



Lärmarme Rotorblätter im Windkanal testen

Aeroakustisch verbessertes Profildesign
mit passiven Verfahren zur Lärmreduktion kombinieren



Bei der Genehmigung von Windparks spielen die erwarteten Lärmemissionen und der dadurch erforderliche Abstand zur Wohnbebauung eine große Rolle. Um diese Emissionen zu reduzieren, haben Wissenschaftler ein gleichermaßen lärmarmes wie aerodynamisch leistungsfähiges Rotorblattprofil entworfen und entsprechende Prüfkörper in Windkanälen vermessen. Diese wurden mit passiven Minderungstechniken an der Hinterkante und modifizierten Blattspitzen kombiniert. Im Experiment wurden – abhängig von den Betriebsbedingungen – Lärmreduktionen von bis zu acht Dezibel erzielt.

Das Thema Lärm betrifft sowohl neue Windparks als auch das Repowering von Anlagen und hat einen großen Einfluss auf die Akzeptanz in der Bevölkerung. Bisher sind oft Lärmgrenzwerte der Grund, warum Windparks einen erheblichen Abstand zu Siedlungen einhalten oder nachts den Betrieb einschränken müssen. Eine Reduktion der Schallemissionen um 1, 2 oder 3 Dezibel (dB) vergrößert rechnerisch die mögliche Anzahl der Windenergieanlagen (WEA) in einem Park um 25 %, 58 % bzw. 100 %. Dies eröffnet Gestaltungsspielräume beim Repowering. Wissenschaftler des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig haben gemeinsam mit Partnern im Forschungsprojekt „BELARWEA – Blattspitzen für Effiziente und Lärmarme Rotoren von WEA“ die Möglichkeiten zur aeroakustischen Verbesserung untersucht. Ziel ist, den Lärm zu verringern ohne Leistung einzubüßen. Die Ergebnisse dienen der aeroakustischen Methodenerweiterung, insbesondere der Entwicklung von Simulationstools zur entwurfsunterstützten Bewertung komplexer Geometrien (z. B. Winglets) und der Demonstration der vorhandenen Fähigkeiten im aeroakustischen Profilentwurf.

Dieses Forschungsprojekt
wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft
und Energie (BMWi)

Simulationsergebnisse aufs Testfeld bringen

Bei modernen WEA sind die Gondeln so gut lärmgekapelt, dass die Rotorgeräusche, besonders von der Hinterkante, die dominierende Lärmquelle sind. Wichtig sind dabei die äußeren 20–25 % des Rotorblatts, da dort die Strömungsgeschwindigkeiten am höchsten sind.

Seit Jahren werden an WEA immer längere Rotorblätter eingesetzt. Es ist aufwendig, in der Entwicklungsphase diese Blätter auf Testständen zu erproben. Daher soll ein immer größerer Teil der Entwicklungs- und Testarbeiten mithilfe von Simulationsprogrammen erfolgen. Dies spart Zeit und Kosten. Validierte Programmteile (Tools) bilden die Ergebnisse früherer Untersuchungen bestmöglich ab, sodass – im Idealfall – die Möglichkeit besteht, im Rechner Varianten zu vergleichen und eine Vorauswahl zu treffen.

Für ein neues Blattdesign ist die aeroakustische Optimierung ein zentrales Entwicklungsziel. Gängige industrielle Methoden zur Vorhersage der WEA-Gesamtschallabstrahlung sind größtenteils empirisch. Sie beruhen auf Messdaten mit eingeschränkten Gültigkeitsbereichen und beinhalten hauptsächlich eine Geräuschabschätzung für die im Blattaußenbereich vorhandenen Profile. Im Falle von Schallquellen mit linienartiger Verteilung, z. B. Hinterkantenlärm, ist eine solche, auf 2-D-Schnitten basierende Modellierung möglich. Ist das Ziel aber, Designspielräume über das konventionelle Maß hinaus zu steigern und z. B. auch innovative Blattspitzenformen oder Lärminderungsmaßnahmen mit komplexer Umströmung bereits im Vorentwurf zu bewerten, müssen physikbasierte, weitgehend nicht-empirische 3-D-Simulationsverfahren Anwendung finden.

Hier setzt das Projekt BELARWEA an. Die Phase 1 startete mit dem Entwurf einer neuen Profilgeometrie, wobei nicht-empirische Computational Aeroacoustics-Verfahren (CAA) aus Luftfahrtanwendungen bereits entwurfsunterstützend eingesetzt wurden. Die nach Simulation beste Variante wurde für ein umfangreiches Testprogramm in verschiedenen Windkanalumgebungen ausgewählt und mit passiven Lärminderungsmaßnahmen kombiniert (Abb. 1). Vorrangiges Ziel der Untersuchungen war, präzise Validierungsdaten für vorhandene 2-D- und neu entwickelte 3-D-Simulationsansätze zu erhalten. Des Weiteren wurde eine Vorauswahl passiver Lärminderungsmaßnahmen für deren späteren Einsatz an WEA-Rotoren getroffen.

Das neue Profil

Die Profilgeometrie ist wesentlich für die Schallentstehung, weil von ihr abhängt, bis zu welchem Punkt die Luftströmung laminar verläuft, ab wann sie turbulent wird und an welcher Stelle sie vom Profil abreißt. Auch der Anströmwinkel an der Vorderkante, die Strömungsgeschwindigkeit, etwaige kleine Fertigungsfehler und die Blattverschmutzung nehmen Einfluss.

Die Braunschweiger Forscher entwarfen ein aeroakustisch günstiges Profil mit der Bezeichnung RoH-W-18% $\text{c}37$ (nachfolgend: RoH). Dieses verglichen sie mit dem Standardprofil NACA 64-618. Für wissenschaftliche Vergleiche wird häufig die sogenannte NREL-5-MW Referenzanlage herangezogen, deren Geometrie- und Leistungsdaten allgemein zugänglich sind. Das genannte NACA-Standardprofil befindet sich im äußeren 20 – 25 % Bereich dieser Anlage. Vergleiche wurden zunächst am Rechner simuliert und anschließend

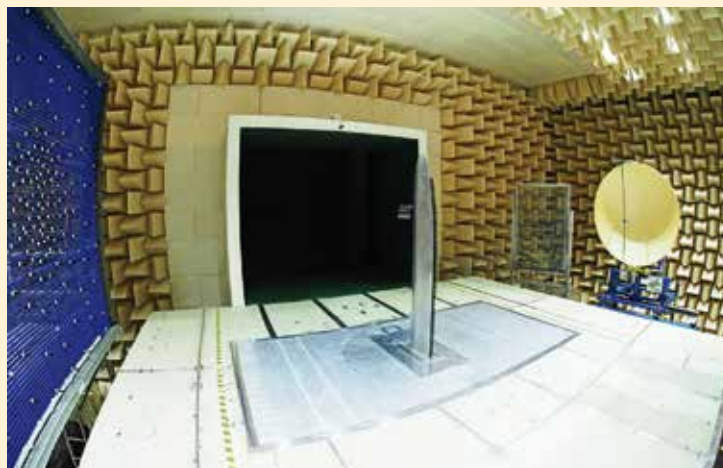


Abb. 1 Die Messung der Geräuschquellen erfolgt im Windkanal (DNW-NWB) über eine Richtmikrofonanordnung (Hohlspiegel) und 2 Mess-Arrays: Das linke Feld hat einen Durchmesser von 3 m, 140 Mikrofone und ist der Saugseite zugewandt. Das rechte hat einen Durchmesser von 1 m, 96 Mikrofone und befindet sich wie der Hohlspiegel auf der Druckseite. Messobjekt ist ein Tragflügel mit Bürstenverlängerung.

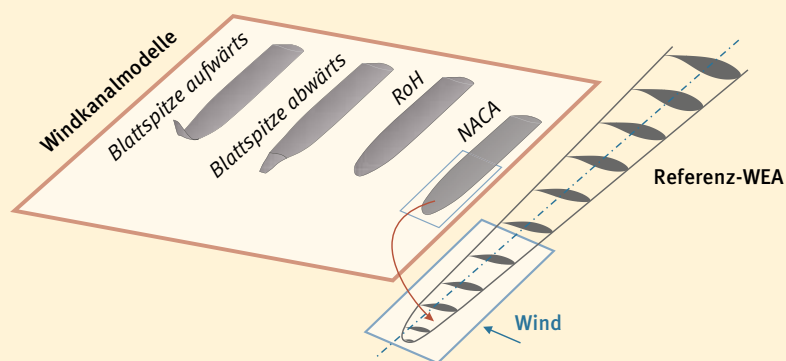


Abb. 2 Übersicht über die getesteten Modellvarianten ohne Hinterkantenmodifikationen. Die beiden linken Blattspitzen bei den Windkanalmodellen zeigen nach oben und nach unten gebogene Winglets.

durch Messungen überprüft. Im größeren Windkanal (DNW-NWB) wurden die äußeren 20 % des NREL-5MW-Rotorblattes im Maßstab 1:6 als Vergleichsgeometrie verwendet (Abb. 2). Wegen der im Windkanalversuch fehlenden Rotation wurde die Geometrie angepasst, insbesondere die Blattverwindung zurückgenommen.

Die Blattspitzen heutiger moderner WEA haben wenig Einfluss auf die Lärmertstehung an Rotoren, da in diesem Bereich häufig aus akustischen und strukturellen Gründen auf Rotorleistung verzichtet wird. Winglets oder Spiroide können die Rotorleistung um bis zu 4 % erhöhen. Daher wurden auch zwei Wingletentwürfe in die Untersuchungen aufgenommen und in das Windkanalmodell mit RoH-Profilierung integriert (Abb. 2, 3).

Passive Technologien zur Lärminderung

Ein Ziel war, die Potenziale passiver Techniken an der Hinterkante weiter auszureizen. Hierzu zählen Hinterkantenzahnung (Serrations), luftfahrterprobte poröse Materialien und verschiedene Formen von Hinterkantenbürsten. Eingang in die Praxis hat bisher nur die Zahnung gefunden. Die Messungen der verschiedenen Modifikationen ergaben, dass das Potenzial zur Lärminderung der einzelnen Techniken unter Idealbedingungen im Laborversuch frequenzabhängig zwischen 3 und 10 dB liegt. Die in den Tests besonders berücksichtigte Bürstenverlängerung kann über weite Betriebsbereiche ca. 6 dB erreichen (Abb. 1, 3).

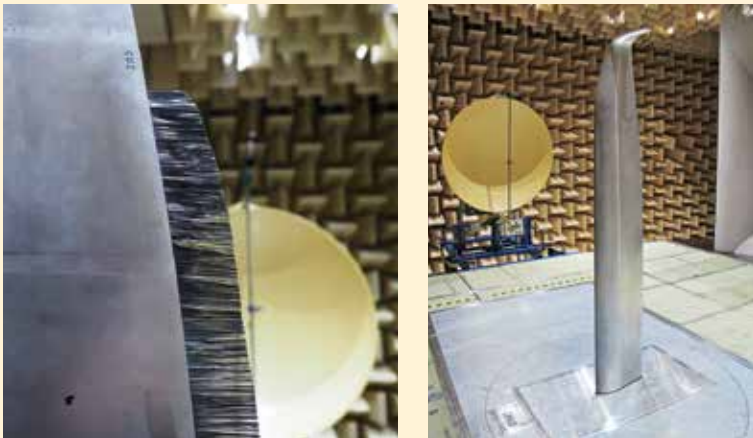


Abb. 3 Eine modifizierte Hinterkante mit Bürstenverlängerung – Modellkonfiguration mit Winglet

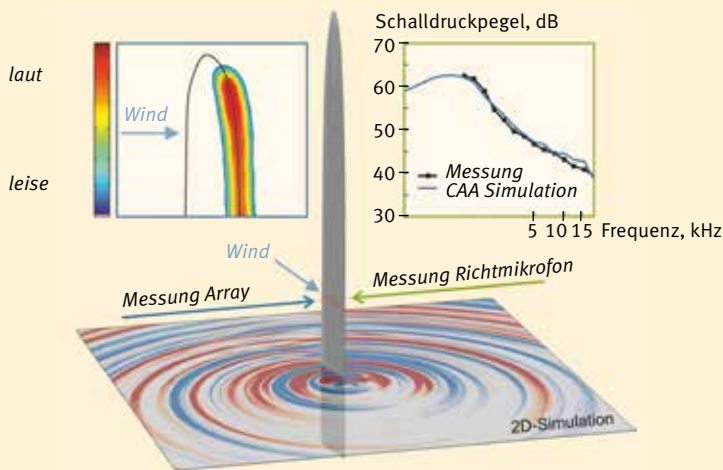


Abb. 4 „Schnappschuss“ des Schallfeldes aus 2-D-Simulation von Hinterkantengeräusch (unten). Exemplarische Quellkarte aus Array-Messung bei 2,5 kHz mit Linienquelle an der Hinterkante (oben links) und Vergleich gemessenes vs. simuliertes Geräuschspektrum (oben rechts)

Ansätze für die Praxis

Mit Abschluss des aerodynamischen und akustischen Messprogramms liegt nun eine einzigartige Datengrundlage vor. Durch die Kombination verschiedener Windkanalumgebungen und Messtechniken konnten die Parameterbereiche früherer Untersuchungen deutlich erweitert werden. Dies betrifft Strömungsgeschwindigkeiten (40 – 80 m/s), Blattstellwinkel über weite Betriebsbereiche sowie die gültigen Frequenzbereiche der Akustikmessungen. Diese wurden durch Oberflächendruck- und Windkanalwaagenmessungen begleitet. Durch Wahl eines relativ kleinen Modellkörpers im größeren Windkanal konnte eine exzellente Datenqualität erzielt werden, die mit größeren Testobjekten nicht erreicht werden kann. Die Daten werden nun genutzt, neue 3-D-CAA-Simulationsverfahren zu validieren. Da diese physikbasiert und nicht empirisch sind, ist eine Übertragung auf die Originalabmessungen durch die Simulationen am Rechner möglich. Eine in Braunschweig vorhandene, nicht empirische 2-D-Methodik zur Vorhersage von Hinterkantenlärm konnte im Projekt bereits erfolgreich validiert und entwurfsunterstützend angewendet werden (Abb. 4). Das neue RoH-Profil erreichte im Windkanalversuch eine Geräuschminderung von 2 dB im Vergleich zur NACA-Referenz und bestätigte damit die Prognosen der Forscher. Ebenso ließen sich die erwarteten, verbesserten aerodynamischen Eigenschaften des Profils experimentell nachweisen. Der Einsatz modifizierter Hinterkanten hat sich als eine noch wirksamere Methode zur Geräuschminderung erwiesen. Künftig ist es möglich, eine



Wind strömt übers Rotorblatt

Stark vereinfacht dargestellt, trifft der Wind mit unterschiedlichen Anströmwinkeln auf die Vorderkante des Blatts auf. Durch die Reibung des Luftstroms an der Oberfläche reduziert sich die Geschwindigkeit. Direkt an der Blattoberfläche beträgt sie Null. Diese „abgebremste“ Luft heißt Grenzschicht und ist für den großen Teil der Lärmemissionen prägend.

Auf der ersten Teilstrecke über die Blattoberfläche verläuft die Grenzschichtströmung im Idealfall laminar, d. h., die einzelnen Luftteilchen bewegen sich parallel. Ab einem Umschlagpunkt, der von der geometrischen Gestaltung, den Druckverhältnissen und der Reibung abhängt, treten auf dem Weg zur Hinterkante immer stärkere Turbulenzen (Luftwirbel) auf und die Grenzschicht wird dicker. Am Ende löst sich der Luftstrom wieder vom Profil, was Verwirbelungen im Nachlauf einer WEA verursacht. Ziel der Konstrukteure ist, den Energiegehalt der Grenzschichtturbulenzen im Bereich der Hinterkante möglichst klein zu halten. Dies bedeutet u. a. auch, dass Strömungsablösungen vor der Hinterkante (Abb. 5) über möglichst große Betriebsbereiche der WEA zu vermeiden sind.

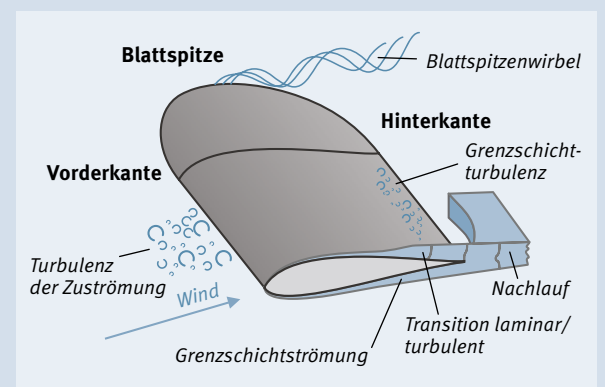


Abb. 5 Schallquellen am Rotorblatt mit Grenzschichtströmung um ein Profil (Grenzschichtdicke stark überhöht)

Rangfolge der Maßnahmen zu treffen. Im Projekt wurden erste 3-D-Simulationen der Schallabstrahlung von den verschiedenen Blattspitzengeometrien durchgeführt. Ein interessantes Ergebnis ist die sehr unterschiedliche Winkelabhängigkeit des Blattspitzengeräusches im Falle der Winglets – ein Ergebnis der detaillierten Messungen des Fernfeldschalls für diese Komponenten. Zukünftig sollen 3-D Simulationsprogramme den Konstrukteur bereits in der Vorentwurfsphase unterstützen. Die Braunschweiger Wissenschaftler planen eine Phase 2 des Projekts, in der sie gemeinsam mit Industriepartnern den äußeren Blattbereich einer bestehenden WEA modifizieren möchten. Je nach Anlagentyp und Designphilosophie sollen die jetzt positiv erprobten Simulationstechniken, die demonstrierten Fähigkeiten zum Profilineuentwurf sowie passive Minderungstechnologien zum Einsatz kommen. Unter typischen Standortbedingungen soll ein derart modifiziertes Blatt einer heutigen WEA mindestens 3 dB weniger Lärm aufweisen als das Ursprungsblatt. Dieses Ziel klingt bescheiden, entspricht aber einer technisch höchst anspruchsvollen Halbierung der Schallleistung.



Aktive Verfahren für weniger Lärm

Ein optimiertes Profil und Blattdesign, Flügelaufsätze und modifizierte Hinterkanten gehören zu den passiven Techniken für die Lärminderung von WEA. Ihre Stärke ist, dass sie, um ihre Wirkung zu entfalten, keine zusätzliche Energie benötigen. Die Ergebnisse sind auch für die Entwicklung von leiseren Turbomaschinen und Kühlgebläsen relevant.

Wissenschaftler vom Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart erforschen in einem komplementären Projekt aktive Techniken zur Lärmsenkung. In den Forschungsprojekten ActiQuiet und ActiQuieter haben sie das aktive, flächige Absaugen der Grenzschicht am Rotorblatt untersucht. Dieses Absaugen erfolgt mittels einer oder mehrerer Absaugpumpen, die in den Rotor integriert sind. Die Stärke dieser Methode liegt darin, sich optimal an die jeweiligen Anströmbedingungen des Blatts anpassen zu können. Das Ziel ist, möglichst viel Lärm mit möglichst geringem Energiebedarf zu vermeiden, ohne die Leistungsfähigkeit der WEA zu beeinträchtigen. Im ersten Schritt wurde das Verfahren experimentell an einem Profil sowie numerisch durch CFD-Simulationsprogramme getestet. Das Ergebnis war eine Absaugkonfiguration, bei der Absaugstärke und Position des Luftauslasses optimiert sind.

Auf Basis dieser aussichtsreichen Ergebnisse ging es im zweiten Schritt darum, das Verfahren an die Bedingungen einer üblichen industriell gefertigten WEA anzupassen. Die Versuche verliefen vielversprechend. Das aktive Absaugen führt über einen weiten Bereich möglicher Einsatzbedingungen zu einer Lärmreduktion und verbesserten Aerodynamik. Bei einer berechneten Lärmreduktion von bis zu 5 dB fiel der Anstieg der Stromerzeugung der WEA höher aus als der hinzugekommene Energieaufwand für die Absaugpumpe. Erst wenn eine Lärmreduzierung größer als 5 dB beabsichtigt wird und die Pumpenleistung entsprechend hoch sein muss, kommt es zu einer negativen Gesamtenergiebilanz. Eine mögliche Gegenstrategie könnte in der Installation mehrerer kleiner statt einer großen Pumpe liegen. Das Ziel dieser Untersuchungen war, auf der Basis der wissenschaftlichen und industriellen Ergebnisse eine Entscheidung über eine prototypische Umsetzung treffen zu können.

Mit den aktiven und passiven Verfahren befinden sich Techniken in der Entwicklung, die dazu beitragen können, künftig die Lärmemissionen von WEA weiter senken zu können.

Projektbeteiligte

- » **Projektleitung BELARWEA:** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Braunschweig, Dr. Michaela Herr, michaela.herr@dlr.de | www.dlr.de/as
- » **Industriebeirat BELARWEA:** Enercon | www.enercon.de, GE Windenergy | www.ge.com/renewableenergy/wind-energy, Nordex | www.nordex-online.com/de, Senvion | www.senvion.com/global/de, Siemens Gamesa Renewable Energy | www.siemensgamesa.com
- » **Projektleitung ActiQuiet und ActiQuieter:** Universität Stuttgart – Fakultät 6 Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie – Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Stuttgart, Dr.-Ing. Thorsten Lutz, lutz@iag.uni-stuttgart.de, www.iag.uni-stuttgart.de

Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Das Klügere gibt nach. BINE-Projektinfo 16/2016
- » Die Zeitmaschine für Rotorblätter. BINE-Projektinfo 15/2011
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter www.bine.info/Projektinfo_08_2018.

BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter www.bine.info/abo

Impressum

Projektorganisation
Bundesministerium
für Wirtschaft und Energie (BMWi)
11019 Berlin

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Simon Hackhofer
Zimmerstraße 26–27
10969 Berlin

Förderkennzeichen
0325726, 0325484, 0325947A

ISSN
0937-8367

Herausgeber
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut
für Informationsinfrastruktur GmbH
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Autor
Uwe Milles

Urheberrecht
Titelbild und Abb. 1–4: DLR
Fotos mit freundlicher
Genehmigung DNW-NWB
Abb. 5: nach Blake, W.K., Mechanics of
Flow Induced Sound and Vibration, Vol. II:
Complex Flow-Structure Interactions.
ACADEMIC Press INC. 1986. pp. 426-973
Eine Verwendung von Text und
Abbildungen aus dieser Publikation
ist nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion
gestattet. Sprechen Sie uns an.

Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?
Wir helfen Ihnen weiter:

0228 92379-44
kontakt@bine.info

BINE Informationsdienst
Energieforschung für die Praxis
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185–197
53113 Bonn
www.bine.info

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages