten der Rotorblätter ermüden und schädigen das Material und führen letztendlich zum Materialabtrag. Dieser Effekt, der am Punkt der Anströmung an der Profilnase des Blatts besonders ausgeprägt ist, wird Vorderkantenerosion genannt. Es handelt sich hierbei um ein Problem, das ein Großteil der Anlagen betrifft [9] und auf das ca. 6 % der Reparaturen an Windkraftanlagen zurückzuführen sind [10]. Vorderkantenerosion reduziert die Langlebigkeit der Rotorblätter und verringert die aerodynamische Leistung. Diese könnte je nach Annahmen und Ausmaß der Erosion zu einer Verringerung der jährlichen Stromproduktion von 3 % bis über 20 % führen [4]. Doch neben der Wirtschaftlichkeit entstehen durch Vorderkantenerosion auch Auswirkungen auf die Umwelt, welche derzeit nur in geringem Maß untersucht sind.

Zum einen handelt es sich bei den Rotorblattmaterialien meist um Kunststoffverbunde, welche infolge der Erosion abgetragen werden und direkt in die Umwelt gelangen. Der Eintrag von nicht biologisch abbaubaren Kunststoffen in die Umwelt sollte generell vermieden werden, jedoch sind die genaue Menge und die Auswirkungen des Eintrags durch Vorderkantenerosion derzeit noch nicht untersucht. Zur vollständigen Erfassung der potentiellen negativen Umweltauswirkungen von Windkraftanlagen und der Beantwortung öffentlich aufkommender Fragen ist dies jedoch von Interesse für Umweltverbände, Gesellschaft und Industrie. Die vorliegende Arbeit stellt Möglichkeiten zur Quantifizierung des abgetragenen Materials vor. Anhand von in der Literatur gegebenen Beschreibungen von Erosionsschäden, welche auf Inspektionsbildern basieren, wird eine Abschätzung der Menge durchgeführt. Die Ermittlung des Materialverlusts durch Vorderkantenerosion soll dazu beitragen, bestehende Lücken in der Ökobilanzierung von Windkraftanlagen zu schließen. Zum anderen erzeugt der Abtrag an der Vorderkante eine Veränderung der Umströmung des Profils und somit auch der aeroakustischen Eigenschaften des Rotorblatts. Diese wirkt sich auch auf die Entwicklung des Hinterkantengeräuschs aus, welche die dominierende Quelle aeroakustischen Lärms an modernen Windkraftanlagen ist [11]. Der von Windkraftanlagen ausgehende Lärm ist ein bedeutender Faktor für die Akzeptanz, den Bau und das Fortbestehen der Anlagen. Bei Repoweringprojekten in Dänemark zwischen 2012 und 2019 war die Verletzung der Lärmemissionslimits der Hauptgrund für

den Abbau von 13 % der Anlagen [12]. Es besteht also ein Interesse an zeit- und kostenoptimierten Methoden zur Vorhersage der Schallentstehung um die Einhaltung der Limits zu gewährleisten, welche diese Arbeit durch die Verwendung einer zweidimensionalen Simulation und vereinfachten Geometrie der erodierten Vorderkante begegnet. Es wird evaluiert inwiefern sich diese Methode zur Bewertung der veränderten Schallabstrahlung an der Hinterkante eignet.

Angesichts der zunehmenden Bedeutung erneuerbarer Energien ist in Zukunft mit einer Steigerung sowohl der Leistung als auch der Anzahl von Windkraftanlagen zu rechnen. Mit der zunehmenden Ausbreitung der Gebiete auf denen Windkraft installiert ist, rücken die Lärmemissionen verstärkt in den Fokus und erfordern geeignete Methoden der Modellierung. Eine steigende Anzahl an Rotorblättern führt außerdem zu einer höheren Menge abgetragenen Materials in die Umwelt. Die erhöhte Erosion in Meeresnähe in Verbindung mit einem Ausbau der Offshore – Windkraft verstärkt diesen Effekt zusätzlich [13]. Eine präzise Abschätzung der mit Vorderkantenerosion verbundenen Umweltauswirkungen ist daher nicht nur aktuell, sondern auch für die zukünftige Entwicklung von Windkraftanlagen von entscheidender Bedeutung.

Diese Arbeit gliedert sich in einen Theorieteil in Kapitel 2, welcher Rotorblätter hinsichtlich ihrer aerodynamischen und strukturellen Funktion beschreibt und auf verwendete Materialien eingeht. Der aktuelle Forschungsstand zur Vorderkantenerosion hinsichtlich Entstehung und Modellierung wird dargelegt. Es wird eine kurze Übersicht der derzeitigen ökologischen Bewertung von Windkraftanlagen gegeben. Außerdem wird auf die Auswirkung von Kunststoff und Lärm auf die Umwelt eingegangen. Die Mechanismen, welche zur Entstehung von Hinterkantenlärm führen, werden am Ende des Kapitels besprochen. In Kapitel 4 werden verschiedene Methoden zur Erfassung von Erosionsschäden vorgestellt, und die am besten geeignete für den vorgesehenen Zweck ausgewählt. Daran anschließend wird die Abschätzung der Materialmenge anhand von Literaturwerten (Kapitel 5) durchgeführt und ausgewertet. Kapitel 6 beschreibt den Ablauf und die Eigenschaften der durchgeführten Simulation, die verwendeten Gitter sowie die berechneten Lösungen der numerischen Strömungsmechanik und Aeroakustik. Ein Vergleich der Spektren der erodierten und unerodierten Geometrie wird durchgeführt und die Ergebnisse eingeordnet. Im letzten Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst, und weitere Schritte zur Erforschung und Bewertung der Auswirkungen des Materialeintrags sowie einer geeigneten Simulation des Hinterkantenlärms von erodierten Rotorblättern vorgeschlagen.

2 Theorie und Forschungsstand

Die Untersuchung von Vorderkantenerosion ist Bestandteil aktueller und vergangener Forschung, wobei der Fokus bisher vermehrt auf die Auswirkung auf Auftrieb, Widerstand und Leistung liegt. Im Zuge dessen wurden sowohl Ansätze zur Vorhersage und Beschreibung der Erosion entwickelt als auch Daten zum Erosionsausmaß an realen Windkraftanlagen aufgenommen und verarbeitet. Die Untersuchung der daraus resultierenden Umweltauswirkungen scheint bisher noch nicht bzw. in sehr beschränktem Maße stattgefunden zu haben. Im diesen Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung zu Vorderkantenerosion an sich und den Umweltauswirkungen beschrieben und theoretische Grundlagen zur verbesserten Einordnung des Themas gegeben.

2.1 Aufbau und Funktion von Rotorblättern

In Deutschland sind derzeit ca. 31 000 der registrierten Windkraftanlagen im Betrieb, von denen rund 99 % Horizontalläufer darstellen [8]. Dieses beherrschende Konstruktionsprinzip hat bei optimaler Auslegung den höchsten Wirkungsgrad und besitzt die Möglichkeit zur Regelung der Rotordrehzahl und Leistungsabgabe, welches den wirksamsten Schutz gegen Überdrehzahl sowie extreme Windgeschwindigkeiten darstellt [14]. Der durchschnittliche Rotordurchmesser beträgt 85 m, wobei das Minimum der registrierten Anlagen bei 0,3 m und das Maximum bei 180 m liegt. Bei der Offshore – Windkraft, welche in Deutschland zwar nur 5 % der erfassten Anlagen, jedoch 40 % der installierten Leistung ausmacht, liegt der durchschnittliche Rotordurchmesser bei 100 m [8]. Die Aufgabe des Rotors ist einen größtmöglichen Teil der Windenergie, welche die Rotorkreisfläche durchströmt in mechanische Arbeit umzuwandeln. Die Rotorblätter, ihre Bauform, sowie ihre aerodynamischen Eigenschaften sind hierbei von besonderer Bedeutung. Der Entwurf der Rotorblätter muss vor allem die Festigkeit und Steifigkeit, sowie die Aerodynamik zur Generierung von Auftrieb und möglichst wenig Geräuschen berücksichtigen. Während der wurzelnahen Bereich besonders auf die Aufnahme von hohen Belastungen ausgelegt ist, spielen in Richtung Blattspitze durch die höheren Umfangsgeschwindigkeiten die aerodynamischen Eigenschaften eine größere Rolle [14]. Bei den heute verwendeten Profilen, handelt es sich um Laminarprofile, welche sich durch einen sehr geringen Profilwiderstand auszeichnen, jedoch auch für eine gute Funktionalität eine geometrisch genaue und glatte Oberfläche erfordern. Dies ist in der Realität meist nicht leistbar, da Windkraftanlagen den jeweiligen Umweltbedingungen ausgesetzt sind. Rotor-

blätter müssen verschiedensten Belastungen, aus der Umwelt, sowie aus der eigenen Rotationsbewegung, sowohl stationären, als auch instationären, standhalten. Die bei der Materialwahl besonders entscheidenden Eigenschaften sind das spezifische Gewicht, die zulässige Bruchspannung, der Elastizitätsmodul, die Dauerfestigkeit und die Reißlänge [14]. Neben diesen Merkmalen sind die Kosten für Material und Herstellung sowie die damit verbundenen Entwicklungskosten von Bedeutung. Diese Kriterien und die großen Abmessungen moderner Windkraftanlagen führen dazu, dass Rotorblätter nach den Leichtbauprinzipien entwickelt werden. Abbildung 2.1 zeigt den Schnitt eines möglichen Grundauf-

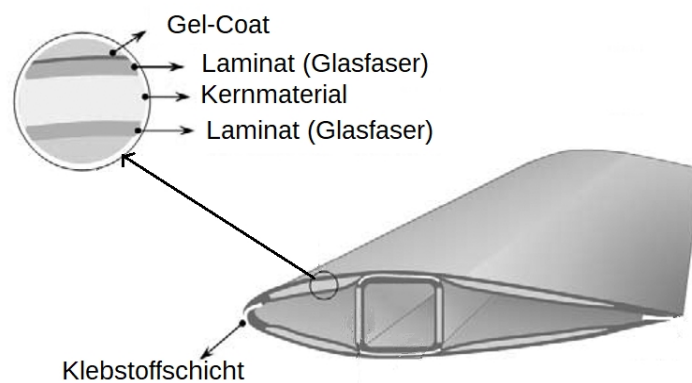


Abbildung 2.1: Aufbau der äußeren Schichten eines Rotorblatts [1]

baus eines Rotorblatts, welches standardmäßig aus zwei verklebten Halbschalen gefertigt ist, und aus verschiedenen Schichten besteht. Hierbei kommen Laminatschichten, das Kernmaterial, Verstärkungsschichten, sowie Klebstoffe und Schutzschichten für die Oberfläche zum Einsatz. Das innenliegende Kernmaterial kann hierbei aus Balsaholz, oder Schaum aus verschiedenen Polymeren, wie Polyvinylchlorid, Polymethacrylimid, Polyethylenterephthalat, Polyurethan oder Styrol-Acrylnitril bestehen [15]. Für die Laminatschichten kommen heutzutage nahezu ausnahmslos Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz, welche aus Fasern und Kunstharzen bestehen. Die meistverwendete Faser ist hierbei die Glasfaser. Zwar weisen Kohlefasern hinsichtlich einer höheren Reißlänge und Elastizitätsmodul bessere Materialeigenschaften auf, sind jedoch wesentlich teurer und kommen daher meist nur in stark beanspruchten Bereichen zum Einsatz. Für die Einbettung und Formgebung sorgt das sogenannte Matrixmaterial, welches aus Epoxid- oder ungesättigtem Polyesterharz sowie gelegentlich aus Vinylesterharz besteht [14]. Da diese faserverstärkten Verbundwerkstoffe ohne zusätzliche Beschichtung eine relativ schlechte Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen haben, wird auf das Laminat eine weitere Schicht gebracht.

Oberflächenlösungen

Rotorblätter sind zahlreichen externen Einflüssen ausgesetzt, denen der Oberflächenschutz standhalten muss. Zudem sollte die Oberfläche nicht reflektierend und möglichst glatt sein [15]. Die oberste, schützende Schicht kann in einem In-Mold-Verfahren als erste Schicht bei der Fertigung des Rotorblatts in die Form gegeben werden. Diese Gelcoats bestehen aus fertigungstechnischen Gründen meist aus einem ähnlichen Material wie das Matrixmaterial [16]. Die Schichtdicke liegt bei bis zu 800 μm , wobei diese je nach Material stark schwanken kann [15]. Gelcoats bieten den Vorteil einen Oberflächenschutz ohne einen weiteren Fertigungsschritt aufbringen zu können [17]. Zusätzlich haben sie ein geringes Risiko der Ablösung, da der Gelcoat mit der Harzmatrix verbunden ist [17]. Allerdings sind Gelcoats in der Regel spröde und haben eine hohe akustische Impedanz. In Erosionstests zur Untersuchung des Vorderkantenschutzes wiesen die Substrate mit Gelcoat Vertiefungen und Risse auf. Nach dem Abtrag des Gelcoats, war somit eine Beschädigung des darunter liegenden Verbundwerkstoffs möglich. Flexible Beschichtungen hingegen wiesen nur minimale Oberflächenschäden auf. Diese sind duktiler und von niedrigerer Impedanz, besitzen eine hohe Bruchdehnung und verringern die Spannung an der Aufprallfläche [17]. Diese Art von Oberflächenschutz wird im Post-Mold-Verfahren durch Sprühen oder Lackieren aufgebracht und stellt somit einen zusätzlichen Fertigungsschritt dar [16]. Bei Reparaturen kann mit diesem Verfahren der Schutz nachgebessert bzw. erneuert werden. Die Schichtdicke ist normalerweise mit unter 200 μm geringer als die der Gelcoats, was zu einer besseren chemischen und mechanischen Beständigkeit führt [15]. Die verwendeten Verfahren und Materialien, welche tatsächlich von Herstellern verwendet werden, sind nicht immer vollständig offengelegt. Mishanevsky et al. stellten in ihren Messungen fest, dass die Hersteller sehr verschiedene Beschichtungssysteme verwenden [13]. Zusätzlich gibt es einige Unstimmigkeiten der Terminologie, da die oberste Schicht häufig als Gelcoats bezeichnet wird, unabhängig davon aus welchem Material sie ist oder wie sie hergestellt wurde [16]. Zu den meistgenannten Lack- bzw. Gelcoatmaterialien gehören neben den bereits genannten ungesättigten Polyestern und Epoxiden, auch Acrylate und Polyurethane [15]. Doch auch Beschichtungen aus Polytetrafluorethylen, oder auf Polycarbonatdiol – Polyurethan – Basis sowie Polymermetalllaminat und Nickel – Kobalt – Legierungen werden beschrieben. Teilweise werden die Beschichtungen durch z.B. oberflächenbehandelte keramische Nanopartikel oder Siliziumcarbid verstärkt [13, 18]. Neben Lacken und Gelcoats stellen derzeit hochflexible Tapes, normalerweise aus Polyurethan, Soft- und Hardshells, Folien sowie Erosionsschilde aus verschiedenen Thermoplasten weitere, bisher weniger verbreitete Lösungen zum Vorderkantenschutz dar [17].

2.2 Vorderkantenerosion

Vorderkantenerosion an Windkraftanlagen entsteht durch wiederholtes Auftreffen von Niederschlagspartikeln mit hohen Geschwindigkeiten auf die Vorderkante der Rotorblätter. Zahlreiche weitere Umwelteinflüsse ermüden das Material zusätzlich und verstärken den Effekt. Dazu zählen Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit, UV-Strahlung durch Sonnenlicht, chemischen Angriffe, Insekten und deren Blut, Fäkalien von Vögeln, Blitzschlag, Eis, Staub, der Salzgehalt in der Luft und Abnutzung durch Sand und andere kleine Partikel. Der Kontaktdruck und die damit verbunden Wellenausbreitung im Material, sowie die entstehenden Materialspannungen führen zur Ermüdung, Verschleiß und Schäden, welche dann als Aufrauung der Oberfläche, Riss in der Oberflächenschicht und im Verbundwerkstoff und Ablösung von Oberflächenschichten sichtbar werden [13]. Je nach Material können Schwerwellen, die sich durch den Tropfenaufprall auf der Oberfläche ausbreiten, zum Versagen der obersten Schicht selbst führen, während andere Beschichtungen aufgrund der Bindung zwischen Beschichtung und Substrat versagen [3]. Diese Schäden können sowohl bereits nach weniger als einem Jahr als auch mehreren Jahren im Betrieb entstehen, wobei in der Regel von ersten Schäden nach zwei bis drei Betriebsjahren gesprochen wird [10, 16, 19]. Die Ursache der Spannbreite von Zeitpunkt und Ausmaß der Erosion sind die zahlreichen Einflüsse und Faktoren die zur Erosionsbildung führen. Vorderkantenerosion führt zu erheblichen Leistungsverlusten, Verringerung der Lebensdauer, sowie erhöhten Kosten und Aufwand für die Wartung und es besteht somit Interesse an der Erforschung dieses Vorgangs [13, 20]. Es ist ein aktiver Teil der Forschung sowohl die Modellierung der Schadensmechanismen auf der Oberfläche als auch probabilistische Ansätze zur Vorhersage von Schäden je nach Standort zu verbessern. Im Folgenden soll ein Überblick zur Gestalt der Erosion, dem Ablauf, den verschiedenen Einflussparametern sowie den aktuellen Ansätzen zur Modellierung von Erosion und Einteilung von Erosionschäden gegeben werden.

Erscheinungsbild

Das Ausmaß und die Form des Schadens entwickeln und verändern sich mit der Zeit und können von kleinen Löchern bis hin zu erheblichem Materialverlust reichen [21]. Anfängliche Erosion erscheint als kleine Gruben an der Vorderkante, welche sich mit der Zeit zu größeren Furchen zusammenschließen. Bei schwereren Schäden findet ein vollständiger Abtrag der Beschichtung an der Vorderkante und in manchen Fällen auch des Gelcoats statt. Dies führt dazu, dass das Laminat freigelegt wird und auch in dem unter der Oberflächenschicht liegenden Material strukturelle Schäden entstehen können [9]. Durch die



Abbildung 2.3: Lösser in der Oberflächenschicht an der Vorderkante [2]



Abbildung 2.2: Großflächiger Abtrag der Oberflächenschicht und Beschädigung des Verbundwerkstoffs [2]

höheren Geschwindigkeiten in Richtung Blattspitze nimmt auch das Ausmaß der Erosion mit steigendem Rotorradius zu, sodass sich die stärksten Ausmaße der Erosion stets an der Blattspitze zeigen. In Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3 sind verschiedene Stadien der Erosion zu sehen. Während Abbildung 2.3 Lösser an der Vorderkante zeigt, welchen den Beginn der Erosion darstellen, kann auf Abbildung 2.2 ein schwererer Schaden beobachtet werden.

Erosionsablauf

Der Erosionsablauf kann in verschiedene Stufen eingeteilt werden, wobei die Anzahl je nach Veröffentlichung zwischen zwei und vier Stufen schwankt. Die Beschreibungen des Ablaufs an sich stimmen jedoch in allen Quellen überein. In einigen Fällen sind lediglich weitere Zwischenstadien aufgeführt und verschiedene Endpunkte gesetzt. Der Anfang der Erosion wird stets als Inkubationsphase beschrieben. Obwohl das Material in dieser Phase Ermüdung erleidet, ändert sich die Oberfläche nicht merklich. Teilweise werden die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit und kleine Gruben noch der Inkubationszeit zugeordnet [22]. In anderen Definitionen stellt ein erkennbarer Materialabtrag bereits das Ende der Inkubationszeit dar [3]. Nach weiterer Ermüdung folgt eine Stufe, welche sich durch einen gleichmäßigen Masseverlust auszeichnet. Die relativ hohe Verschleißrate geht mit einem annähernd linearen Gewichtsverlust einher. Einige Definitionen enden an dieser Stelle [23]. Andere fahren fort und definieren die nächste Phase durch eine deutlich reduzierte Verschleißrate. Diese wird der erhöhten Oberflächenrauigkeit zugeschrieben. Da es sich um die letzte Phase handelt, sind hier die Schäden am größten und erreichen den Verbund-

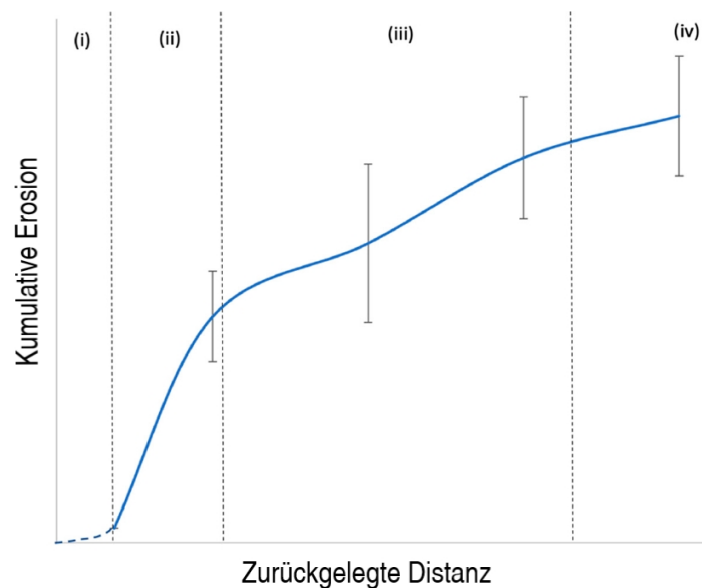


Abbildung 2.4: Erosionsverlauf mit (i) Inkubationszeit (ii) linearer Bereich (iii) Abnahme der Erosionsrate (iv) Endstadium [2]

werkstoff [22]. Abbildung 2.4 zeigt die von Groucott et al. erstellten Erosionsstadien, welche im Regenerosionstest im Laborversuch beobachtet wurden. Hierbei wurde ein Substrat mit hoher Geschwindigkeit durch einen simulierten Regen geführt und der Masseverlust aufgenommen. Nach der Inkubationszeit konnten die beschriebenen Phasen

des linearen Masseverlusts und der reduzierten Verlustrate identifiziert werden. Diese Untersuchung berücksichtigt ein Endstadium als viertes Stadium. Einige andere Beschreibungen enden bereits nach dem linearen Bereich, welcher hier dem Bereich (ii) entspricht. Wie es für Regenerosionstest üblich ist, untersucht dieser lediglich den Einfluss von auftreffenden Tropfen und nicht den anderer möglicher Umwelteinflüsse [2].

Einflüsse

Rotorblätter sind zahlreichen Umwelteinflüssen ausgesetzt, welche es sehr komplex machen die einzelnen Auswirkungen auf die Entstehung von Vorderkantenerosion nachzuvollziehen und zu bewerten. Die am häufigsten genannten bzw. besprochenen Faktoren sind die Aufprallgeschwindigkeit des Niederschlags, die Niederschlagsmenge, insbesondere Regenmenge, sowie die Eigenschaften des Rotorblattmaterials [24]. Die Aufprallgeschwindigkeit ergibt sich aus der Relativbewegung des rotierenden Rotorblatts und der Geschwindigkeit des Partikels, welches von der Windgeschwindigkeit abhängt. Je höher die Geschwindigkeit ist, mit der das Partikel auf die Materialoberfläche auftrifft, desto stärker die Auswirkung und höher die Erosionsrate [22]. Durch die Rotationsbewegung der Blätter nimmt die Geschwindigkeit mit der die Vorderkante durch die Luft fährt von der Nabe bis zur Blattspitze stetig zu. An der Blattspitze entstehen die höchsten Umfangsgeschwindigkeiten, somit auch die höchsten Aufprallgeschwindigkeiten der Partikel, welches zu einer stärkeren Beschädigung der Vorderkante führt. Die Blattspitzengeschwindigkeiten von Windkraftanlagen, unabhängig von Leistung und Rotorblattlänge, liegen im Bereich

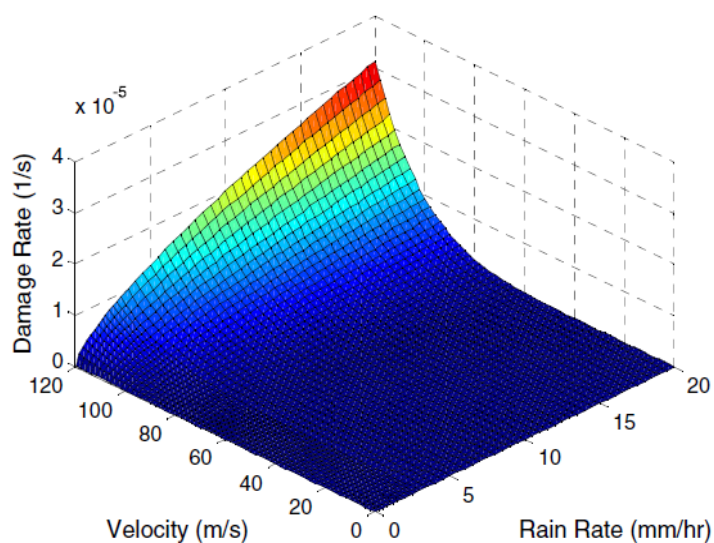


Abbildung 2.5: Abhängigkeit der Schadensrate von Aufprallgeschwindigkeit und Menge des Regens [3]

von $80 \frac{m}{s}$ [16]. Die Umfangsgeschwindigkeit ist somit vor allem abhängig von der Drehzahlkurve der Windturbine und dadurch vom Betrieb und der Steuerung der Anlage [16, 19]. Der andere Einflussfaktor für die Entstehung hoher Relativgeschwindigkeiten also auch hohe Geschwindigkeiten beim Aufprall des Partikels ist die herrschende Windgeschwindigkeit [19]. Neben der Aufprallgeschwindigkeit wird die Menge des Niederschlags bzw. die Anzahl der auftreffenden Partikel als großer Einflussfaktor angesehen [25]. Am meisten untersucht ist der Einfluss von Regen auf die Erosion, wobei teilweise auch von Regenerosion gesprochen wird. Neben der Menge des Regens wird auch die Tröpfchengröße im Schadensmodell berücksichtigt und verschiedene Schadensarten je nach Größenverteilung der Regentropfen erwartet. Je größer der Durchmesser ist, desto größer ist auch die Schadensrate. Der Einfluss wird als quadratisch beschrieben [3, 13]. Eisenberg et al. entwickelten ein analytisches Versagensmodell auf Grundlage von Regenerosion – Tests zur Ermüdungsbeständigkeit verschiedener Rotorblattbeschichtungen [3]. Die dort verwendete Schadenrate abhängig von Geschwindigkeit und Regenrate zeigt Abbildung 2.5. Es ist zu erkennen, dass hohe Geschwindigkeiten die Grundvoraussetzung für Erosionsbildung ist. Bei geringen Regenraten und hohen Geschwindigkeiten können Schäden entstehen, während bei geringeren Geschwindigkeiten und hohen Regenraten keine Erosion zu erwarten ist. Die maximale Schadensrate befindet sich bei höchster Geschwindigkeit und höchster Regenrate. Diese höhere Bedeutung der Geschwindigkeit gegenüber der Regenmenge wird auch in anderen Veröffentlichungen hervorgehoben [26].

Obwohl sich die meisten Veröffentlichungen lediglich mit dem Einfluss von Regen beschäftigen, können auch andere Niederschläge wie Schnee, Nebel oder Gischt (im Fall von Offshore - Anlagen) von Bedeutung sein [25]. Generell besteht Forschungsbedarf hinsichtlich dem Verständnis der zahlreichen Einflussfaktoren, welchen Windkraftanlagen ausgesetzt sind und welche somit für das Materialversagen eine Rolle spielen könnten. Es gibt Beobachtungen von Windkraftanlagen mit eher geringen Blattspitzengeschwindigkeiten und verhältnismäßig trockenem Klima, bei denen die Erosion an der Blattspitze als stark beschrieben wird [16]. In einem anderen mehrjährigen Forschungsprojekt zu künstlichen Bewitterungsverfahren im Zusammenhang mit Vorderkantenerosion konnte keine Festlegung stattfinden welche die am stärksten schädigenden Bewitterung ist. Hierbei wurden neben verschiedener Benässung auch UV-Bestrahlungsstärken, Temperaturschwankungen, Frost, Feuchtigkeit und Salzgehalt untersucht [27]. Diese werden auch in anderen Quellen als mögliche Einflussparameter angesehen [13]. Des Weiteren werden Vereisung, Blitzschlag, starke Windböen, Wirkung der Sonneneinstrahlung allgemein, angelagerte Chemikalien aus der Luft und Frost – Tau – Zyklen genannt [24, 25]. Auch hinsichtlich der Eigenschaften des auftreffenden Partikels gibt es Forschung, welche sich mit den Flug-

bahnen beschäftigt und den Schaden abhängig vom auftreffenden Winkel macht [25, 28]. Alle diese Umweltbedingungen haben potentiell eine Auswirkung auf die Lebensdauer des Rotorblattmaterials und verändern sich je nach Standort, an Land sowie auf Wasser. Offshore – Anlagen und Onshore – Anlagen in Küstennähe sind jedoch durch höhere Windgeschwindigkeiten, erhöhter Feuchtigkeit und erhöhtem Salzgehalt besonderen Umständen ausgesetzt. Die Vorderkantenerosion ist bei Küstenstandorten größer und die Erosionslebensdauer im Vergleich zum Landesinneren drei- bis viermal kürzer [19]. Neben Umwelt- und somit Standortbedingungen sind jedoch auch die Eigenschaften des Materials der Oberflächenschicht von essentieller Bedeutung, da die chemisch-physikalischen Veränderungen von diesen abhängig sind [27]. Auch die Dicke der Oberflächenschicht ist bedeutend, da die inkorrekte Wahl der Schichtdicke Defekte wie die Ablösung dieser hervorrufen kann [29]. Es ist ein Interesse der Forschung und der Industrie beständigere Materialien für die Oberflächenschicht zu entwickeln. Hierbei spielen sowohl die Steifigkeit und Festigkeit eine Rolle, als auch die Zähigkeit und Dämpfungsfähigkeit [13]. Viele Materialeigenschaften wie die Kohäsions- und Adhäsionskraft, Glasübergangstemperatur und Härte, um nur einige zu nennen, haben einen Einfluss auf das Verhalten des Materials bei Regenerosion. Die relative Sprödigkeit wird in einigen Fällen als der Hauptgrund für die Oberflächenermüdung angesehen [3]. Doch auch spezifische Merkmale wie der Widerstand gegen abrasiven Verschleiß, die viskoelastischen Module bei gegebener Frequenz, die Bruchenergie in Zugversuchen, die Rückparallelizität, das Speichermodul und der mechanische Verlustkoeffizient werden als mögliche Einflussparameter genannt. Neben diesen Eigenschaften können auch die Rauheit sowie Schädigungen vor Inbetriebnahme des Rotorblatts eine Auswirkung auf die Erosionsbeständigkeit haben. Eine der häufigsten Herstellungsfehler sind Blasen, welche bereits mit einem Durchmesser von 100 µm zu einer Verkürzung der Lebensdauer um 10 % führen können [13]. Ein nachlässiger Umgang mit den Rotorblättern in der Herstellungsphase sowie während des Transport und Einbaus kann zudem Risse und Kratzer erzeugen, welche als Ausgangspunkte für weiteren Verschleiß und Erosion dienen können [16].

Maßnahmen

Die vorgeschlagenen Maßnahmen für die Behandlung von Erosion beginnen mit einer veränderter Betriebsweise der Windkraftanlage. Hierbei wird Intervallen mit starken Niederschlägen mit einer Reduzierung der Drehgeschwindigkeit der Turbine begegnet werden, um die Schäden der Vorderkante zu minimieren [13]. Der Großteil der Maßnahmen beschäftigt sich jedoch mit der Vorbeugung von Erosion durch wetterbeständigen Vorderkantenschutz [16]. Diese bereits in Kapitel 2.1 besprochenen Lösungen, können in Form von Schutzbändern aus widerstandsfähigen und abriebfesten Elastomeren, Shells, Folien oder Lacke die Beständigkeit der Vorderkante erhöhen. Obwohl das Auftragen von Vorderkantenschutz eine beliebte Methode ist, kann dies das aerodynamische Verhalten deutlich verschlechtern und je nach Schichtanzahl, Profilgeometrie und Reynoldszahl das Auftriebs-Widerstands-Verhältnis bis zu 20 % verringern [30]. Hinzu kommt, dass die Lebensdauer der Beschichtungen mit unter zehn Jahren deutlich niedriger ist als die 20 Jahre der Windkraftanlage an sich [31]. Für einen dauerhaften Erosionsschutz hinsichtlich der Aerodynamik, muss der Vorderkantenschutz regelmäßig erneuert werden [16]. Die entsprechende Vorhersage und Reparatur wird ebenfalls als eine Maßnahme gegen Erosionseffekte hervorgehoben [13]. Da sich die meisten Untersuchungen mit der Auswirkung der Erosion auf die Leistung durch eine veränderte Aerodynamik beschäftigen, sind auch die Maßnahmen dementsprechend ausgelegt.

Modellierung

Zur Abschätzung der Lebensdauer des Materials sowie der Vorhersage des Verschleißes durch Erosion gibt es zahlreiche Modellierungsansätze. Diese sind sowohl analytischer und experimenteller als auch numerischer Natur, sowie eine Kombination aus verschiedenen Ansätzen. Analytische Modelle stellen hierbei eine solide physikalische Beschreibung des Tropfenaufralls dar und liefern mit einigen Annahmen Schätzungen erster Ordnung für gewisse Parameter [19]. Das am häufigsten genutzte Modell zur Bestimmung der Inkubationszeit, also des ersten Versagens des Materials aufgrund des Tropfenaufralls, ist das Springer Modell von 1974. Dieses stellt basierend auf Wirbelarmtests einen Zusammenhang zwischen der geschätzten Lebensdauer eines Materials, der Materialfestigkeit und dem Druck eines Tropfenaufralls her und beschreibt die Entwicklung der Erosion als Funktion der akkumulierten Einschläge von Regentropfen [24, 29, 32]. Die bereits vorgestellten Phasen der Erosion, welche sich aus Inkubationsphase, der Phase des starken, stetigen Masseverlusts und der Endphase mit reduzierter Erosionsrate zusammensetzen, stammt ebenfalls von Springer et al. [32]. Das Modell enthält weiterhin Korrekturen für

beschichtete Materialien und ihm wird eine breite Anwendbarkeit, sowohl für duktile als auch für spröde Materialien zugeschrieben [3, 29]. Bei der Anwendung des Modells auf Materialien mit besonders geringen Steifigkeitseigenschaften, wie beispielsweise Elastomere, zu denen auch das häufig genannte Polyurethan zählt, ergeben sich jedoch Ungenauigkeiten. Weiterhin gingen Springer et al. von unvollständigen Daten aus Wirbelarmtests aus, welche auch in neueren Arbeiten zu finden sind [29]. Diese könnten mitunter der Grund sein, warum der Vergleich der Ergebnisse des Springer-Modells mit tatsächlichen Felddaten gescheitert ist [33]. Trotzdem wird das Springer-Modell zur Berechnung der Inkubationszeit, welche häufig als der Punkt des Materialversagens gewählt wird, verwendet. Dies liegt unter anderem daran, dass alternative Berechnungen noch unvollständig sind und bisher keine breite Anwendung gefunden haben [29].

Der bei Springer verwendete Regenerosionstest mit Wirbelarm, ist auch weiterhin der Industriestandard zur Bewertung von Vorderkantenschutzbeschichtungen. Es handelt sich hierbei um einen experimentellen Aufbau, bestehend aus einem wirbelnden Hochgeschwindigkeitsarm, auf dem das zu untersuchende Material durch einen simulierten Regen rotiert wird. Diese Untersuchungen eignen sich zur relativen Bewertung der Regenbeständigkeit von Beschichtungen, stellen jedoch reale Bedingungen mit verschiedenen Tröpfchendurchmessern, Aufprallgeschwindigkeiten und anderen Feldbedingungen nicht dar [3]. Die Korrelation zwischen Ergebnissen aus diesen Wirbelarmtests und tatsächlichen Feldergebnissen ist gering [33]. Die meisten neueren Ansätze verwenden zusätzlich numerische Modellierungen, darunter Computational Fluid Dynamics (CFD) und Finite Elemente Methode (FEM) Analysen, wobei die numerische Modellierung des Tropfenaufpralls ebenfalls eine anspruchsvolle Aufgabe ist. Sowohl die zu beschreibende Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Struktur, als auch das elastische Materialverhalten sind sehr komplex [31].

Die Modelle der aktuellen Forschung versuchen meist bestimmte Erosionsstadien vorauszusagen. Dies kann die Inkubationszeit sein, der erste Schaden, der eine Gefahr für die strukturelle Integrität darstellt und somit eine Reparatur erfordert, oder generelle Vorhersagen von Ermüdungsrissen, Aufprallspannungen und Oberflächenrauheiten [19]. Hierbei werden je nach Modell die genannten Methoden verknüpft. Die Materialeigenschaften, die Aufprallgeschwindigkeit und die Menge bzw. Anzahl der Regentropfen bilden meist die Grundlage zur Beschreibung und Berechnung des Kontakts zwischen Regentropfen und Oberflächenschicht sowie der Ausbreitung der Spannungswellen [31]. In einigen Fällen werden weitere Parameter berücksichtigt, wie die Größe der Tropfen [30] oder die Flugbahn der Partikel, sowie weiterer Niederschlag wie Schnee, Nebel oder Gischt [25]. Verma et al. schlugen ein Modell vor, welches anstatt der weit verbreiteten deterministischen

Annahmen vermehrt probabilistischen Betrachtungen nutzt. Hierbei verwenden sie probabilistische Verteilungen der Regentropfengröße und -intensität, sowie der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe. Sie berücksichtigten ebenfalls die Drehzahlkurve und die Nabenhöhe der Windkraftanlage in ihren Vorhersagen, konnten ihr Modell jedoch noch nicht mit realen Daten validieren [19].

Trotz vielfältiger Forschung im Bereich der Vorderkantenerosion an Windkraftanlagen ergeben sich einige Lücken. Die Modellierung eines einzelnen Regentropfenaufpralls kann zwar sehr präzise berechnet werden, ist jedoch ebenfalls sehr komplex und rechenintensiv. Es stellt eine Herausforderung dar diese Ergebnisse für mehrere zufällig auftreffende Tropfen zu extrapolieren [19]. Unter anderem daraus resultieren einige Annahmen und Einschränkungen der verschiedenen Modellierungsversuche. Folgende Merkmale sind in den Berechnungen teilweise nicht berücksichtigt: Einfluss der Rauheit und scharfe Kanten auf die Spannungen, Winkel des Stoßes, Krümmung des Körpers, verschiedene Beschichtungen, genaue Form der auftreffenden Partikel und das Auftreffen von sich überschneidenden Partikeln um nur einige zu nennen [19, 25, 31]. Neben diesen Annahmen in den einzelnen Berechnungen, werden die unterschiedlichen Aspekte, welche zur Erosion an Windkraftanlagen führen selten zusammengeführt. Einer der Hauptaspekte ist hierbei die Berücksichtigung der Standortbedingungen auf die Entwicklung der Erosion. Dies liegt unter anderem an dem komplexen Zusammenwirken und fehlenden Statistiken von möglichen Regen- und Windlastbedingungen, darunter Starkregenereignisse, sowie mittlere Tröpfchengrößen [13]. Dieses Zusammenwirken kann derzeit auch im Labor nicht zuverlässig nachgestellt werden, was dazu führt, dass die heute eingesetzten Prüfverfahren nicht dazu ausreichen Erosionsschäden mit Präzision vorherzusagen oder nachzustellen [27]. Zusammenfassend gibt es Forschung, welche sich mit Aspekten der Vorderkantenerosion, wie z.B. der Regenbeständigkeit von Materialien, der Auswirkung verschiedener Schadensfälle auf die Aerodynamik, oder der Erfassung von Standortbedingungen beschäftigt. Allerdings gibt es noch immer kein anerkanntes Schadensmodell, welches das Verhalten des Materials der Oberflächenschicht und den Erosionsverlauf zuverlässig beschreiben kann [31].

Einteilung von Erosion

Für die Betrachtung der Umweltauswirkungen ist es in erster Linie interessant, wie groß die Schäden an realen Windkraftanlagen sind. Das daraus resultierende Schadensbild dient zum einen als Grundlage für die strömungsmechanische Simulation, und zum anderen als Abschätzung für die Menge und Art der Kunststoffemissionen in die Umwelt. Da die Modellierung des Erosionsprozesses noch nicht an dem Punkt ist, das tatsächliche Ausmaß der Erosion abzuschätzen, bietet es sich an die Schäden an Rotorblättern, unabhängig von deren Entstehung zu betrachten. Es konnte beobachtet werden, dass der Schaden in Nähe



Abbildung 2.6: Erosionsschäden an der Blattspitze bei 99 % Rotorradius



Abbildung 2.7: Erosionsschäden bei 88 % Rotorradius

der Staupunkte beginnt und sich von dort ausgehend in Richtung Hinterkante entwickelt. Auf der Druckseite breitet sich die Erosion stärker aus als auf der Saugseite [9]. Entlang der radialen Position des Rotorblatts steigt die Schwere der Schäden in Richtung der Blattspitze. Ab 70 % der Rotorradius können vermehrte Erosionsschäden festgestellt werden [9]. Zum Vergleich zeigt Abbildung 2.6 Schäden an der Blattspitze bzw. bei 99 % Rotorradius und Abbildung 2.7 bei 88 % Rotorradius desselben Rotorblatts. Hinsichtlich der

Einteilung der Schäden von Vorderkantenerosion gibt es keine einheitliche Klassifizierung. Wird das Material im Labor untersucht, findet die Einteilung meist über den Verlauf der Erosion statt. Hierbei wird bewertet, ob sich das Material noch vor der Inkubationszeit, in der Phase des Masseverlusts oder in der Endphase befindet [2, 34]. Es wurden auch bereits einige Untersuchungen an Rotorblättern im Feld durchgeführt, wobei verschiedene Schadensklassen definiert wurden. Im et al. untersuchten ein Blatt einer Vestas Turbine, welche zwölf Jahre im Betrieb war und klassifizierten die entstandenen Schäden in „moderat“ und „schwer“. Die Einteilung richtet sich hierbei nach der Dringlichkeit einer Reparatur. Bei dem moderaten Schaden war zwar die Oberflächenschicht nahezu abgetragen, die strukturelle Stabilität jedoch immer noch vorhanden, weshalb eine Wartung nicht als nötig angesehen wurde. Diese Art der Erosionsauswirkung wurde ab einer radialen Position von 80 % beobachtet. Der „schwere Schaden“ zeichnete sich durch die vollständige Entfernung der Oberflächenschicht an der Vorderkante, sowie eine Schädigung des Laminats aus. Er trat bei einer radialen Position ab 90 % auf. Die mittlere Tiefe der Schäden betrug in der Klasse „moderat“ 1,01 mm und in der Klasse „schwer“ 1,29 mm [9]. Auch Aird et al. unterscheiden nur in zwei Arten der Erosion: zum einen oberflächliche Schäden, welche das unter der Oberflächenschicht liegende Material nicht freilegen und in tiefe Schäden, welche das darunterliegende Schaufelmaterial freilegen [24]. Prieto et al. unterteilen in kosmetische Erosion, Schweregrad 1 und Schweregrad 2, wobei erstere kleine Flecken beschreibt, die nicht bis an das Laminat reichen, Schweregrad 1 Stellen sind, die dieses erreichen und Schweregrad 2 größere Zonen sind, die das Laminat freilegen [25]. Neben diesen Quellen gibt es weitere, welche eine beschreibende Art der Erosionseinteilung anhand von Felddaten durchführen ohne die verschiedenen Stufen zu quantifizieren [10, 21, 33]. Außerdem existiert die Beschreibung des Erosionsausmaßes anhand von Rauigkeitswerten. Hierbei wird zwischen verschiedenen Tiefen, deren Maximalwerte mit 200 µm beschreiben werden, sowie teilweise Flächendeckungsdichten unterteilt [35, 36]. Zárate et al. beschreiben die Verschiebung der Profillinie und unterteilen in drei Stufen des Volumenverlusts an der Druckseite des Profils. Hierbei wird eine prozentuale Angabe zur Reduktion der Profilkordinate im Verhältnis zum ursprünglichen Profil angegeben [37].

Die genaueste Beschreibung der Schäden lässt sich bei Sareen et al. finden, welche auch in anderen Veröffentlichungen verwendet wird. Hier werden neun Schadensklassen auf Grundlage von Felddaten von Onshore – Turbinen definiert, welche zwischen 1 und über 10 Jahren im Betrieb waren. Es werden sowohl die einzelnen Schäden – Lochfraß, Grubenbildung und Delaminierung – in Größe und Anzahl beschrieben, als auch die Ausbreitung in Richtung der Sehnenlänge untersucht [4]. Dies ist die einzige Einteilung der Schäden, welche sich in mehreren Untersuchungen wiederfinden lässt. Es gibt bisher keine Vereinheitlichung der Beschreibung von Schäden, die durch Vorderkantenerosion erzeugt werden.

Veröffentlichungen, in denen Schadensklassen definiert werden, nutzen diese meist für weiterführende Untersuchungen. Im häufigsten Fall handelt es sich dabei um die Bewertung der aerodynamischen Eigenschaften, wie dem Auftrieb, Widerstand und Leistung. Doch sie dienen auch als Grundlage zur Qualitätsbewertung von Aufnahmeverfahren, wie z.B. der Bildverarbeitung [9]. Eine Verknüpfung der im Feld beobachteten Schadensstufen und turbinen- oder standortspezifischen Eigenschaften liegt nach bestem Wissen der Autorin nicht vor.

2.3 Materialeintrag in die Umwelt

Die Quantifizierung der Vorderkantenerosion an Rotorblättern und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt sind derzeit nur in beschränktem Maß Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Dennoch gibt es einige Veröffentlichungen, welche sich mit diesem Thema beschäftigen. Schmitt erwähnt den Abrieb von Rotorblättern hinsichtlich des Kunststoffeintrags durch Offshore – Anlagen in der Nordsee, erhielt aber hinsichtlich der Schwere dieses Problems von den Ansprechpersonen der verschiedenen Windparks kontroverse Aussagen [38]. Es existieren Stimmen, die diesem Materialeintrag aus Umweltperspektive sehr kritisch gegenüberstehen. 2021 forderte die Umwelt – Nichtregierungsorganisation „The Green Warriors of Norway“ die Europäische Chemikalienagentur auf die Auswirkungen von Epoxidharzen, welche durch Windkraftanlagen in die Umwelt gelangen, zu untersuchen und Maßnahmen zu entwickeln. Sie betonten die negativen Auswirkungen auf die gesamte Nahrungskette, wobei ihr besonderer Fokus auf dem Stoff Bisphenol A und ähnlichen Chemikalien lag [39]. Daneben gab es eine weitere Veröffentlichung zu diesem Thema im gleichen Jahr, die jedoch nicht als ein wissenschaftlich fundiertes Dokument angesehen werden kann [40]. 2020 wurde von den Wissenschaftlichen Diensten des Deutschen Bundestags eine grobe Mengenabschätzung des Fraunhofer Instituts veröffentlicht, welche das durch Erosion abgetragene Material an Rotorblättern von Windkraftanlagen betrifft [41]. Eine ausführlichere Abschätzung dieses Eintrags in die Umwelt, die potentiellen Auswirkungen und die Implementierung in der ökologischen Bewertung von Windkraftanlagen existiert bisher nicht.

Ökobilanzierung von Windkraftanlagen

Negative Umweltauswirkungen können auf dem gesamten Lebensweg einer WKA entstehen, welcher die Phasen der Rohstoffgewinnung, der Herstellung, dem Betrieb und der Behandlung ausgedienter Komponenten und Materialien beinhaltet. Das meist etablierte Verfahren zur Bewertung der möglichen Umweltauswirkungen eines Produktes oder Prozesses ist die Ökobilanzierung (engl. Life Cycle Assessment, LCA) [42]. Diese Methode ist nach DIN EN ISO 14040/14044 normiert und ermöglicht der Wissenschaft, der Industrie und politischen Entscheidungstragenden ein einheitliches Verfahren der Quantifizierung von Umweltauswirkungen und somit auch einen besseren Vergleich zwischen Produkten oder Prozessen. Durch das Anstreben einer ganzheitlichen Betrachtung sowohl des gesamten Lebenswegs als auch vieler verschiedener Umweltbereiche soll eine Verlagerung der Umweltauswirkungen verhindert werden [43]. Bei Windenergieanlagen beinhalten die relevanten vorgelagerten Prozesse die Rohstoffgewinnung, die Fertigung und den Bau der Windkraftanlagen, die betrieblichen die Stromerzeugung, den Betrieb und die Wartung und die nachgelagerten die Stilllegung und die verschiedenen Szenarien zur Behandlung der Abfälle. In bestehenden

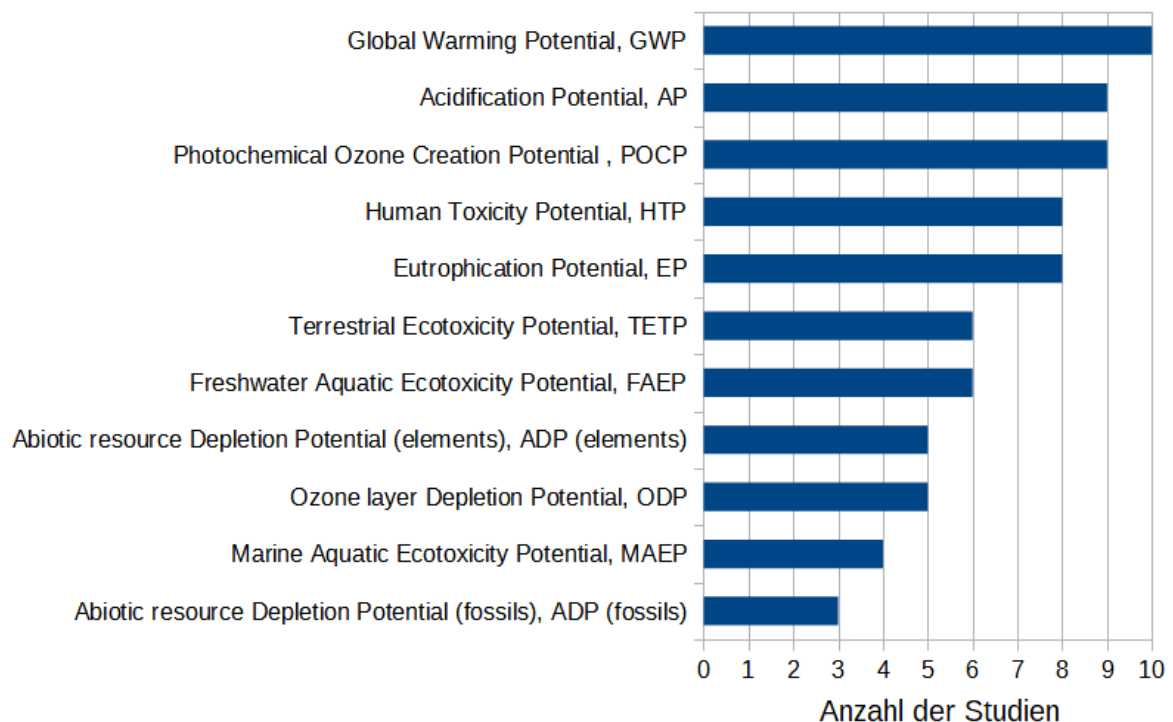


Abbildung 2.8: Anzahl der Studien welche die entsprechende Wirkungskategorie in der Ökobilanz berücksichtigen (10 von Kylili untersuchte Studien)

Ökobilanzierungen werden die möglichen Umweltauswirkungen in den meisten Fällen auf eine Energieeinheit bezogen. Spezifischer ist diese funktionelle Einheit meist 1 kWh. Die standardmäßig angenommene Lebensdauer der Anlage beträgt 20, in einzelnen Fällen 25 Jahre. Als meist verwendeter und aussagekräftigster Index werden zum einen der kumulierte Energieaufwand und die energetische Amortisationszeit angesehen. Diese sind keine Kategorien einer Ökobilanzierung nach DIN EN 14040/44, sondern stellen eine eigene und begrenztere Bewertungsmethode dar. Zum anderen werden kohlenstoffbezogenen Indikatoren (wie beispielsweise das Treibhausgaspotential) genannt. Doch dies sind nicht die einzigen berücksichtigten Umweltwirkungskategorien. In den von Kylili untersuchten Studien wurden bis zu elf Kategorien untersucht. Alle zehn Studien berücksichtigten das Treibhausgaspotential (GWP), doch auch andere Wirkungskategorien wie das Versauerungspotential oder Ozonbildungspotential wurden in den meisten Bilanzierungen untersucht. Abbildung 2.8 zeigt in wie vielen der aufgenommenen Studien die jeweilige Umweltwirkungskategorie miteinbezogen wurde [42]. Mendecka et al. überprüften 104 Studien und kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Treibhausgasemissionen am häufigsten untersucht wurden. Dies wird unter anderem dadurch begründet, dass es sich hierbei um ein großes Umweltproblem handelt [44]. Kritisiert wird die Gefahr der starken Vereinfachung einer solch reduzierten Bewertung [45]. Ca. die Hälfte der Studien erfassen den kumulierten Energieaufwand [44]. Hinsichtlich der Umweltwirkungskategorien Treibhausgas-, Versauerungs- sowie Eutrophierungspotential pro kWh wird mit steigender Turbinennennleistung von geringeren Potentialen ausgegangen [42, 44]. Das Versauerungspotential sowie das Eutrophierungspotential werden für On- und Offshore – Anlagen als vergleichbar angesehen. Neben den berücksichtigten Umweltwirkungskategorien sind auch die Lebensphasen, die mit in die Bilanzierung einfließen von Interesse. Laut der Untersuchung von Mendecka et al. gilt das größte Interesse mittelgroßen (100 – 1000 kW) und großen (> 1000 kW) Anlagen. Die meisten dieser Studien heben die Bedeutung der vorgelagerten Prozesse der Herstellungsphase hervor [44]. Es existieren jedoch auch Studien, welche den Einfluss der Endlagerung, Abfallentsorgung bzw. des Recyclings betonen. Zudem wird ausgedrückt, dass die Komponentenherstellung möglichst nah bei dem angedachten Standort der WKA erfolgen sollte um Transportentfernungen zu minimieren [42]. Einige Untersuchungen berücksichtigen die zusätzlichen Emissionen durch das Fahren von Teillast bzw. das Anfahren und Abschalten zur Netzintegration [44]. Besonders hervorgehoben wird das Windpotential des Standorts, welche die Umweltauswirkungen je Energieeinheit beträchtlich verändert. Generell ist der Umfang der Studien jedoch sehr unterschiedlich [42]. Es soll erwähnt werden, dass es keine Handlungsanweisung in den entsprechenden Normen DIN EN 14040/44 gibt, welche Kategorien in einer

Ökobilanzierung berücksichtigt werden sollten. Diese Abschätzung und Festlegung von Umweltkategorien, welche für die jeweilige Anwendung relevant sein könnten, liegt in der Hand der Personen, welche die Ökobilanz erstellen und ist somit eine zumindest teilweise subjektive Entscheidung. Die berechneten Umweltauswirkungen schwanken stark je nach Technologie, Standort und zeitlicher Auflösung. Zudem werden unterschiedliche Modellierungsansätze für dieselbe Umweltwirkungskategorie verwendet, welches keine eindeutige Identifizierung der Umweltauswirkungen ermöglicht. Weiterhin unterscheiden sich die Studien in den Annahmen der Input- und Outputflüsse der vor- und nachgelagerten Prozesse und deren Emissionen. Einer der Hauptursachen sind hierbei die Auswirkungen des gewählten Strommixes bei der Fertigung, Konstruktion und Demontage. Zusätzlich entstehen Unterschiede durch Unstimmigkeiten bei den angenommenen Windverhältnissen, Turbinengrößen und -designs [44]. Es besteht Kritik an bestehenden Ökobilanzierung hinsichtlich fehlender Harmonisierung und fehlender Sensitivitätsanalysen [42, 44]. Arvesen et al. stellen fest, dass sowohl die Nutzungsphase, also auch die End-of-Life-Phase nicht vollständig abgedeckt werden [46]. Wird die Nutzungsphase berücksichtigt, so wird dem Transport die größte Auswirkung zugeschrieben und als weitere Einflussgrößen Ersatzteile und Schmierstoffe erwähnt [45]. Nach derzeitigem Kenntnisstand der Autorin existieren keine Ökobilanzierungsstudien, die den Eintrag durch Erosion in die Umwelt berücksichtigen.

Auswirkung von Kunststoff in der Umwelt

Wie sich Kunststoff auswirkt, wenn es in die Umwelt gelangt ist bereits seit Jahrzehnten Teil der Forschung. Innerhalb der letzten fünfzehn Jahre ist die Zahl der Veröffentlichungen, insbesondere im Bereich Mikroplastik stark gestiegen. Mikroplastik wird hierbei als Kunststoffpartikel definiert, deren größte Abmessung unter 5 mm liegt [47]. Während primäres Mikroplastik absichtlich in dieser Größe hergestellt wird, entsteht sekundäres Mikroplastik durch die Verwitterung aus größeren Kunststoffteilen, dem Makroplastik [47]. Seit 2011 ist ein exponentielles Wachstum an veröffentlichten Artikeln zum Thema Mikroplastik zu beobachten. Hierbei beschäftigt sich die Forschung zum einen mit der Anreicherung, Verschmutzung und Häufigkeit von Mikroplastik in Meeren und an Stränden. Des Weiteren wird der Transport und Abbau untersucht, sowie versucht die Menge und Art des Kunststoffes in verschiedenen Umgebungen zu bestimmen. Ein zusätzlicher Forschungsbereich beschäftigt sich mit der Aufnahme von Mikroplastik durch Organismen in der Meeresumgebung.

Der Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt kann über verschiedene Wege erfolgen, wobei Düngemittel auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, Kläranlagen, sowie Mülldeponien die wichtigsten und direktesten darstellen. Durch die geringe Abbaurate kann es über Jahrhunderte in der Umwelt verweilen [48]. Die Auswirkungen von Kunststoffmaterialien auf Biota können extern in Form von Verfangen, Strangulieren, Ertrinken oder Ersticken erfolgen [49]. Durch die Unfähigkeit der meisten Organismen den Kunststoff von der Beute zu unterscheiden, wird es aufgenommen und kann zu inneren Schäden an Geweben und Organen, sowie Geschwüren führen und durch die Organismen zusätzlich weiter transportiert werden [48, 50]. Es wirkt sich auf den Verdauungstrakt sowie die Hormonproduktion und Fortpflanzung aus. In maritimer Umgebung kann außerdem Makroplastik ein potenzieller Faktor für das Wachstum und die Verbreitung von Mikroalgen und Bakterien sein [51]. Polymere aller Größen können außerdem verschiedene toxische Chemikalien wie z.B. Schwermetalle und Pestizide aufnehmen. Unter bestimmten Umständen können sie diese wieder freisetzen und somit als Reservoir für Schadstoffe in der Umwelt dienen [50]. Neben biologischen, chemischen und physikalischen Auswirkungen auf die Umwelt, entstehen durch Makroplastik auch wirtschaftliche Folgen durch touristische Einbußen, Verstopfungen in Entwässerungsinfrastrukturen, ein erhöhtes Überschwemmungsrisiko, sowie Beschädigung von Schiffen und Fischereigeräten [51].

Während die Auswirkungen in maritimen Umgebungen viel untersucht werden, ist die Forschung in Frischwasser- und terrestrischen Gebieten bisher beschränkt. Die Wirkung im Süßwasser wird teilweise als ein Prozentsatz des maritimen Effekten abgeleitet [49]. Allerdings ist es auch möglich, dass die Wirkung durch ein beschränktes Verbreitungsgebiet und die direkte Betroffenheit von Einleitungen mit hohen Mikroplastikkonzentration auf Süßwasserorganismen akuter ist als der Effekt in maritimer Umgebung [50]. Die Untersuchungen von Auswirkungen in terrestrischer Umgebung und in der Atmosphäre ist noch nicht sehr fortgeschritten [48]. In landwirtschaftlich genutzten Flächen wird davon ausgegangen, dass Makroplastik zu geringerer Samenkeimung und Wurzelwachstum führen kann [51]. An den Effekten von Mikroplastik auf die pflanzliche Biomasseproduktion besteht ein Interesse der Forschung und Industrie [52].

Ein großer Teil der Untersuchung der Auswirkung von Mikroplastik in der Umwelt ist der Effekt, den es auf die menschliche Gesundheit hat. Menschen sind Mikroplastik durch Nahrung oder Atmung ausgesetzt [48]. Die größten Expositionsfaktoren entstehen hierbei durch Fisch, Meeresfrüchte und Meersalz [47]. Doch auch Trinkwasser kann eine Quelle sein. Mikroplastik kann den Energiestoffwechsel, das oxidative Gleichgewicht und die DNA stören und immunologische, histologische sowie neurologische Schäden verursachen [48].

Die Auswirkung, die Polymere auf Menschen, Flora und Fauna haben hängen von der Menge sowie verschiedenen Eigenschaften, wie der Größe, der Form, der Art des Monomers und der Dichte ab. Diese sind ebenfalls relevant für die Sorptionseigenschaften für toxische Chemikalien [48, 50]. Die Größe der Partikel ist entscheidend für die Toxizität, wobei die kleinsten Durchmesser die größten Auswirkungen haben [50]. Neben der Größe ist in maritimer Umgebung auch die Dichte von besonderer Bedeutung. Liegt diese unter der Dichte des Meerwassers verbleibt der Kunststoff an der Oberfläche und baut sich dort durch UV-Licht und Verwitterung leichter ab. Ist die Dichte jedoch höher, sinkt der Kunststoff an den Meeresboden ab, wodurch die Abbaugeschwindigkeit drastisch reduziert wird und es durch Bakterien, Algen und Schwermetalle zusätzlich kontaminiert wird [47]. Für die Bewertung der Auswirkungen von Kunststoffen in der Umwelt spielen diese Faktoren somit eine bedeutende Rolle und werden in bestehenden Bewertungsmodellen berücksichtigt. Bisher gibt es keine vollständige offizielle LCA - Methodik [49]. Obwohl die derzeit verwendeten Polymere einer Regulierung und Zulassung unterliegen, ergeben sich verschiedene Expositionswege und Gefahrenpotentiale, welches die Bewertung komplex macht [47].

Es gibt verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Umweltauswirkungen von Kunststoffen, die sich auf verschiedene Eintragsgebiete sowie Wirkungskategorien beziehen. Darunter befindet sich das wissenschaftlichen Konsensmodell USEtox innerhalb dessen eine detaillierte Datenbank mit Charakterisierungsfaktoren für die Human- sowie Süßwasserökotoxizität verschiedenster Chemikalien erstellt wurde [53]. Für den Eintrag von Mikroplastik in maritimer Umgebung und davon abgeleitet in Süßwasserumgebung wurden innerhalb des MariLCA Projekts Charakterisierungsfaktoren entwickelt. Die verwendete Wirkungskategorie beschreibt die physikalische Auswirkungen auf Biota. Es wird zwischen verschiedenen Größen, Formen und Dichten unterschieden sowie einzelne ausgewählte Polymere berücksichtigt. Demnach tragen eine geringere Dichte und größere Abmessungen der Kunststoffpartikel zu höheren potentiellen negativen physikalischen Auswirkungen auf Biota im Gewässer. Die Entwicklung von weiteren Charakterisierungsfaktoren für Polymere und damit Ansätze für eine offizielle Ökobilanz – Methodik zur umfassenderen Bewertung der Auswirkungen von Kunststoffemissionen auf die Umwelt sind derzeit in der Forschung [49].

2.4 Lärmbelastung durch Windkraftanlagen

Über den von Windkraftanlagen ausgehenden Lärm wird bereits seit den 1980er Jahren geforscht und es ist bekannt, dass die wichtigsten Komponenten, die zur Lärmentstehung beitragen zum einen der Antriebsstrang mit Getrieben und Generator und zum anderen die Rotorblätter sind. Ersterer erzeugt in der Regel Vibrationen, welche auf den Turm und die Blätter übertragen und dort abgestrahlt werden. Letztere erzeugen mit dem Durchgang durch die Luft den sogenannte aerodynamischen Lärm [11]. Dieser enthält verschiedene Frequenzen und wird als Breitbandrauschen beschrieben [54]. Eine Rangordnung der am stärksten lärm erzeugenden Mechanismen und deren Störeeigenschaften ist derzeit nicht verfügbar [11]. Moderne Windparks haben einen Schalleistungspegel zwischen 98 und 105 dB(A) in Nabenhöhe. Je nach Wetter- und Geländelage werden diese bei Wohnhäusern in 500 m Entfernung auf 25-45 dB(A) im Freien, bzw. 15-45 dB(A) im Inneren gedämpft [55]. Während es für Onshore – Anlagen bereits zuverlässige Vorhersagemodelle gibt, sind die Untersuchungen für Offshore – Anlagen mit größeren Unsicherheiten besetzt. Diese begründen sich vor allem in der weiten Entfernung der Anlagen zu den nächsten Wohnhäusern, sowie den Schalltransport über eine ebene reflektierende Fläche [11].

Auswirkungen auf Mensch und Umwelt

Der von Windkraftanlagen abgestrahlte Schall kann zum einen tatsächliche Belästigung und Schlafstörungen auslösen [12]. Zum anderen kann er in Kombination mit anderen Faktoren auch zu einer schlechteren Akzeptanz von Windenergie führen. Hinsichtlich der Befürchtungen liegt der Lärm hinter der Bedrohung des Vogelflugs und dem Anblick der Anlage [56]. Im Bereich der Auswirkungen von Windkraftanlagen auf den Menschen, wird dem Schall, im Vergleich zu Faktoren wie dem Schattenwurf oder dem Eisabwurf die größte Bedeutung beigemessen.

Steigt der Lärmpegel, so nimmt die Anzahl an berichteten Schlafstörungen wie z.B. Einschlafproblemen und weniger Tiefschlaf zu. Weiterhin wurde herausgefunden, dass Anwohnende auch Schall unterhalb der Hörschwelle wahrnehmen können, welches ebenfalls ihren Schlaf beeinträchtigt [11]. Die meisten Beschwerden bezüglich des Lärms scheinen sich auf die Nachtzeit zu beziehen, was mit einem höheren Signal-Rausch-Verhältnis durch geringere Hintergrundgeräusche erklärt werden kann. Dieser ist in ländlichen Gebieten, besonders niedrig und Personen fühlen sich dort somit mehr belästigt als Personen, die in Vorstädten leben [11, 12]. Aus diesem Grund sind die Geräusche von Windkraftanlagen auch dann besonders gut hörbar, wenn auf Nabenhöhe viel Wind herrscht, es am Boden jedoch relativ windstill ist [57]. Neben dem Geräuschverhältnis ist

auch der A-bewertete Schalldruckpegel relevant für den Grad der Belästigung. Steigt die Dezibelanzahl des hörbaren Lärms oder der Anteil an niedrigen Frequenzen, so wird das Geräusch als lästiger wahrgenommen. Doch auch der Anblick und die allgemeine Einstellung zu Windparks haben einen Einfluss darauf wie sehr sich Menschen gestört fühlen. So scheint Windparklärm eher wahrgenommen zu werden als andere Lärmquellen, wie Verkehrs-, Eisenbahn- und Fluglärm und die Anzahl der selbstberichteten Schlafstörungen steigt durch die Sichtbarkeit der Turbinen [11]. Ob Windparklärm tatsächlich den Schlaf beeinträchtigt ist umstritten. Es gibt sowohl Studien, die dies belegen, als auch solche, die diesen Effekt nicht nachweisen können. Die Wahrnehmung der Belästigung, welche auch Auswirkungen auf die Schlafstörungen haben kann, ist sehr subjektiv und hängt von mehr Faktoren, als nur des Pegels und der Frequenzen des abgestrahlten Schalls [57]. Neben den Auswirkungen auf den Menschen, kann der Lärm die Kommunikation zwischen Wildtieren beeinträchtigen. Dies könnte sich zum einen auf die Fortpflanzung auswirken und die Tiere zum anderen durch den eventuell erhöhten Stress anfälliger für Krankheiten machen [11].

Regulierung

Gesetzliche Regelungen zu Schallemissionen bestimmen einzuhaltende Maximalpegel, wobei diese oftmals allgemein gehalten sind und sich nicht explizit auf Windkraftanlagen beziehen. Die Limits reichen von 20 dB(A) bis 70 dB(A) und sind sowohl vom Standort der Lärmquelle als auch des Tages- bzw. Nachtzeit abhängig. Die World Health Organization empfiehlt für eine Minimierung der Schlafstörungen durch Windkraftanlagen einen Gesamtaußenlärmpegel von 45 dB(A) [12]. Beschwerden können scheinbar minimiert werden, wenn das Limit an Wohnhäusern bei 35 dB(A) liegt. Einige Gerichtsbarkeiten halten diesen Wert jedoch für zu niedrig [11]. Bei den aktuellen Regelungen gibt es die Kritik, dass die Grenzwerte auf traditionellen Lärmquellen basieren und somit für die Geräusche der Windkraftanlagen, welche sich überwiegend im niederfrequenten Bereich bewegen unangemessen sein könnten. Einige Länder sind diesem Problem begegnet und so enthalten die Richtlinien von Schweden und Deutschland Vorschriften für tieffrequente Geräusche. Die Verletzung der allgemeinen Lärmregulierungen kann der Grund für den Abbau von Turbinen oder die Verhinderung vom Bau neuer Anlagen sein [12]. Zur Reduzierung des Schallemissionen der Windkraftanlage selbst gibt es bereits bauliche Maßnahmen. Hinsichtlich des aerodynamischen Lärms beziehen sich diese auf ein verändertes Design der Rotorblätter und die Abregelung ab einer bestimmten Drehzahl [57].

2.5 Schallentstehung am Rotorblatt

Schallwellen sind kleine Druckschwankungen, welche in einem Medium, beispielsweise der Luft, übertragen werden. Das menschliche Gehör kann hierbei Frequenzen von ca. 16 Hz bis 16 kHz wahrnehmen. Hinsichtlich des Schalldrucks beginnt der hörbare Bereich bei 0 dB und endet bei der Schmerzgrenze mit 140 dB [58]. Schallquellen können verschieden Ursachen haben, in technisch relevanten Strömungen jedoch gilt die auftretende Turbulenz als die Hauptursache für aerodynamisch erzeugten Schall [59]. Wenn Strömungsturbulenzen mit der Oberfläche interagieren, erzeugen sie zufällige Druckschwankungen auf dieser [54]. Bei der plötzlichen Änderung einer Randbedingung, findet eine Energiestreuung statt und die turbulente kinetische Energie wird in akustische Energie umgewandelt. Am Rotorblatt tritt dieser Effekt an der Vorder- und Hinterkante des Profils auf und es wird dementsprechend in die Mechanismen des Vorder- und Hinterkantenlärms unterscheiden [60]. Vorderkantenlärm entsteht durch die Wechselwirkung zwischen der Turbulenz in der Anströmung und der Vorderkante. An der Hinterkante interagiert die Turbulenz der ausgebildeten Grenzschicht mit der Hinterkante. In beiden Fällen findet Interaktion mit einer Kante statt, an der turbulente Energie deutlich effizienter in Schall umgewandelt wird, als an einer Profiloberfläche oder in einer freien Strömung [59].

Obwohl auch der Vorderkantenlärm von Bedeutung sein kann, haben verschiedene Studien gezeigt, dass vor allem an modernen Multi-Megawatt Anlagen der Hinterkantenlärm die dominierende Geräuschquelle ist [11]. Hierbei handelt es sich generell um ein breitbandiges Geräusch, wobei trotzdem eine bestimmte Spitzenfrequenz existiert, bei der das Rauschen maximal wird [60]. Hinterkantenlärm entsteht durch Grenzschichtturbulenz, welche sich bis zur Hinterkante fortsetzt und dort als Schall abgestrahlt wird. In welchem Frequenzbereich und von welcher Intensität dieser ist, hängt hauptsächlich von den Eigenschaften der turbulenten Grenzschicht an der Hinterkante ab [61]. Diese wird durch verschiedene Geometrie- und Strömungsparameter beeinflusst. Ffowes Williams und Hall entwickelten eine Theorie zur Abstrahlung von Hinterkantenschall ins Fernfeld für eine turbulent umströmte, halbumendliche Platte bei kleinen Machzahlen. Anhand dieser können grundlegende Zusammenhänge für die Profilmströmung und deren Auswirkung auf die abgestrahlte Schalldruckintensität veranschaulicht werden.

Für nichtkompakte, zweidimensionale Profile, also eine kleinere Sehnenlänge als die Wellenlänge des akustischen Signals hat, gilt

$$p^2 \sim \frac{\rho \cdot \bar{u}^2 \cdot U^3}{c} \cdot \frac{l_c \cdot l_{turb}}{A^2} . \quad (1)$$

Hierbei ist p der Schalldruckeffektivwert, ρ die Dichte des Fluids, \bar{u} die mittlere Schnelle der turbulenten Strukturen, U die Strömungsgeschwindigkeit, c die Schallgeschwindigkeit, l_c die Spannweite, l_{turb} die charakteristische Turbulenzlänge und A der Abstand zum Beobachter. Sowohl die Dichte als auch die Schallgeschwindigkeit sind bei einem gegebenen Standort einer WKA keine beeinflussbaren Faktoren. Liegt der Fokus auf der Schallentstehung am Profil, so ist der Abstand A zwischen Quelle und Empfänger nicht relevant, da dieser Faktor erst nach der Schallabstrahlung zum Tragen kommt und nicht die Profilmströmung beeinflusst. Als veränderbare Parameter, die im Zusammenhang mit der Schallintensität an der Hinterkante gesehen werden, bleiben die Strömungsgeschwindigkeit U , die Spannweite des Profils l_c , sowie die mittlere Schnelle der turbulenten Strukturen \bar{u} und die charakteristische Turbulenzlänge l_{turb} . Bei gegebenem Standort und Turbine sind sowohl l_c als auch U gegeben. Die häufige Annahme, dass \bar{u} proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist führt zu einer theoretischen Abhängigkeit des Hinterkantenlärms von der fünften Potenz der Strömungsgeschwindigkeit [62]. Die Skalierung in vierter bis fünfter Potenz scheint für geringe Machzahlen zutreffend zu sein, doch auch für größere Strömungsgeschwindigkeiten existiert ein Zusammenhang mit der Schallabstrahlung [60]. Die Strömungsgeschwindigkeit ist also ein Parameter mit großem Einfluss, und bedeutet, dass größere Windgeschwindigkeiten eine Erhöhung des Hinterkantenlärms bewirken. Zudem ist bei gleich bleibender Windgeschwindigkeit durch die größeren Umfangsgeschwindigkeiten an größeren Radien für die Intensität des Schalls das äußere Viertel des Blattes bestimmend ist [61]. In Richtung Blattspitze nimmt die Spannweite l_c des Profils ab und erzeugt somit einen entgegengesetzten Effekt hinsichtlich der Schallintensität. Dieser Zusammenhang ist jedoch im Gegensatz zur Strömungsgeschwindigkeit lediglich linear. Die in Formel (1) berücksichtigte charakteristische Turbulenzlänge, welche ein Maß für die großen Turbulenzstrukturen der Strömung ist, wird üblicherweise als proportional zur Grenzschichtdicke angenommen. Eine größere Grenzschichtdicke führt zu einer höheren Schallabstrahlung [62]. l_{turb} und \bar{u} sind Größen welche die Turbulenz der Grenzschicht beschreiben und ergeben sich wiederum aus Profil- und Anströmbedingungen. Wie die Umströmung des Rotorblatts aussieht und damit auch welche Gestalt die Grenzschicht annimmt, hängt von den Fluideigenschaften, der Profilform, den Oberflächeneigenschaften sowie die Art der Anströmung, mitsamt der

Strömungsgeschwindigkeit, dem Anstellwinkel und dem Turbulenzgrad der Anströmung ab. Diese Parameter bestimmen ebenfalls ob und wann die Grenzschicht von laminar zu turbulent umschlägt. In einer laminaren Grenzschicht verlaufen die Fluidpartikel geordnet und parallel zur Oberfläche, während sie in einer turbulenten deutlich mehr Schwankungen unterliegen. Bei der Überströmung eines Profils findet nach einer bestimmten Länge, dem Transitionspunkt, der Übergang von laminarer zu turbulenter Grenzschicht statt. Die Eigenschaften der turbulenten Grenzschicht an der Hinterkante und somit auch der dort abgestrahlte Schall hängen unter anderem davon ab an welchem Punkt die Strömung umschlägt. Die traditionelle Beschreibung dieses Prozesses erfolgt mithilfe der linearen Stabilitätstheorie, bei der davon ausgegangen wird, dass die Turbulenz der freien Strömung und andere Störungen gering sind. Hierbei beginnt der Umschlag mit Störungen wie den Tollmien-Schlichting-Wellen. Diesen folgen linearen und nichtlinearen Instabilitäten, wodurch zunächst turbulente Flecken entstehen und sich schließlich einer turbulenten Strömung in der Grenzschicht ausbildet. Sind jedoch die externen Störungen groß, so kann das lineare Störungswachstum umgangen werden und das Übergangsphänomen wird zu einem hochgradig nicht-linearem Problem. Diese Art des Übergangs wird Bypass-Übergang genannt und erfolgt bereits bei geringeren Profiltiefen. Eine Untersuchung von Schwab, welche an realen Windkraftanlagen durchgeführt wurde, ergab, dass kein Hinweis auf Tollmien – Schlichting – Wellen gefunden werden konnte. Ein Greifen des Bypass – Mechanismus an Windkraftanlagen wird also für wahrscheinlich gehalten [63].

Rotorblätter von Windkraftanlagen sind mehreren externen Störungen ausgesetzt. Schwankungen von Druck und Geschwindigkeit in der Umgebungsluft, sowie der Nachlauf von anderen Windturbinen erzeugen bereits Turbulenzen in der Anströmung. Hinzu kommen Rotationseffekte sowie nicht-glatte Oberflächen durch die Abnutzung im Betrieb. Diese Einflüsse machen die theoretische Bestimmung bzw. Simulation des Transitionspunkts komplex. Doch auch die Untersuchung des Transitionsverhaltens an Rotorblättern von realen Windkraftanlagen sind in der verfügbaren Literatur wenig zu finden. In einer dieser Untersuchungen beobachteten Özçakmak et al. eine ständige Verschiebung des laminar-turbulenten Übergangspunkts während der Rotation. Weiterhin konnten sie feststellen, dass auf der Druckseite des Profils eine geringere Geschwindigkeit und Anstellwinkel sowie eine erhöhte Anströmturbulenz zu einer Verschiebung des Transitionspunkts in Richtung der Vorderkante führt. Auf der Saugseite führen höhere Anstellwinkel zu einem früheren Übergang [64]. Hinsichtlich des laminar-turbulenten Übergangs besteht Forschungsbedarf um bessere Modelle zur Vorhersage zu entwickeln [11]. Durch das komplexe Zusammenwirken des turbulenten Windes und der Blattrotation sind Feldexperimente erforderlich, welche vor allem dem Stand der Technik in Form von Anlagen mit größeren Leistungen und Rotordurchmessern berücksichtigen sollten [63].

Faktoren, welche als ausschlaggebend für die Verschiebung des laminar-turbulenten Transitionspunkt bestimmt wurden, haben durch ihren direkten Zusammenhang mit den Instabilitäten und Schwankungen und somit der Turbulenz der Strömung ebenfalls einen Einfluss auf die Schallentstehung. So wird der Anstellwinkel, mit der die Strömung auf das Profil trifft, als wesentlicher Parameter angesehen. Hinsichtlich der Grenzschichtdicke prognostizieren Modellierungen von umströmten Profilen bei einer kleinen Grenzschichtdicke in Kombination mit großen Reibungsbeiwerten eine Reduktion des Hinterkantenlärms [59]. Auch Profileigenschaften, wie die Profilwölbung, Profildicke und der Radius an der Vorderkante haben einen großen Einfluss auf die Lärmbildung. Daraus resultiert eine aktive Entwicklung lärmarmere Profile zur Reduktion des Hinterkantenlärms [59]. Auf den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit, welche durch Erosion verändert wird, soll im Folgenden eingegangen werden.

Aerodynamische Auswirkung von Vorderkantenerosion

Im Fokus der Forschung liegt bisher der Einfluss der Vorderkantenerosion auf den Leistungsverlust und somit auch auf die Auftriebs- und Widerstandswerte. Die Abschätzung der jährlichen Leistungsverluste reichen von wenigen Prozent bis hinzu maximalen Verringerungen um 25 % bei stark ausgeprägter Erosion [13]. Untersuchungen zum Widerstandsanstieg im Windkanal ergaben, dass der Luftwiderstand um bis zu 500 % ansteigen kann. Insgesamt sind die aerodynamischen Verluste bei Windgeschwindigkeiten unterhalb der Nenngeschwindigkeit besonders groß und steigen mit zunehmender Reynoldszahl an [9]. Den Änderungen der Leistungswerte liegt eine Veränderung der Aerodynamik durch die Erosion zugrunde. Rauheitselemente bringen weitere Turbulenz in die Strömung ein, erhöhen die Wandreibung, verschieben das Geschwindigkeitsprofil in der Grenzschicht und führen zu einer Verdickung dieser [65]. Sowohl die Höhe der Rauigkeit als auch die Ausdehnung beeinflussen den Grad der Instabilitäten, der in die Grenzschicht induziert wird. Bei einer kritischen Höhe der Oberflächenrauheit werden turbulente Flecken gebildet, welche sich stromabwärts zu einer turbulenten Strömung ausbilden. Übersteigt die Rauigkeit diese kritische Höhe tritt bereits an der Rauigkeit eine turbulente Strömung auf. Bei steigendem Ausmaß und Rauigkeitshöhe verstärken sich die aerodynamischen Auswirkungen, d.h. der Auftrieb sinkt, der Widerstand steigt und es entstehen größere Leistungseinbußen [13]. Die sich bei starker Erosion entwickelnde Stufe führt aufgrund des Strömungssprungs zu Verlusten. Während diese bei einer höheren Stufen bzw. tieferen Erosion und einer Lage näher an der Vorderkante steigen, ist die exakte Form der Stufe von geringerer Bedeutung. Weiterhin konnte in Windkanalversuchen, bei denen Schleifpapier unterschiedlicher Körnung als Modell der Erosion verwendet wurde, zwar eine Verringerung des maximalen Auftriebs jedoch keine Abhängigkeit von der Größe der Körnung

festgestellt werden. Mit zunehmender Korngröße nimmt jedoch der Luftwiderstand zu. Untersuchungen zur kritischen Rauigkeitshöhe, also der Wert bis zu dem die Rauigkeit keine Auswirkung auf die aerodynamische Leistung hat, ergaben eine Proportionalität zur Sehnenlänge. Je länger die Sehnenlänge, desto größer ist auch der Wert der kritischen Rauigkeitshöhe. Zudem erzeugt Erosion eine Verschiebung des Umschlagspunkts in Richtung Vorderkante. Besonders bei hohen Anstellwinkeln befindet sich der Umschlag auf der Ober- bzw. Saugseite nahezu am Staupunkt des Profils [35].

Erosion beeinflusst offensichtlich die Aerodynamik des Profils und hat somit ebenfalls Auswirkungen auf den laminar-turbulenten Umschlag. In früheren Studien wurden die Auswirkungen von Vorderkantenerosion teilweise so vereinfacht, dass nur die Verschiebung des Transitionspunkts berücksichtigt und von einer vollturbulenten Strömung ausgegangen wurde [13]. Diese Art der Modellierung von Vorderkantenerosion überzeugt zwar durch Einfachheit, besonders in der rechnerischen Simulation, jedoch ist die Komplexität der Ausmaße der Erosion hoch und lässt sich nicht nur auf eine Verschiebung des Transitionspunkts reduzieren [66]. In einigen Untersuchungen lässt sich die Übersetzung der Erosion in eine Oberflächenrauheit finden. Hierbei wurde festgestellt, dass die Rauigkeitshöhe einen größeren Einfluss auf die Leistung hat als die Rauigkeitsdichte [35]. Es wird allerdings kritisiert, dass in der Angabe der Rauigkeit keine Informationen über eine positive oder negative Änderung der Oberfläche enthalten ist [67]. Zudem erreichen die Beschädigungen der Oberfläche durch den Erosionseinfluss Ausmaße, welche bei der Betrachtung feststellbar sind und somit größer sind als die durch Rauheit beschriebenen Abweichungen [68]. Sind die Rauigkeitshöhen zudem sehr gering, so kann in der Strömung keine Änderung des Geschwindigkeitsprofils festgestellt werden [65]. Die Modellierung durch eine sichtbare Veränderung der Profilgeometrie ist dementsprechend angebracht. Schramm et al. simulierten ein DU 96-W-180 Profil mit einer an der Vorderkante eingebrachte Stufe, sowie einer zusätzlichen Reduzierung des Profils an der Nase. Sie untersuchten die Aerodynamik hinsichtlich der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte und verglichen die Daten der RANS Simulation und $k-\omega$ -SST-Modellierung mit experimentellen Daten von Sareen et al.. Der Vergleich wurde bei $Re = 1,5 \times 10^6$ und ergab eine leichte Überschätzung der CFD für beide Werte in der Nähe des Strömungsabrisses [66].

Zwar wird mit Vorderkantenerosion neben Leistungseinbußen auch eine erhöhte Lärmerzeugung verbunden, jedoch sind die veränderten Schallemissionen nur bedingt erforscht und in Modellen abgebildet [61]. Latoufis et al. untersuchten die akustischen Auswirkungen von Holz – Rotorblättern einer 600 W Anlage mit 2,4 m Rotordurchmesser. Sie beobachteten einen durchschnittliche Erhöhung des Schalldruckpegels von 10 % bzw. 4 dB(A) über Windgeschwindigkeiten von 4 bis 10 m/s infolge der Erosion [69]. Eine

Untersuchung der Schallabstrahlung im Windkanal an einem DU96 W180 Profil wurde von Zhang et al. durchgeführt. Sie orientierten sich an den Schadensstufen nach Sareen et al. mit Löchern, Kerben und Delamination. Im Fall der ungestörten Anströmung (Turbulenzgrad unter 0,1 %) bei geringem Schaden ordneten sie das tonale Breitbandspektrum dem Geräusch aus den Instabilitäten der laminaren Grenzschicht zu. Bei starken kombinierten Schäden aus Löchern, Kerben und Delaminierung, sowie reiner starker Delaminierung, konnten sie ein reines Breitbandgeräusch feststellen und im Vergleich zu geringeren Schadensformen einen Anstieg der niederfrequenten Schalldrücke und einen Abfall der hochfrequenten Anteile beobachten. Bei turbulenter Anströmung mit einem Turbulenzgrad von ca. 4 % bzw. 7 % konnte kein Unterschied in dem an der Hinterkante entstehenden Fernfeldrauschen festgestellt werden [70]. Dos Santos et al. beobachteten bei der Untersuchung im Windkanal mit einem Turbulenzgrad von unter 0,08 % bei steigenden Höhen des aufgetragenen Zickzack Bandes ebenfalls einen Anstieg des Fernfeldrauschens bei niedrigen Frequenzen [71]. Neben verschiedenen Reynoldszahlen, Strouhalzahlen und Profilformen verwenden dos Santos et al. eine aufgetragene und Zhang et al. eine abgetragene Geometrieänderung. Wang & Chen simulierten verschiedene Erosionsstadien durch Abtragung der Vorderkantengeometrie und bestimmten in einer 3D-Simulation unter Verwendung des Zonal Detached Delay Eddy Simulation Turbulenzmodells den Schallpegel einer NREL 5MW Anlage. Sie berechneten eine Steigung des Gesamtlärmpegels beim Empfänger am Boden mit steigender Erosionstiefe. Zudem geben sie an, dass eine geringe Ausbreitung der Erosion in Sehnenlängensrichtung zu höheren Lärmpegeln führen können als eine weite Ausbreitung [72].

3 Forschungsbedarf

Da Vorderkantenerosion an Windkraftanlagen ein kompliziertes Phänomen ist, das aus der Wechselwirkung verschiedener Faktoren entsteht, ist eine Modellierung und Vorhersage des realen Schadensausmaßes bisher nicht möglich. Im Rahmen dieser Arbeit sollen für die Umweltauswirkungen der Erosion, zum einen durch den direkten Materialeintrag in die Umwelt und zum anderen durch eine veränderte Schallabstrahlung, Möglichkeiten gefunden werden das Ausmaß der Erosion angemessen nachzustellen. Der Materialeintrag ist derzeit kein Bestandteil der standardmäßigen Untersuchung der Umweltauswirkungen von Windkraftanlagen, jedoch gewinnt er in den letzten Jahren an Aufmerksamkeit. Die Quantifizierung der Materialmenge soll dazu beitragen Lücken in der Ökobilanzierung von Windenergie zu schließen. Zusätzlich kann eine wissenschaftlich fundierte Abschätzung dazu dienen aufkommenden Fragen zu diesem Thema zu beantworten und öffentlichen Aussagen zu begegnen. Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umwelt in Form von Lärmbelastung durch veränderten Hinterkantenschall gibt es sowohl experimentelle als auch numerische Ansätze den Effekt zu modellieren. Diese sind nötig um das Phänomen erfassen zu können, jedoch für die regelmäßige Anwendung auf verschiedene Profile zur Vorhersage einer veränderten Schallabstrahlung sehr zeit- und kostenintensiv. Auch weil die Forschung in diesem Thema am Anfang steht, gibt es derzeit keine Ansätze zur Abschätzung der veränderten Akustik mit reduziertem Aufwand. Im Folgenden soll solch eine Möglichkeit mithilfe einer numerischen Simulation mit angemessener Rechenzeit untersucht werden. Für die Nachbildung der erodierten Vorderkante wird eine geeignete Geometrie erstellt und die Auswirkung auf die Entstehung des Hinterkantenlärms untersucht.

4 Bestimmung von Erosionsschäden

Sowohl für die Abschätzung der abgetragenen Materialmenge, als auch für die akustische Simulation eines erodierten Rotorblatts ist es erforderlich möglichst durchschnittliche Daten der Schadensformen durch Vorderkantenerosion zu ermitteln. Um diese zu erhalten, ist die Auswertung möglichst vieler Informationen von Anlagen unterschiedlicher Merkmale von Vorteil. Im Idealfall liegen ausreichend Informationen über die Erosionsschäden an Turbinen und die Verknüpfung zu Eigenschaften der Betriebs- und Rotorblattart, sowie Umgebungsbedingungen vor. Wie bereits beschrieben, reicht der aktuelle Stand der Forschung nicht dafür aus die Schwere der Vorderkantenerosion einer Anlage zuverlässig vorherzusagen. Das komplexe Zusammenwirken unterschiedlicher Umweltbedingungen, verschiedenen Rotorblattmaterialien und Betriebsweisen lassen derzeit keine belastbare Modellierung des realen Erosionsablaufs zu. Ein möglicher Ansatz ist dementsprechend die Abschätzung auf Grundlage von Messungen der Schadenszustände erodierter Vorderkanten aus dem Feld durchzuführen.

Anforderungen

Für die Quantifizierung der Materialmenge, welche im Laufe der Lebensdauer einer Windkraftanlage von den Rotorblättern in die Umwelt gelangt, müssen Daten die Grundlage sein, welche eine Massen- bzw. Volumenabschätzung möglich machen. Im Idealfall bestehen diese aus detaillierten quantitativen Informationen zu den Schäden der Vorderkante am Ende der Lebensdauer. Eine Breite an verschiedenen Turbinen- und Materialarten, sowie Standorten ist erstrebenswert um eine durchschnittliche Abschätzung der Abtragsmenge zu ermöglichen. Für die Simulation der Strömung und damit der Schallabstrahlung können verschiedene Erosionsstadien von Interesse sein. Das Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik des DLR verwendet zur Strömungssimulation das interne Programm TAU, welches die Berechnung an einem 2D Schnitt durchführt. Obwohl es auch Möglichkeiten zur Auswertung von 3D-Flügeln unter Verwendung eines CAD-Modells gibt, ist die Verwendung von TAU die gängige Herangehensweise. Dadurch liegt der Fokus auf der Erstellung eines zweidimensionalen Profils mit Erosionsschäden. In diesem Schnitt des Rotorblatts können jegliche Abweichungen von der ursprünglichen Geometrie, auch Oberflächenrauigkeiten, eine Veränderung der Strömung hervorrufen und somit ebenfalls einen Einfluss auf die Schallentwicklung haben [22]. Die Beschaffung der Informationen zum Erosionsausmaß sollte also für die Bewertung der Akustik eine möglichst detaillierte Kontur eines erodierten Profils liefern, welche mit angemessenem Aufwand erstellt werden kann.

Literaturwerte

In der Literatur lassen sich Untersuchungen finden, welche sich auf Daten aus dem Feld stützen. Hierbei werden Fotos und/oder Inspektionsberichte ausgewertet und Erosionsstadien bzw. -muster daraus abgeleitet. Eine Nutzung dieser bereits erhobenen Daten zahlreicher Anlagen und damit die Verwertung des bereits investierten Aufwands wäre äußerst zweckmäßig und böte den Vorteil Informationen einer Reihe von Rotorblättern mit verschiedenen Betriebsbedingungen nutzen zu können. In einigen Veröffentlichungen lassen sich Beschreibungen der Vorderkantenschäden von Rotorblättern realer Windkraftanlagen finden, über die bereits im Kapitel 2.2 eine Übersicht gegeben wurde. Visbeck et al., Eisenberg et al., Martinez et al., Gaudern et al. und Im & Kim beschreiben Erosionsschäden, und dies teilweise auch quantitativ. Allerdings fehlen weitere Angaben um damit eine belastbare Abschätzung des Volumenverlusts durchführen zu können. In den meisten Fällen ist die Beschreibung der Erosion jedoch eher qualitativer und nicht quantitativer Natur. Hinzu kommt, dass oft nicht ersichtlich ist unter welchen Umständen sich die beschriebenen Erosionsmuster ergeben haben. Präzise Daten zu Turbineneigenschaften, Standorten, Betriebsweisen und Wartungs- bzw. Reparaturereignissen lassen sich nicht verknüpft mit Erosionsstadien finden. Meist gibt es zusätzlich keine Angaben dazu auf welche radiale Position sich die Schadensmuster beziehen, welches durch die erheblich stärkeren Schäden an der Blattspitze jedoch von großer Bedeutung ist. In der Literatur konnte lediglich eine Veröffentlichung gefunden werden, welche die Anforderungen weitestgehend erfüllt. Sareen et al. stützen ihre Schadensklassen zum einen auf Felddaten und geben zum anderen die durchschnittlichen Abmaße der beobachteten Schäden an [4]. Diese Beschreibung der Erosionsauswirkungen soll im späteren Verlauf dieser Arbeit als Grundlage der Mengenabschätzung dienen. Daten von beschädigten Vorderkanten, welche in veröffentlichten Studien verwendet und darin für andere Zwecke ausgewertet wurden, wären in Form von Rohdaten sehr hilfreich für die hier angestrebte Abschätzung. Da die Nutzung aufgrund datenschutzrechtlicher Bestimmungen ausgeschlossen ist, ist es für die Verwendung von Rohdaten erforderlich, eigene Messdaten zu erheben.

Erhebung von Felddaten und Aufnahme von Erosionsschäden

Es gibt eine Reihe von Technologien, die zur Schadensdetektion an Rotorblättern verwendet werden. Diese zerstörungsfreien Verfahren finden sowohl im Labor als auch vor Ort statt und reichen von Schwingungsüberwachungen und Thermographien, über Impedanztechniken und der Auswertung von Frequenzantworten unterschiedlicher Wellenlängen bis hin zu Lasertechniken, Smart Paint und Mikroskopie [73]. Sie dienen mehrheitlich der Zustandsüberwachung und Detektion struktureller Schäden. Hierbei ist die Schwingungsanalyse die bekannteste Technologie zur Zustandsüberwachung [74]. Häufig genannt im Zusammenhang mit der Schadenserkennung an Windkraftanlagen ist die Thermographie, bei der schadhafte Stellen durch ihre abweichende Wärmeleitfähigkeit erkannt werden [15]. Diese Verfahren sind dafür ausgelegt unterirdische Defekte oder Anomalien zu detektieren und somit den strukturellen Zustand der Rotorblätter zu bewerten [74]. Unter der Vielzahl der möglichen Technologien ist bisher noch unklar welche die am besten geeignete ist [24]. Für die in dieser Arbeit benötigten genauen Abmessungen von Schäden, welche durch Erosion entstanden sind, eignen sich diese Verfahren nicht, da Defekte im Inneren des Rotorblatts nicht von Interesse sind. Ein Verfahren, welches die äußeren Schäden am Rotorblatt aufnimmt ist ausreichend. Für die Aufnahme von Schadensbildern an der Oberfläche wird im Rahmen von Inspektionen die konventionelle Fotografie, teilweise mithilfe von Drohnen verwendet [75]. Diese Methode überzeugt vor allem durch ihre Einfachheit und Wiederholbarkeit. Zur dreidimensionalen Erfassung scheint Photogrammetrie durch Drohnenaufnahmen ein vielversprechender Ansatz zu sein, bringt jedoch durch Flüge in Rotorblattnähe auch Herausforderungen mit sich [13]. Konventionelle Fotografie wird häufig zur Untersuchung von Vorderkantenerosion verwendet. Besonders nützlich erweist sie sich für den Vergleich zwischen experimentellen Daten und Felddaten [29]. Publikationen, welche Erosionsschäden von realen Turbinen beschreiben, stützen sich meist auf Fotos von Vorderkanten [4, 21, 76]. Es gibt bereits Ansätze zur Auswertung von Fotografien mithilfe von maschinellem Lernen. Die flächenmäßige Ausdehnung und Form sowie grobe Einteilung in tiefe und oberflächliche Schäden ist dabei möglich. Sie können zur schnellen, objektiven Bewertung von zahlreichen Bildern aus Feldinspektionen genutzt werden. Für eine genaue Quantifizierung des Schadens und das Erkennen von beginnender Erosion sind jedoch weitere Arbeiten erforderlich [24]. Auch die zugrunde liegenden fotografischen Aufnahmen haben eher eine geringe Detailgenauigkeit und erfassen keine kleinere Lochfraßbildung [29]. Geringe Kontraste zwischen der Oberflächenschicht und der freigelegten Schicht erschweren die Erkennung von oberflächlichen Schäden [3]. Die Verwendung von Bildaufnahmen eignet sich für die Erfassung einer großen Anzahl von Schäden auf der Oberfläche und deren grober Bewer-

tung. Für die vorliegende Arbeit ist eine möglichst detaillierte Erfassung der dreidimensionalen Oberflächengeometrie gefordert und aufgrund des gegebenen Rahmens nur von einer geringen Anzahl von Rotorblättern möglich. In der Literatur beschriebene Untersuchungen erstellen hierfür teilweise einen Abdruck der Vorderkante. Hierbei wird entweder Ton oder Dentalalginat (eine Abformmasse für Zähne), verwendet. Diese Abdrücke müssen dann zur besseren Nutzbarkeit in ein CAD-Format übertragen werden. Im et al. führten dies unter Verwendung von Projektionspapier durch [9]. Ehrmann et al. übertrugen den Abdruck vom Dentalalginat auf Laborgips und scannten diesen mithilfe eines Laser-Wegsensors [10]. Die Sicherung der Vorderkantengeometrie unter Verwendung einer Abdruckmasse scheint ein relativ einfacher und kostengünstiger Weg zu sein. Jedoch sind bis zum Erlangen der CAD-Geometrie Zwischenschritte erforderlich, welche zum einen den Aufwand erhöhen und zum anderen das Potential für Fehler und Ungenauigkeiten erhöhen. Ein 3D-Scan der Vorderkante direkt vor Ort würde diese Nachteile umgehen. 3D-Laserscanner gibt es in portablen Bauformen mit der Möglichkeit zum Scannen in verschiedenen Modi mit unterschiedlicher Genauigkeit. Vimalakanthan et al. verwendeten einen hochauflösenden, auf strukturiertem Licht basierenden Handscanner zur Vermessung eines erodierten Rotorblatts und anschließenden aerodynamischen Auswertung und konnten damit gute Ergebnisse erzielen [22]. Für eine Messung der Vorderkantenerosion,



Abbildung 4.1: Referenzpunkte eines Blattabschnitts für den Scan der Vorderkante

welche zur Auswertung eines realen Erosionsmusters Detailgenauigkeit anstrebt, erscheint die Verwendung eines 3D-Laserscanners eine geeignete Methode. Unter der Voraussetzung fachgerechter Bedienung lässt sich die Geometrie der Oberfläche direkt vor Ort digitalisieren und die erstellten Daten für die Bestimmung von abgetragenem Material und akustischer Veränderung nutzen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit der Scan eines Rotorblatts mithilfe des Laserscanners T-SCAN hawk 2 durchgeführt. Dieser besitzt eine volumetrische Genauigkeit von $0,02 \text{ mm} + 0,015 \text{ mm/m}$, und verfügt somit

auch bei großen Objekten über eine ausreichende Genauigkeit. Beim Rotorblatt handelt es sich um ein Blatt einer 2 MW Anlage im Landkreis Peine nach 15 Jahren im Betrieb. Zur Vorbereitung des Scans werden reflektierende Referenzpunkte auf dem zu erfassenden Bereich benötigt, welche auf die Vorderkante des Blatts geklebt wurden. Zur Erkennung von genügend Referenzpunkten für den Scanner aus allen relevanten Winkeln, und der Reduzierung benötigter Klebepunkte wurden jeweils sogenannte Hyperscalebars auf den zu scannenden Abschnitt gelegt. Abbildung 4.1 zeigt den Aufbau an einem Abschnitt der Rotorblatts. Es wurden die äußeren 4 m der Vorderkante an der Blattspitze des 33 m langen Blattes gescannt. Die Messung erfolgte in vier Abschnitten mit jeweils 1 m der Vorderkante und besitzt somit eine theoretische volumetrische Genauigkeit von 0,035 mm. Hierbei wurde ein zweistufiger Scan durchgeführt, dessen erster Schritt aus einem Erfassen der Referenzpunkte und dem Einfangen der Geometrie der Vorderkante bestand. Im nächsten Schritt wurde der Detailmodus mit einer höheren Auflösung verwendet um den erodierten Teil der Vorderkante möglichst gut aufnehmen zu können. Obwohl die Auswertung der Nutzbarkeit der erstellten 3D Daten noch zu untersuchen ist, lässt sich sagen, dass sich der Scan mithilfe des T - SCAN hawk 2 Lasergeräts durch wenig geschultes Personal gut durchführen lässt. Die in [22] gegebene Tabelle zur Behandlung möglicher Probleme u.A. der Lichtverhältnisse wird als zweckmäßig angesehen. Neben dem Scan wurden vor Ort Rauigkeitswerte mithilfe eines Perthometers M2 der Marke Mahr aufgenommen. Aufgrund der hohen Krümmungsradien an der Profilmase und zu großen Höhenunterschiede auf der Oberfläche ist dies für die Erfassung der Struktur der Vorderkante nicht geeignet.

5 Quantifizierung des Materialeintrags

Zur Untersuchung der Auswirkungen von abgetragenem Material während der Nutzungsphase von Windkraftanlagen ist zum einen die Art, Form und Größe des Materials und zum anderen die Menge von Bedeutung. Die aktuelle Forschung von Vorderkantenerosion beschäftigt sich nicht mit der Quantifizierung des tatsächlichen Masseverlust, welcher an realen Windkraftanlagen stattfindet. Die Beschreibung der Erosionsschäden sind in den meisten Fällen qualitativer Natur. Es existiert eine Veröffentlichung des Deutschen Bundestags in der eine Abschätzung des Fraunhofer-Instituts für Windenergiesysteme (IWES) beschrieben wird. Diese nehmen an, dass pro Rotorblatt eine Fläche von 10 m^2 von stärkster Erosion betroffen ist. Es wird davon ausgegangen, dass nach vier Jahren die 5 mm dicke Beschichtung vollständig abgetragen ist. Mit einer spezifischen Dichte von $1,2\frac{\text{t}}{\text{m}^3}$ und einer Anlagenanzahl in Deutschland von 31.000 gelangen sie zu einem jährlichen Materialabtrag von $1.395\frac{\text{t}}{\text{Jahr}}$. Dies ist nach eigenen Angaben ein grobes Worst-Case-Szenario, und der tatsächliche Wert wird deutlich darunter vermutet [41]. In der Literatur wird in den meisten Fällen von ersten Schäden nach zwei bis drei Betriebsjahren ausgegangen. Diese ersten Schäden werden als Ende der Inkubationszeit definiert, welche sich durch allererste Materialfehler auszeichnet [3, 10]. Ein Abtrag der vollständigen Beschichtung nach vier Jahren erscheint somit sehr pessimistisch. Auch eine betroffene Fläche von 10 m^2 scheint bei einer durchschnittlichen Blattlänge von 42 m für deutsche Onshore - Anlagen sehr hoch. Im Folgenden soll eine belastbarere Abschätzung der Materialmenge, welche aufgrund von Vorderkantenerosion in die Umwelt gelangt, erstellt werden.

Abschätzung anhand von Literaturwerten

In einigen Veröffentlichungen wurde das Ausmaß und die Form der Erosionsschäden nicht nur qualitativ beschrieben, sondern auch quantifiziert. Enríquez Zárata et al. teilten die Erosionsstufen nach Reduzierung der Profilkordinaten ein, was einem Volumenverlust gleichgesetzt werden kann [37]. Gaudern et al. und Im & Kim beschreiben ebenfalls Schäden an der Vorderkante [9, 21]. Leider sind die Informationen aus diesen Veröffentlichungen nicht ausreichend um darauf basierend eine Abschätzung der abgetragenen Materialmenge einer durchschnittlichen WKA abzuleiten. Sareen et al. hingegen beschreiben die Schäden ihrer Untersuchungen an mehreren Turbinen sehr genau. Sie begutachteten die Vorderkanten von Onshoreturbinen anhand von Fotos und leiteten daraus verschiedene

Schadensklassen ab [4]. Die untersuchten Anlagen waren von unterschiedlicher Größe bzw. Leistung und befanden sich zwischen einem und über zehn Jahren im Betrieb. Anhand dieser Fotos wurden durchschnittliche Abmessungen der verschiedenen Schadensformen bestimmt und neun Schadensklassen erstellt. Dabei stellten sie ein Verhältnis des Ausmaßes der Schäden von Ober- bzw. Saugseite zu Unter- bzw. Druckseite von 1:1,3 fest. Sie unterteilten in die drei verschiedenen Schadensformen Löcher, Kerben und Delaminierung, deren durchschnittliche Abmessungen in Tabelle 1 zu sehen sind.

Tabelle 1: Durchschnittliche Maße der beobachteten Schäden von Sareen et al.

	Loch [mm]	Kerbe [mm]	Delaminierung [mm]
Tiefe/Durchmesser	0,51/ 0,51	2,54/ 2,54	3,81/ -

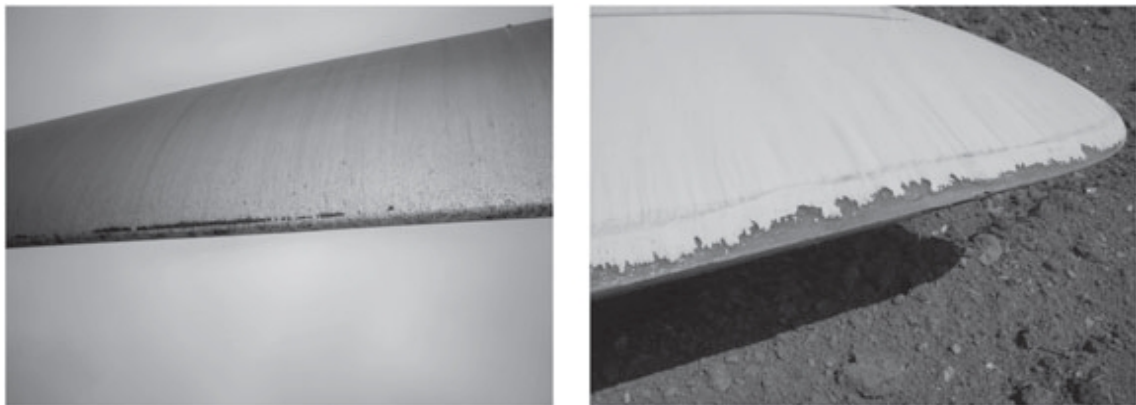


Abbildung 5.1: Aufnahmen von den Schadensformen Löcher und Kerben (links) und Delaminierung der Vorderkante (rechts) [4]

Hierbei bezieht sich die Delaminierung lediglich auf den flächenmäßigen Abtrag der obersten Schicht und nicht auf Delaminierungsformen innerhalb des Materials. Abbildung 5.1 zeigt Beispielbilder von Sareen et al. für Löcher und Kerben (links) und Delaminierung (rechts). Ziel dieser Schadenserfassung und -einteilung war die Übertragung auf ein Modell, welches im Windkanal auf sein aerodynamisches Verhalten untersucht wurde. Bei dem Modell handelte es sich um ein DU 96-W-180 Profil mit einer Sehnenlänge von $0,457\text{ m}$ und einer Breite von $0,851\text{ m}$, welches für die Nutzung an einer 75 % Blattstation entwickelt wurde. Sareen et al. geben die in Tabelle 2 beschriebenen Schadenskategorien für die Oberseite des Modells an.

Tabelle 2: Schadenseinteilung nach Sareen et al. DL: Delaminierung

	Typ A	Typ B	Typ C
Stufe 1	100 Löcher	-	-
Stufe 2	200 Löcher	200 Löcher / 100 Kerben	-
Stufe 3	300 Löcher	400 Löcher / 200 Kerben	400 Löcher / 200 Kerben / 1% DL
Stufe 4	-	800 Löcher / 400 Kerben	800 Löcher / 400 Kerben / 2% DL
Stufe 5	-	-	1600 Löcher / 800 Kerben / 3% DL

Um dem unterschiedlichen Ausmaß der Schadensausbreitung auf der Saug- und Druckseite Rechnung zu tragen, legten sie die Anzahl der Löcher und Kerben, sowie die Ausdehnung aller drei Schadensformen auf der Unterseite auf das 1,13-fache fest. Mit diesen Angaben wird der Volumenverlust bezogen auf die Blattabschnittbreite sowie die Sehnenlänge bestimmt. Da es sich um ein Profil handelt, welches für 75 % Rotorradius ausgelegt ist, wird hier davon ausgegangen, dass sich die beschriebenen Schäden an dem Abschnitt von 75 % Rotorradius befinden. Um den gesamten Materialverlust bestimmen zu können muss die gesamte Blattlänge berücksichtigt werden. Durch höhere Umfangsgeschwindigkeiten an der Blattspitze, nehmen auch die Erosionsschäden mit steigendem Rotorradius zu. Martinez et al. untersuchten 84.000 Schäden an 1.084 Turbinen in Nordamerika und kamen zu der Erkenntnis, dass bis zu einem Rotorradius von 30 % nahezu keine Erosionsschäden zu finden sind [75]. Auch Visbeck et al. beschreiben, dass sich der Großteil der Defekte auf den äußeren 60 % des Blattes befinden. Sie basieren ihre Aussagen auf der Untersuchung von 562 On- und Offshoreturbinen und leiteten eine Verteilung der Schwere der Schäden entlang des Rotorblatts ab, welche in Abbildung 5.2 zu sehen ist. Dabei werden nicht-

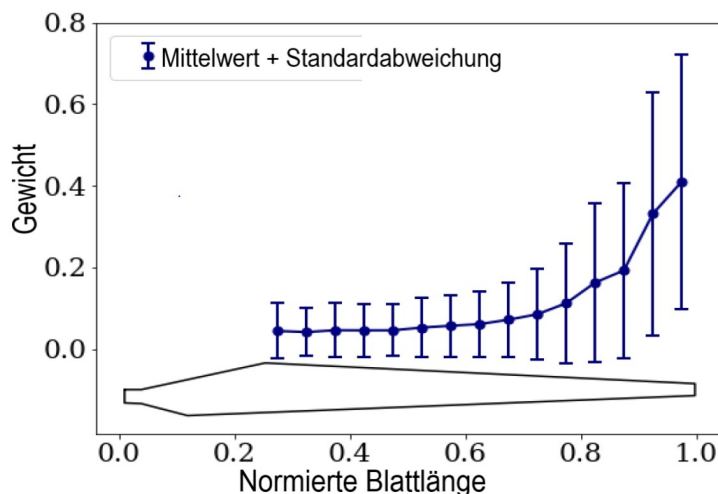


Abbildung 5.2: Gewichtete Schadensverteilung entlang des Rotorradius [5]

strukturelle Schäden gering gewichtet und Schäden, welche eine Gefahr für die strukturelle Integrität des Blattes darstellen, erhalten eine hohe Gewichtung [5]. Diese Verteilung der Schwere der Schäden soll für die vorliegende Abschätzung die Möglichkeit geben, die an einer bestimmten Stelle beobachtete Vorderkantenerosion auf das gesamte Rotorblatt zu extrapolieren. Auch die Sehnenlänge an der entsprechenden radialen Position muss berücksichtigt werden, da die Angabe der Delaminierung bei Sareen et al. prozentual zur Sehnenlänge gegeben ist. Das Verhältnis von Sehnenlänge zu Blattlänge je nach radialer Position entlang des Rotorblattes wird den öffentlich zugänglichen Daten der NREL 5 MW Anlage entnommen [77]. Die durchschnittliche Blattlänge von Onshoreanlagen, welche sich derzeit in Deutschland im Betrieb befinden, beträgt rund $l = 42 \text{ m}$ [8]. Unter Verwendung dieser Blattlänge, der Blattgeometrie der NREL 5 MW Anlage und der Schadensgewichtung laut Visbech et al. werden die Schäden von 75 % Rotorradius auf das gesamte Rotorblatt extrapoliert. Es ergeben sich die in Tabelle 3 dargestellten Volumenverluste je nach Schadenskategorie [8].

Tabelle 3: Von Sareen et al. abgeleitete Berechnung des Volumenverlust pro Blatt bei einer Blattlänge von 42 m

	Typ A	Typ B	Typ C
Stufe 1	4 cm ³		
Stufe 2	7cm ³	448 cm ³	
Stufe 3	14 cm ³	896 cm ³	4.075 cm ³
Stufe 4		1.792 cm ³	7.696 cm ³
Stufe 5			<u>19.251 cm³</u>

Sareen et al. bewerteten Schäden an Turbinen, welche zwischen einem und über zehn Jahren im Betrieb waren. Da davon auszugehen ist, dass die geringeren Schäden von Anlagen mit kürzerer Betriebsdauer stammen, und hier eine Abschätzung des Massenverlusts über die gesamte Lebensdauer angestrebt wird, ist die höchste Schadenskategorie von Interesse. Wird die Dichte von Epoxidharz angenommen, welche ca. bei $1,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ liegt [78], beläuft sich die abgetragene Masse auf

$$m_{\text{Blatt, onshore,75}}(l=42 \text{ m}) = \underline{23 \text{ kg}} . \quad (2)$$

Die Menge bezieht sich auf die Schadensform Stufe 5 und Typ C von Sareen et al. und geht davon aus, dass diese bei 75 % Rotorradius beobachtet wurde. Die größte Unsicherheit, welcher diese Berechnung unterliegt, ist diese Position entlang des Rotorradius. Sareen et al. übertrugen die verschiedenen Schadensformen zur Untersuchung der Aerodynamik auf ein 75 % - Profil. Dieser Hinweis auf die mögliche radiale Position der angenommenen Schäden wurde für die vorliegende Abschätzung als Grundlage genommen, und davon ausgegangen, dass sich die in Tabelle 2 und Tabelle 3 beschriebenen Schäden bei einem Rotorradius von 75 % befanden. Es ist genauso gut möglich, dass diese Verknüpfung bei Sareen et al. nicht stattgefunden hat und die höchsten Schäden an der Blattspitze beobachtet wurden, dort, wo üblicherweise der größte Schaden entsteht. In diesem Fall wäre die hier durchgeführte Berechnung der gesamten abgetragenen Menge deutlich überschätzt. Wird davon ausgegangen, dass sich die stärksten beobachteten Schäden an der Blattspitze (bei 100 %) befanden, und damit die Abschätzung für das gesamte Blatt durchgeführt, beträgt die Masse

$$m_{WKA, onshore, 100} (42m) = \underline{5,9 \text{ kg}} \quad . \quad (3)$$

Dieser Wert liegt lediglich bei rund einem Viertel (25,65 %) des vorherigen. Da nicht mit Sicherheit gesagt werden kann an welcher Stelle sich die von Sareen et al. beschriebenen Schäden befanden, werden im Folgenden jeweils beide Annahme vorgestellt und diese als pessimistische bzw. optimistische Annahme bezeichnet. Bei Sareen et al. handelt es sich weiterhin nicht um Untersuchungen von Rotorblättern an ihrem Lebensende, wodurch auch beim Schadensausmaß nicht davon ausgegangen werden kann, dass es in dieser Form am Ende der Lebensdauer eines Rotorblatts vorliegt. Das Höchstalter der untersuchten Turbinen ist nicht klar. Aus dem Ausdruck „10+“ Jahre kann lediglich darauf geschlossen werden, dass auch zehn Jahre alte Rotorblätter Teil der Untersuchung waren. Bei einer durchschnittlichen Lebenserwartung von Windenergieanlagen von 20 Jahren, würde somit nur die Hälfte der Betriebsdauer durch diese Erhebung berücksichtigt werden. Die Masseverlustrate von Vorderkantenerosion verläuft nach dem Ende der Inkubationszeit linear. Daran schließt eine Phase mit deutlich reduzierter Verschleißrate. Da es in der Literatur derzeit keine Angaben darüber gibt wie stark diese Reduktion ausfällt und wann der Übergang der Phasen stattfindet, soll hier für eine Worst – Case – Abschätzung von einem gleichbleibenden Masseverlust über die gesamte Lebensdauer ausgegangen werden. Der Unterschied zwischen den 10 Betriebsjahren der untersuchten Anlagen und den 20 erwarteten Betriebsjahren wird dementsprechend durch eine Verdopplung der Abtragsmenge berücksichtigt. Bei drei Blättern je Anlage beläuft sich die Menge des Materials, welches über die Lebensdauer abgetragen wird und in die Umwelt gelangt

$$m_{WKA, onshore, 75} (42 m) = \underline{139 \text{ kg}} \quad (4)$$

bzw.

$$m_{WKA, onshore, 100} (42 m) = \underline{35 \text{ kg}} \quad (5)$$

Diese Abschätzungen gelten bisher nur für Onshoreanlagen. Dies ist darauf begründet, dass auch Sareen et al. ausschließlich Onshoreturbinen untersuchten. Offshoreanlagen sind anderen Umweltbedingungen ausgesetzt und unterliegen einer schnelleren Entwicklung der Erosion. In Küstennähe wird von einer 3 – 4 mal geringeren Erosionslebensdauer der Rotorblätter ausgegangen [19]. Die Ausfallrate von Offshoreanlagen im Vergleich zu Onshoreanlagen ist viermal höher [79]. Hinzu kommt, dass der mittlere Rotordurchmesser von Onshoreanlagen ca. 85 m beträgt, der von Offshoreanlagen jedoch 134 m. Für die Abschätzung der Abtragsmenge von Offshoreturbinen wird von einer mittleren Rotorblattlänge von 65 m ausgegangen. Die größeren Schäden durch andere Umweltbedingungen offshore soll durch eine Vervielfachung der geschätzten Abtragsmenge berücksichtigt werden. Es ergeben sich die Massen je WKA zu

$$m_{WKA, offshore, 75} (65 m) = \underline{1.328 \text{ kg}} \quad (6)$$

bzw.

$$m_{WKA, offshore, 100} (65 m) = \underline{339 \text{ kg}} \quad (7)$$

Aus den Angaben von Sareen et al. ist zusätzlich nicht ersichtlich ob Reparaturen an den Blättern stattgefunden haben. Regelmäßige Wartungen und Reparaturen sind unerlässlich beim Betrieb einer Windkraftanlage und machen 25 – 30 % der gesamten Stromerzeugungskosten aus [80]. Die Angaben zur Wartung variieren, und es existiert nur begrenzte Literatur zum Ressourcenbedarf für Reparaturen [81]. In der Literatur lassen sich Ausfallraten für Rotorblätter von jährlich 0,5 finden [79]. Die Ausfallrate wird häufig mit entstehenden Kosten für die Stillstandszeit verknüpft und scheint sich somit auf Schäden zu beziehen, die eine Reparatur erfordern. Eine Analyse von 350 Offshore – Turbinen, mit einer Leistung zwischen 2 und 4 MW und einem Alter von 3 bis 10 Jahren geht von 8,3 Ausfällen pro Turbine und Jahr aus. Diese bestehen aus 6,2 kleineren Reparaturen, 1,1 größere Reparaturen und 0,3 größeren Ersatzbeschaffungen. 12,1 % der Ausfälle gehen dabei auf die Rotorblätter zurück, was ca. 1 Ausfall pro Jahr durch die Rotorblätter bedeuten würde [81]. Branner & Ghadirian geben eine jährliche Versagensrate von 0,06 bis

0,29 an, wobei unter Versagen verschiedenste innere wie auch äußere Schäden unterschiedlicher Schwere gemeint sind [82]. Andere Angaben gehen von 0,456 kleineren Reparaturen an Schutzfilmen oder -schilden, bzw. Füllung und Injektion und 0,01 größeren Reparaturen, welche typischerweise strukturelle Reparaturen sind, aus. Bei Offshore – Turbinen wird im Vergleich zu Onshore – Anlagen von einer viermal höheren Ausfallrate ausgegangen [81]. An Blättern von Onshore – Standorten kann also von einem Viertel der Ausfallraten ausgegangen werden. Bei einer Lebensdauer von 20 Jahren würde dies 2,28 kleinere und 0,05 größere Reparaturen der Blätter je Windkraftanlage bedeuten. Eine konkrete zusätzliche Menge an Volumenverlust kann aus diesen Angaben nicht abgeleitet werden und somit auch nicht mit in die Berechnung einfließen. Außer groben Angaben zum Alter und Größe der untersuchten Windkraftanlagen liegen keine weiteren Informationen über die weiteren Einflussfaktoren zur Erosionsbildung vor. Faktoren wie die Betriebsbedingungen, Materialien und Standortbedingungen bleiben unbekannt und können nicht mit in die Bewertung aufgenommen werden. Dadurch, dass die von Sareen et al. verwendeten Daten von der US-amerikanischen Firma 3M stammen, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um Standorte in den USA handelt. Dies schränkt die Wetterverhältnisse jedoch nur bedingt ein. Die unter diesen Bedingungen bestimmten Ergebnisse von durchschnittlichen Massen, welche in die Umwelt gelangen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Abgetragene Materialmenge einer WKA mit einer Blattlänge von 42 m (onshore) bzw. 65 m (offshore)

	Pessimistische Annahme	Optimistische Annahme
	[kg]	[kg]
Onshore	139	35
Offshore	1.328	339

Ausgehend von diesen Berechnungen soll ein Vergleich zu dem vom Fraunhofer IWES abgeschätzten Wert gezogen werden. Um die Schätzungen möglichst vergleichbar zu machen wird hier ebenfalls von 31.000 Windkraftanlagen in Deutschland, sowie einer Materialdichte von $1,2 \frac{g}{cm^3}$ ausgegangen. Für die Berücksichtigung der Offshore – Anlagen in der Berechnung wird dabei von 1500 offshore Standorten ausgegangen. Derzeit sind rund 1500 Offshore – Anlagen in Deutschland in Betrieb [8].

Somit ergibt sich für 1500 Offshore – Anlagen und 29.500 Onshore – Anlagen ein jährlicher Materialeintrag von rund

$$m_{\text{jährlich},75} = \underline{\underline{304 \frac{t}{\text{Jahr}}}} \quad (8)$$

bzw.

$$m_{\text{jährlich},100} = \underline{\underline{120 \frac{t}{\text{Jahr}}}} \quad (9)$$

Verglichen zu den Schätzungen des Fraunhofer IWES von $1.395 \frac{t}{\text{Jahr}}$ liegen die berechneten Mengen lediglich bei 22 % (für die pessimistische Annahme) bzw. 5,6 % (für die optimistische Annahme) des vom Deutschen Bundestags veröffentlichten Werts.

Funktion der Blattlänge

Die diesen Ergebnissen zugrunde liegende Berechnung bezieht sich auf die von Sareen et al. beobachteten und veröffentlichten Schäden. Diese wurden innerhalb der hier aufgestellten Berechnung auf eine bestimmte Blatt- und Sehnenlänge bzw. Oberfläche skaliert. Vergrößert sich also die der Erosion ausgesetzten Oberfläche, so nimmt selbstverständlich auch Menge des abgetragenen Materials zu. Die Rechnung befindet sich im digitalen Anhang dieser Arbeit. Die Variable von der diese Berechnung abhängig ist, ist die angenommene Blattlänge. Abbildung 5.3 zeigt den Verlauf der abgetragenen Masse einer Onshore – Anlage über die Blattlänge bei der pessimistischen Annahme. Es ist zu sehen,

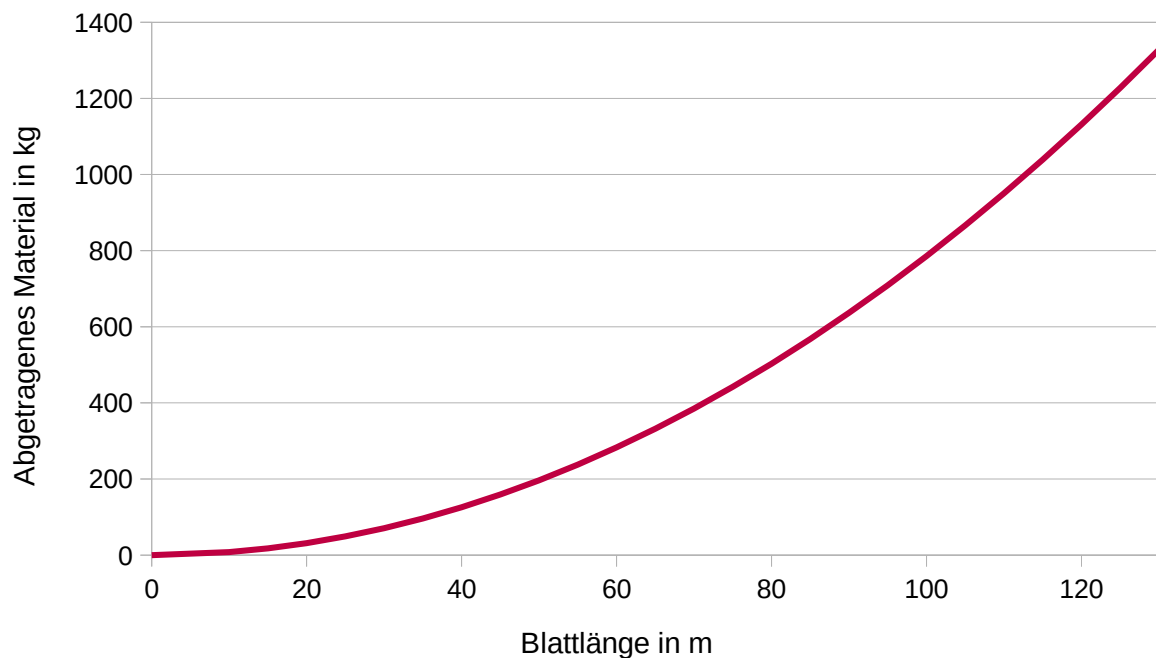


Abbildung 5.3: Abgetragene Materialmenge einer Onshore - Anlage je nach Blattlänge (pessimistische Annahme)

dass diese Zunahme der Masse nicht linear verläuft, sondern die Steigung zunimmt. Die Auswirkungen von Unsicherheiten in den Berechnungen steigen somit auch ebenfalls. Abbildung 5.4 zeigt den Vergleich zwischen Onshore Anlagen für die pessimistische und optimistische Annahme.

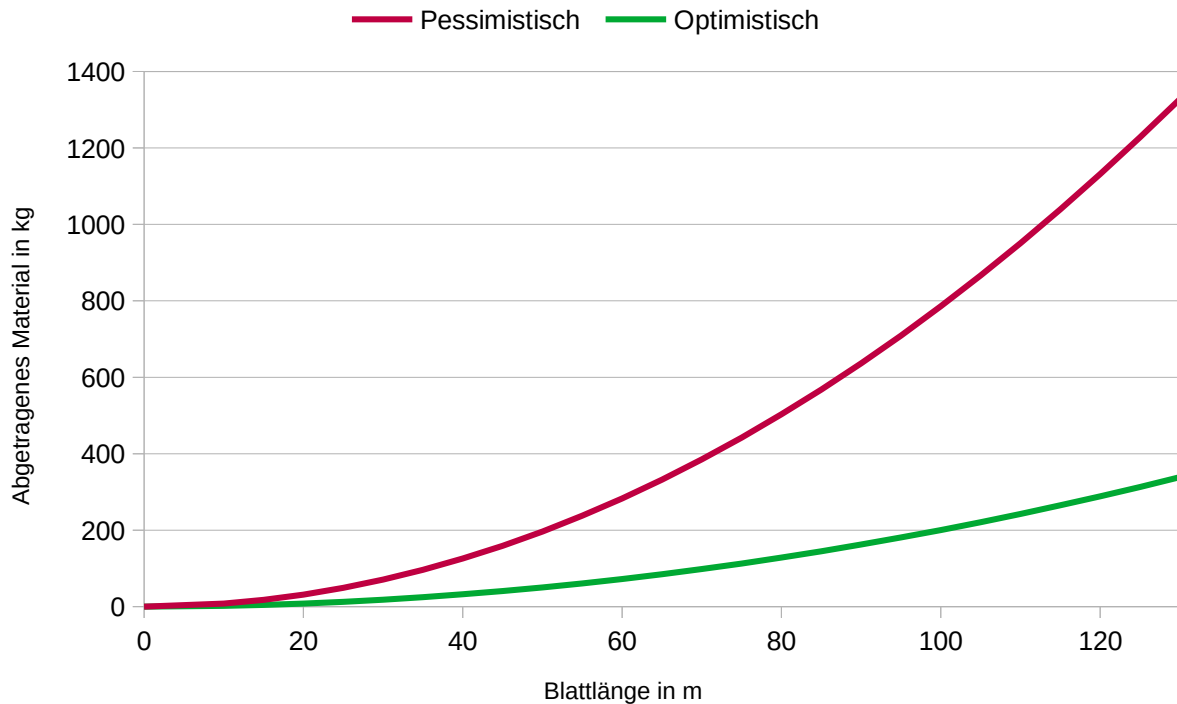


Abbildung 5.4: Abgetragene Masse für Onshore - WKAs nach Blattlänge für die pessimistische und optimistische Annahme

Die Verläufe können durch ein Polynom 2. Grades sehr gut angenähert werden. Die entsprechenden gerundeten Funktionen der Abtragsmasse basierend auf der Blattlänge lauten

$$m_{WKA, onshore, 75}(l) = 0,08 \left(\frac{kg}{m} \right) \cdot l^2 \quad (10)$$

und

$$m_{WKA, onshore, 100}(l) = 0,02 \left(\frac{kg}{m} \right) \cdot l^2 \quad (11)$$

Abbildung 5.5 zeigt die gute Übereinstimmung der quadratischen Funktionen mit den berechneten Werten. Die Verläufe der optimistischen Annahme liegen so dicht beieinander, dass ein Unterschied nicht mehr sichtbar ist.

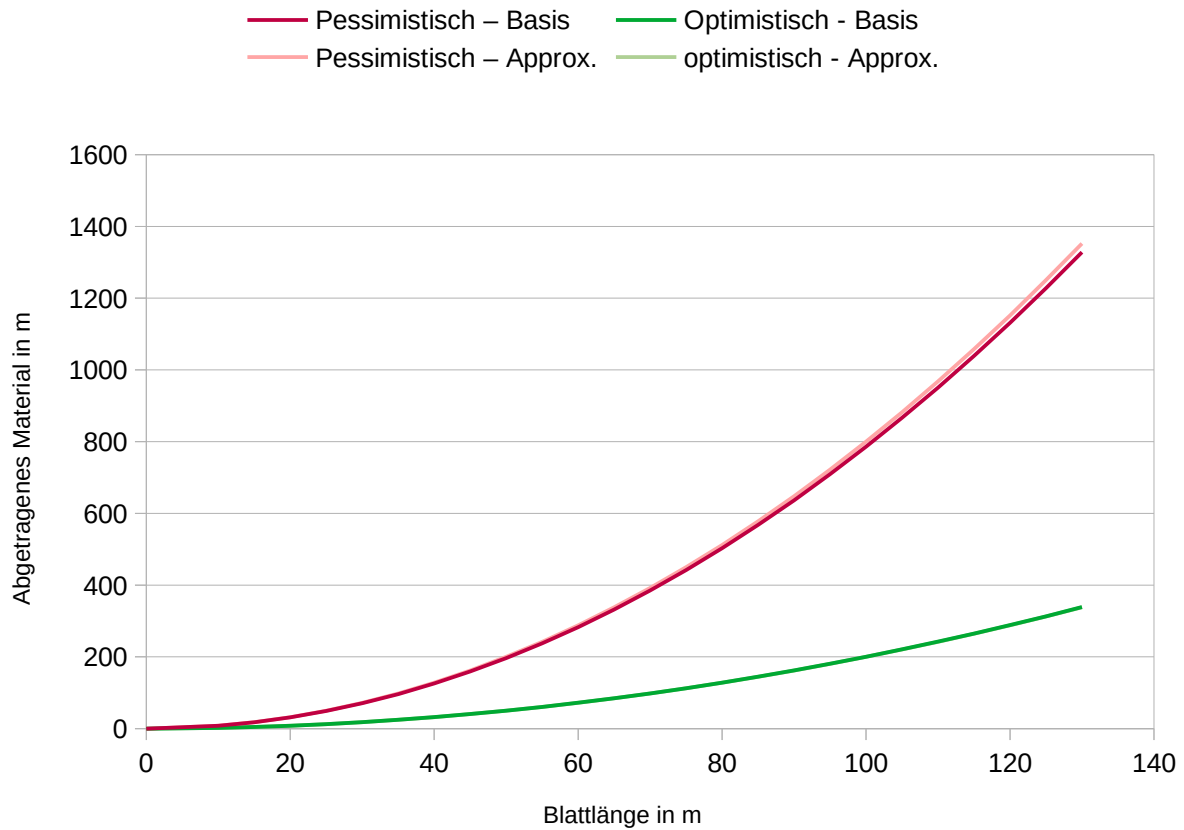


Abbildung 5.5: Abweichung durch die Beschreibung mithilfe quadratischer Funktionen

Analog lassen sich die Funktionen für Offshore – Bedingungen erstellen, welche lediglich aus einer Erweiterung um den Faktor 4 bestehen. Tabelle 5 zeigt die Faktoren b der quadratischen Funktion

$$m_{WKA}(l) = b \left(\frac{kg}{m^2} \right) \cdot l^2, \quad (12)$$

welche zur Beschreibung des Masseabtrags an einer Windkraftanlage bestehend aus drei Rotorblättern über die Lebensdauer von 20 Jahren verwendet werden können.

Tabelle 5: Faktoren b für die Funktion (12) der Abtragsmassen je WKA über die Blattlänge

	Pessimistisch Annahme	Optimistische Annahme
Onshore	0,08	0,02
Offshore	0,31	0,08

Die hier bestimmte Funktion des Masseneintrags ist die fundierteste Abschätzung, die nach bestem Wissen der Autorin derzeit vorliegt und bietet eine Möglichkeit der verbesserten Bewertung dieses Umwelteinflusses von Windkraftanlagen. Aufgrund der zahlreichen Einflüsse des Materials, der Betriebsweise und der Umgebungsbedingungen unterliegt der Mechanismus der Vorderkantenerosion einer hohen Komplexität, welche derzeit nicht zuverlässig in Modellen vorhergesagt werden kann. Die Ableitung der Menge anhand des Schadenszustands realer erodierter Rotorblätter wird deswegen als die am besten geeignete Methode angesehen.

Die größten Differenzen in der Abschätzung ergeben sich durch die beiden Möglichkeiten der Interpretation des Schadensausmaßes von Sareen et al.. Zur Validierung der Rechnung Einschätzung der realistischeren Annahme, kann ein Abgleich mit Daten zum Materialverlust durchgeführt werden. Hierfür werden die Messungen der Vorderkante mithilfe des 3D-Scanners vorgeschlagen. Neben den aufgenommenen Schäden am Rotorblatt von Sareen et al. oder dem hier durchgeführten Scan, könnte es weitere Einträge geben, die damit nicht erfasst werden. Dazu gehört zum einen die bereits besprochene Materialmenge reparierter Stellen, welche nicht berücksichtigt wird. Zum anderen können die Arbeiten selbst, welche an Rotorblättern durchgeführt werden zu einem Materialeintrag führen. Diese stehen nur zum Teil bzw. nicht mit Vorderkantenerosion im Zusammenhang, sollten jedoch für eine vollständige Abschätzung des Rotorblattmaterials in der Umwelt untersucht werden. Zum einen ist bei Reparaturen teilweise auch eine Materialentfernung notwendig [1]. Zum anderen werden die Rotorblätter zur Vermeidung von Schwertransporten vor Ort zerschnitten, wobei keine konkreten Regulierungen zur Durchführung existieren. Laut der nicht rechtsverbindlichen DIN SPEC 4886 sollte darauf geachtet werden, dass kein Material in die Umgebung gelangt [93]. Eine langfristige Norm mit konkreten Regelungen zur Reduktion des Materialeintrags gibt es nicht, wodurch keine Obergrenze für die Materialmenge existiert. Insbesondere durch die nicht beeinflussbaren Umweltbedingungen, wie Wind, welcher zur Verwehung des Materials führen kann, ist ein Eintrag in die Umwelt sehr wahrscheinlich. Der Materialeintrag durch Reparaturarbeiten und Zerkleinerung könnte einen bedeutenden Anteil an der Gesamtmenge darstellen.

6 Akustiksimulation

Zur Bewertung inwiefern sich Vorderkantenerosion auf die Entstehung von Hinterkantenlärm auswirkt, und auf diese Art die Umwelt belastet, wird eine numerische Simulation in 2D durchgeführt. Die Berechnung der Strömung sowie Schallabstrahlung erfolgt an sieben Profilschnitten am äußeren Blattradius der NREL 5MW Anlage. Für die Untersuchung werden verschiedene Strömungs- bzw. Geometriefälle hinsichtlich der Erosionsauswirkung untersucht. Zunächst soll ein Profil mit laminar-turbulentem Umschlagspunkt untersucht werden. Im nächsten Schritt wird eine vollturbulente Anströmung angenommen. Im letzten Schritt sollen neben dem Effekt der Erosion eine laminar-turbulente Transition zu erzeugen, weitere veränderte Strömungseigenschaften aufgrund der beschädigten Geometrie berücksichtigt werden.

Wie bereits in Kapitel 2.5 gesehen, gibt es dazu die Möglichkeit der veränderten Oberflächenrauigkeit. In der Berechnung der Grenzschicht von rauen Wänden mithilfe des am DLR verfügbaren Codes, darf die Rauigkeit nicht größer sein, als die logarithmische Schicht innerhalb der Grenzschicht. Die Rauigkeiten, welche durch Erosion entstehen befinden sich in der Nähe der Vorderkante, wo die Grenzschicht am dünnsten ist, da sie erst im Verlauf über das Profil weiter aufdickt. Dadurch liegen die Rauigkeitshöhen der Erosion deutlich über der Dicke der logarithmischen Schicht, was die Verwendung einer veränderten Oberflächenrauigkeit als Abbild für die Erosion ausschließt. Wird von dem Worst-Case-Szenario der Erosionsbildung nach Sareen et al. ausgegangen, liegen zudem die durch Erosion entstandenen Höhenunterschiede am Profil mit 3,81 mm deutlich über Höhen, die normalerweise mithilfe von Rauigkeiten beschrieben werden.

Für den dritten Untersuchungsfall mit veränderter Geometrie wird somit eine vorwärtsgerichtete Stufe ins Profil eingebracht, welche an den Maßen der von Sareen et al. beobachteten Schäden orientiert ist. Hinsichtlich der Turbulenz der Grenzschicht wird dieser Fall ebenfalls mit einer vollturbulenten Grenzschicht simuliert. Dies bietet die Möglichkeit den Einfluss der geometrischen Veränderung isoliert vom Umschlagspunkt zu betrachten. Die Untersuchung findet für die Geometrien ohne Stufe an allen sieben Schnitten statt. Das Szenario mit einer eingebauten Stufe als Erosionsauswirkung wird lediglich am äußersten Profilschnitt simuliert, wo die Erosion stets am stärksten ausgeprägt ist. Für diese drei Fälle, zusammengefasst in Tabelle 6, wird die im Folgenden beschriebene Prozesskette durchlaufen.

Tabelle 6: Eigenschaften der simulierten Erosionsszenarien

Fall	Grenzschicht	Profilgeometrie	Profilschnitt
Transition	Berechneter Transitionspunkt	Unbeschädigt	Schnitt 1 - 7
Vollturbulent	Vollturbulent	Unbeschädigt	Schnitt 1 - 7
Stufe	Vollturbulent	Stufe im Profil	Schnitt 1

Eine detailliertere Beschreibung der in der Prozesskette verwendeten Tools als in dieser Arbeit, lässt sich in der Prozessbeschreibung von Rautmann finden [6].

6.1 Untersuchungsszenario und Eingangsparameter

Die Simulation findet an der für Forschungszwecke entworfenen Offshore – Turbine NREL 5MW am Betriebsnennpunkt statt. Die Betriebsbedingungen an diesem Punkt sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Der Betriebspunkt befindet sich bei einer Windgeschwindigkeit $v = 11,4 \frac{m}{s}$, bei der der Rotor mit einer Drehzahl $n = 12,1 \frac{1}{min}$ dreht. Mit einem Rotorradius $R = 63 m$ ergibt sich eine Schnellaufzahl λ von

$$\lambda = \frac{2\pi n R}{v} = \frac{2\pi \cdot 0,2 \frac{1}{s} \cdot 63 m}{11,4 \frac{m}{s}} = 7 . \quad (13)$$

Mithilfe der Simulations- und Designsoftware Qblade für Windkraftanlagen werden sowohl die Position der Schnitte durch das Rotorblatt als auch die Anströmbedingungen bestimmt. Für die Untersuchung der Schallabstrahlung werden sieben Schnitte am äußeren Radius des Rotorblatts verwendet, wobei der innerste Schnitt bei ca. 77 % liegt. Entlang diesem Abschnitt des Rotorradius besteht die Geometrie des Rotorblatts der NREL 5 MW Turbine aus einem NACA64-A17 Profil. Abbildung 6.1 zeigt das Rotorblatt und die Positionen der Schnitte, an denen die zweidimensionale Simulation der Schallabstrahlung an der Hinterkante durchgeführt wird. In der darunterliegenden Tabelle 8 sind die Geometrie und die Anströmbedingungen an den gewählten Profilschnitten aufgelistet.

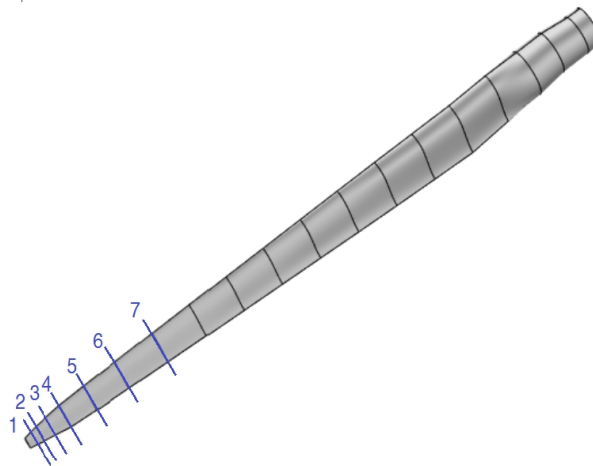


Abbildung 6.1: Position der für die Simulation verwendeten Profilschnitte am Rotorblatt der NREL 5MW Turbine

Tabelle 7: Betriebs- und Geometrieigenschaften der NREL 5 MW Anlage bei Nennbetrieb

Leistung	5 MW
Laufrichtung	Horizontalläufer
Rotordurchmesser	126 m
Blattlänge	63,5 m
Windgeschwindigkeit	11,4 m/s
Rotordrehzahl	12,1 1/min
Blattspitzengeschwindigkeit	80 m/s
Schnellaufzahl	7

Tabelle 8: Anströmbedingungen an den verschiedenen Profilschnitten

	Radiale Position [-]	Sehnen- länge [m]	Anström- winkel [°]	Mach- zahl [-]	Reynolds- zahl [-]
Schnitt 1	0,77	1,19	3,84	0,23	$6,4 \cdot 10^6$
Schnitt 2	0,83	1,419	4,35	0,23	$7,6 \cdot 10^6$
Schnitt 3	0,89	1,7525	4,53	0,22	$9 \cdot 10^6$
Schnitt 4	0,93	2,086	4,71	0,22	$10,7 \cdot 10^6$
Schnitt 5	0,96	2,313	4,79	0,21	$11,3 \cdot 10^6$
Schnitt 6	0,98	2,518	4,9	0,2	$11,7 \cdot 10^6$
Schnitt 7	0,99	2,764	4,9	0,18	$11,6 \cdot 10^6$

6.2 Numerische Strömungsberechnung

Für die verwendete aeroakustische Simulation (CAA) werden die Turbulenzeigenschaften der Grenzschicht an der Hinterkante des Profils benötigt. Diese Informationen können aus der numerischen Simulation der Profilmströmung gewonnen werden, wofür hier eine

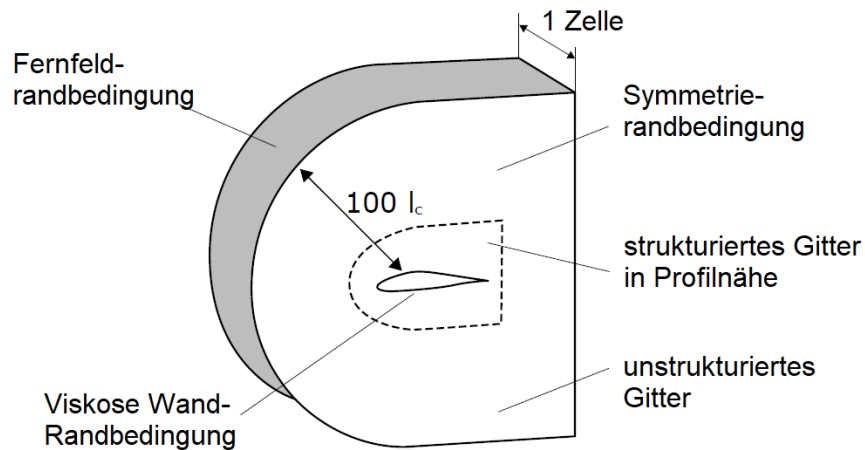


Abbildung 6.2: Aufbau des CFD Gitters [6]

RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) Modellierung zum Einsatz kommt. Die Schwankungswerte des Reynoldsen Spannungstensor werden mit dem $k-\omega$ -Turbulenzmodell beschrieben. Für die Strömungssimulation werden zwei Gittergeometrien erstellt,

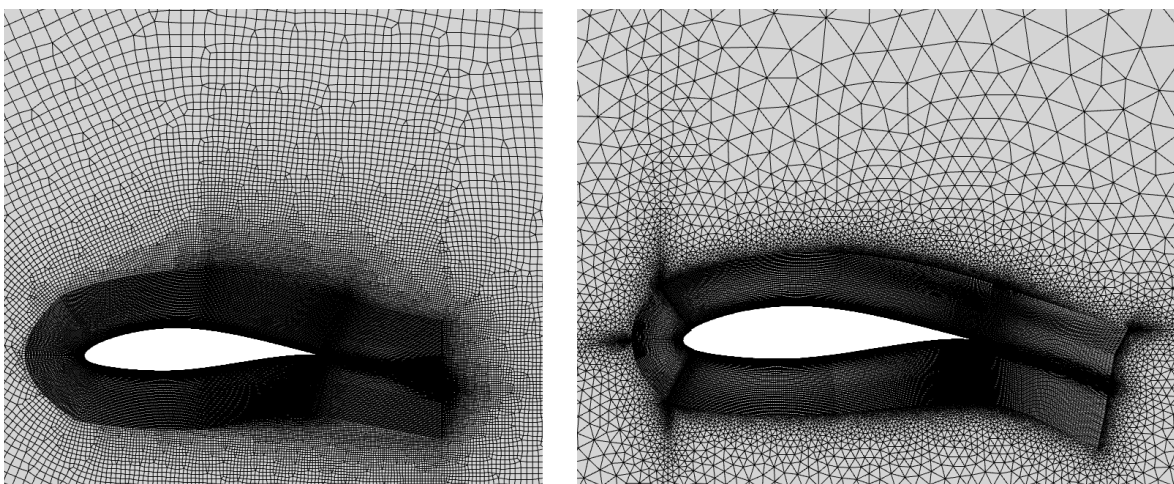


Abbildung 6.3: Vergleich der Fernfeldstruktur des Gitters ohne (links) und mit (rechts) eingebauter Erosionsstufe

welche das ursprüngliche und das erodierte Profil darstellen. Die Gitter beider Profilformen beschreiben die Form des NACA64-A17 und werden mit einer scharfen Hinterkante modelliert. In Profilnähe wird ein strukturiertes Gitter verwendet, während für das Fernfeld ein unstrukturiertes zum Einsatz kommt. Abbildung 6.2 zeigt den Grundaufbau des Gitters mit der Aufblähung in die dritte Ebene um eine Zelle, was für die Funktionalität der Simulation notwendig ist. Da jedoch keine Strömung in diese Richtungsebene erlaubt ist, wird die Simulation trotzdem als zweidimensional angesehen. Das Gitter des ursprünglichen Profils ohne Erosion besteht aus 380.652 Zellen und das Gitter mit eingebauter Stufe aus 356.184 Zellen. Wie in Abbildung 6.2 zu sehen handelt es sich im Fernfeld um ein unstrukturiertes und in Profilnähe um ein strukturiertes Gitter. Abbildung 6.3 zeigt die CFD – Gitter mit und ohne Stufe und die Unterschiede der unstrukturierten Gitter im Fernfeld. Die Zellgröße der wandnächsten Zelle beträgt beim Profil ohne Erosion $4 \cdot 10^{-5} m$ und beim Profil mit Stufe $2,7 \cdot 10^{-6} - 3,4 \cdot 10^{-6} m$. Eine Netzkonvergenzstudie des Gitters mit Stufe wurde zur Reduzierung des Zeitaufwands nicht durchgeführt. Die Validierung des Gitters ohne Stufe kann den Untersuchungen von Rautmann entnommen werden [6]. Die Genauigkeit der Stufe wurde deswegen leicht über der des Netzes ohne Stufe gewählt. Weitere Angaben zu den Gittereigenschaften befinden sich im digitalen Anhang.

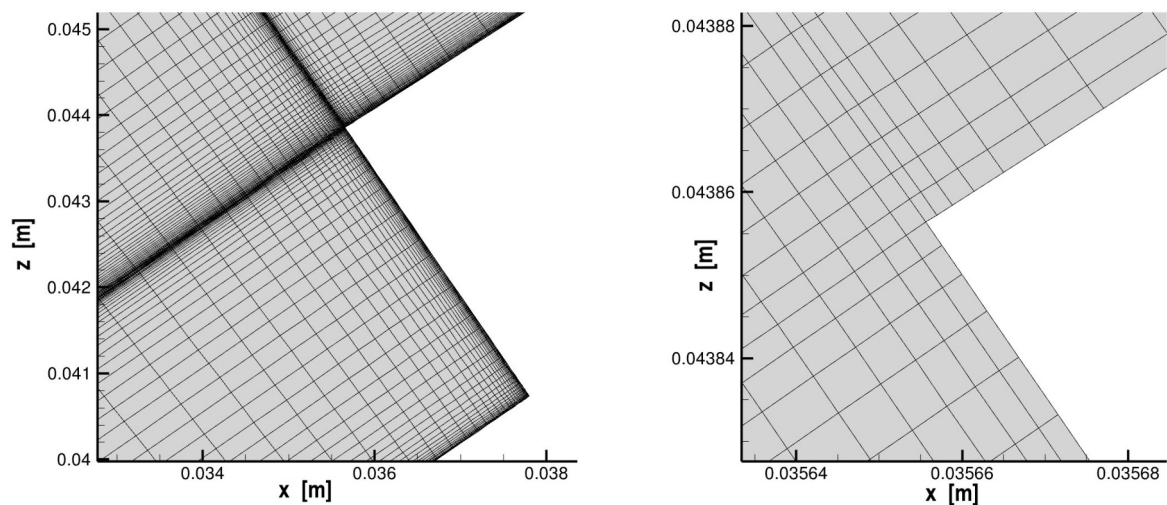


Abbildung 6.4: Form und Größe der Gitterzellen an der Erosionsstufe auf der Saugseite

Die Höhe und Lage der Erosionsstufe, welche im Gitter des letzten Untersuchungsfalls eingebaut wird, orientiert sich am Worst-Case-Szenario der von Sareen et al. beschriebenen Erosionsschäden. Die Stufe wird sowohl auf der Saug- als auch auf der Druckseite eingebaut. Auf der Saugseite beträgt die Höhe der Stufe 3,8 mm (0,32 % der Sehnenlänge) und die Position liegt bei 3 % der Sehnenlänge. Die Stufe der Druckseite ist 2,6 mm (0,22 % der Sehnenlänge) hoch und liegt bei 4,3 % der Sehnenlänge. Die Zellauflösung der Stufe

auf der Saugseite ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Die beiden verschiedenen Gitter (glatt und mit Stufe) werden als Grundlage für die Strömungssimulation verwendet. Für die Berechnung der Strömung kommt der DLR – Code TAU zum Einsatz, welcher aus einer RANS Simulation sowie der Verwendung des SST-k- ω -Turbulenzmodell nach Menter besteht. Für die Berechnung der natürlichen Transition von laminar zu turbulent wird das Re- θ -Modell verwendet. Die TAU Berechnung ist nicht zeitgenau. Nach den festgelegten 200.000 Iterationen wird ein stationärer Zustand mit Residuen erreicht. Die Umgebungsbedingungen liegen bei einer Temperatur von 15° C und einem Umgebungsdruck von 1,01389 Pa.

Die Turbulenz am Fernfeldrand wird auf 0,1 % festgelegt. Mit diesen Parametern werden die Strömungssimulationen durchgeführt, deren Informationen zum einen zur Weitergabe der mittleren Strömungsgrößen an die darauffolgende akustische Simulation genutzt werden. Zum anderen wird auch der Umschlagspunkt der natürlichen Transition von laminarer zu turbulenter Grenzschicht bestimmt. Die Berechnung des natürlichen laminar-

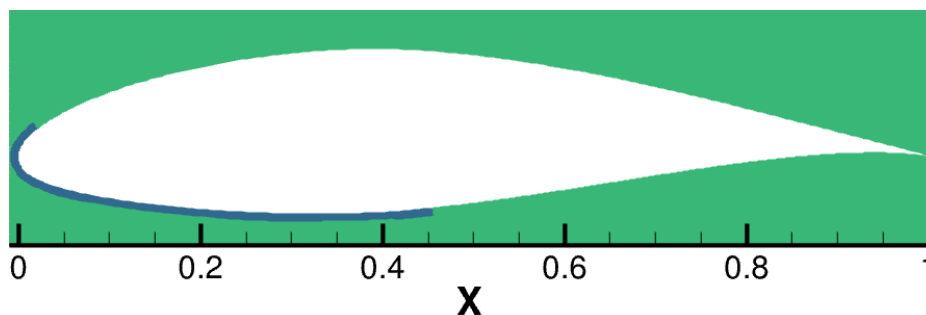


Abbildung 6.5: Berechneter Punkt der laminar-turbulenten Transition am Schnitt 1

turbulenten Übergangs ergibt einen Transitionsunkt von 2 - 3 % der Sehnenlänge auf der Saugseite und 45 - 46 % auf der Druckseite. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 6.5 den berechneten Umschlagspunkt am äußersten Schnitt (Schnitt 1). Die Berechnung der natürlichen Transition ohne die Berücksichtigung von Störungen sowohl in der Anströmung als auch auf der Profiloberfläche und stabilisierenden Rotationseffekten nicht realitätsgetreu für die Transition an Windkraftanlagen. Die ermittelten Transitionsunkte dienen demnach nicht zur tatsächlichen Bestimmung des Übergangs an Rotorblättern im Betrieb, sondern als Vergleich zu einer Strömung mit vollständig turbulenter Grenzschicht über das gesamte Profil.

6.3 Fast Random Particle Mesh Methode

Für die Berechnung der Schallquellen werden fluktuierende zeitaufgelöste Turbulenzen benötigt. Die zeitlich gemittelte RANS Lösung dient als Grundlage für die Rekonstruktion der zeit- und orts aufgelösten Turbulenzen, welche mithilfe der Fast Random Particle Mesh (FRPM) Methode im Bereich der Hinterkante, auf dem FRPM – Patch, durchgeführt wird. Der Patch besteht aus 192.000 quadratischen Zellen, welche eine Seitenlänge von $0,0005 \cdot l_c$ besitzen. Die Anzahl der auf dem Patch zufällig verteilten Partikel beträgt 540.000. Die Lage der Patches an der Hinterkante, sowie die Geometrie dieses Quellgebiets kann Abbildung 6.6 entnommen werden. Bei der Rekonstruktion der kinetischen turbulenten Energie werden die Werte der RANS Lösung angestrebt. Der Vergleich der turbulenten kinetischen Energie, welche aus der CFD stammt, mit der mithilfe der FRPM Methode wiederhergestellten Werte, zeigt leichte Unterschiede wie Abbildung 6.6 zeigt. Die Rekonstruktion ergibt eine leichte Überschätzung der turbulenten kinetischen Energie. Da es sich hierbei nur um geringe Differenzen handelt und zudem die vorliegende Untersuchung einen relativen Vergleich zwischen den verschiedenen Szenarios herstellen soll, wird der Einfluss der leicht verschiedenen Ergebnisse nicht als relevant angesehen.

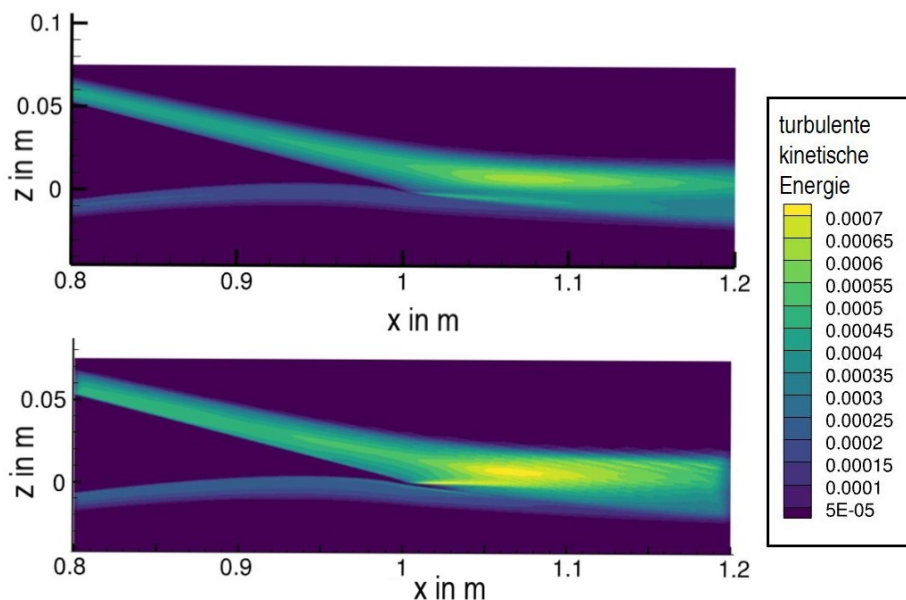


Abbildung 6.6: Vergleich der kinetischen Turbulenzenergie aus der RANS Lösung (oben) und nach der FRPM Rekonstruktion (unten)

6.4 Aeroakustische Simulation

Mithilfe der aeroakustischen Simulation wird das zeit- und orts aufgelöste fluktuierende Schalldruckfeld um die Hinterkante des Profils modelliert. Die zweidimensionale Berechnung erfolgt unter Verwendung des Aeroakustiklösers PIANO. Die Zuverlässigkeit des Verfahrens wurde für unerodierte Profilgeometrien bereits eingehend untersucht und wird somit als gegeben angenommen [6]. Das verwendete CAA – Gitter besteht aus einer strukturierten Multiblockgitter, welches sich um die Hinterkante des Profils anordnet. Die Ausdehnung beträgt sechs mal sechs die Sehnenlänge mit insgesamt ca. 1,2 Mio. Zellen. Im Block direkt an der Hinterkante beträgt die Zellgröße mit $0,0005 \cdot l_c$ die gleiche wie die des FRPM Patches. Im Fernfeld liegt diese Länge bei ca. $0,01 \cdot l_c$. Der Aufbau des Gitters, ausgehend von der Hinterkante ist in Abbildung 6.7 zu sehen.

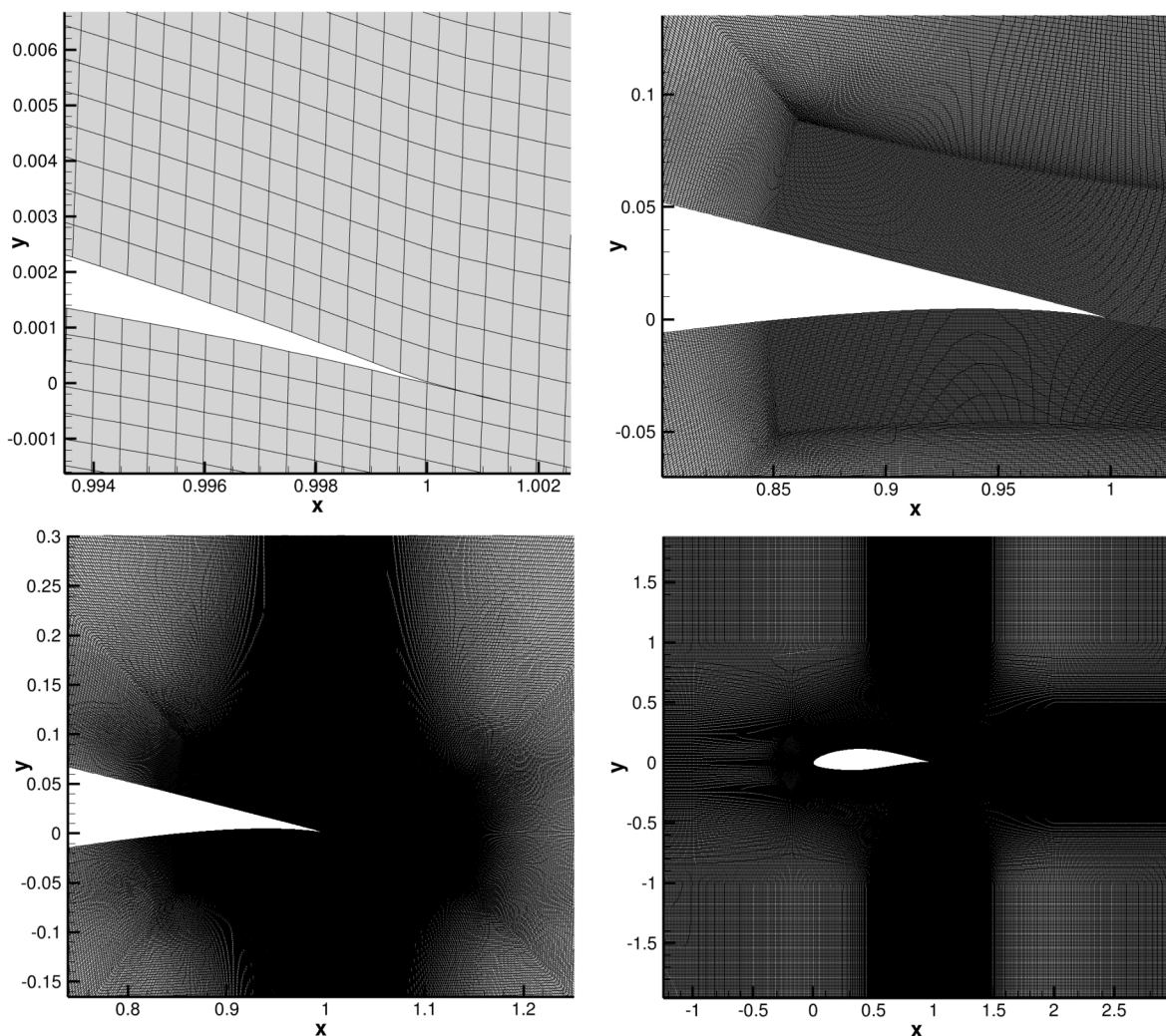


Abbildung 6.7: Aufbau des CAA-Gitters um die Hinterkante

Die CAA – Berechnung besteht aus 400.000 Schritten mit einer dimensionslosen Schritt-
länge von $t_{CAA} = 1,8 \cdot 10^{-4}$. Mit einer Schallgeschwindigkeit $a = 340,3 \frac{m}{s}$ und einer
Referenzlänge der Sehnenlänge am äußersten Schnitt von $l_c = 1,19 m$ ergibt sich ein
physikalischer Zeitschritt von

$$t = t_{CAA} \cdot \frac{a}{l_c} = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{340,3 \frac{m}{s}}{1,19 m} = \underline{6,3 \cdot 10^{-7} s} \quad (14)$$

Und damit eine gesamte physikalische Berechnungszeit von

$$t_{ges} = t \cdot 400.000 = \underline{0,253 s} \quad (15)$$

Zur Auswertung der Druckschwankungen werden 360 Mikrofone mit einem Radius von
 $2,5 \cdot l_c$ äquidistant um die Hinterkante verteilt. Die Anordnung ist so angelegt, dass das
erste und letzte Mikrofon hinter der Hinterkante liegen. Die Abtastung erfolgt bei jedem
50. dimensionslosem Zeitschritt also jeweils nach $3,15 \cdot 10^{-7} s$ physikalischer Zeit.
Entsprechend dem Abtasttheorem von Nyquist und Shannon können also Frequenzen bis
zu 15,8 kHz erfasst werden, welche weit über den für den Hinterkantenschall relevante
Frequenzen liegen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Frequenzspektren und entsprechenden Richtcha-
rakteristiken an den Profilschnitten vorgestellt. Dabei handelt es sich um Vergleiche der
Mikrofone, welche im beschriebenen Abstand um die Hinterkante angeordnet sind. Es
sollte beachtet werden, dass die Angaben und Beschreibungen der Schalldrücke zu den
verschiedenen Fällen lediglich für diese Stellen um das Profil gültig sind und keine
Beschreibung des am Boden ankommenden Geräuschs darstellen. Durch die Anordnung
der virtuellen Mikrofone relativ zur Sehnenlänge, ergeben sich verschiedene Abstände
zwischen Schallquelle und Mikrofon je nach Position und somit Länge des Profils.
Verschiedene Profilschnitte an unterschiedlichen Positionen entlang des Rotorblatts werden
aus diesem Grund nicht miteinander verglichen. Die nachfolgenden Ergebnisse dienen zum
Vergleich der verschiedenen Simulationsfälle an einem Profil mit festgelegter Geometrie
und Anströmbedingungen.

6.5 Ergebnisse

Im ersten Schritt findet der Vergleich an glatten Profilen mit zwei unterschiedlichen Umschlagspunkten statt. Hierbei liegt bei einem Fall der beschriebene laminar-turbulente Transitionsunkt bei ca. 3 % auf der Saugseite und 43 % auf der Druckseite. Der zweite Fall geht von einer vollständig turbulenten Grenzschicht auf dem gesamten Profil aus. Das betrachtete Spektrum reicht von den niedrigsten ausgewerteten Frequenzen von 12,5 Hz bis zu Frequenzen von 1000 Hz, welches den erwarteten Frequenzbereich abdeckt [72]. Die Ergebnisse zeigen an allen Schnitten ein Breitbandrauschen mit einem Maximum im Bereich zwischen 250 Hz und 400 Hz und eine dipolförmige Richtcharakteristik. Die richtungsabhängige Schallabstrahlung ist in beiden Fällen sehr ähnlich. Es handelt sich um

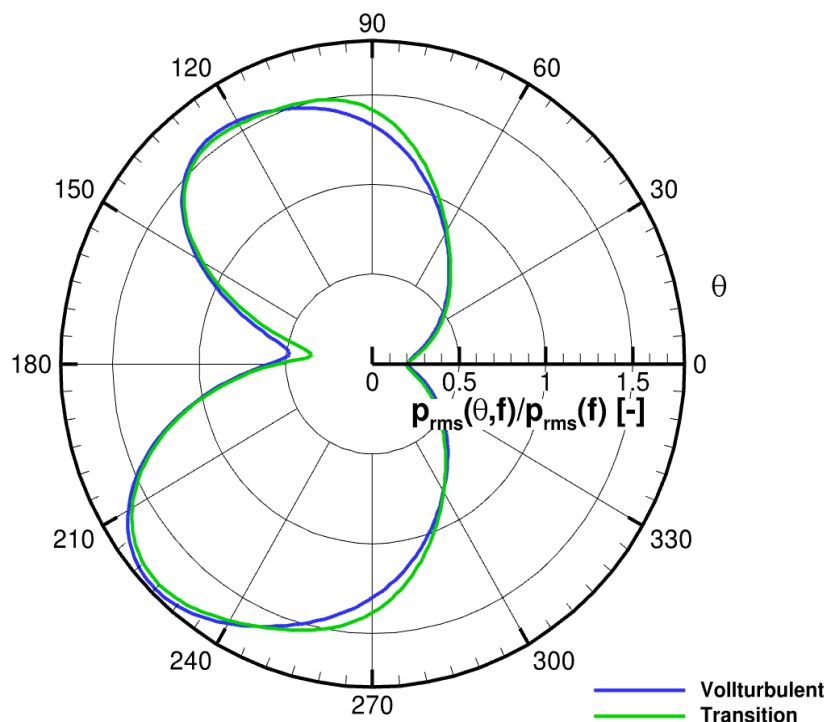


Abbildung 6.8: Richtcharakteristik der 12,5 Hz Frequenzen an Schnitt 7

eine stromaufwärts gerichtete Dipolform, deren Mitte bei der Profilschneide liegt. Durch den etwas höheren Anteil auf der Druckseite ergibt sich eine leichte Asymmetrie in der Richtcharakteristik. Die größten Unterschiede in Richtung der Abstrahlung der beiden Fälle mit verschiedenen Transitionspunkten lassen sich bei niedrigeren Frequenzen beobachten. Abbildung 6.8 zeigt den Unterschied in der Richtcharakteristik der vollturbulenten und laminar-turbulenten Strömung an Schnitt 7 bei 12,5 Hz. Dargestellt ist der vom Winkel θ

abhängige Effektivwert des Schalldrucks p_{rms} für die 12,5 Hz Frequenzen im Verhältnis zum gemittelten Schalldruckeffektivwert der 12,5 Hz Frequenzen über alle Positionen. Der hier dargestellte Fall ist der mit den meisten Abweichungen zwischen den beiden Verläufen. Alle anderen Profilschnitte und Frequenzen zeigen deutlich geringere Unterschiede zwischen den beiden Verläufen. Das richtungsabhängige Maximum liegt zwischen 230° und 215° , wobei es bei höheren Frequenzen bei kleineren Winkeln liegt, in Richtung Vorderkante, und bei geringeren Frequenzen in Richtung Hinterkante. Abbildung 6.9 zeigt dies an Schnitt 1 für den vollturbulenten Fall für Frequenzen von 12,5 Hz und 400 Hz.

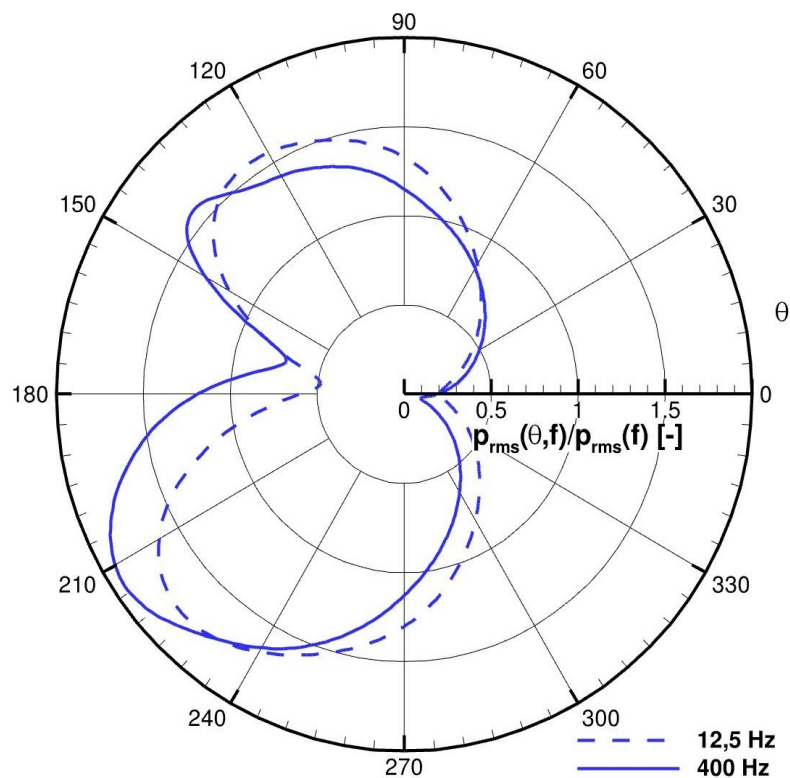


Abbildung 6.9: Richtcharakteristik an Schnitt 1 im vollturbulenten Fall

Hinsichtlich des Verlaufs der Gesamtschalldruckpegel befindet sich das Maximum beider Verläufe an der gleichen azimuthalen Position, bei ca. 215° . Der Höchstwert des Gesamtschalldruckpegels lässt sich an allen berechneten Profilschnitten entlang des Radius an dieser Position erkennen. Abbildung 6.10 zeigt beispielhaft den Gesamtschalldruckpegel beider Varianten für den Schnitt 7 in der Polardarstellung. Es handelt sich hierbei um eine nahezu kreisförmige Verteilung der Schalldruckpegel um die Hinterkante. Durch die etwas geringere Stärke des abgestrahlten Schalls stromauf der Vorderkante und stromab der Hinterkante, ergibt sich eine Tendenz zu einer Dipol – Form. Die Maximalwerte des Gesamtschalldruckpegels liegen an Schnitt 7 bei der transistierenden Strömung 0,9 dB

unter der vollturbulenten Strömung. Damit liegt das Maximum des Gesamtschalldruckpegels der vollturbulenten Strömung lediglich ca. 1 % über dem Pegel der Strömung mit Transition. Die anderen Schnitte zeigen ebenfalls geringe Unterschiede zwischen den beiden Verläufen. Im Schnitt liegen die Verläufe nur ~0,7 % auseinander. Die größten Abweichungen sind im Bereich der Anströmrichtung bei ca. 160-170° und hinter der Hinterkante bei 350° und betragen 1-2 %.

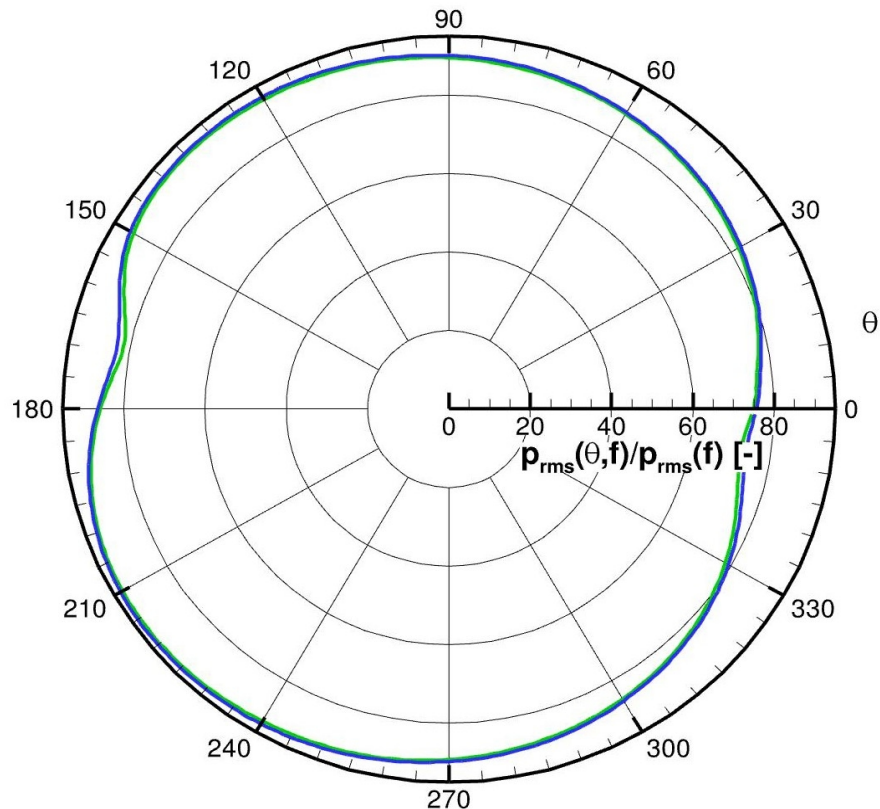


Abbildung 6.10: Vergleich der Gesamtschalldruckpegel an Schnitt 7

Hinsichtlich des Schalldruckpegels über die Frequenz im Terzspektrum folgen die Graphen ebenfalls einem ähnlichen Verlauf. Auch die Peaks liegen somit bei beiden Umströmungsfällen bei den gleichen Frequenzen. Entsprechend dem Aufbau eines Breitbandgeräusches gibt es keine vereinzelt Peaks diskreter Frequenzen, sondern eine Verteilung mit einem Maximum des Schalldruckpegels. Dieses befindet sich in der bei ca. 250 Hz am innersten Schnitt 7 und 400 Hz am äußersten Schnitt 1. Die Frequenzverteilung des Mikrofons bei 216° sind in Abbildung 6.11 für Schnitt 1 und in Abbildung 6.12 für Schnitt 7 dargestellt. Die Graphen der vollturbulenten Berechnung befinden sich über alle Frequenzen bei 0,5 – 1,5 dB höheren Schalldruckpegeln als die der Berechnung mit Transition. Die ähnlichen Verläufe an den verbleibenden Schnitten lassen sich im Anhang finden.

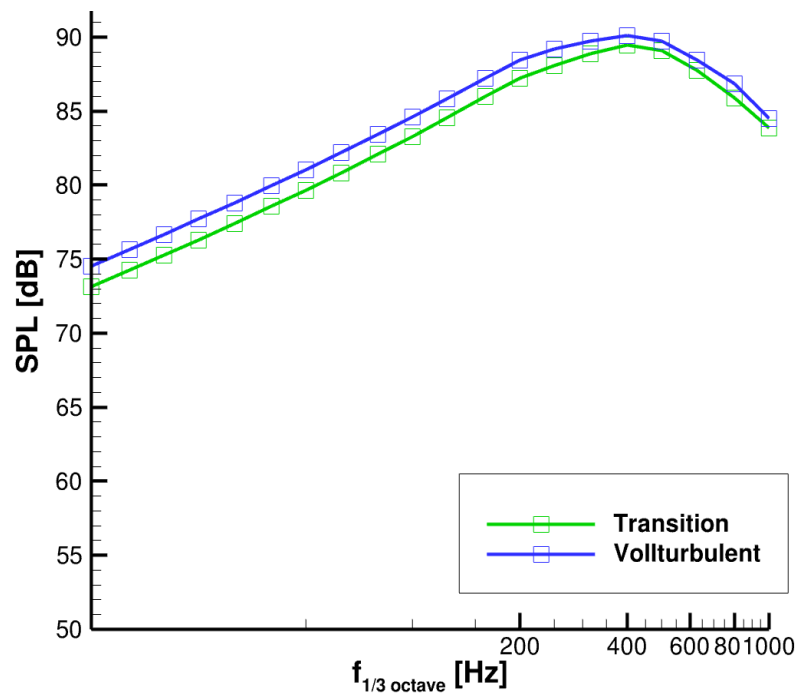


Abbildung 6.11: Vergleich der Terzfrequenzspektren bei 216° an Schnitt 1

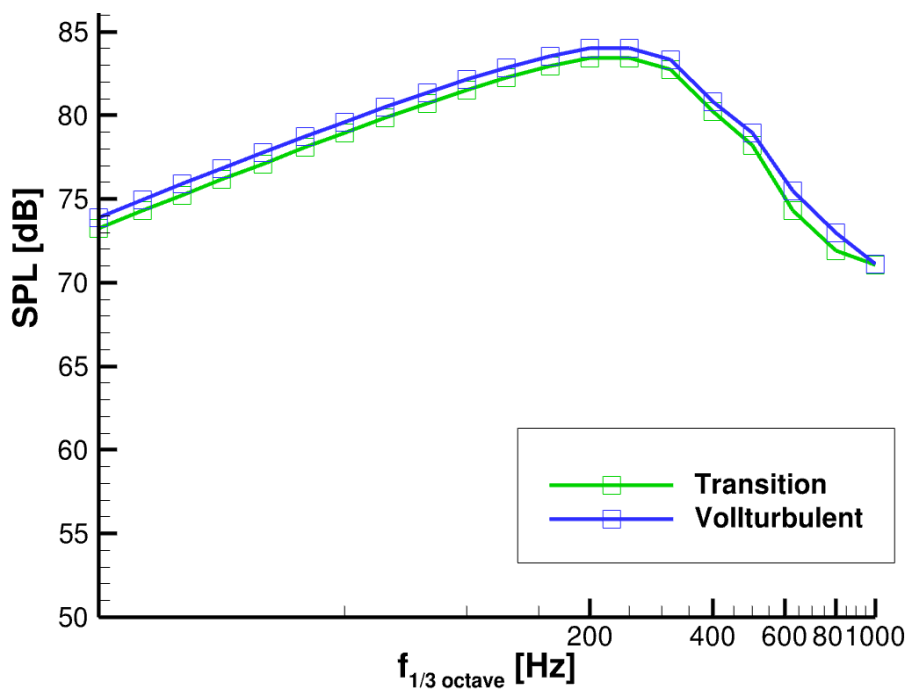


Abbildung 6.12: Vergleich der Terzfrequenzspektren bei 216° an Schnitt 7

Im dritten Untersuchungsfall wird eine turbulente Grenzschicht über das gesamte Profil simuliert und zusätzlich für die CFD die Gittergeometrie mit eingebauter Stufe verwendet. Dieser Fall wird lediglich am äußersten Profilschnitt, Schnitt 1, an dem die meiste Erosion zu erwarten ist, berechnet. Die Richtcharakteristik der verschiedenen Frequenzen ändert sich auch hier kaum. Auch die Richtungsabhängigkeit des Gesamtschalldruckpegels zeigt geringe Unterschiede, wobei die größten Differenzen stromab der Hinterkante liegen. Der maximale Schalldruckpegel tritt auch hier im Bereich von 215° auf. Der Pegel des Gesamtschalldrucks liegt in allen Abstrahlungsrichtungen leicht über den Werten des Profils ohne Stufe. Im Bereich direkt hinter der Hinterkante sind die Unterschiede am größten und der Pegel des Falls mit Stufe liegt 6 % (5 dB) über der vollturbulenten Rechnung ohne Stufe und 8 % (6,1 dB) über der Rechnung mit Transition. An den anderen Positionen liegen die Unterschiede im Bereich 1 % bzw. 2 %.

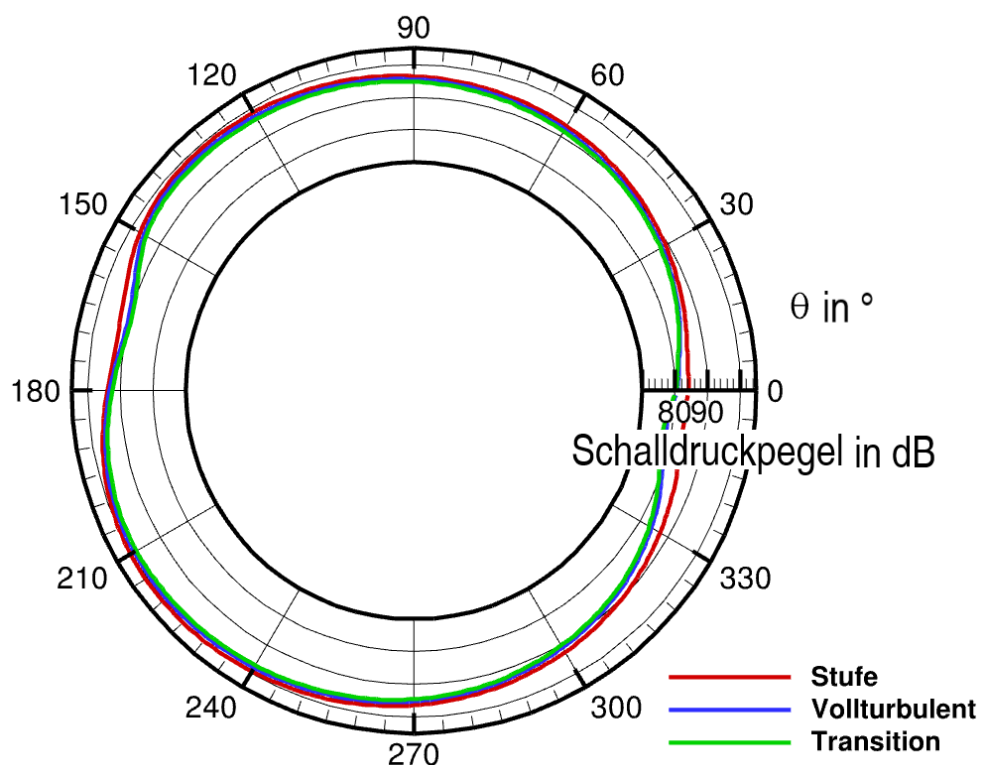


Abbildung 6.13: Gesamtschalldruckpegel aller drei untersuchten Simulationsfälle

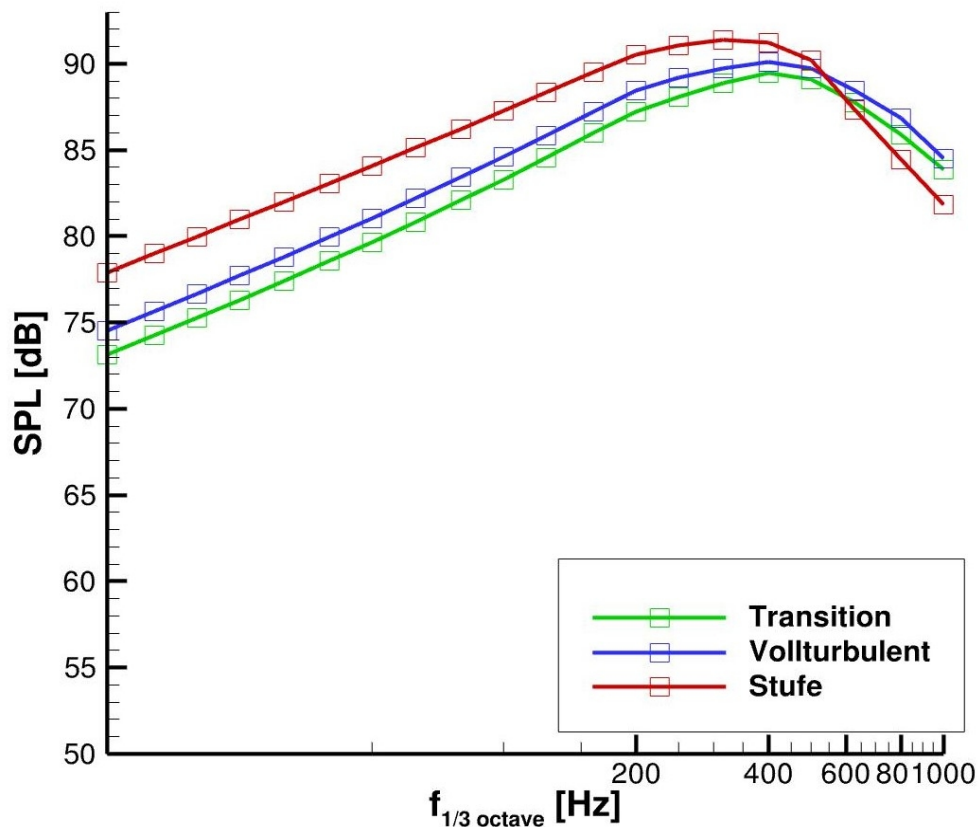


Abbildung 6.14: Vergleich der Terzfrequenzspektren aller Fälle an Schnitt 1

In Abbildung 6.14 ist die Terzdarstellung der Schalldruckpegel der Mikrofone bei 216° aufgetragen, welches die Mikrofonposition mit dem höchsten aufgezeichneten Schalldruckpegel ist. Im Vergleich zu den Verläufen des glatten Profils, verschiebt sich das Maximum zu tieferen Frequenzen. Während es bei der vollturbulenten und transierenden Strömung im Bereich von 400 Hz liegt, befindet es sich bei der vollturbulenten Strömung mit Stufe bei ca. 300 Hz. Der Schalldruckpegel erhöht sich um ca. 1-2 dB, und damit ca. doppelt so stark wie zwischen den beiden verschiedenen Transitionsunkten. Bei Frequenzen zwischen 550 – 600 Hz liegt der Schalldruckpegel des Falls mit Stufe unter dem der unbeschädigten Geometrie. Diese Tendenz bezüglich des Verlaufs des Schalldruckpegels über die Frequenz lässt sich auch in andere Schallabstrahlrichtungen beobachten. Die Verläufe an anderen Mikrofonpositionen lassen sich im Anhang finden.

6.6 Auswertung und Diskussion

In der hier durchgeführten Simulation der Schallabstrahlung erzeugt die Verschiebung des laminar-turbulenten Umschlagspunkt an den Staupunkt eine leichte Erhöhung des Schalldruckpegels über den Frequenzbereich von 12,5 Hz bis 1000 Hz. Der Unterschied in den Schalldruckpegeln liegt bei maximal 1 dB im Terzspektrum. Dieser erhöhte Schalldruckpegel entspricht den Erwartungen der Theorie. Durch den früheren Umschlagspunkt steigt die Dicke der Grenzschicht an der Hinterkante welche zu energiereicheren Turbulenzstrukturen und somit erhöhter Schallentwicklung führt. Die Verläufe im Terzspektrum und damit die Verteilung der Frequenzanteile ändert sich kaum und auch im Vergleich der Richtcharakteristiken lassen sich nur sehr geringe Unterschiede feststellen. Die Zuverlässigkeit der verwendeten Prozesskette für die Ergebnisse für ein Profil ohne Stufe mit vollturbulenter Grenzschicht bzw. laminar-turbulenter Transition wurden von Ewert et al. an einem NACA 0012 Profil untersucht und festgestellt, dass die Trends in den Spektren gut nachgebildet werden [83]. Die stärkere Neigung der Verläufe in der Richtcharakteristik in Richtung stromauf bei höheren Frequenzen welche hier in den Ergebnissen zu sehen ist (Abbildung 6.9) konnten Oberai et al. ebenfalls feststellen. Die hier berechnete Asymmetrie in der Richtcharakteristik beobachteten sie und auch Moreau et al. ebenfalls. Nach ihren Untersuchungen kann sie auf den Anstellwinkel zurückgeführt werden [84, 85].

Das Einbringen der veränderten Geometrie durch die Stufe im CFD-Gitter erhöht den maximalen Schalldruckpegel und verschiebt das Spektrum in Richtung niedrigerer Frequenzen. In den Experimenten von Zhang et al. wurden vier verschiedene Erosionsformen angelehnt an Sareen et al. an einem DU96 W180 Profil bei $Re = 0,4 \cdot 10^6$ untersucht. Bei starker Erosion unter Einbringen einer Stufe in die Vorderkante bei einem geringen Turbulenzgrad von unter 0,1 % konnten sie einen Anstieg der Schalldruckpegel bei niedrigeren Frequenzen und eine Verringerung der Schalldrücke bei höheren Frequenzen im Vergleich zum unbeschädigten Profil beobachten. Sie gehen davon aus, dass die starke Erosion zu langskaligen Turbulenzstrukturen und einer dickeren Grenzschicht an der Hinterkante führt, was für die hier durchgeführte Simulation ebenfalls als Grund angesehen werden kann. Bei turbulenter Anströmung kamen sie jedoch zu dem Schluss, dass die erodierte Vorderkante keinen Einfluss auf den an der Hinterkante erzeugten Fernfeldlärm hat und schlossen die Schadenserkenkung anhand von Hinterkantenlärm aufgrund dessen aus. Die maximalen Schalldrücke bei glatter Oberfläche und kleineren Erosionsschäden in Form von Löchern und Kerben liegen bei Zhang et al. bei den Peaks vereinzelter Töne. Das Auftreten einzelner Töne wird üblicherweise nicht mit dem Spektrum von Hinterkantenlärm verbunden, da es sich bei der Schallentstehung durch die Interaktion mit der Hinterkante um ein Breitbandgeräusch handelt [60]. Dieses tonales

Rauschen bzw. die vereinzelt Peaks werden bei Zhang et al. mit dem Vorhandensein einer laminaren Ablöseblase bei niedrigen Reynoldszahlen und geringen Oberflächenfehlern begründet und treten beim Einbringen der Stufe an der Vorderkante nicht mehr auf [70]. In der hier durchgeführten Simulation bietet die vollturbulente Grenzschicht bzw. der frühe Übergang von laminar zu turbulent bei wesentlich höheren Reynoldszahlen kein Szenario für diese Art der Tonentstehung. Aus den bei Zhang et al. dargestellten Daten soll hier keine Aussage zu einem veränderten Gesamtschalldruckpegel abgeleitet werden. Zhang et al. selbst liefern keine Angaben zu den Gesamtschalldruckpegeln. Santos et al. untersuchten ebenfalls experimentell die Schallabstrahlung und Wanddruckschwankungen an der Hinterkante eines NACA 0012 Profils bei geringen Reynoldszahlen von maximal $0,3 \cdot 10^6$ und werteten das Spektrum bei Strouhalzahlen basierend auf der Grenzschichtdicke von 0,1 bis 10 aus. Sie verwendeten Zigzagtales verschiedener Höhen und ordneten einen Anstieg der Intensität niedriger Frequenzen bei einer erhöhten Rauigkeit dem Hinterkantengeräusch zu [71]. Ein erhöhter Gesamtschalldruckpegel wird auch hier nicht beschrieben, wird jedoch als Auswirkung von Vorderkantenerosion angesehen [61, 69]. Beide experimentellen Untersuchungen der Auswirkungen von Vorderkantenerosion auf die Akustik konnten eine Verschiebung des Spektrums zu niedrigeren Frequenzen beobachten, welche in der hier durchgeführten Simulation ebenfalls berechnet wurde.

Die experimentellen Untersuchungen fanden jedoch bei deutlich niedrigeren Reynoldszahlen, anderen Profilformen und Turbulenzgraden und, soweit angegeben, anderen auf der Grenzschichtdicke basierenden Strouhalzahlen statt. Vor allem unterschiedliche Reynoldszahlen ändern bei der Überströmung von Stufen deutlich die Strömungseigenschaften [86]. Die beschriebenen experimentellen Untersuchungen können nicht als Validierung der Simulation angesehen werden, sondern lassen im Vergleich nur die Beobachtung einer ähnlichen Tendenz zu. Zum Ergebnis eines höheren Gesamtschalldruckpegels kamen Wang et al. ebenfalls bei ihrer Berechnung der gesamten NREL 5MW Anlage mithilfe einer Zonal Delay Detached Eddy Simulation [72]. Durch die Verwendung der Large Eddy Simulation ist von einer genaueren Berechnung der instationären Effekte auszugehen, jedoch wurde die Simulation nicht mit experimentellen Daten validiert.

Zur besseren Bewertung inwiefern sich die verschiedenen simulierten Strömungen verhalten und sich im Grenzschichtbereich auswirken, werden im Folgenden die Geschwindigkeitsverläufe und sowie die Intensität der turbulenten kinetischen Energie an der Hinterkante betrachtet. Abbildung 6.15 zeigt die Verteilung der x-Geschwindigkeit entlang der z-Achse an der Hinterkante. Die Grenzschichtdicke ist bei allen Fällen auf der Saugseite deutlich größer als auf der Druckseite. Die Werte der Saugseite betragen bei der

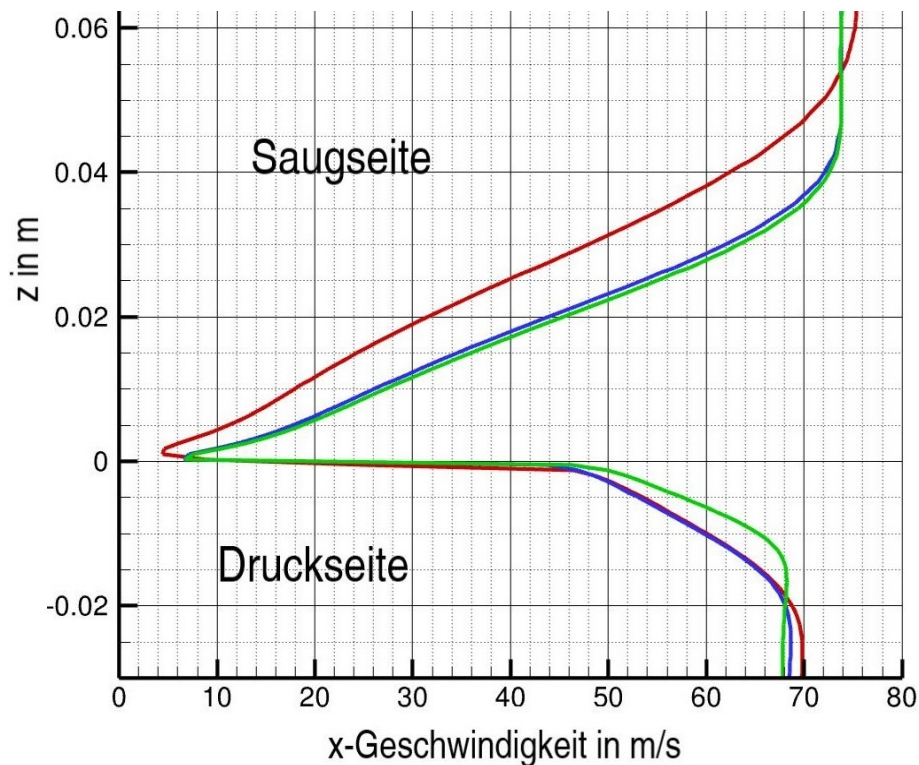


Abbildung 6.15: Verlauf der x-Geschwindigkeit über die z-Achse an der Hinterkante

Strömung mit Stufe das 2,6-fache, bei der Strömung ohne Stufe und einer vollturbulenten Grenzschicht das Doppelte und bei der Strömung mit natürlicher Transition das 3,3-fache. Die Verläufe der Fälle ohne Stufe liegen auf der Saugseite dicht beieinander. Das Einbringen der Stufe erhöht die 99%-Grenzschichtdicke auf der Saugseite um rund 25 %. Auf der Druckseite liegen die Verläufe der vollturbulenten Strömung (mit und ohne Stufe) sehr dicht beieinander. Die Grenzschichtdicke des Falls mit Transitionspunkt liegt bei ca. 60 % im Verhältnis zu den beiden vollturbulenten Berechnungen. Im Verlauf der turbulenten kinetischen Energien über die z-Achse lassen sich diese Tendenzen ebenfalls erkennen, siehe Abbildung 6.16. Die Werte auf der Saugseite liegen deutlich über denen der Druckseite und das Einbringen der Stufe hat auf der Saugseite deutlich stärkere Auswirkungen. Der Einfluss der Erosionsstufe auf der Druckseite ist sowohl in Bezug auf

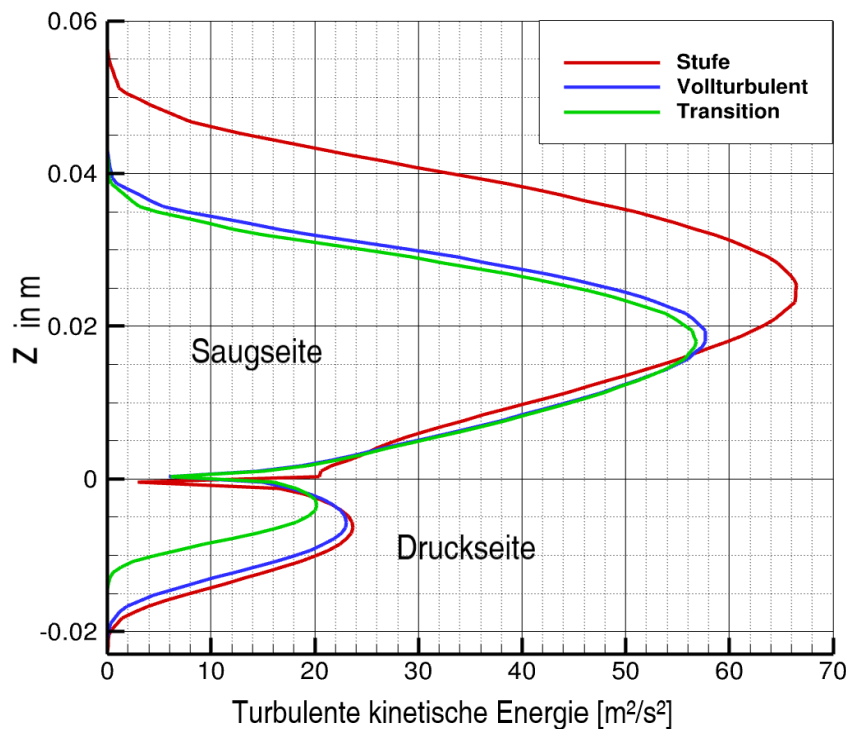


Abbildung 6.16: Verteilung der turbulenten kinetischen Energie an der Hinterkante entlang der z-Achse

die turbulente kinetische Energie, als auch die Geschwindigkeit in Sehnenrichtung minimal. Auf der Saugseite hingegen liegt das Maximum der turbulenten kinetischen Energie bei ca. 116 % im Vergleich zur Strömung ohne Stufe. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Transitionsunkten sind auf der Druckseite stärker als auf der Saugseite. Zusammengefasst konnte also Folgendes beobachtet werden:

- Höhere Werte der Grenzschichtdicke und turbulenten kinetischen Energie auf der Saugseite im Vergleich zur Druckseite in allen Fällen
- Höherer Einfluss des Umschlagspunkts auf der Druckseite im Vergleich zur Saugseite
- Höherer Einfluss der Geometrieänderung auf der Saugseite im Vergleich zur Druckseite

Die insgesamt deutlich höheren Werte auf der Saugseite des Profils stehen im Einklang mit den Erkenntnissen von Brooks et al. welche einen höheren Einfluss der Grenzschicht der Saugseite im Vergleich zur Druckseite auf die Schallabstrahlung bei ausreichend großen Anström winkeln beschreiben [87, 88]. Die größeren Grenzschichtdicken und höheren Werte der turbulenten kinetischen Energie auf der Saugseite führen zu höheren Druckpegeln des abgestrahlten Schalls und dominieren somit die Form des Spektrums.

Die geringeren Abstände zwischen den Verläufen bei verschiedenen Transitionspunkten auf der Saugseite, sowohl der x-Geschwindigkeit als auch der turbulenten kinetischen Energie, lassen sich durch die unterschiedliche Lage der Transitionspunkte begründen. Der laminar-turbulente Umschlag auf der Saugseite liegt bei lediglich 3 % im Vergleich zu 46 % auf der Druckseite. Während sich also auf der Saugseite die Lauflänge der turbulenten Grenzschicht kaum ändert, wird sie auf der Druckseite fast halbiert. Durch die schnellere Wachstumsrate der Dicke turbulenter Grenzschichten im Vergleich zu laminaren, kann sich auf der Saugseite im Gegensatz zur Druckseite durch die größere turbulente Lauflänge eine deutlich dickere Grenzschicht bilden. Bei der Berechnung der Schallentstehung an der Hinterkante des Profils zeigt das Einbringen der Stufe in die Geometrie des Profils stärkere Auswirkungen in den Spektren, als die Verschiebung des Transitionspunkts. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Transitionspunkt auf der Saugseite mit 3 % der Sehnenlänge bereits sehr nah an der Vorderkante liegt. Eine Verschiebung des Transitionspunkts weiter stromab auf der Saugseite würde einen deutlicheren Unterschied zum Verlauf der Strömung mit vollturbulenter Grenzschicht ergeben. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Quellen zum Umschlagspunkt bei realen Windkraftanlagen, soll dieser frühe, berechnete Punkt der Transition ausreichend für den hier benötigten Zweck sein.

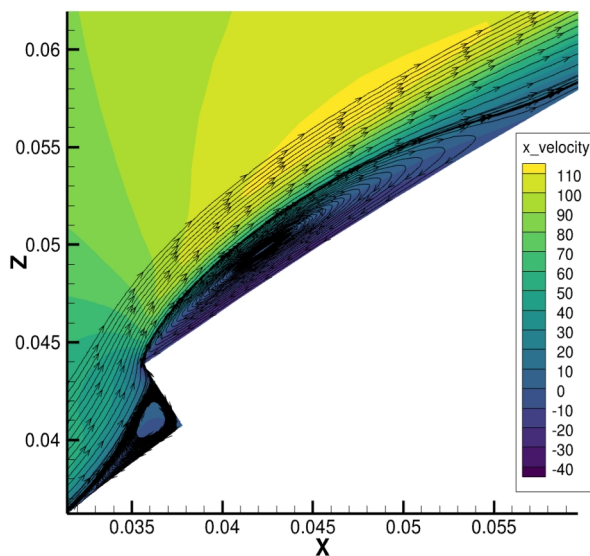


Abbildung 6.17: Verlauf der Stromlinien und x-Geschwindigkeit entlang der Stufen auf der Saugseite

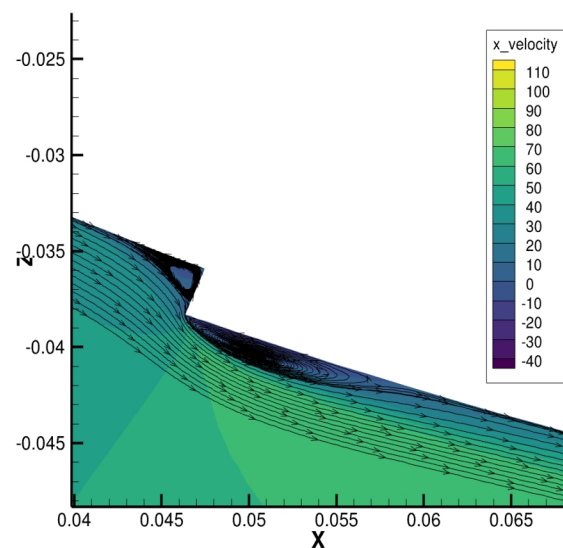


Abbildung 6.18: Verlauf der Stromlinien und x-Geschwindigkeit entlang der Stufen auf der Druckseite

Zur Einordnung der Unterschiede des Stufeneinflusses auf der Saug- und Druckseite wird die Überströmung der Stufe auf beiden Profelseiten genauer betrachtet. Aufgrund des Anströmwinkels und der Profilform sind die Geschwindigkeitsverläufe auf Saug- und

Druckseite verschieden, wodurch die Strömung auf der Ober- und Unterseite mit unterschiedlicher Geschwindigkeit auf die Stufe trifft. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Profilseiten ist die Höhe der Stufe im CFD-Gitter. Auf der Saugseite beträgt sie 3,8 mm und auf der Druckseite 2,6 mm. Wie in Abbildung 6.17 und Abbildung 6.18 zu sehen ist, löst die Strömung auf beiden Seiten des Profils an der Stufe ab und es bildet sich ein Rückströmgebiet sowohl stromauf direkt vor der Stufe als auch stromab direkt nach an der Kante der Stufe. Dabei löst die Strömung auf beiden Seiten des Profils stromauf bei $1,6 \cdot h$ ab und legt bei $0,7 \cdot h$ vertikaler Höhe wieder an, wobei h die Stufenhöhe ist. Bei nach vorne gerichteten Stufen wird bei dem Ablösegebiet stromauf der Stufe von einer sehr schwachen Abhängigkeit der Reynoldszahl ausgegangen, welches hier ebenfalls beobachtet werden kann. In der Literatur liegen die Positionen der Ablösung bei $0,8 \cdot h - 1,9 \cdot h$ und somit im gleichen Rahmen wie die hier beobachteten Werte [89]. Beim vertikalen Wiederanlegungspunkt an der Stufe wird von $0,5 \cdot h - 0,6 \cdot h$ ausgegangen, was leicht unter dem beobachteten Punkt von $0,7 \cdot h$ liegt. Insgesamt stimmen die Abmessungen des Ablösegebiets stromauf der Stufe auf Druck- und Saugseite bis auf eine Überschätzung von max. +15 % gut mit den Erkenntnissen aus Experimenten und der bestehenden Literatur überein. Die Ablöseblase, welche an der Stufenkante ablöst, und sich stromabwärts davon bildet, hat auf der Saugseite eine Dicke von $0,7 \cdot h$ und liegt bei $6,2 \cdot h$ wieder an. Auf der Druckseite beträgt die Höhe der Ablöseblase $0,6 \cdot h$ und liegt bei $4,2 \cdot h$ wieder an der Unterseite an. Hinsichtlich der Dicke des Gebiets konnten Largeau & Moriniere einen Maximalwert von $0,7 \cdot h$ feststellen, welcher im Einklang mit den simulierten Ergebnissen steht [90]. Das Ablösegebiet stromab unterliegt weitaus stärkeren Schwankungen als die kleinere Ablöseblase stromauf der Stufe. Die Form ändert sich je nach Stufenhöhe, Verhältnis der Grenzschichtdicke zur Stufenhöhe, sowie der Reynoldszahl basierend auf der Stufenhöhe [91]. Eine Abnahme des Rezirkulationsgebiets bei steigendem Verhältnis der Grenzschichtdicke zur Stufenhöhe konnte von Largeau & Moriniere festgestellt werden [90]. Die höhere Stufe auf der Saugseite im Gegensatz zur Druckseite in der durchgeführten Simulation erzeugt demnach ein größeres Ablösegebiet, welches in Abbildung 6.17 und Abbildung 6.18 zu sehen ist. Die eingebrachte turbulente kinetische Energie ist auf der Saugseite ebenfalls deutlich höher als auf der Druckseite, wie Abbildung 6.19 und Abbildung 6.20 zeigt.

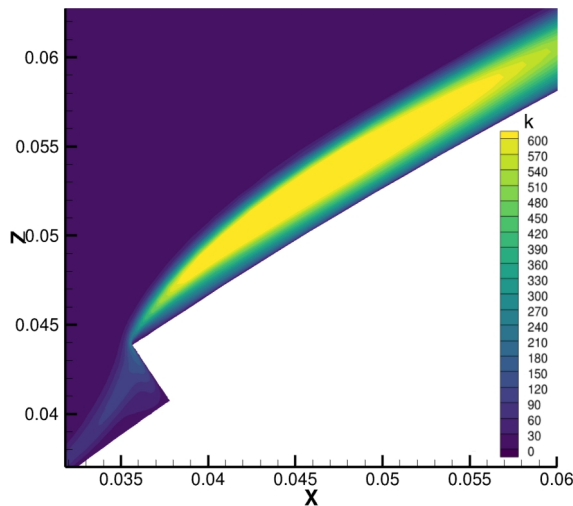


Abbildung 6.20: Turbulente kinetische Energie entlang der Stufe auf der Saugseite

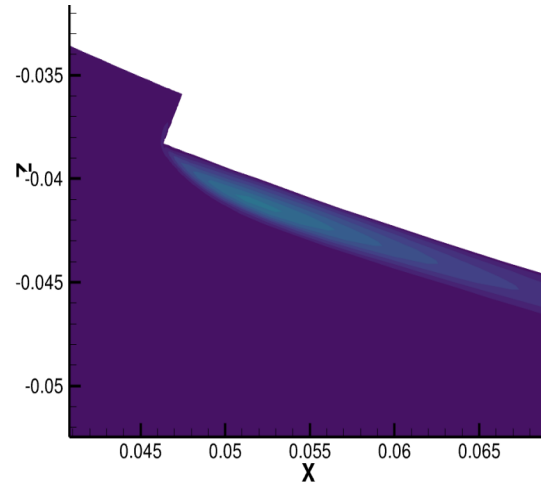


Abbildung 6.19: Turbulente kinetische Energie entlang der Stufe auf der Druckseite

Bei der Überströmung einer Stufe wird zwar der Bereich stromaufwärts als relevanter für die dort entstehende Akustik angesehen, jedoch ist der Bereich stromab effizienter hinsichtlich der Wanddruckschwankungen. Durch die Wirbelablösung werden deutliche instationäre dynamische Druckfelder erzeugt, welche stromab getragen werden. Diese hängen hauptsächlich mit großskaligen Wirbelstrukturen zusammen und werden in der Scherschicht fortgetragen [90, 92]. Die großen Turbulenzstrukturen könnten bei ausreichend weitem Transport bis zur Hinterkante für Druckschwankungen niedriger Frequenz an der Hinterkante sorgen.

Sowohl die höhere Geschwindigkeit auf der Saugseite, als auch die höhere Stufenhöhe tragen dazu bei, dass der Einfluss der Stufe auf die Strömung auf der Saugseite größer ist als auf der Druckseite. Der Unterschied in der Stufenhöhe entspricht jedoch nicht dem realen Verhältnis von erodierten Rotorblättern an Windkraftanlagen. Erosionsschäden treten auf der Druckseite in stärkerem Ausmaß auf, als auf der Saugseite und somit ist die Stufenhöhe auf der Saugseite tendenziell geringer als auf der Druckseite. Das umgekehrte Verhältnis in der Simulation ist auf Ungenauigkeiten bei der Konstruktion des CFD-Gitters zurückzuführen. Der andere Einflussfaktor, die höhere Strömungsgeschwindigkeit auf der Saugseite, hingegen ist fundamentaler Bestandteil der Umströmung zur Generierung von Auftrieb an einem Profil. Dieser Unterschied in den Geschwindigkeiten zwischen Saug- und Druckseite entspricht den tatsächlichen Gegebenheiten und die Strömung trifft auf der Saugseite mit einer höheren Geschwindigkeit auf die veränderte Geometrie. Hinsichtlich der Geschwindigkeit könnten die Auswirkungen von Oberflächenveränderungen somit auf der Saugseite einen höheren Einfluss auf die Schallabstrahlung an der Hinterkante haben. Brooks et al. beschreiben neben dem größeren Einfluss der Grenzschicht der Saugseite, dass die dünnere Grenzschicht der Druckseite geringere Schalldruckpegel hervorruft, die

sich bei höheren Frequenzen befinden. Die erhöhte turbulente kinetische Energie und die größere Grenzschichtdicke auf der Saugseite durch das Einbringen der Stufe könnten zur Verschiebung des Maximums im Frequenzspektrum hin zu niedrigeren Frequenzen beigetragen haben.

Die hier simulierten Fälle konnten den Einfluss der veränderten Geometrie und den der laminaren oder turbulenten Grenzschichtlänge separat zeigen. Im Vergleich zu einer vollständig turbulenten Grenzschicht auf einer glatten Oberfläche, hat das Einbringen einer Stufe von 2,6 mm bzw. 3,8 mm bei einer Sehnenlänge von 1,19 m und einer Reynoldszahl von 6,4 Mio. die Verläufe der Grenzschichtdicke und der turbulenten kinetischen Energie auf der Saugseite, sowie das Terzspektrum deutlich beeinflusst. Die Veränderung der Profilnase in Form einer eingebrachten Stufe im CFD – Gitter ist eine unkomplizierte Art der Geometrieänderung und eine starke Vereinfachung der komplexen und zufälligen Form von realen Erosionserscheinungen an der Vorderkante. In den Experimenten von Zhang et al. ist der spektrale Verlauf mit starker Erosion, also einer großen Anzahl von Löchern und Kerben, sowie einem vollständigen Abtrag der obersten Schicht bis 3-4 % der Sehnenlänge, nahezu identisch zum Verlauf mit der gleichen Delamination, ohne Löcher und Kerben. Dies könnte als Hinweis angesehen werden, dass bei ausreichend starker Erosion die Auswirkung der Stufe in der Vorderkante die Auswirkungen der Löcher und Kerben dominiert. Es muss jedoch bedacht werden, dass die Geometrieänderung an der Vorderkante in Form einer Stufe ein bereits sehr fortgeschrittenes Stadium der Erosion abbildet und vorherige Stadien einen anderen Einfluss auf das Hinterkantengeräusch haben könnten, der hier nicht untersucht wurde.

7 Fazit und Ausblick

Ein Ziel dieser Arbeit bestand in der Quantifizierung des durch Vorderkantenerosion abgetragenen Materials. Zur Mengenbestimmung der Materialeintrags wird aufgrund des aktuell fehlenden Verständnisses bzw. der zuverlässigen Modellierung von Vorderkantenerosion, die Bewertung von Zuständen realer Rotorblätter als die am besten geeignete Methode angesehen. Basierend auf den viel zitierten Beschreibungen von Sareen et al. von beobachteten Erosionsschäden aus dem Feld wurde eine Abschätzung der abgetragenen Materialmenge durchgeführt und als Funktion der Blattlänge beschrieben [4]. Die Abschätzung berücksichtigt neben den Daten zum Schadensausmaß von Sareen et al. eine Gewichtung der Erosionsschwere entlang des Radius von Visbeck et al. [5]. Außerdem wird die Sehnenlängenverteilung entlang des Radius entsprechend der Forschungsanlage NREL 5MW verwendet, sowie zwischen on- und offshore Standorten unterschieden. Für eine Anlage mit durchschnittlichen Blattgrößen in Deutschland wurde eine Abtragsmenge von 35 - 140 kg für Standorte im Landesinneren (Blattlänge von 42 m) und 340 - 1.330 kg für Standorte offshore (Blattlänge von 65 m) bestimmt. Als größte nicht einbezogene Unsicherheit in dieser Kalkulation werden Reparaturen angesehen, welche eventuell an den von Sareen et al. untersuchten Blättern durchgeführt wurden und somit den vorangegangenen Materialabtrag verbergen. Unter dieser Einschränkung wird die vorgenommene Abschätzung als fundierte Grundlage zur Bewertung der potentiellen negativen Umweltauswirkungen durch direkten Kunststoffeintrag angesehen.

Die im Rahmen dieser Arbeit 3D-gescannte Vorderkante eines Rotorblatts am Lebensende könnte in einem nächsten Schritt hinsichtlich des Materialabtrags ausgewertet und zur Validierung der berechneten Mengenabschätzung verwendet werden. Außerdem sollten weitere Eintragsquellen, auf mögliche in die Umwelt gelangenden Materialien überprüft werden. Dazu gehören Rotorblattreparaturen, sowie der Abbauprozess inklusive dem Zersägen der Blätter vor Ort. Ein weiterer nächster Schritt könnte aus der Verknüpfung der Ergebnisse der Mengenermittlung mit den verwendeten Materialien der obersten Rotorblattschichten und existierenden Ansätzen für Charakterisierungsfaktoren für den Kunststoffeintrag in die Umwelt bestehen. Die Bewertung des Eintrags verschiedener Kunststoffarten und -größen in maritime oder terrestrische Umgebung trägt dazu bei Lücken in der Nutzungsphase der Ökobilanzierung einer Windkraftanlage zu schließen.

Zur effizienten Modellierung und Vorhersage des Effekts von Vorderkantenerosion auf den entstehenden Hinterkantenschall wurde eine eingebrachte Stufe in der Vorderkante innerhalb einer hybride Akustiksimulation untersucht. Zur Abschätzung des Einflusses des Transitionspunkts zum Vergleich wurde die Umströmung eines glatten Profils mit laminar-turbulenter Transition sowie vollturbulenter Grenzschicht simuliert. Im nächsten Schritt erfolgte die Berechnung der Geometrie mit vorwärtsgerichteter Stufe an der Profilnase bei vollturbulenter Grenzschichtströmung. Die Verschiebung des Transitionspunkts führte an allen sieben Schnitten für die Positionen zwischen 77 – 99 % des Rotorradius zu einer Erhöhung der Schalldruckpegel um 1-2 %. In der Frequenzverteilung konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die verwendete Simulationsmethode wird durch vorangegangene Untersuchungen für glatte Profile als validiert angenommen. Die Akustiksimulation der erodierten Vorderkante in Form einer eingebrachten Stufe an der Blattspitze (Rotorradius = 99 %) ergibt eine Erhöhung des Gesamtschalldruckpegels um 1-6 % sowie eine Verschiebung der Frequenzintensität zu niedrigeren Frequenzen. Während das Maximum im Terzspektrum bei den Fällen ohne Stufe bei ca. 400 Hz liegt, verschiebt es sich bei der Geometrie mit Stufe in einen Bereich von 300 Hz. Aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit an experimentellen Untersuchungen der Auswirkung von Vorderkantenerosion auf die Schallabstrahlung am Profil, kann die Berechnung nicht als abschließend validiert angesehen werden. Die veröffentlichten Experimente wurden bei deutlich geringeren Reynoldszahlen, anderen Profilformen, Turbulenzgraden, Umschlagspunkten und Messpositionen durchgeführt. Bei steigender Erosion und niedrigem Turbulenzgrad wird jedoch ebenfalls eine Schalldruckerhöhung bei niedrigeren und eine Verringerung bei hohen Frequenzen beobachtet. Eine Erhöhung des Gesamtschalldruckpegels konnte in anderen Untersuchungen ebenfalls beobachtet werden. Aufgrund der validierten Berechnungen ohne eine eingebrachte Stufe, sowie den ähnlichen Tendenzen in der Literatur, wird diese Akustiksimulationsmethode weiterhin als eine Möglichkeit zur Modellierung des Erosionseinflusses auf die Hinterkantenlärmstehung betrachtet, dessen Gültigkeit jedoch noch weiter geprüft werden muss. Die Untersuchung der Strömung an der Hinterkante mittels RANS zeigt deutliche Unterschiede zwischen der Saug- und der Druckseite für alle Untersuchungsfälle. Die Grenzschichtdicke und die turbulente kinetische Energie liegt auf der Saugseite bei 2 - 3,3 höheren Werten im Vergleich zur Druckseite. Größere Werte auf der Saugseite im Vergleich zur Druckseite stimmen mit Erkenntnissen bestehender Literatur überein. Die Verschiebung des Transitionspunkts ergibt auf der Druckseite deutlich stärkere Unterschiede als auf der Saugseite. Dies wird auf den frühen Umschlagspunkt von 3 % auf der Saugseite im Vergleich zum späteren Umschlag bei 46 % auf der Druckseite in der Berechnung mit laminar-turbulenter Transition zurückgeführt. Das Einbringen der Stufe hingegen zeigt stärkere Auswirkungen auf der Saugseite als auf der Druckseite. Sowohl auf der Ober- als auch Unterseite des Profils entstehen stromauf und stromab Ablö-

segebiete. Die Maße der Ablöseblase stromauf sind hinsichtlich der Ablöseposition und vertikaler Wiederanlegung dabei gleich, während die Ablöseblase stromab auf der Saugseite stärker ausgeprägt ist. Die größere Ablöseblase entsteht durch eine höhere Stufenhöhe, sowie erhöhte Geschwindigkeit auf der Saugseite und erhöhte eingebrachte Turbulenz. Diese Strömung mit Ablösegebiet erzeugt langskalige Druckfluktuationen, die an der Hinterkante zur Abstrahlung von niederfrequentem Schall führen können. Die Maße der Ablösegebiete entsprechen gut den Werten der Literatur und lassen lediglich eine leichte Überschätzung der Turbulenz des hier verwendeten Verfahrens vermuten. Insgesamt bietet das zweidimensionale RANS/CAA Verfahren mit Einbringung einer Stufe als Beschreibung von Vorderkantenerosion einen einfachen und effizienten Simulationsansatz. Die Überströmung der Stufe wird hinsichtlich der Ablösegebiete gut durch die RANS berechnet mit Hinweisen auf eine leichte Überschätzung der Turbulenz. Die Qualität der Berechnung des Hinterkantenlärms kann durch fehlende Vergleiche nicht abschließend bewertet werden. Die validierte Simulation der Berechnung ohne Stufe, die überzeugenden Ergebnisse der Turbulenzberechnung und die ähnlichen Tendenzen in den Spektren von experimentellen Untersuchungen sprechen jedoch für eine Zuverlässigkeit der erzielten Ergebnisse. Die zufällige Natur des Schadens durch Vorderkantenerosion ergibt eine hohe Komplexität der Geometrien sowie der Überströmung dieser und erfordert Vereinfachungen. Um die hier vorgestellten Modellierungsansätze zu validieren sind Experimente mit ähnlichen Strömungsparametern notwendig, welche die Bewertung des Hinterkanten-schalls ermöglichen. Durch den höheren Aufwand von Experimenten im Vergleich zu schnellen Rechenverfahren ist eine Simulation von bereits durchgeführten Experimenten aus der Literatur sinnvoll. Neben der Validierung der Simulation mit veränderter Geometrie, können einige Parameter angepasst werden um reale Gegebenheiten besser widerzuspiegeln. Die Höhe der Stufe führt bei laminarer Anströmung zu einem Umschlag in eine turbulente Grenzschichtströmung, was einer Zusammenlegung des Transitions-punkts mit der Stufenposition entspricht. Die Stufenhöhe sollte in einem nächsten Schritt auf der Saug- und Druckseite gleich sein. Weiterhin steht die Bewertung der Vereinfachung des Vorderkantenschadens durch eine Stufe aus. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen CAD Daten eines realen Ero-sionsschadens können mit einer entsprechenden 3D Akustik-simulation berechnet und mit einer Stufengeometrie verglichen werden. Die Modellierung der Auswirkung von Vorderkantenerosion auf die Schallentstehung an der Hinterkante kombiniert die komplexe Umströmung unregelmäßiger Geometrien und deren Auswirkungen auf die turbulente Grenzschicht an der Hinterkante eines Profils. Zum vollständigen Verständnis dieser Zusammenhänge ist weitere Forschung in Form von Experimenten und Simulationen notwendig. Die hier durchgeführte Simulation besitzt Potential zur Modellierung des veränderten Hinterkanten-schalls durch Vorderkantenerosion zu dienen und somit diese Art der Umwelteinwirkung vor ihrem Eintreten abzuschätzen.

Literaturverzeichnis

- [1] K. B. Katnam, A. J. Comer, D. Roy, da Silva, L. F. M., and T. M. Young, "Composite Repair in Wind Turbine Blades: An Overview," *The Journal of Adhesion*, vol. 91, 1-2, pp. 113–139, 2015, doi: 10.1080/00218464.2014.900449.
- [2] S. Groucott, K. Pugh, I. Zekos, and M. M Stack, "A Study of Raindrop Impacts on a Wind Turbine Material: Velocity and Impact Angle Effects on Erosion MAPS at Various Exposure Times," *Lubricants*, vol. 9, no. 6, p. 60, 2021, doi: 10.3390/lubricants9060060.
- [3] D. Eisenberg, S. Laustsen, and J. Stege, "Wind turbine blade coating leading edge rain erosion model: Development and validation," *Wind Energy*, vol. 21, no. 10, pp. 942–951, 2018, doi: 10.1002/we.2200.
- [4] A. Sareen, C. A. Sapre, and M. S. Selig, "Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance," *Wind Energy*, vol. 17, no. 10, pp. 1531–1542, 2014, doi: 10.1002/we.1649.
- [5] J. Visbech, T. Göçmen, C. B. Hasager, H. Shkalov, M. Handberg, and K. P. Nielsen, "Introducing a data-driven approach to predict site-specific leading-edge erosion from mesoscale weather simulations," *Wind Energ. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 173–191, 2023, doi: 10.5194/wes-8-173-2023.
- [6] C. Rautmann, *Numerical Simulation Concept for Low-Noise Wind Turbine Rotors*, 2017.
- [7] Bundesnetzagentur, *Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2023*. [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240103_SMARD.html (accessed: Aug. 15 2024).
- [8] Bundesnetzagentur, *Marktstammdatenregister*. [Online]. Available: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenubersicht>
- [9] H. Im and B. Kim, "Numerical study on the effect of blade surface deterioration by erosion on the performance of a large wind turbine," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, no. 6, p. 383001, 2019, doi: 10.1063/1.5115080.
- [10] R. Ehrmann, E. White, D. Maniaci, R. Chow, C. Langel, and C. P. van Dam, "Realistic Leading-Edge Roughness Effects on Airfoil Performance," *AIAA Applied Aerodynamics Conference*, vol. 31, 2013.
- [11] C. Hansen and K. Hansen, "Recent Advances in Wind Turbine Noise Research," *Acoustics*, vol. 2, no. 1, pp. 171–206, 2020, doi: 10.3390/acoustics2010013.

-
- [12] M. A. Alamir, K. L. Hansen, and P. Catcheside, “Penalties applied to wind farm noise: Current allowable limits, influencing factors, and their development,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 295, no. 12, p. 126393, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126393.
- [13] L. Mishnaevsky *et al.*, “Leading edge erosion of wind turbine blades: Understanding, prevention and protection,” *Renewable Energy*, vol. 169, pp. 953–969, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.01.044.
- [14] E. Hau, Ed., *Windkraftanlagen: Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit*, 6th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [15] C. Kühne, D. Stapf, P. Holz, and W. Baumann, “Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter,”
- [16] M. H. Keegan, D. H. Nash, and M. M. Stack, “On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 46, no. 38, p. 383001, 2013, doi: 10.1088/0022-3727/46/38/383001.
- [17] R. Herring, K. Dyer, F. Martin, and C. Ward, “The increasing importance of leading edge erosion and a review of existing protection solutions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, p. 109382, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109382.
- [18] E. A. Valaker, S. Armada, and S. Wilson, “Droplet Erosion Protection Coatings for Offshore Wind Turbine Blades,” *Energy Procedia*, vol. 80, pp. 263–275, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.430.
- [19] A. S. Verma *et al.*, “A probabilistic long-term framework for site-specific erosion analysis of wind turbine blades: A case study of 31 Dutch sites,” *Wind Energy*, vol. 24, no. 11, pp. 1315–1336, 2021, doi: 10.1002/we.2634.
- [20] Ö. S. Özçakmak, H. A. Madsen, N. N. Sørensen, J. N. Sørensen, A. Fischer, and C. Bak, “Inflow Turbulence and Leading Edge Roughness Effects on Laminar-Turbulent Transition on NACA 63-418 Airfoil,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1037, no. 2, p. 22005, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1037/2/022005.
- [21] N Gaudern, “A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 524, no. 1, p. 12031, 2014, doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012031.
- [22] K. Vimalakanthan, van der Mijle Meijer, Harald, I. Bakhmet, and G. Schepers, “Computational fluid dynamics (CFD) modeling of actual eroded wind turbine blades,” *Wind Energy Science*, vol. 8, no. 1, pp. 41–69, 2023, doi: 10.5194/wes-8-41-2023.

- [23] E. Cortés, F. Sánchez, A. O’Carroll, B. Madramany, M. Hardiman, and T. M. Young, “On the Material Characterisation of Wind Turbine Blade Coatings: The Effect of Interphase Coating–Laminate Adhesion on Rain Erosion Performance,” *Materials*, vol. 10, no. 10, p. 1146, 2017, doi: 10.3390/ma10101146.
- [24] J. A. Aird, R. J. Barthelmie, and S. C. Pryor, “Automated Quantification of Wind Turbine Blade Leading Edge Erosion from Field Images,” *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2820, 2023, doi: 10.3390/en16062820.
- [25] R. Prieto and T. Karlsson, “A model to estimate the effect of variables causing erosion in wind turbine blades,” *Wind Energy*, vol. 24, no. 9, pp. 1031–1044, 2021, doi: 10.1002/we.2615.
- [26] Craig Siddons, Calum Macleod, Liu Yang, and Margaret Stack, “An experimental approach to analysing rain droplet impingement on wind turbine blade materials,” *EWEA 2015 Annual Event*, 2015. [Online]. Available: <https://pureportal.strath.ac.uk/en/publications/an-experimental-approach-to-analysing-rain-droplet-impingement-on>
- [27] Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. – DFO, “Schlussbericht vom 02.08.23: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (RotorBeWi),” 2023.
- [28] Kieran Pugh, Ghulam Rasool, and Margaret M Stack, “Some thoughts on mapping tribological issues of wind turbine blades due to effects of onshore and offshore raindrop erosion,” *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1007/s40735-018-0165-9.
- [29] K. Pugh, J. W. Nash, G. Reaburn, and M. M. Stack, “On analytical tools for assessing the raindrop erosion of wind turbine blades,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, p. 110611, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110611.
- [30] B. Amirzadeh, A. Louhghalam, M. Raessi, and M. Tootkaboni, “A computational framework for the analysis of rain-induced erosion in wind turbine blades, part II: Drop impact-induced stresses and blade coating fatigue life,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 163, pp. 44–54, 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2016.12.007.
- [31] A. Tempelis and L. Mishnaevsky, “Surface roughness evolution of wind turbine blade subject to rain erosion,” *Materials & Design*, vol. 231, p. 112011, 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.112011.
- [32] H. M. Slot, E.R.M. Gelinck, C. Rentrop, and E. van der Heide, “Leading edge erosion of coated wind turbine blades: Review of coating life models,” *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 837–848, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.02.036.

- [33] Hamish Law and Vasileios Koutsos, “Leading edge erosion of wind turbines: Effect of solid airborne particles and rain on operational wind farms,” *Wind Energy*, vol. 23, no. 10, pp. 1955–1965, 2020, doi: 10.1002/we.2540.
- [34] D. Nash, G. Leishman, C. Mackie, K. Dyer, and L. Yang, “A Staged Approach to Erosion Analysis of Wind Turbine Blade Coatings,” *Coatings*, vol. 11, no. 6, p. 681, 2021, doi: 10.3390/coatings11060681.
- [35] David C. Maniaci, Edward B. White, Benjamin Wilcox, Christopher M. Langel, C.P. van Dam, and Joshua A. Paquette, “Experimental Measurement and CFD Model Development of Thick Wind Turbine Airfoils with Leading Edge Erosion,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 753, no. 2, p. 22013, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/753/2/022013.
- [36] R. S. Ehrmann, “Effect of Surface Roughness on Wind Turbine Performance,” 2014.
- [37] J. Enríquez Zárate, Gómez López, María de los Ángeles, J. A. Carmona Troyo, and L. Trujillo, “Analysis and Detection of Erosion in Wind Turbine Blades,” *Mathematical and Computational Applications*, vol. 27, no. 1, p. 5, 2022, doi: 10.3390/mca27010005.
- [38] V. Schmitt, “Plastik in der Offshore-Windbranche - Eintragungspotenziale in der deutschen Nordsee,” *Europa Regional*, vol. 26.2018, no. 4, pp. 46–57, 2021. [Online]. Available: https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/document/74725/1/ssoar-europareg-2021-4-schmitt-Plastik_in_der_Offshore-Windbranche_.pdf
- [39] R. Oddekalv, J.-E. Weinbach, L. Haukeland, and A. Nilsen, *4,4'-isopropylidenediphenol (Bisphenol A) and structurally related bisphenols of similar concern for the environment*. [Online]. Available: https://nmf.no/wp-content/uploads/2021/02/Green-Warriors-of-Norway-ECHA_REACH-Bisphenol-comments-and-evidence.pdf
- [40] Bård-Einar Rimereit, A. Solberg, and Jan-Erik Weinbach, *Leading Edge erosion and pollution from wind turbine blades 5 th. Edition - English*: Unpublished, 2021.
- [41] Fachbereich WD8 Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung, *Zu einem Einzelaspekt der Erosion von Rotorblättern von Windrädern*, 2020. [Online]. Available: <https://www.bundestag.de/resource/blob/817020/27cf214cfbeaac330d3b731cbbd8610b/WD-8-077-20-pdf.pdf>
- [42] A. Kylili, “Chapter 4 - Environmental assessment of wind turbines and wind energy,” in *Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies*, P. A. Fokaides, A. Kylili, and P.-z. Georgali, Eds.: Elsevier, 2022, pp. 55–83. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B97801281711110000048>
- [43] *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*, DIN EN ISO 14040, 2021.

- [44] B. Mendecka and L. Lombardi, “Life cycle environmental impacts of wind energy technologies: A review of simplified models and harmonization of the results,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 111, pp. 462–480, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.019.
- [45] A. Bonou, A. Laurent, and S. I. Olsen, “Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy—from theory to application,” *Applied Energy*, vol. 180, pp. 327–337, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.058.
- [46] A. Arvesen and E. G. Hertwich, “Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5994–6006, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.06.023.
- [47] Z. Yuan, R. Nag, and E. Cummins, “Ranking of potential hazards from microplastics polymers in the marine environment,” *Journal of hazardous materials*, vol. 429, p. 128399, 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128399.
- [48] Y. Zhang, S. Pu, X. Lv, Y. Gao, and L. Ge, “Global trends and prospects in microplastics research: A bibliometric analysis,” *Journal of hazardous materials*, vol. 400, p. 123110, 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123110.
- [49] E. Corella-Puertas, C. Hajjar, J. Lavoie, and A.-M. Boulay, “MarILCA characterization factors for microplastic impacts in life cycle assessment: Physical effects on biota from emissions to aquatic environments,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 418, p. 138197, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138197.
- [50] M. D. Prokić, T. B. Radovanović, J. P. Gavrić, and C. Faggio, “Ecotoxicological effects of microplastics: Examination of biomarkers, current state and future perspectives,” *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 111, no. 2018, pp. 37–46, 2019, doi: 10.1016/j.trac.2018.12.001.
- [51] S. Lechthaler, K. Waldschläger, G. Stauch, and H. Schüttrumpf, “The Way of Macroplastic through the Environment,” *Environments*, vol. 7, no. 10, p. 73, 2020, doi: 10.3390/environments7100073.
- [52] M. C. Rillig and A. Lehmann, “Microplastic in terrestrial ecosystems,” *Science*, vol. 368, no. 6498, pp. 1430–1431, 2020, doi: 10.1126/science.abb5979.
- [53] M. Bijster, *USEtox 2.0: Documentation*, 1st ed.: USEtox International Center, 2018.
- [54] K. Dai, A. Bergot, C. Liang, W.-N. Xiang, and Z. Huang, “Environmental issues associated with wind energy – A review,” *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 911–921, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.10.074.

- [55] G. Micic *et al.*, “A Review of the Potential Impacts of Wind Farm Noise on Sleep,” *Acoust Aust*, vol. 46, no. 1, pp. 87–97, 2018, doi: 10.1007/s40857-017-0120-9.
- [56] M. Kress and I. Landwehr, “Akzeptanz Erneuerbarer Energien in EE-Regionen,” Berlin, 2012. [Online]. Available: https://digital.zlb.de/viewer/api/v1/records/15801723/files/images/ioew_dp_66_akzeptanz_erneuerbarer_energien1.pdf/full.pdf
- [57] N. Ohlsen, “Klimawandelbewusstsein und Akzeptanz erneuerbarer Energien,” Dissertation, Fachbereich Sozialwissenschaften, Universität Bremen, Bremen, 2018.
- [58] M. Möser, *Technische Akustik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [59] G. Guidati, “Berechnung und Verminderung von Strömungsgeräuschen an Profilen,” Dissertation, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003.
- [60] S. Lee, L. Ayton, F. Bertagnolio, S. Moreau, T. P. Chong, and P. Joseph, “Turbulent boundary layer trailing-edge noise: Theory, computation, experiment, and application,” *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 126, no. 1107, p. 100737, 2021, doi: 10.1016/j.paerosci.2021.100737.
- [61] R. Byerbach, “Verbundvorhaben: Von der Schallquelle zur psychoakustischen Bewertung; Teilprojekt: Schallentstehung und Schallreduktion : Schlussbericht Forschungsvorhaben WEA-Akzeptanz: Von der Schallquelle zur psychoakustischen Bewertung Schallentstehung und Schallreduktion,” Hamburg, 2019.
- [62] T. Geyer, E. Sarradj, Fritzsche, and Christoph, Eds., *Schallentstehung und turbulente Grenzschicht an der Hinterkante poröser Profile*, 2010.
- [63] D. Schwab, “Aerodynamische Grenzschichtuntersuchungen an einem Windturbinenblatt im Feldversuch,” Dissertation, Strömungsmechanik, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2018.
- [64] Ö. S. Özçakmak, H. A. Madsen, N. N. Sørensen, and J. N. Sørensen, “Laminar-turbulent transition characteristics of a 3-D wind turbine rotor blade based on experiments and computations,” *Wind Energy Science*, vol. 5, no. 4, pp. 1487–1505, 2020, doi: 10.5194/wes-5-1487-2020.
- [65] A. Koodly Ravishankara, H. Özdemir, and E. van der Weide, “Analysis of leading edge erosion effects on turbulent flow over airfoils,” *Renewable Energy*, vol. 172, pp. 765–779, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.021.
- [66] M. Schramm, H. Rahimi, B. Stoevesandt, and K. Tangager, “The Influence of Eroded Blades on Wind Turbine Performance Using Numerical Simulations,” *Energies*, vol. 10, no. 9, p. 1420, 2017, doi: 10.3390/en10091420.

- [67] J. B. Taylor, A. L. Carrano, and S. G. Kandlikar, “Characterization of the effect of surface roughness and texture on fluid flow—past, present, and future,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 45, no. 10, pp. 962–968, 2006, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.01.004.
- [68] *Gestaltabweichungen*, DIN 4760, 1982.
- [69] K. Latoufis, V. Riziotis, S. Voutsinas, and N. Hatziaargyriou, “Effects of Leading Edge Erosion on the Power Performance and Acoustic Noise Emissions of Locally Manufactured Small Wind Turbine Blades,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1222, no. 1, p. 12010, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1222/1/012010.
- [70] Y. Zhang, F. Avallone, and S. Watson, “Leading edge erosion detection for a wind turbine blade using far-field aerodynamic noise,” *Applied Acoustics*, vol. 207, no. 8345, p. 109365, 2023, doi: 10.1016/j.apacoust.2023.109365.
- [71] F. L. dos Santos, N. A. Even, L. Botero, C. Venner, and L. D. de Santana, “Influence of Surface Roughness Geometry on Trailing Edge Wall Pressure Fluctuations and Noise,”
- [72] H. Wang and B. Chen, “Investigation on aerodynamic noise for leading edge erosion of wind turbine blade,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 240, p. 105484, 2023, doi: 10.1016/j.jweia.2023.105484.
- [73] M. McGugan and L. Mishnaevsky, “Damage Mechanism Based Approach to the Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades,” *Coatings*, vol. 10, no. 12, p. 1223, 2020, doi: 10.3390/coatings10121223.
- [74] Attaf B., *Recent Advances in Composite Materials for Wind Turbine Blades*, 2013.
- [75] C. Martinez, F. A. Yeboah, S. Herford, M. Brzezinski, and V. Puttagunta, “Predicting Wind Turbine Blade Erosion using Machine Learning,” *SMU Data Science Review*, vol. 2, no. 2, 2019. [Online]. Available: <https://scholar.smu.edu/datasciencereview/vol2/iss2/17>
- [76] T.J.S. Gertsen, “Data-driven leading edge erosion detection for wind turbine blades using SCADA data,”
- [77] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/38060.pdf>
- [78] G. W. Ehrenstein, *Polymer-Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendung*, 3rd ed. München: Hanser, 2011.
- [79] L. Mishnaevsky and K. Thomsen, “Costs of repair of wind turbine blades: Influence of technology aspects,” *Wind Energy*, vol. 23, no. 12, pp. 2247–2255, 2020, doi: 10.1002/we.2552.

- [80] Fangfang Ding, Zhigang Tian, and Tongdan Jin, "Maintenance modeling and optimization for wind turbine systems: A review," in *2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE): 15-18 July 2013, Chengdu [i.e. Emaishan, Sichuan], China*, 2013, pp. 569–575.
- [81] J. Carroll, A. McDonald, and D. McMillan, "Failure rate, repair time and unscheduled O&M cost analysis of offshore wind turbines," *Wind Energy*, vol. 19, no. 6, pp. 1107–1119, 2016, doi: 10.1002/we.1887.
- [82] Kim Branner and Amin Ghadirian, "Database about blade faults," 2014. [Online]. Available: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/database-about-blade-faults>
- [83] R. Ewert, C. Appel, J. Diercke, and M. Herr, "RANS/CAA based prediction of NACA 0012 broadband trailing edge noise and experimental validation," *AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, vol. 2009.
- [84] A. Oberai, F. Roknaldin, and T. J. R. Hughes, "Computation of trailing-edge noise due to turbulent flow over an airfoil," *AIAA Journal*, vol. 40, pp. 2206–2216, 2002, doi: 10.2514/3.15312.
- [85] S. Moreau, C. Schram, and M. Roger, "Diffraction Effects on the Trailing Edge Noise Measured in an Open-Jet Anechoic Wind Tunnel," in 2007.
- [86] S. Wang, Y. Zhou, M. M. Alam, and H. Yang, "Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers," *Physics of Fluids*, vol. 26, no. 11, p. 257, 2014, doi: 10.1063/1.4901969.
- [87] M. Herr, "Trailing-edge noise - reduction concepts and scaling laws," Braunschweig, 2013.
- [88] T. F. Brooks and T. H. Hodgson, "Trailing edge noise prediction from measured surface pressures," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 1981, 78(1), pp. 69–117.
- [89] M. Sherry, D. Lo Jacono, and J. Sheridan, "An experimental investigation of the recirculation zone formed downstream of a forward facing step," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 98, no. 12, pp. 888–894, 2010, doi: 10.1016/j.jweia.2010.09.003.
- [90] J. F. Largeau and V. Moriniere, "Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward-facing step," *Exp Fluids*, vol. 42, no. 1, pp. 21–40, 2006, doi: 10.1007/s00348-006-0215-9.
- [91] M. Awasthi, "High Reynolds Number Turbulent Boundary Layer Flow over Small Forward Facing Steps," Masterarbeit, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2012.

[92] R. Camussi, M. Felli, F. Pereira, G. Aloisio, and A. Di Marco, “Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward-facing step,” *Physics of Fluids*, vol. 20, no. 7, p. 299, 2008, doi: 10.1063/1.2959172.

[93] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN SPEC 4866, „Nachhaltiger Rückbau, Demontage, Recycling und Verwertung von Windenergieanlagen“, 2020