



Dokumentation

Zu Wirbelschleppen von Windparks

Zu Wirbelschleppen von Windparks

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 007/22
Abschluss der Arbeit: 10. Februar 2022
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,
Bildung und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Wirbelschleppen	5
3.	Zur Feststellung notwendiger Mindestabstände von Windenergieanlagen zu Flugplätzen	6
3.1.	Gutachten der Fachhochschule Aachen zu Mindestabständen von Windenergieanlagen zu Flugplätzen	6
3.2.	Kritik am FH Gutachten und Stellungnahme des Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt	7
4.	Auswahl von Studien/wissenschaftliche Publikationen und Stellungnahmen zu Wirbelschleppen von Windparks	9
4.1.	Darstellungen der Wissenschaftsinformationsplattform SMC und den Wissenschaftszentren „Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt“ und „Fraunhofer-Instituts für Windenergiesysteme“	10
4.1.1.	Science Media Center	10
4.1.2.	Informationen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, DLR	10
4.1.3.	Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme, IWES	13
4.2.	Übersichtsartikel zu Wechselwirkungen zwischen Windparks und der turbulenten atmosphärischen Grenzschicht	13
4.3.	Beispiele wissenschaftlicher Publikationen zu Auswirkungen von Nachläufen auf kleine Flugzeuge	14

1. Einleitung

Auf der windabgewandten Seite einer Windenergieanlage (WEA) entsteht immer ein Windschatten. Der entstehende Nachlauf (turbulenter Windschweif, Wirbelschleppen) weist eine geringere Geschwindigkeit im Vergleich zum Wind vor der Anlage auf.

Nachläufe hinter großen Windparks können bei Onshore-Anlagen einige 10 km und bei Offshore-Anlagen sogar über 100 km lang sein.¹ Da in diesen Bereichen eine verringerte Windgeschwindigkeit herrscht, stellt sich die Frage, ob dies einen Einfluss auf (leichtere) Flugzeuge haben könnte, die in der Nähe von WEAs fliegen, starten oder landen. Laut Einschätzungen des Fraunhofer-Instituts für Windenergiesysteme sind für den Flugverkehr nur die Bereiche ganz knapp hinter einzelnen Anlagen (mehrere 100 m) relevant. In diesen Bereichen ist es ggf. für Flugplätze, die sich sehr nahe an geplanten Windparks befinden, sinnvoll mittels Simulationsstudien die Auswirkungen für den Einzelfall zu überprüfen. Faktoren, die für die Bewertung der Unfallgefahr eine Rolle spielen, sind beispielsweise die Flugzeugkategorie, die Distanzen zwischen den Windkraftträdern, ihre Anordnung, die Größe der Anlage, die Turbinengröße und die vorherrschenden Windverhältnisse. Das Bundesverkehrsministerium hat 2012 „Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb“ (NFL I 92/13) erlassen.² Darin sind Abstände (400/850 m) zum Verlauf einer Platzrunde³ definiert, die von Bauwerken idealerweise einzuhalten sind. Die Sicherheit soll im Einzelfall geprüft werden.⁴

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Erkenntnisse zur Auswirkung von Wirbelschleppen durch Windparks auf bemannte Fluggeräte zusammengetragen. Eingangs wird der Begriff der „Wirbelschleppen“ eingeführt und sodann ein konkreter Fall, in dem eine Festlegung von Mindestabständen von Windenergieanlagen zu einem Flugplatz gutachterlich festgelegt wurde und im Nachgang zu kontroversen Debatten geführt hatte, vorgestellt. Im folgenden Kapitel wird eine Auswahl wissenschaftlicher Literatur, Stellungnahmen und Studien der vergangenen Jahre aufgeführt, die sich mit der Problematik von Wirbelschleppen hinter Windkraftanlagen auseinandersetzen.

Die Arbeit konzentriert sich auf Onshore-Anlagen. Im Bereich der Offshore-Anlagen sind ggf. Nachlaufphänomene anders zu beurteilen, betreffen aber naturgemäß leichte bemannte Fluggeräte weniger und werden daher hier nicht thematisiert.

1 Persönliche Information vom 2.2.2022: Fraunhofer - IWES; Institute for Wind Energy Systems.

2 https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Unternehmen/Richtlinien/GG_Sichtflugbetrieb%20NFL%20I%2092-13.pdf.

3 Anmerkung: Die Platzrunde ist ein standardisiertes An- und Abflugverfahren für Flüge nach Sichtflugregeln.

4 „Die Beurteilung im Einzelfall, ob und inwieweit Bauwerke oder sonstige Anlagen die Durchführung des Flugplatzverkehrs beeinträchtigen, soll auf der Grundlage einer Stellungnahme der Flugsicherungsorganisation erfolgen.“ (NFL I 92/13 (6))

2. Wirbelschleppen

Wirbelschleppen entstehen im Windschatten hinter einzelnen Windkraftträdern bzw. hinter gesamten Windparks. Man spricht auch von sog. Nachläufen oder Turbulenzschleppen. Im englischen Sprachgebrauch ist die Verwendung von „wake turbulences“ üblich. Es handelt sich um Bereiche mit geringerer Windgeschwindigkeit, veränderten Druckverhältnissen und einer erhöhten Turbulenz.

Die grundsätzlichen Effekte im Nachlauf eines Windkrafttrades sind in der nachfolgenden Grafik dargestellt.⁵ Rotiert die Turbine schnell, so kann es im Bereich der Blattspitzen zu Verwirbelungen kommen, die in Form einer Helix leeseitig mit der Windgeschwindigkeit abfließen. In Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und dem Betrieb der WEA kann außerdem ein Winddefizit im Nachlauf entstehen („Nachlaufdelle“). Der Strömung wird dabei Energie entzogen, die Luft dadurch abgebremst. Maximal kann knapp 60 % der in der Luft enthaltenen Energie entzogen werden, praktisch allerdings wesentlich weniger. Am besten berechnet sich das Winddefizit aus der Gesamt-Windlast auf den Rotor.⁶ Der Nachlauf weitet sich mit zunehmender Distanz um ungefähr 3-6° aus. Dies hängt von der Bodenbeschaffenheit ab. Das Winddefizit nimmt kontinuierlich ab. Im Nachlauf kommt es zu einer erhöhten Turbulenz.

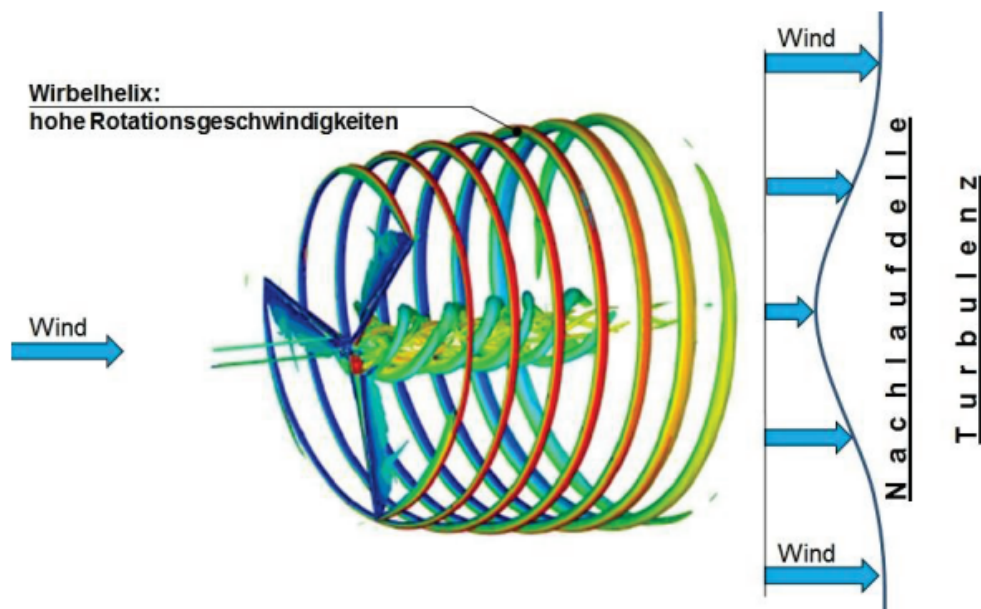


Bild 1. Windradnachlauf mit Helix der Blattspitzenwirbel, CFD-Rechnung

5 Quelle: <https://www.dglr.de/publikationen/2017/450060.pdf>.

6 Persönliche Information vom 3.2.2022: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Hinsichtlich der Sicherheit von Flügen in der Nähe von WEAs sind die Wirbelhelix und die Nachlaufdelle die relevanten Einflussfaktoren, falls diese in einem Abstand von mehr als zwei Rotordurchmessern durchgeführt werden. Die Erkenntnisse hierzu werden im weiteren Verlauf der Arbeit dargestellt.

Wirbelschleppen von Offshore-Anlagen sind im Allgemeinen länger, sind allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Zu Wirbelschleppen hinter Offshore-Anlagen hat das Helmholtz-Zentrum Potsdam auf ihrer „Wissenschaftsplattform Umwelt und Erde“ eine allgemein verständliche Darstellung bereitgestellt.⁷ Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik stellt in einer knappen Darstellung Ergebnisse zweier Forschungsstudien zu Offshore-Anlagen auf ihren Seiten „Energie Perspektiven“ vor.⁸

3. Zur Feststellung notwendiger Mindestabstände von Windenergieanlagen zu Flugplätzen

Bei der Festlegung von Mindestabständen von Windenergieanlagen zu Flugplätzen spielen zahlreiche Faktoren eine Rolle. Als ein historisches, inzwischen abgeschlossenes Beispiel wird im Folgenden auf ein seinerzeit kontrovers diskutiertes Gutachten der Fachhochschule Aachen (2015) eingegangen, in dem vergleichsweise große Mindestabstände von Windenergieanlagen zu Flugplätzen eingefordert wurden.⁹ Dieses Gutachten wurde sowohl in wissenschaftlichen Kreisen wie von Piloten heftig kritisiert. Der Vorgang wird im Folgenden kurz dargestellt.

3.1. Gutachten der Fachhochschule Aachen zu Mindestabständen von Windenergieanlagen zu Flugplätzen

Die Fachhochschule Aachen (Fachbereich 6/ACIAS e.V.) war vom Luftsport-Landesverband Brandenburg e.V. beauftragt worden, ein Gutachten zur Frage des **Mindestabstands von Flugplätzen mit gemischtem Flugbetrieb zu Windenergieanlagen** in Abhängigkeit von deren Größe zu erstellen. Die gutachterliche Stellungnahme wurde im Dezember 2015 veröffentlicht.¹⁰ In der Studie werden Motorflugzeuge, Ultraleichtflugzeuge, Segelflugzeuge, Fallschirmspringer, Hängegleiter, Gleitschirme und Ballone berücksichtigt. Als mögliche Gefahren und einschränkende Faktoren werden untersucht: die Kollision mit einer Windenergieanlage, die Auswirkung des Windfeldes im Nachlauf der Windenergieanlage auf das Luftfahrzeug, die notwendige Trennung der An-

7 <https://www.eskp.de/energiewende-umwelt/offshore-windkraftanlagen-verwirbeln-wasser-und-luft-9351111/>.

8 https://www2.ipp.mpg.de/ippcms/ep/ausgaben/ep201804/0418_wind.html.

9 „Aufgrund turbulenter Luftströmungen im Nachlauf einer WEA wird ein zylindrischer Schutzbereich um die WEA definiert, welcher von Luftfahrzeugen gemieden werden sollte. Der in der Studie empfohlene Mindestabstand zu den WEA soll sieben Rotordurchmesser betragen sowie sich bis zu einer Höhe der WEA zuzüglich 15 % der Rotordurchmessers erstrecken. - Da es nicht nur um Flugplätze für motorisierte Flugzeuge sondern auch um Plätze für Segelflugzeuge, Ballone, Gleitschirme und Hängegleiter geht, gibt es eine sehr hohe Anzahl dieser Plätze in ganz Deutschland. Entsprechend gravierend wären die Auswirkungen auf den Windkraftausbau, wenn die Forderungen der FH Aachen von den Luftfahrtbehörden übernommen würden. Erste Fälle liegen in Baden-Württemberg bereits vor.“ (Bundesverband Windenergie: Windenergieprojekte unter Berücksichtigung von Luftverkehr und Radaranlagen; Juli 2017)

10 F. Janser et al.: Windenergieanlagen in Flugplatznähe, Gutachterliche Stellungnahme, Fachbereich 6 Luft- und Raumfahrttechnik FH Aachen, Dezember 2015.

und Abflugwege der verschiedenen Luftfahrzeugtypen und Voraussetzungen für die zweckmäßige Nutzung eines Flugplatzes und Segelfluggeländes. Aus diesen Untersuchungen leiten die Wissenschaftler notwendige Freiflächen ab.

In dem Gutachten wird festgestellt, dass die Mindestabstände von Hindernissen zur Platzrunde, festgelegt in den NfL 1 92/13¹¹, von 400 m zum Gegenanflug und 850 m zu allen übrigen Platzrundenteilen nicht geeignet seien, um einen sicheren Flugbetrieb für alle Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten. Insbesondere die Standardverfahren zum Einflug in die Platzrunde im Gegenanflug, aber auch das Fliegen von Vollkreisen im Gegenanflug seien mit derart geringen Abständen nicht möglich. Hindernisse im Abstand von 400 m zur Platzrunde nähmen in unzulässiger Weise Möglichkeiten zum Vermeiden von Kollisionen durch Ausweichen.

Windenergieanlagen müssten aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften als dynamische Luftfahrt-Hindernisse aufgefasst werden - im Gegensatz zum klassischen statischen Hindernis. Ein Pilot könne die Entfernung zu Windenergieanlagen – insbesondere aufgrund ihrer drehenden Rotoren, aber auch wegen der gleichen äußeren Form bei signifikanten Größenunterschieden – nur sehr schwer abschätzen. Die unterbewusste Gefährdung sei signifikant höher, sodass mehr Aufmerksamkeit für die Wahrung eines ausreichenden Abstandes verwendet werde. Die Studie betont allerdings auch, dass einige, aus der aerodynamischen Optimierung der Windkraftanlagen abgeleiteten Strömungsfelder im Nachlauf für die Beurteilung der Auswirkungen auf den Flugweg eher untauglich seien; es bestehe weiterhin in einzelnen Aspekten experimenteller Klärungsbedarf hinsichtlich detaillierter Aussagen zur Interaktion zwischen verschiedenen Fluggeräten und dem Strömungsfeld von Windkraftanlagen.

3.2. Kritik am FH Gutachten und Stellungnahme des Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt

Das Gutachten wurde von verschiedenen Seiten kritisiert, mitunter, da hieraus wesentlich größere Abstände resultieren als durch die Regelungen der §§ 12 und 17 LuftVG und der Richtlinien des BMVI vorgesehen sind.

Im März 2016 wurde daher in einer Sitzung des Bund-Länder-Fachausschusses Luftfahrt das Gutachten thematisiert und anschließend im BMVI besprochen. Bei diesem Treffen wurde ein weitergehender Untersuchungsbedarf festgestellt.¹² Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) führte eine fachliche Untersuchung des Gutachtens durch.¹³

11 Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung; Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb, 2013, https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Unternehmen/Richtlinien/GG_Sichtflugbetrieb%20NfL%20I%2092-13.pdf.

12 Darstellung des Vorgangs siehe: <https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/arbeitskreise/luftverkehr/20170727-hintergrundpapier-windenergie-luftverkehr-radar-aktualisiert-ueberarbeitung-2017.pdf>.

13 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Prüfung des Gutachtens der FH Aachen zur „Feststellung notwendiger Mindestabstände von Windenergieanlagen zu Flugbetriebsräumen und Flugplätzen“ vom 15.05.2016.

Diese Gegenstellungnahme des DLR konnte im zeitlichen Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht im Original frei verfügbar gefunden werden. Im Folgenden werden drei Fundstellen aufgelistet, in denen aus dem DLR-Gutachten zitiert wurde bzw. dieses ausgewertet wird.

- (1) Im Urteil des VG Trier vom 11.04.2017 zu maßgeblichen Abständen von Windenergieanlagen zu einem Segelflugplatz wird in der Urteilbegründung aus dem DLR-Gutachten wörtlich wie folgt zitiert:

„Der abschließenden Bewertung zum Gefährdungspotential und insbesondere den daraus abgeleiteten pauschalen Abstandsempfehlungen können wir in der vorliegenden Form nicht zustimmen. (...) Aus unserer Sicht besitzt das Gutachten jedoch Mängel in der wissenschaftlichen Umsetzung – sowohl bei der Konzeption der Flugversuche, als auch in der Ergebnisdiskussion. In ihrer Wertung des von WEA ausgehenden Gefährdungspotentials und den daraus abgeleiteten Mindestabständen sehen wir mit der Durchführung der Flugversuche deutliche Widersprüche. In der kritischen Analyse mit bestehenden Untersuchungen anderer Institutionen gelingt es den Autoren der FH Aachen Schwachstellen in den analysierten Arbeiten aufzuzeigen, jedoch fehlt die notwendige tiefergehende fachliche Auseinandersetzung ohne die eine Bewertung und Einordnung der zum Teil sehr unterschiedlichen Ergebnisse nicht gelingen kann. Eine differenzierte Diskussion kommt nicht zustande. Die Schlussfolgerungen und empfohlenen Mindestabstände vermögen in der Konsequenz die Gesamtsituation nicht adäquat zu erfassen. Zur abschließenden Klärung von Mindestabständen sind daher nach unserer Auffassung weitere Untersuchungen zwingend erforderlich.“¹⁴

Das Gericht hat die Stellungnahme des DLR als einer fachlichen Entwertung des FH Gutachtens gleichkommend beurteilt.¹⁵

- (2) In einem Hintergrundpapier des Bundesverbandes Windenergie wird die Stellungnahme des DLR wie folgt zusammengefasst:

„Stellungnahme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zu dem Gutachten vom 15.04.2016, im Auftrag des Umweltministerium Baden-Württemberg

Das Gutachten weise sowohl bei der Analyse bestehender wissenschaftlicher Arbeiten als auch in den eigenen Untersuchungen erhebliche Mängel auf. Die Empfehlungen zu zusätzlichen Mindestabständen seien daher nicht stichhaltig belegt. Die DLR spricht sich in dieser Einschätzung für Einzelfallbetrachtungen aus, in

14 VG Trier, U. v. 11.04.2017 – 1 K 4887/16.TR. ZNER 2017, Heft 6, Seite 510, 514.

15 Die Diskussion gilt auch vor diesem Hintergrund inzwischen als geklärt; die Position des FH Aachen-Gutachtens ist in der Folge nicht mehr vertreten worden.

denen auf zusätzliche pauschale, zu restriktive Abstandsregelungen verzichtet werden müsse.“¹⁶

- (3) In einer Anmerkung¹⁷ zu einem Urteil des VG Trier vom 11.04.2017 – 1 K 4887/16 werden die Ergebnisse der Prüfung durch das DLR wie folgt dargestellt:

„Das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) kommt in einer fachlichen Untersuchung des Gutachtens zu dem Ergebnis, dass zwar der grundsätzlichen Einordnung von Windenergieanlagen als dynamisches Hindernis zuzustimmen und auch die Verursachung von Verwirbelungen hinter einer Windenergieanlage bekannt sei, die konkret gefolgerte Vorgabe pauschaler Abstandsvorgaben aufgrund erheblicher Mängel innerhalb des Gutachtens sowohl bei der Analyse bestehender relevanter wissenschaftlicher Arbeiten als auch in den eigenen Untersuchungen aber nicht haltbar sei. Die Auswirkungen der Windenergieanlage hingen vielmehr von den konkreten Umständen am Errichtungsort ab, sodass stets eine Einzelfallbetrachtung notwendig sei. Auch aus Sicht des Deutschen Hängegleiter Verbandes (DHV) seien die im Gutachten postulierten Vorgaben deutlich überzogen. Konkret wird bemängelt, dass die durchgeführten Versuche unter „worstcase“-Bedingungen mit Windgeschwindigkeiten von 14 m/s stattfanden, bei denen die betrachteten Kleinstflieger aber sowieso aus Sicherheitsgründen nicht fliegen.“¹⁸

4. Auswahl von Studien/wissenschaftliche Publikationen und Stellungnahmen zu Wirbelschleppen von Windparks

Im Folgenden findet sich eine Auswahl von wissenschaftlichen Publikationen und wissenschaftlichen Stellungnahmen der vergangenen Jahre zu von Onshore-Windparks erzeugten Wirbelschleppen/Wakes.¹⁹

Zunächst wird auf Darstellungen einer Wissenschaftsinformationsplattform und von Wissenschaftszentren eingegangen. Dabei werden auch tangierende Bereiche behandelt, wie beispielsweise die Möglichkeit, den Wake-Effekt zu kontrollieren bzw. zu reduzieren sowie die Frage, wie groß - unabhängig von einer möglichen Gefährdung von Fluggeräten - Wirbelschleppen sein können. Ein Übersichtsartikel fasst den derzeitigen Erkenntnisstand über die Ausdehnung und den Verlauf des Nachlaufs von WEAs zusammen; drei konkrete Forschungsarbeiten befassen sich mit den Auswirkungen von Wirbelschleppen auf durchfliegende Fluggeräte.

Im Allgemeinen lässt sich aus den Studien ableiten, dass weitgehend keine Gefahr für die strukturelle Festigkeit von Kleinflugzeugen besteht, es allerdings im unmittelbaren Nahbereich der

16 BWE (Bundesverband Windenergie), Hintergrundpapier: Windenergieprojekte unter Berücksichtigung von Wetter und Radaranlagen, 2017, (Fn.9), S. 8.

17 M. Schmidt, ZNER 2017, Heft 6, Seite 515; VG Trier, U. v. 11.04.2017 – 1 K 4887/16.TR.

18 M. Schmidt, ZNER 2017, Heft 6, Seite 515; VG Trier, U. v. 11.04.2017 – 1 K 4887/16.TR.

19 Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Anlagen zu merkbaren Einflüssen auf den Flug kommt. Je nach Voraussetzungen kommen verschiedene Studien zwar zu unterschiedlichen Minimalabständen, doch lässt sich je nach spezifischer Gegebenheit ein „sicherer“ Abstand festlegen. Diese Minimalabstände liegen immer im Bereich von einigen Rotordurchmessern.

4.1. Darstellungen der Wissenschaftsinformationsplattform SMC und den Wissenschaftszentren „Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt“ und „Fraunhofer-Instituts für Windenergiesysteme“

4.1.1. Science Media Center

Vor dem Hintergrund der Diskussion zum Windenergieertrag bei einer Umkehrung der Drehrichtung von Windrädern hat das Science Media Center 2020 verschiedene Wissenschaftler um Stellungnahme gebeten. In ihren Stellungnahmen wird auch auf den Erkenntnisstand zur Reichweite von Wirbelschleppen, die durch Windräder erzeugt werden, eingegangen. Hier wird von Wissenschaftlern betont, dass die Frage nach einer Reduzierung der Wirbelschleppen (Wake Control) auf die stromabwärts befindlichen Anlagen (wodurch eine Ertragssteigerung zu erreichen ist), Gegenstand aktueller Forschung sei und somit eine offene Forschungsfrage.²⁰

Aus Anlass einer Publikation in „Nature Energy“ im Jahr 2018²¹ zu Ertragsverlusten infolge von Wake-Effekten von Windkraftanlagen wurden Experten vom SMC um ihre Einschätzung hinsichtlich der Windschatten durch Windparks gebeten.²² Zwar liegt der Fokus der Diskussion wiederum auf der Beeinflussung von Windkraftanlagen untereinander, allerdings bezogen auf die Ausdehnungsweite von Wirbelschleppen. Die Studie konstatiert, dass der wake-Effekt im Onshore-Bereich bei bis zu 50 Kilometern liegen könne. Daher sollte es allgemeine Regeln für den Aufbau von Windparks geben, die dies berücksichtigten (in Hinblick auf die Störung naheliegender anderer Windparks). Die Gefährdung von Flugzeugen in unmittelbarer Nähe wird allerdings nicht thematisiert.²³

4.1.2. Informationen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, DLR

Auf einer Internetthemenseite (DLR_next) geht das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt allgemeinverständlich in einem knappen Übersichtstext auf das Phänomen von Wirbelschleppen

20 <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/research-in-context/details/news/liefere-links-drehende-windraeder-mehr-strom/>.

21 Lundquist JK et al. (2018): Cost and Consequences of wind turbine wake effects arising from uncoordinated wind energy development. Nature Energy; DOI: 10.1038/s41560-018-0281-2. www.nature.com/articles/s41560-018-0281-2

22 <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/research-in-context/details/news/erstmal-folgen-von-wind-schatten-durch-windparks-berechnet/>.

23 Die beiden angegebenen Seiten des SMC bieten durch die namentliche Angabe der von ihnen angefragten Experten eine Übersichtsliste von Wissenschaftlern, die im deutschsprachigen Raum zu verschiedenen Fragestellungen von Windkraftanlagen forschen.

ein. Dies wird allerdings anhand von durch Flugzeuge erzeugten Nachläufen und ihrer Vermessung erläutert.²⁴ Die Entstehung und Visualisierung von Wirbelschleppen durch Flugzeuge werden schon seit langer Zeit am DLR untersucht. Eine am Forschungsflughafen in Braun vorgenommene Visualisierung von Wirbelschleppen findet sich auf den Seiten der DLR.²⁵ Bereits im Jahr 2006 hatte das DLR Untersuchungen zu Wirbelschleppen hinter einem Airbus durchgeführt und hierzu Ergebnisse und Empfehlungen veröffentlicht.²⁶

In Hinblick auf die Betrachtung von Windkraftanlagen wurden am DLR insbesondere Studien an Offshore-Anlagen durchgeführt.²⁷ Allgemein ist das Thema „Wirbelschleppen/Wake für Onshore-Windparks“ weniger untersucht als für Offshore-Windparks. Onshore-Anlagen unterscheiden sich in einigen für den Nachlauf relevanten Faktoren von Offshore-Anlagen: Sie sind relativ kleiner und die Umgebungsturbulenz und die Oberflächenrauigkeit sind höher. Daher erfolgt die Durchmischung des Nachlaufs mit der ungestörten Strömung um den Windenergieanlagen herum viel schneller.²⁸

In Hinblick auf die Bewertung von Durchflügen bei Onshore-Anlagen wurden vom DLR 2017 Ergebnisse von Flugversuchen im Nachlauf von Windenergieanlagen (WEA) auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress vorgestellt.²⁹ Hierzu wurden innerhalb von fünf Monaten insgesamt 330 Nachlaufeinflüge³⁰ bei verschiedenen Windbedingungen untersucht.³¹ Bei den zu untersuchenden Windenergieanlagen handelte es sich um zwei Nordex N117-2400-WEA mit einer Gesamtanlagenhöhe von jeweils 199,5 Metern³². Die Durchflüge wurden bei einer Entfernung hinter den Rotoren von ca. dem 1,5- bis ca. 15- fachen des Rotordurchmessers unternommen.

24 https://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6683/10964_read-25018/.

25 <https://www.dlr.de/content/de/bilder/luftfahrt/attas-visualisierung-wirbelschleppe.html>.

26 Pressemeldung des DLR: „Airbus A380 Wirbelschleppen-Studie abgeschlossen – DLR-Unterstützung bei Messungen erfolgreich“; 3. November 2006; http://web.archive.org/web/20100604063057/http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-4551/84_read-5692/.

27 Vgl. hierzu beispielsweise: Lehrstuhl für Hubschraubertechnologie an der Technischen Universität München: Hubschrauber Einsätze in Offshore Windparks (HeliOW) im 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung; <https://www.asg.ed.tum.de/ht/forschungsprojekte/heliow/>.

28 Persönliche Informationen vom 2.2.2022: Institut für Flugzeugbau Universität Stuttgart

29 Fischenberg, D. et al. (2017): Flugversuche im Nachlauf von großen Windenergieanlagen; Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2017, DocumentID 450060; <https://www.dglr.de/publikationen/2017/450060.pdf>.

30 Mit einer „Remos GX (Abflugmasse 600 kg, LSA-Klasse)“.

31 Messzeitraum von Dezember 2016 bis Mai 2017.

32 Ein Rotordurchmesser von über 120 m sowie eine Anlagenhöhen von 200 m sind auch an Binnenlandstandorten derzeit üblich, so dass der Versuchsaufbau realistische Szenarien widerspiegelt.

Die Bewertung der Piloten zum Flugkomfort wird wie folgt zusammengefasst:

„Die in den Flugversuchen gewählte Flughöhe von unter 500 ft ist für VFR³³-Piloten sehr ungewohnt, da diese Höhe sonst nur unmittelbar vor der Landung erreicht wird. Der Abstand zum Windrad wurde als unangenehm nah empfunden. Zudem kann die Entfernung zu den Windrädern quantitativ nicht zuverlässig geschätzt werden. Nach einigen Flügen stellte sich eine gewisse Erfahrung bzw. Gewöhnung ein, die sich aber nur auf die Bodenmerkmale stützte. Zur genauen Einhaltung der geplanten Flugstrecke stand ein Kartendisplay mit den vorgegebenen Tracks zur Verfügung. Nur damit war eine Einhaltung der Abstände quantitativ möglich. Die Wahrnehmung des Einflusses des Nachlaufes hängt von der Windgeschwindigkeit ab. Bei starkem Wind (> 15 m/s) sind die Einflüsse nicht bzw. kaum von der allgemeinen Turbulenz zu unterscheiden. Dies gilt auch für den kleinsten geflogenen Abstand. Bei Windgeschwindigkeiten zwischen 7 m/s und 10 m/s war der Einfluss am deutlichsten spürbar. Bei einigen Durchflügen war eine Azimuthänderung³⁴ bei Ein- und Ausflug deutlich sichtbar. Teilweise war auch eine kleine Querbewegung (großer Schiebewinkel) für kurze Zeit spürbar, bevor sich dies in eine Azimuthänderung wandelte. Nennenswerte Rollwinkel wurden dabei in keinem Fall erreicht. Auch ein sofortiges Eingreifen durch starke Steuerausschläge war in keinem Fall erforderlich. Als unangenehm wurde die Perspektive durch den besonders bei starken Winden relativ großen Vorhaltekreis empfunden, der dazu führt, dass kurz vor dem Einflug in den Nachlauf die Längsachse des Flugzeuges genau in den Rotorkreis zeigt, obwohl der Flugweg tatsächlich parallel zur Rotorebene verläuft. Der Einfluss durch den Nachlauf auf die Fluggeschwindigkeit war kaum spürbar – solange der Flugweg parallel zur Rotorebene verlief. Anders sah dies bei schrägen Durchflügen aus (bis zu 45° zur Rotorebene). Hierbei war eine deutliche Geschwindigkeitsreduktion zu sehen und zu spüren. Da eine ausreichende Reserve zur Überziehgeschwindigkeit bestand, war dies nicht als kritisch anzusehen. Bei empfohlener Landeanfluggeschwindigkeit hätte aber wahrscheinlich die Überziehwarnung des Flugzeuges ausgelöst. Die Dauer solcher Phasen war dabei jeweils nur für wenige Sekunden, wodurch sich für den Piloten keine erkennbare Höhenänderung einstellte. Der Blattspitzenwirbel war besonders am oberen Rand des Nachlaufs zu spüren. Dieser fühlt sich wie normale Turbulenz der Umgebung an, in einigen Fällen jedoch etwas stärker. Auf Höhe der Rotorachse waren die Wirbel nur als kurzes „Ruckeln“ zu spüren. Die Intensität fiel dabei sehr unterschiedlich aus, je nachdem, wie genau der Wirbel getroffen wurde. Eine erhöhte Turbulenz war auch in vergleichsweise großer Entfernung (8 bis 10 Rotordurchmesser) bei mittleren Windgeschwindigkeiten von 6 bis 10 m/s spürbar, während eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit (Nachlaufdelle) dort nicht mehr erkennbar war.“

33 Visual Flight Rules

34 Azimut: Fachwort aus der Geodäsischen Vermessung: Der Winkel, den der durch einen Punkt an der Himmelskugel hindurchgehende Höhenkreis mit dem astronomischen Meridian bildet. (grafische Darstellung siehe: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/a/azimut-bohrtechnik.html>.)

Unter den in dieser Studie abgebildeten Bedingungen ergeben sich laut Autoren dieser Publikation keine Hinweise auf eine außergewöhnliche Belastung des Flugzeugs oder auf abnormale Flugzustände. Die Autoren geben allerdings einschränkend zu Bedenken, dass für noch größere Anlagen mit bis zu 5 und 7 MW Leistung und Rotoren mit Durchmessern von 130 m weitere Flugversuche zu empfehlen sind.

4.1.3. Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme, IWES

Am Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme, IWES, wurden mittels Flugsimulationsszenarien in Gegenwart von zugewiesenen Wind- und Turbulenzfeldern die Effekte von Nachlaufströmungen auf leichte Fluggeräte in der Nähe von Windkraftanlagen untersucht.³⁵ Die Ergebnisse sind in einer öffentlich zugänglichen Publikation zusammengefasst.³⁶

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse empfehlen die Autoren der Studie sichere Begegnungsabstände für Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt (auch unter Berücksichtigung des „Komforts der Piloten“, d.h. es besteht keine akute Gefahr, aber der Flugkomfort ist eingeschränkt). Diese Angaben sollen als Bewertungsgrundlage des Unfallrisikos für Flüge in der Nähe von Windkraftanlagen dienen. Ab einer Distanz von einem bis drei Rotordurchmessern stromabwärts bei niedriger Windgeschwindigkeit und einem bis sieben Durchmessern stromabwärts bei hoher Windgeschwindigkeit könne die Turbinennachlaufströmung als stabil angesehen werden. In keinem der untersuchten Fälle sei die strukturelle Festigkeit des Flugzeugs gefährdet gewesen. Allerdings weise das derzeitige Modell noch eine Reihe von Einschränkungen auf. So sei ein sehr vereinfachtes Modell der Auswirkungen von Turbulenzen auf die aerodynamischen Ableitungen verwendet worden und es berücksichtige keine Änderungen des sog. Druckmittelpunkts während einer Wirbelschleppenbegegnung.

4.2. Übersichtsartikel zu Wechselwirkungen zwischen Windparks und der turbulenten atmosphärischen Grenzschicht

In einem 2018 erschienenen wissenschaftlichen Übersichtsartikel, „Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review“, werden Erkenntnisse über Ausdehnung und Verlauf des Nachlaufs von WEA detailliert dargestellt.³⁷

Im einfachen Fall der Interaktion zwischen einer freistehenden Horizontalachsen-Windturbine und der atmosphärischen Grenzschicht über flachem Gebiet beträgt der Turbulenzbereich in Abhängigkeit von Geometrie, Betriebszustand der Windturbine und Wind zwischen zwei und vier

35 Die untersuchten Szenarien beziehen sich auf Windgeschwindigkeiten von 5 m/s und 12 m/s. Der Turbinendurchmesser beträgt 126 m. Das implementierte Flugdynamikmodell ist eine modifizierte Version der Cessna 172 Skyhawk.

36 Varriale, C.; De Marco, A.; Daniele, E.; Schmidt, J.; Stoevesandt, B. Flight Load Assessment for Light Aircraft Landing Trajectories in Windy Atmosphere and Near Wind Farms. *Aerospace* 2018, 5, 42. <https://doi.org/10.3390/aerospace5020042>. <https://www.mdpi.com/2226-4310/5/2/42>.

37 Porté-Agel, F. et al (2020): Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review; *Boundary-Layer Meteorology* 174:1–59 <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0>. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10546-019-00473-0.pdf>.

Rotorlängen. Im Fall von größeren WEA können die Überlagerung mehrerer Windturbinen-Wellen und ihre wechselseitige Interaktion mit der atmosphärischen Grenzschichtströmung zu Veränderungen in der Bewertung der Wake-Region kommen. Dabei spielen zahlreiche Faktoren wie die Windrichtung, Windstärke, Größe der WEA, Anordnung der Windräder etc. eine Rolle. Diese können in konkreten Simulationsmodellen untersucht werden und müssen im Einzelfall bewertet werden.

4.3. Beispiele wissenschaftlicher Publikationen zu Auswirkungen von Nachläufen auf kleine Flugzeuge

In der Zeitschrift „Wind Energy Science“ ist 2018 ein Artikel unter dem Titel „Do wind turbines pose roll hazards to light aircraft?“ erschienen.³⁸ In den USA, so die Autoren des Artikels, befänden sich rund 40 % aller Windturbinen in einem Umkreis von 10 km um einen kleinen Flughafen. Daher sei es essentiell, die Gefahren für Kleinflugzeuge hinsichtlich der durch den Betrieb der WEA erzeugten Turbulenzen einschätzen zu können. Mittels Simulationen wurden Turbinenwirbelschleppen erzeugt und deren Auswirkungen auf hypothetische Flugzeugrouten untersucht. Selbst im Worst-Case-Szenario könne bei mehr als dem achtfachen Turbinendurchmesser ein stabiler Zustand angenommen werden.³⁹

Auf dem 44. European Rotorcraft Forum wurden im September 2018 Ergebnisse eines Projekts zum Durchflug von Helikoptern durch Windkraftturbulenzen vorgestellt.⁴⁰ Insgesamt zeigten die Analysen, dass im üblichen Testfall, basierend auf Nennwindgeschwindigkeit und moderater Hubschraubergeschwindigkeit, die Auswirkungen der Turbulenzen keinen Sicherheit gefährdenden Einfluss hätten. In besonders kritischen Situationen, d.h. in unmittelbarer Nähe der Windkraftanlage und bei hohen Windgeschwindigkeiten sowie relativ niedriger Hubschraubergeschwindigkeit oder sogar im Schwebeflug gäbe es Anzeichen, dass die Situation kritischer zu bewerten sei. Außerdem wurde festgestellt, dass bei kleinen Windkraftanlagen Korrekturen durch den Piloten aufgrund der Bodennähe gefährlich sein könnten. Dies müsse weiter erforscht werden.

In der Zeitschrift „The Aeronautical Journal“ erschien 2019 ein Artikel unter dem Titel „Wind turbine wake vortex influence on safety of small rotorcraft“.⁴¹ Diese Studie befasst sich mit den potenziellen Auswirkungen auf die Sicherheit von kleinen Hubschraubern und ultraleichten Flugzeugen, die in der Nähe starker Windkraftanlagen fliegen. Als Beispiel wird eine 7-MW-Windturbine im kritischsten Betriebszustand angenommen, die den maximalen Zirkulationswirbel erzeugt. Die Auswirkungen hängen von zahlreichen flugzeugspezifischen Faktoren, den atmosphärischen und wetterabhängigen Gegebenheiten sowie dem spezifischen Flugverhalten und

38 Tomaszewski, J.M. et al. (2018): Do wind turbines pose roll hazards to light aircraft? Wind Energ. Sci., 3, 833 - 843, 2018; <https://doi.org/10.5194/wes-3-833-2018>.

39 Ebd., Figure 4.

40 Bakker, R. et al. (2018): Wind Turbine Wake and Helicopter Operations - Wind turbine wake identification, Partner contributions. Projektbericht. GARTEUR_HC-AG23-WP0-D1. 44th European Rotorcraft Forum, Delft, 19.-20. September 2018.

41 Van der Wall, B.G.: Wind Turbine Wake Vortex Influence on Safety of Small Rotorcraft; August 2019; Aeronautical Journal -New Series- 123(1267):1-22 DOI:10.1017/aer.2019.59.

Reagieren auf Strömungsänderungen ab und müssen in jedem konkreten Fall betrachtet werden. Verschiedene dieser technischen Faktoren werden hier herausgearbeitet.

* * *