

FLUGVERSUCHE IM NACHLAUF VON GROSSEN WINDENERGIEANLAGEN

D. Fischenberg¹, P. Knebel¹, M. Cremer²

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

²messWERK GmbH, Hermann-Blenk-Str. 27, 38108 Braunschweig
Deutschland

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden Messdaten von Flugversuchen im Nachlauf von großen Windenergieanlagen (WEA) analysiert. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Strömungssituation hinter den WEA und dem Einfluss des Nachlaufs auf die Flugdynamik des einfliegenden Flugzeugs. Als Windenergieanlagen standen zwei Nordex N117-2400 mit einer Gesamtanlagenhöhe von jeweils 199,5 Metern zur Verfügung, als Versuchsträger diente eine speziell instrumentierte Remos GX mit einer Abflugmasse von 600 kg. In einem Versuchszeitraum von 5 Monaten wurden über 330 Nachlaufeflüge bei verschiedenen Windbedingungen und WEA-Betriebspunkten durchgeführt. Die Entfernung hinter den Rotoren lag dabei im Bereich des 1,5- bis ca. 15-fachen des Rotordurchmessers. Die gesammelten Messdaten stellen eine umfangreiche Information über die Beeinflussung eines Flugzeugs beim Einflug in einen WEA-Nachlauf bereit. So quantifizieren die Messdaten die Höhe der Windreduktion hinter einer WEA (Nachlaufdelle), die Änderung der Anströmbedingungen am Flugzeug sowie die Größe der auftretenden Flugzeugbeschleunigungen verursacht durch die Blattspitzenwirbel. Die Messdaten werden statistisch analysiert und bewertet. Ferner beschreibt der Testpilot subjektiv die Auswirkungen des Nachlaufs auf Flugzeug und Flugdynamik.

1. EINLEITUNG

Die Größe und Anzahl von modernen Windenergieanlagen (WEA) hat in den letzten Jahren in Deutschland - bedingt durch das Gesetz zum Ausbau der erneuerbaren Energien [1] - stark zugenommen. Rotordurchmesser von über 120 m, Anlagenhöhen von 200 m sowie Leistungen von 3 MW und mehr sind auch an Binnenlandstandorten heute üblich. Mit besonderem Interesse blicken die General Aviation, Segel- und Ultraleichtflieger darauf, ob und wie stark die Strömung im Nachlauf solcher großer WEA gestört ist und welchen Einfluss sie auf die Flugdynamik eines Flugzeugs haben kann. Dies ist insbesondere dort von Interesse, wo WEA in der Nähe von Flugplätzen projektiert werden, bei denen die Platzrunde oder sogar der Start- und Landevorgang beeinflusst werden könnte.

Um hier – in Ergänzung zu verschiedenen theoretischen Abhandlungen, z.B. [2], [3], [4], [5], [6] – valide Messdaten aus Flugversuchen zu sammeln, hat das Institut für Flugsystemtechnik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Zusammenarbeit mit der Fa. messWERK Versuche mit einer speziell instrumentierten Remos GX (LSA Klasse) über einen Zeitraum von mehreren Monaten absolviert. Die Messungen erfolgten im Nachlauf von zwei modernen Multimegawattanlagen mit einer Gesamthöhe von jeweils 199,5 m. Bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Anlagenbetriebspunkten wurden mehr als 330 Einflüge in deren Nachlauf in unterschiedlichen Flughöhen, mit verschiedenen Einflugwinkeln und bei Abständen zwischen weniger als zwei und 15 Rotordurchmesser durchgeführt.

Die grundsätzlichen Effekte im Nachlauf einer WEA sind in Bild 1 skizziert. Hohe Rotationsgeschwindigkeiten können im Bereich der Blattspitzenwirbel auftreten, die in

Form einer Helix leeseitig mit der Windgeschwindigkeit abfließen. Zusätzlich entsteht – stark abhängig von Windgeschwindigkeit und Betriebspunkt der WEA - ein Winddefizit im Nachlauf durch die Energieentnahme des Rotors („Nachlaufdelle“). Ferner ist eine erhöhte Turbulenz im Nachlauf zu erwarten, so z.B. hinter der Gondel und im Nachlauftrandbereich.

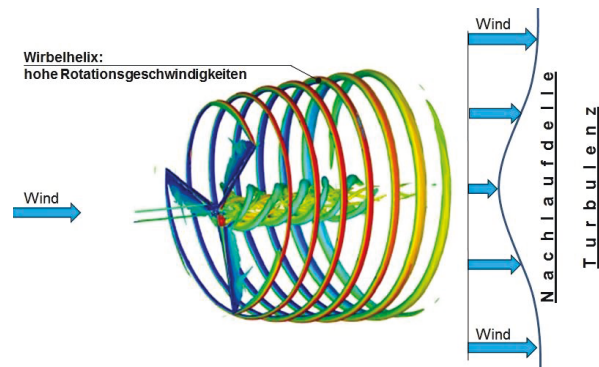


Bild 1. Windradnachlauf mit Helix der Blattspitzenwirbel, CFD-Rechnung [7]

2. MESSTECHNIK UND WINDERMITTLUNG

Das Versuchsflugzeug Remos GX der Fa. messWERK hat eine maximale Abflugmasse von 600 kg und liegt damit zwischen Ultraleichtflugzeugen und kleinen Flugzeugen der E-Klasse (Bild 2). Es ist mit einem umfangreichen Messsystem für Flugerprobung und Forschung ausgestattet. Dazu gehören Sensoren zur Messung aller Steuereingaben und zahlreicher Triebwerksparameter

sowie ein hochwertiges Inertialmesssystem, mit dem die Lagewinkel, Beschleunigungen, Drehraten und die translatorische Bewegung im geodätischen System erfasst werden. Weiterhin verfügt das Flugzeug über eine Luftdatensonde zur Messung des Anströmvektors im flugzeugfesten Koordinatensystem. Diese Sonde verfügt sowohl über mechanische Windfahnen als auch über eine 5-Lochsonde zur Anströmwinkelmessung (Bild 3). Die Mess- und Aufzeichnungsfrequenz beträgt dabei 100 Hz.



Bild 2. Messflugzeug Remos GX

Für diese Sonde wurde in verschiedenen Flugversuchen eine In-Flight-Kalibrierung durchgeführt, wodurch sowohl der Sondenfehler als auch der Einbaufehler bestimmt wurden.



Bild 3. Strömungsvektorsonde der Remos GX

Der 3-dimensionale Windvektor \vec{V}_W lässt sich als Vektordifferenz aus dem Bahnvektor \vec{V}_K und dem Fluggeschwindigkeitsvektor \vec{V} bestimmen.

$$\vec{V}_W = \vec{V}_K - \vec{V}$$

Die messtechnische Herausforderung bei der Windmessung liegt unter anderem in der Größe der drei Vektoren. Die Fluggeschwindigkeit ist unter normalen meteorologischen bzw. Flugbedingungen selbst für Kleinflugzeuge groß im Vergleich zur Windgeschwindigkeit. Somit ist auch die Bahngeschwindigkeit normalerweise erheblich größer als die Windgeschwindigkeit. Aus diesem Grund ist der Wind die kleine Differenz zweier großer Vektoren. Dadurch ist leicht ersichtlich, dass an die Genauigkeit der Flug- und Bahngeschwindigkeitsmessung hohe Anforderungen gestellt werden müssen, um auch den Wind mit einer akzeptablen Genauigkeit zu erhalten. Der Bahngeschwindigkeitsvektor \vec{V}_K wird mit dem Inertialnavigationssystem bestimmt, das intern über GPS gestützt wird.

Die Messung des Fluggeschwindigkeitsvektors \vec{V} erfolgt pneumatisch mit einer 5-Lochsonde. Diese liefert den Betrag der Fluggeschwindigkeit im aerodynamischen Koordinatensystem, das durch den Anstellwinkel α sowie den Schiebewinkel β gegenüber dem flugzeugfesten Koordinatensystem gedreht ist. Das flugzeugfeste Koordinatensystem ist gegenüber dem geodätischen um den Azimuth- (oder Gierwinkel) Ψ , Längslagewinkel θ und Rollwinkel Φ verdreht. Diese Zusammenhänge sind für die Horizontalebene in Bild 4 dargestellt. Zur besseren Übersicht sind nur die Winkel und Vektoren in der Horizontalebene gezeichnet.

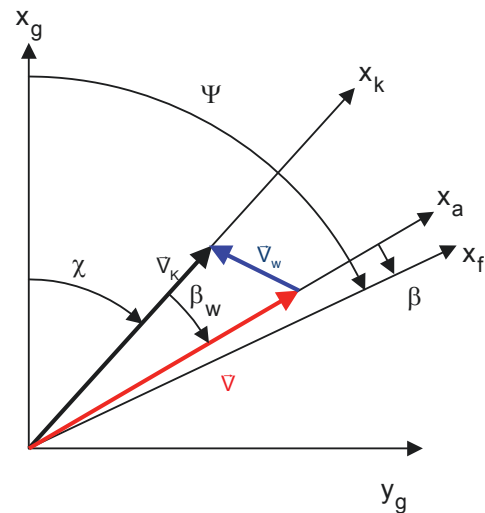


Bild 4. Winkelbezeichnungen und Koordinatensysteme in der Horizontalebene

Zur Berechnung des Windvektors \vec{V}_W muss der Fluggeschwindigkeitsvektor \vec{V} in das geodätische Koordinatensystem transformiert werden. Dazu wird der Vektor \vec{V} zunächst mit der Drehmatrix \underline{M}_{fa} in das flugzeugfeste Koordinatensystem transformiert. Diese Matrix ist nur abhängig von α und β . Mittels der Drehmatrix \underline{M}_{gf} erfolgt die Transformation ins geodätische System. Diese Transformation ist abhängig von den Eulerwinkeln Θ , Ψ und Φ

$$\vec{V}_W = \begin{bmatrix} u_K \\ v_K \\ w_K \end{bmatrix} - \underline{M}_{gf} \underline{M}_{fa} \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Somit können alle drei geodätischen Windgeschwindigkeitskomponenten gemessen werden. Die erreichte Genauigkeit beträgt für dieses System ca. 0.5 m/s für alle drei Komponenten [8].

3. WEA UND VERSUCHSSZENARIEN

3.1. Windenergieanlagen

Für die Flugversuche wurden die beiden solitär stehenden WEA des Windparks Cramme (Südostniedersachsen) ausgewählt. Der dort vertretene Anlagentyp Nordex N117-2400 kann als Vertreter einer modernen, repräsentativen WEA für Binnenlandstandorte angesehen werden [9]. Der

Rotordurchmesser beträgt 117 m, die Gesamtanlagenhöhe 199,5 m, Bild 5. Die Anlagen werden bei westlichen Winden (bei allen Flügen gegeben) über ein weitgehend ebenes, hindernisfreies Gelände (landwirtschaftliche Flächen) angeströmt. Hinter den Anlagen beginnt in etwa 5 Rotordurchmesser Abstand ein Waldgebiet.



Bild 5. WEA 1 im Windpark Cramme Typ Nordex N117-2400; Gesamthöhe 199,5 m, Rotordurchmesser 117 m

Die Leistungskurve, den Leistungsbeiwert C_p und den Schubbeiwert C_t der N117-2400 [10] zeigt Bild 6. Es wird deutlich, dass die Nennleistung der Anlage schon recht früh bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 11 m/s erreicht bzw. konstant geregelt wird. Eine solche Anlagenbauart ist typisch für Binnenlandstandorte und geht einher mit großen Rotordurchmessern und großen Bauhöhen.

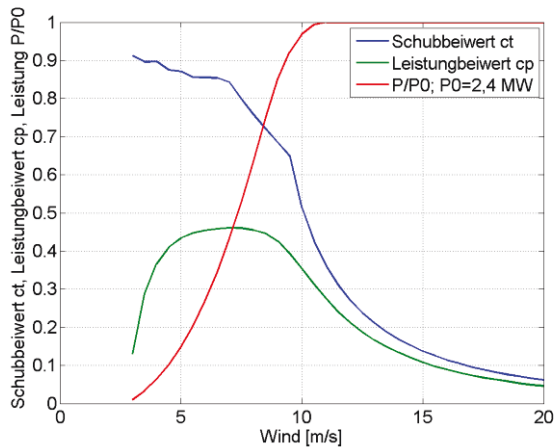


Bild 6. Leistungskurve, Leistungs- und Schubbeiwert Nordex N117-2400 (Nennleistung 2,4 MW) [10]

Der Leistungsbeiwert C_p beschreibt den aerodynamischen Wirkungsgrad einer WEA (auch Erntegrad genannt). Er kennzeichnet die Fähigkeit der Anlage die im Wind vorhandene kinetische Energie in Leistung umzusetzen. Der maximal mögliche aerodynamische Wirkungsgrad einer WEA (axial) liegt nach der Theorie von Betz [11] bei 59%. Der maximale Leistungsbeiwert der N117-2400 wird mit 46% angegeben [10], was dem Betz'schen Wert zu 78% entspricht.

Die Leistungsdichte einer WEA ist das Produkt aus der Windgeschwindigkeit und der kinetischen Energie der Anströmung, welche wiederum quadratisch von der Windgeschwindigkeit abhängt. Somit nimmt die Leistung einer WEA kubisch mit der Windgeschwindigkeit zu. Die Gesamtleistung P einer WEA berechnet sich somit mit der Rotorfläche A , der Luftdichte ρ , dem Leistungsbeiwert C_p und der Windgeschwindigkeit V_W zu

$$P = \frac{1}{2} A \rho c_p V_W^3.$$

Die Rückwirkung einer WEA auf die Strömung bzw. die Größe der Abschattung hinter der Anlage (wichtig auch bei Windparks) hängt u.a. vom Schubbeiwert C_t ab. Dieser Beiwert ist damit auch einer der maßgeblichen Parameter für die Beeinflussung eines in den Nachlauf einfliegenden Flugzeugs. Der Schubbeiwert ist die normierte Kraft, die durch die Luftströmung auf die Nabe der WEA wirkt. Zur Normierung wird dabei die Axialkraft des Windes verwendet. Die Schubbeiwerte sind bei kleinen Windgeschwindigkeiten am höchsten, was bedeutet, dass die *relative* Beeinflussung der Strömung dort am größten ist. Allerdings ist dann die in der Strömung enthaltene Energie noch klein. Da diese aber überproportional (kubisch) mit Zunahme der Windgeschwindigkeit steigt, ist die absolute Beeinflussung der Strömung hinter der WEA bei mittleren Windgeschwindigkeiten am höchsten.

Ein weiterer die Strömung hinter einer WEA beeinflussender Effekt sind die Blattspitzenwirbel, die an jedem Rotorblatt generiert werden und mit der Strömung in Form einer Helix abfließen (vergl. Bild 1). Der Blattspitzenwirbel entsteht – ähnlich wie die Wirbelschlepe hinter einem Flugzeug – durch den Druckausgleich zwischen Rotorblattvorderseite und –hinterseite. Dabei wird eine rotierende Strömung induziert. Ein Maß für die Stärke von Wirbeln ist die Zirkulation Γ . Diese kann nach [12] für Rotoren berechnet werden mit der Windgeschwindigkeit V_W , der Rotordrehzahl Ω , der Anzahl der Blätter n_B (hier 3) und dem Schubbeiwert C_t zu

$$\Gamma = \frac{\pi}{n_B} \frac{V_W^2}{\Omega} C_t.$$

Bild 7 zeigt die berechnete Abhängigkeit der Zirkulation von der Windgeschwindigkeit für die N117-2400 unter Annahme einer linearen Drehzahlkurve zwischen Aufschaltwindgeschwindigkeit (3 m/s) und Nennwindgeschwindigkeit (11 m/s). Das Maximum der Zirkulation liegt bei einer Windgeschwindigkeit von $V_W = 9,5$ m/s. Der Schubbeiwert ist dort $C_t = 0.65$. Bei höheren Windgeschwindigkeiten fällt dieser stark ab, und damit trotz steigender Windgeschwindigkeit auch die Blattspitzenzirkulation. Der Bereich für ausgeprägte Zirkulation liegt bei Windgeschwindigkeiten im Bereich von ca. 6 m/s < V_W < 12 m/s.

Eine Berechnung des Blattspitzenwirbels für einen Anlagentyp und die theoretische Auswirkung des Strömungsfeldes auf ein einfliegendes Flugzeug werden in [13] diskutiert.

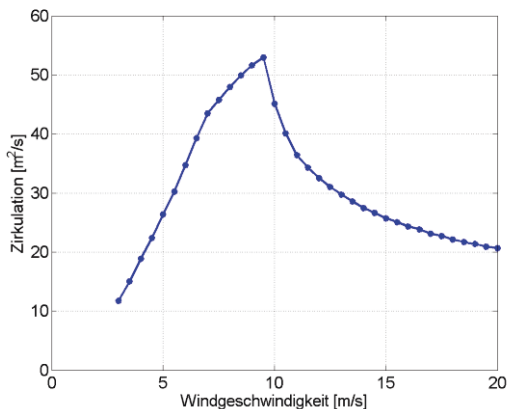


Bild 7. Berechnete Blattspitzenzirkulation der Nordex N117-2400

3.2. Flugversuche

Im Zeitraum von Dezember 2016 bis Mai 2017 konnten in 8 Messflügen über 330 Nachlaufdurchflüge durchgeführt werden, siehe Tabelle 1. Die Windgeschwindigkeit bei den Flügen lag dabei im Bereich von $V_w=3$ m/s (Aufschaltgeschwindigkeit WEA) bis zu maximal $V_w=16$ m/s (Nennleistung abgeregelt), siehe Bild 8. Die Qualität der Messdaten wurde mit Hilfe eines Kompatibilitätschecks [14] überprüft. Mit Ausnahme von Flug 5 stehen für alle Flüge hochwertige Messdaten zur Verfügung. Flug 5 wird nur für die subjektive Pilotenbewertung verwendet.

Bild 9 zeigt die Windgeschwindigkeiten aufgetragen über die geflogenen Abstände zu den WEA. Eine große Anzahl von Einflügen wurde bei Windgeschwindigkeiten von $V_w = 8 \dots 12$ m/s durchgeführt, exakt dort, wo die maximale Zirkulation der Blattspitzenwirbel und damit die größten Beschleunigungen am Flugzeug zu erwarten sind. Ferner ist bei diesen Windgeschwindigkeiten das höchste Winddefizit im Nachlauf vorhanden.

Flug #	Tag	Anzahl Durchflüge		Wind Messung WEA-Gondel	
		WEA 1 (N)	WEA 2 (S)	Stärke [m/s]	Richtung
1	8.12	7	7	12-13	SW
2	12.1	18	18	12-13	WSW
3	14.3	15	15	8-10	W
4	15.3	19	19	8-10	NW
(5)	10.4	7	31	10-11	NW
6	11.4	18	18	7-10	WNW
7	21.4	24	24	7-10	W
7-R	21.4	24	24	7-10	W
8	30.5	24	24	3-8	SW...NW

Tabelle 1. Übersicht der Nachlaufdurchflüge mit der Remos GX im Windpark Cramme 2016/2017

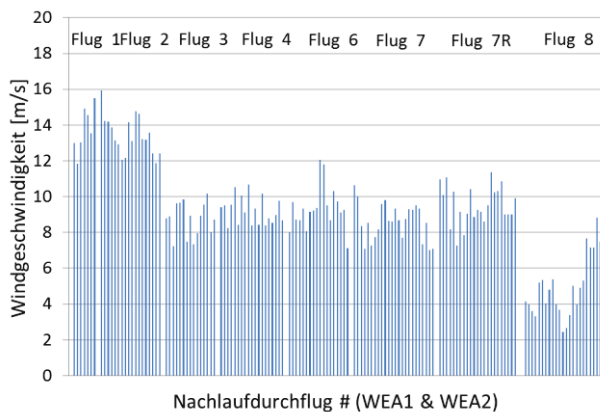


Bild 8. Gemessene Windgeschwindigkeiten jeweils kurz vor den Nachlaufdurchflügen

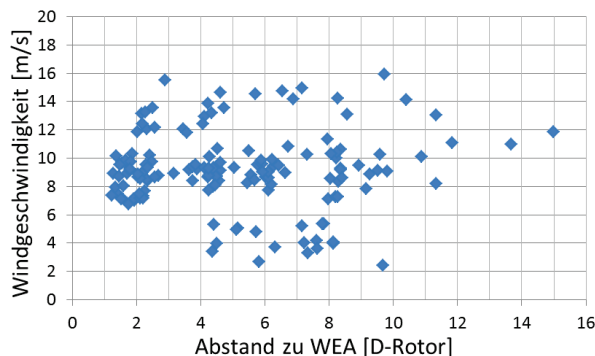


Bild 9. Gemessene Windgeschwindigkeiten jeweils kurz vor den Nachlaufdurchflügen über dem geflogenen Abstand zu den WEA

Die Versuche wurden als transversale Nachlaufdurchflüge gestaltet, hauptsächlich orthogonal zur Windrichtung (100% Seitenwindkomponente), aber auch bei bis zu ca. 45° Komponente aus Rücken-/Gegenwind (Schrägdurchflüge). Die Nachläufe wurden in bis zu sechs verschiedenen Höhen durchflogen, variiert zwischen ca. 30 m unter Gondelhöhe und ca. 20 m oberhalb der oberen Blattspitzenhöhe. Die Abstände hinter den Anlagen betragen zwischen minimal 1,5 und maximal 15 Rotordurchmessern. Die meistgeflogenen und vorgegebenen Abstände waren das 8-, 6-, 4- und 2-fache des Rotordurchmessers.

Vor jedem Einflug in den WEA-Nachlauf wurde ein stabiler, horizontaler und schiebefreier Flugzustand mit einem der Seitenwindkomponente entsprechendem Vorhaltewinkel (Bild 10) ausgetrimmt. Die Fluggeschwindigkeit CAS lag dabei im unteren Bereich der Enveloppe, plus einer je nach Windgeschwindigkeit und Turbulenz gewählten Fahrtreserve, typischerweise im Bereich $CAS \approx 70 \dots 80$ kt. Bei 330 Nachlaufdurchflügen liegt die theoretisch mögliche Anzahl der Blattspitzenwirbeldurchflüge bei ca. 660 (Bild 10). Die tatsächliche Anzahl ist geringer, da ein Durchflug auch zwischen den Wirbeln möglich ist, abhängig von der Ganghöhe der Helix. Diese ist wiederum abhängig von der Windgeschwindigkeit und der Rotordrehzahl der WEA. Während der Durchflüge wurden durch Steuereingaben die Höhe konstant und der Rollwinkel um Null gehalten, allerdings möglichst ohne Verwendung des Seitenruders. Einen typischen Cockpitblick bei einem Abstand zu den WEA von sechs Rotordurchmessern zeigt Bild 11.

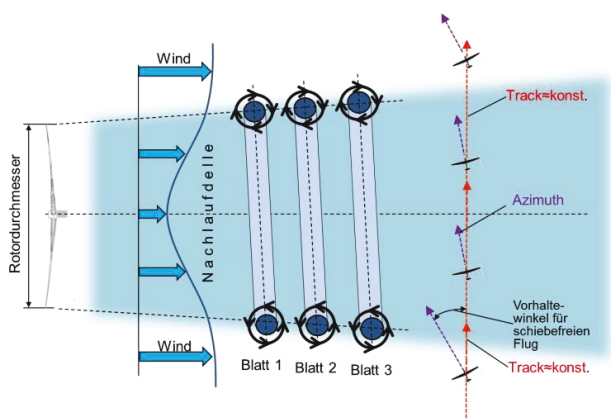


Bild 10. Prinzipskizze eines typischen transversalen Nachlaufdurchflugs ohne Seitenruderkorrektur



Bild 11. Cockpitblick bei einem Fly-By im Abstand von ca. 6 Rotordurchmessern leeseitig zu den WEA; Strömungssensorik (Windmessstationen) sichtbar am linken Außenflügel

Den Groundtrack der Remos von einem typischen Versuchsflug zeigt Bild 12. Eingezeichnet sind dabei die Positionen beider Windräder und die gemessenen, gemittelten Windrichtungen kurz vor jedem Nachlaufdurchflug. Geflogen wurde in jeweils sechs verschiedenen Höhen in Abständen zu den WEA von dem 8-, 6-, 4- und 2-fachem des Rotordurchmessers in Süd-Nord-Richtung (24 Fly-Bys, 48 Nachlaufdurchflüge). Hinzu kommen Messungen im Nachlauf während der Rückflüge.

Die Betriebsdaten der WEA für Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Leistung und Drehzahl wurden ergänzend vom Betreiber der Anlagen als gemittelte 10-min-Werte in Form von Minimal-, Maximal- und Mittelwert zur Verfügung gestellt. Bild 13 zeigt ein Beispiel für ein 4-Stunden-Messintervall, in dessen Mitte der Flugversuch stattgefunden hat. Die mittleren Windgeschwindigkeiten, gemessen an der Gondel, passen gut mit dem ermittelten Wind aus den Messungen der Remos überein.

Deutlich werden allerdings auch teilweise recht hohe Leistungsschwankungen der WEA innerhalb des Zeitraums eines Flugversuchs und auch innerhalb eines 10-min-Intervalls. Dies kann eine Erklärung sein für die teilweise recht unterschiedlich starken Flugzeugreaktionen bei aufeinanderfolgenden Durchflügen mit ansonsten gleichen Randbedingungen.

4. AUSWERTUNG FLUGVERSUCHE

Die Nachlaufdurchflüge werden statistisch im Hinblick auf gemessene Minimal-/Maximalwerte ausgewertet. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die an Bord gemessenen Beschleunigungen und Anströmwinkel gelegt, ferner auf den gemessenen Windvektor. Bei der Messfrequenz von 100 Hz liegen die Winddaten bei der typischen Flugeschwindigkeit von CAS=80 kt in einer räumlichen Auflösung von ca. 40 cm in Flugrichtung vor.

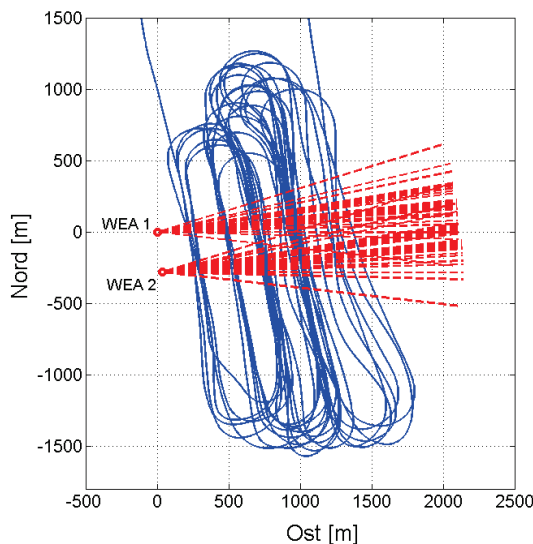


Bild 12. Remos Groundtrack (—) vom Versuchsflug am 21.4.2017 mit Standort WEA1 (nördlich) und WEA2 (südlich) und den Windrichtungen ermittelt aus den flugzeugseitigen Messungen vor jedem Nachlaufdurchflug (- - -)

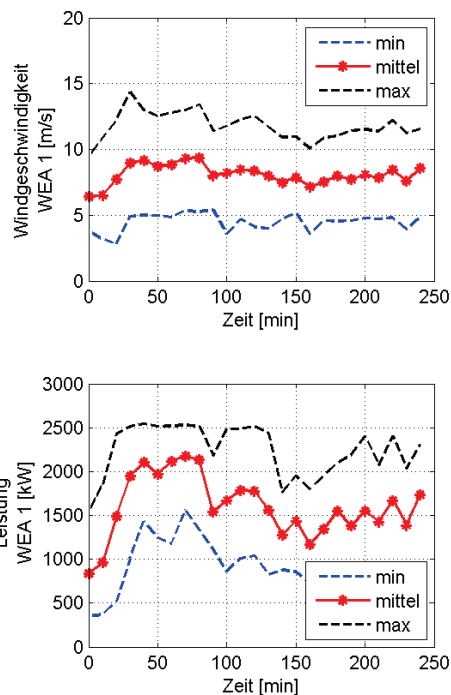


Bild 13. Betreiberdaten von Windgeschwindigkeit (Gondelmessung) und Leistung für ein 4-Stunden-Messintervall (10-min-Werte) von WEA 1

4.1. Winddefizit und Nachlaufdelle

Den Vergleich von drei Windprofilen hinter den beiden WEA in Gondelhöhe bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten zeigt Bild 14. Die hohe Effizienz der Anlagen wird bei kleinen und mittleren Windgeschwindigkeiten sichtbar: die Strömung wird auf unter 2 m/s verzögert. Für die mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 9...10 m/s bedeutet dies eine Reduktion der Windgeschwindigkeit bei kleinen Abständen hinter den Anlagen in der Spitze von über 80 %. Bei der höheren Windgeschwindigkeit (ca. 12-13 m/s, WEA abgeregelt) wird eine Reduzierung um bis zu ca. 6 m/s gemessen (ca. 50%). Ferner ist hier eine recht hohe Turbulenz sichtbar, was u.a. zur Folge hat, dass die Nachlaufdelle bei größeren Anlagenabständen schneller ihre Signifikanz verliert. Dies ist ebenso gültig für den Blattspitzenwirbel, dessen strukturierte Form sich schneller auflöst und dann mit der allgemeinen Turbulenz vermischt als bei mittleren Windgeschwindigkeiten.

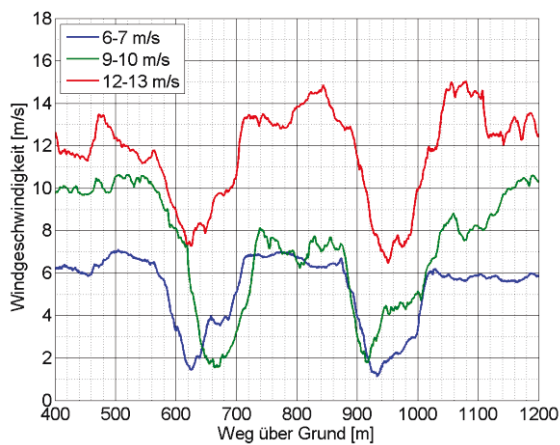


Bild 14. Exemplarischer Vergleich von Windprofilen hinter den beiden WEA bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten; ermittelt aus horizontalen Vorbeiflügen in Gondelhöhe in ca. 2 Rotordurchmessern Abstand hinter den Anlagen

Bild 15 und Bild 16 zeigen das ermittelte Winddefizit hinter den WEA, (a) als Funktion des Abstands und (b) als Funktion der Windgeschwindigkeit. Folgende Aussagen lassen sich ableiten:

- Aus 300 Nachlaufdurchflügen wird ein maximales Winddefizit hinter den Anlagen von ca. $\Delta V_w = 9$ m/s ermittelt.
- Die höchsten Winddefizite werden bei den Flügen mit dem kleinsten Abstand zum Rotor gemessen. Mit zunehmendem Abstand werden die Winddefizite kleiner. In 5 Rotordurchmessern Abstand wird maximal ein Defizit von $\Delta V_w = 7$ m/s gemessen.
- Ein Maximum an Winddefizit bildet sich aus bei $V_w = 8...11$ m/s, hier arbeiteten die Anlagen mit höchster Effizienz (auch die Blattspitzenzirkulation ist hier am höchsten, Bild 7). Bei stärkerem Wind ist die Nachlaufdelle nicht stärker ausgeprägt, sondern hat in Tendenz kleinere Winddefizite. Beachtet werden sollte dabei, dass die Werte bei stärkerem Wind durch die dann auch vorhandene höhere Turbulenz anteilig höher beeinflusst sind.

Allgemein kann festgestellt werden, dass bei mittleren

Windgeschwindigkeiten von ca. 6...11 m/s die signifikanteste Beeinflussung der Strömung gemessen wird. Dies gilt sowohl für die Nachlaufdelle, als auch für den Blattspitzenwirbel. Grund hierfür sind die hohe Effizienz der Anlage bis ca. $V_w = 11$ m/s (ab dann wird die Leistung der Anlage konstant geregelt) in Kombination mit der noch mäßigen Turbulenz je nach Wetter- und Bodenbedingungen. Bei $V_w = 5...6$ m/s ist die Beeinflussung des Nachlaufs - obwohl die Anlage auch hier mit hoher Effizienz arbeitet - absolut gesehen sowohl bzgl. Winddefizit als auch Blattspitzenwirbel eher moderat. Für ein $V_w < 4$ m/s ist die Beeinflussung des Nachlaufs - auch direkt hinter der Anlage - als sehr gering zu bewerten.

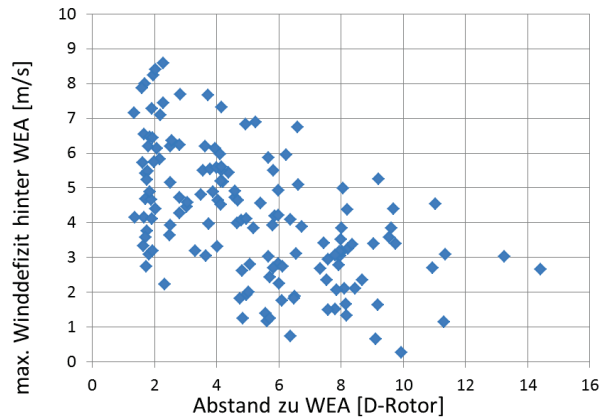


Bild 15. Winddefizit gemessen (max.) als Funktion des geflogenen Abstands zu den Anlagen

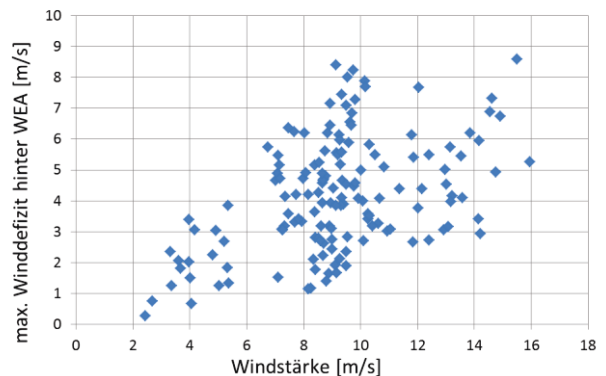


Bild 16. Winddefizit gemessen (max.) hinter den Anlagen als Funktion der Windgeschwindigkeit

4.2. Flugmechanische Betrachtungen

Bild 17, Bild 18 und Bild 19 zeigen die Verläufe wichtiger flugmechanischer Messgrößen für typische transversale Nachlaufdurchflüge bei drei unterschiedlichen WEA-Betriebspunkten: (a) Windgeschwindigkeit ca. 6-7 m/s, WEA-Leistung ca. 1 MW; (b) Windgeschwindigkeit ca. 9-10 m/s, WEA-Leistung ca. 2 MW, und (c) Windgeschwindigkeit ca. 12-13 m/s, WEA-Leistung ca. 2,5 MW (abgeregelt).

In allen Fällen fällt ein hoher Vorhaltewinkel für schiebefreien Flug (Differenz zwischen Track und Azimuth) von bis zu ca. 18° vor dem eigentlichen Nachlaufeinflug auf.

Im Bereich des Nachlaufs ist dann typischerweise eine erhebliche Änderung des Gierwinkels (Azimuth) erkennbar, je nach Wind bis ca. 10°. Die Drehbewegung erfolgt dabei beim Nachlaufeinflug vom Windrad weg, beim Ausflug umgekehrt. Da der Track wenig beeinflusst wird, ändert sich der Vorhaltewinkel sinngemäß aufgrund des verringerten Seitenwinds, diese Reaktion erfolgt durch die Gierstabilität des Flugzeugs weitgehend selbsttätig, ohne dass der Pilot das Seitenruder betätigt.

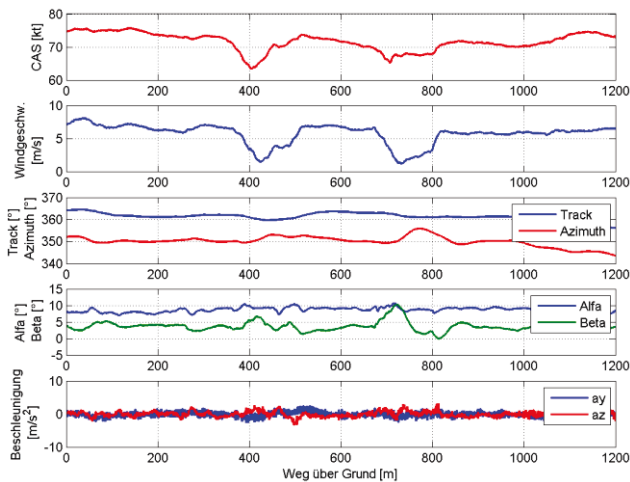


Bild 17. Flug- und Windgeschwindigkeit, Track, Azimuth, Anstell- und Schiebewinkel und Beschleunigungen gemessen bei einem transversalen Vorbeiflug in Gondelhöhe in 2,6 (WEA 1) bzw. 2,1 (WEA 2) Rotordurchmesser Abstand hinter den Anlagen; Windgeschwindigkeit ca. 6-7 m/s

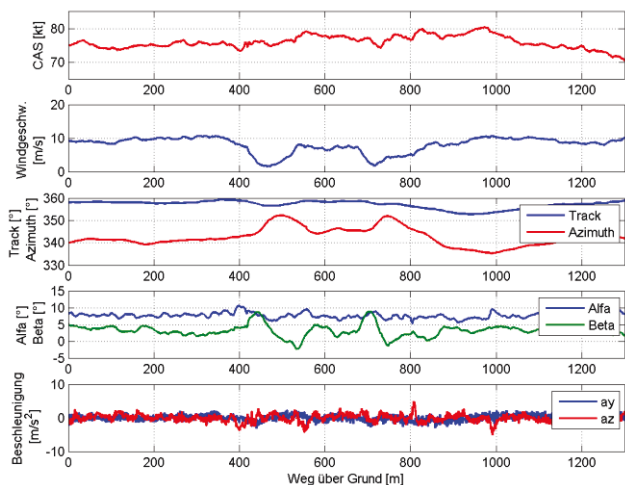


Bild 18. Flug- und Windgeschwindigkeit, Track, Azimuth, Anstell- und Schiebewinkel und Beschleunigungen gemessen bei einem transversalen Vorbeiflug in Gondelhöhe in 1,5 (WEA 1) bzw. 1,7 (WEA 2) Rotordurchmesser Abstand hinter den Anlagen; Windgeschwindigkeit ca. 9-10 m/s

Zu Beginn der Gierbewegung im Nachlauf sind i. Allg. höhere Schiebewinkel (Beta) zu beobachten, sowohl beim Einflug als auch Ausflug. Dieser Effekt ist besonders deutlich in Fall (b) (Bild 18, Windgeschwindigkeit ca. 9-10 m/s); hier entstehen durch den Nachlauf bis zu $\Delta\beta = \pm 6^\circ$ bei Ein- bzw. Ausflug. Ist das Flugzeug nicht schiefbefreitrimmt, werden hier als Summe auch Schiebewinkel von etwas über 10° gemessen. Im Fall von stärkerem

Wind (Fall (c), Bild 19) dagegen ist diese Systematik weniger deutlich sichtbar. Ursachen hierfür sind eine erhöhte Fluggeschwindigkeit, damit sind bei gleicher Querwindkomponente die Schiebewinkel kleiner, und die vorhandene Turbulenz bei starkem Wind verursacht Schiebewinkel in ähnlicher Größenordnung.

Bei dem Vorbeiflug von Fall (a), Bild 17, ist im Bereich des Nachlaufs eine Reduzierung der Fluggeschwindigkeit (ca. 9...10 kt) vorhanden. In dem hier gezeigten Fall war der Durchflug nicht orthogonal zur Windrichtung, sondern hatte eine deutliche Gegenwindkomponente (Schrägdurchflug). Bei solchen Szenarien, die dicht hinter einer WEA eher nicht praxisrelevant sind, wäre eine entsprechende Fahrtreserve anzuraten, um ausreichend Abstand zur Überziehggeschwindigkeit zu halten.

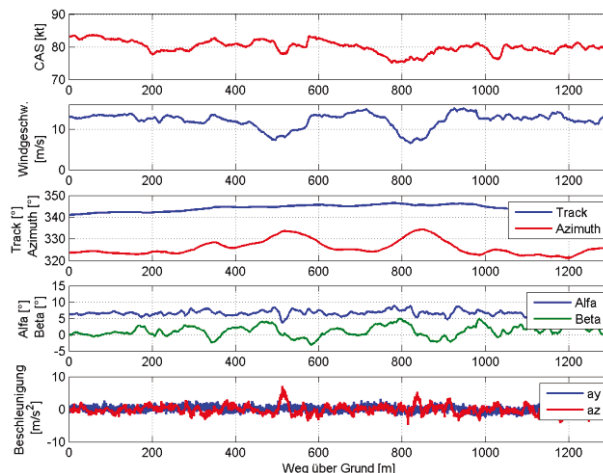


Bild 19. Flug- und Windgeschwindigkeit, Track, Azimuth, Anstell- und Schiebewinkel und Beschleunigungen gemessen bei einem transversalen Vorbeiflug in Gondelhöhe in 1,6 (WEA 1) bzw. 1,9 (WEA 2) Rotordurchmesser Abstand hinter den Anlagen; Windgeschwindigkeit ca. 12-13 m/s

Im Bereich des Nachlaufs sind erhöhte Linearbeschleunigungen sowohl in lateraler als auch besonders in vertikaler Richtung zu beobachten. In den Fällen mit niedriger (a) und mittlerer Windgeschwindigkeit (b) treten diese i. Allg. im Randbereich des Nachlaufs (Einflug und Ausflug) auf, was einen Effekt von den Blattspitzenwirbeln vermuten lässt. Diese Beschleunigungen treten in allen Fällen als kurzzeitige Spitzen auf, auch ist die Magnitude in den gezeigten Fällen mit $\Delta a_z \approx \pm 3 \text{ m/s}^2$ bzw. $\Delta a_z \approx \pm 5 \text{ m/s}^2$ eher klein und nicht über dem Turbulenzlevel. Im Fall der hohen Windgeschwindigkeit (Bild 19) treten die maximalen Beschleunigungen nahe der Mitte der Nachlaufdelle und damit der Gondelposition auf. Der Randbereich zeigt sich hier unauffällig. Es ist zu vermuten, dass sich bei erhöhter Turbulenz die Blattspitzenwirbel schneller auflösen. Die gemessenen Beschleunigungen liegen hier in etwa bei maximal $\Delta a_z \approx 7 \text{ m/s}^2$ und damit nicht signifikant über dem vorhandenen Turbulenzlevel.

4.3. Beschleunigungen

Bild 20 bis Bild 23 zeigen die gemessenen Maximalbeschleunigungen aller Fly-Bys in flugzeugfester vertikaler und lateraler Richtung. Jeder Fly-By beinhaltet neben den

eigentlichen Nachlaufdurchflügen von WEA 1 und WEA 2 den stabilisierten Anflug, den Flug zwischen den beiden Nachläufen und den Abflug (Gesamtintervall 40 s), vergl. Bild 17 bis Bild 19. Dargestellt sind die Maximalwerte jeweils als Funktion der Windgeschwindigkeit und als Funktion des Abstands zu den WEA.

Es lässt sich feststellen, dass die maximal gemessenen Beschleunigungen eine Zunahme mit ansteigender Windgeschwindigkeit aufweisen, ferner eine Abnahme mit zunehmender Entfernung zum Rotor. In dem Bereich der größten Blattspitzenzirkulation (Windgeschwindigkeit ca. 8-10 m/s) werden die höchsten Beschleunigungswerte gemessen, vertikal bis zu einem Lastvielfachen von $n_z=2\text{ g}$ ($\Delta a_z=-10\text{ m/s}^2$) bzw. $n_z=0,2\text{ g}$ ($\Delta a_z=+8\text{ m/s}^2$), lateral im Bereich von $n_y=\pm 0,6\text{ g}$. Die höchsten Beschleunigungen treten i. Allg. sehr kurzzeitig im Randbereich des Nachlaufs auf, was auf die Blattspitzenwirbel als Ursache hindeutet. Bei Windgeschwindigkeiten über 11 m/s (WEA bei Nennleistung) werden keine höheren Beschleunigungswerte gemessen. Auch unterscheiden sich diese dann wenig von der Umgebungsturbulenz (die bei größerer Windgeschwindigkeit i. Allg. höher ist) und sind weniger signifikant dem Nachlauf zuzuordnen. So lässt sich z. B. der größte gemessene Wert aller Nachlaufdurchflüge in Bild 20 mit einem $n_z=2,05$ ($\Delta a_z=-10,5\text{ m/s}^2$) klar der allgemeinen Turbulenz im Anflug zuordnen und nicht dem WEA-Nachlauf selbst (Windgeschwindigkeit dabei ca. 13 m/s).

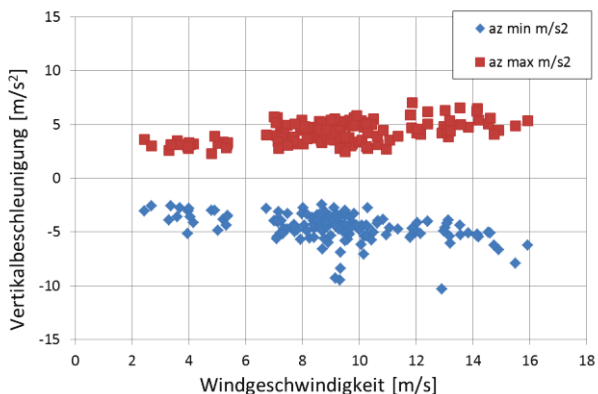


Bild 20. Maximale Vertikalbeschleunigungen bei den WEA1- und WEA2-Nachlaufdurchflügen als Funktion der Windgeschwindigkeit

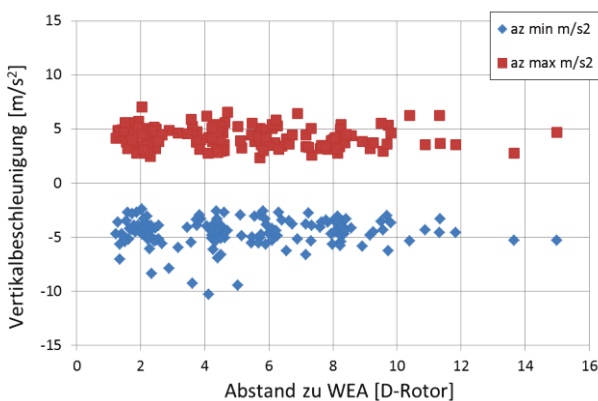


Bild 21. Maximale Vertikalbeschleunigungen bei den WEA1- und WEA2-Nachlaufdurchflügen als Funktion des Abstands zu den WEA

Insgesamt werden innerhalb aller Nachlaufdurchflüge keine Beschleunigungen gemessen, die das Flugzeug überlasten. Dies gilt auch für geringe Abstände hinter den Rotoren unter fünf Rotordurchmessern bis hin zu den hier minimal geflogenen 1,5 Rotordurchmessern. Merkbar, aber keineswegs gefährlich können kurzzeitige Beschleunigungen im Randbereich des Nachlaufs sein. Dieser Effekt ist bei mittleren Windgeschwindigkeiten (7...10 m/s) und möglichen laminaren Windverhältnissen am stärksten ausgeprägt.

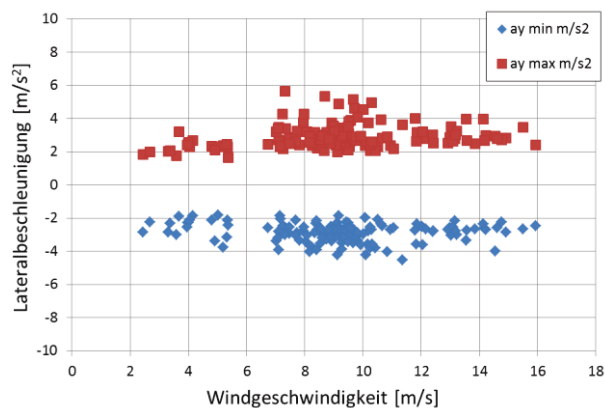


Bild 22. Maximale Lateralbeschleunigungen bei den WEA1- und WEA2-Nachlaufdurchflügen als Funktion der Windgeschwindigkeit

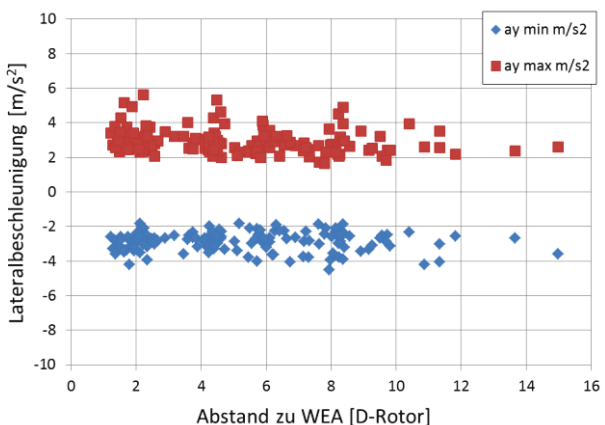


Bild 23. Maximale Lateralbeschleunigungen bei den WEA1- und WEA2-Nachlaufdurchflügen als Funktion des Abstands zu den WEA

4.4. Anströmwinkel

Bei den gemessenen Anströmwinkeln fallen besonders die hohen Schiebewinkel hinter den Anlagen auf (Bild 25), am deutlichsten bei mittleren Windgeschwindigkeiten (ca. 7...10 m/s). Dies korreliert mit der Effizienz der Energieentnahme aus der anströmenden Luft bei hohen WEA-Wirkungsgraden, vergl. Bild 14. Der maximal gemessene Schiebewinkel liegt bei $\beta=13,3^\circ$. Unter Berücksichtigung des nicht schiefbefreien Fluges vor dem Einflug (gemittelt bis zu $\beta\approx 4...5^\circ$) werden durch den Nachlauf verursachte maximale Zusatzschiebewinkel von $\Delta\beta\approx\pm 8...9^\circ$ ermittelt. Diese treten allerdings nur kurzzeitig bei Nachlaufeinflug bzw. -ausflug auf und sind flugdynamisch akzeptabel.

Die maximal gemessenen Anstellwinkel während der

Nachlaufdurchflüge liegen bei $12,5^\circ$. Solche Werte können in den meisten Fällen dem Randbereich des Nachlaufs zugeordnet werden.

Bei nicht zur Windrichtung orthogonalen Durchflügen (Schrägdurchflügen) wurde in einigen Fällen eine Fahrtreduzierung des Flugzeugs gemessen. Der Betrag der hier ermittelten Werte liegt maximal bei einer Geschwindigkeitsverringderung von bis zu $\Delta CAS \approx 9 \dots 10$ kt.

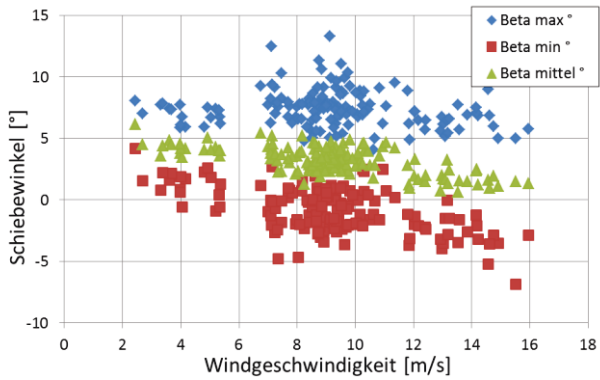


Bild 24. Gemessene Minimal-/Maximalschiebewinkel innerhalb der WEA1- und WEA2-Nachlaufdurchflüge, als Funktion der Windgeschwindigkeit

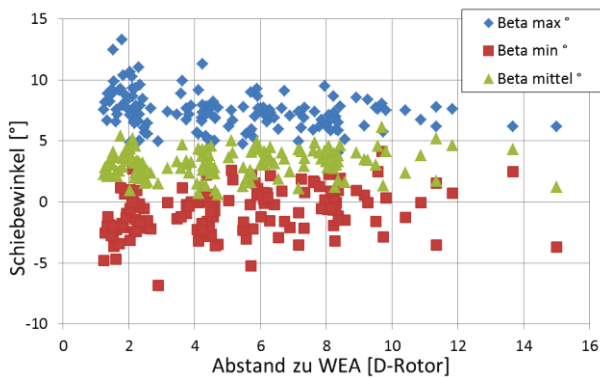


Bild 25. Gemessene Minimal-/Maximalschiebewinkel innerhalb der WEA1- und WEA2-Nachlaufdurchflüge, als Funktion des Abstands zu den WEA

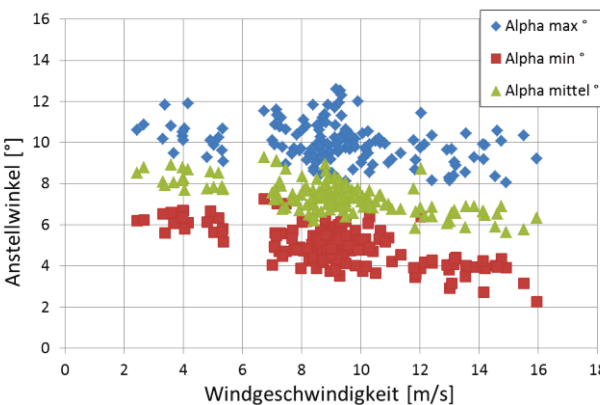


Bild 26. Gemessene Minimal-/Maximalanstellwinkel innerhalb der WEA1- und WEA2-Nachlaufdurchflüge, als Funktion der Windgeschwindigkeit

5. PILOTENBEWERTUNG

Die in den Flugversuchen gewählte Flughöhe von unter 500 ft ist für VFR-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.

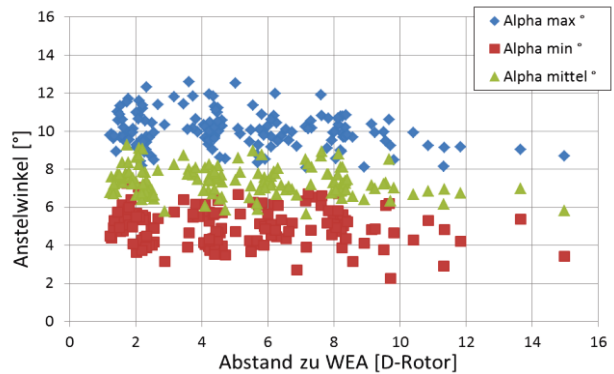


Bild 27. Gemessene Minimal-/Maximalanstellwinkel innerhalb der WEA1- und WEA2-Nachlaufdurchflüge, als Funktion des Abstands zu den WEA

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 Azimuthänderung bei Ein- und Ausflug deutlich sichtbar. Teilweise war auch eine kleine Querbeschleunigung (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 Vorhaltewinkel 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 Überziehggeschwindigkeit 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.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Auswertung der Messdaten von über 330 Einfügen in den Nachlauf von Windenergieanlagen des Typs Nordex N117-2400 mit einer Remos GX (Abflugmasse 600 kg, LSA-Klasse) hat keine Hinweise auf eine außergewöhnliche Belastung des Flugzeugs oder auf abnormale Flugzustände ergeben. Auch waren bei den Versuchen keine außergewöhnlichen Steuereingaben des Piloten notwendig, um den Nachlauf in verschiedenen Flughöhen bei unterschiedlichen Szenarien zu durchfliegen. Dies gilt für die hier geflogenen Abstände hinter den Rotoren von weniger als 2 bis maximal 15 Rotordurchmessern. Die Versuche deckten dabei die gesamte typische Bandbreite von Anlagenbetriebspunkten ab, mit Windgeschwindigkeiten zwischen 3 m/s (Aufschaltgeschwindigkeit der WEA) und maximal ca. 16 m/s (WEA bei Nennleistung).

Den größten Einfluss auf das Flugzeug hatte der WEA-Nachlauf bei Windgeschwindigkeiten zwischen 7 und 10 m/s. Dies ist der Bereich vor Erreichen der Anlagennennleistung (bei der N117-2400), die Anlage arbeitet dort mit hohem Wirkungsgrad und die Zirkulation der Blattspitzenwirbel ist am stärksten ausgeprägt. Dabei wurden besonders im Randbereich des Nachlaufs kurzzeitig Vertikalbeschleunigungen bis zu $+10 \text{ m/s}^2$ gemessen. Ähnliche Werte wurden allerdings ab mittleren Windgeschwindigkeiten auch außerhalb des Nachlaufs gemessen, bedingt durch die allgemeine Turbulenz der Luft besonders in Bodennähe. So wurden von dem Piloten die Nachlaufturbulenzen bei höheren Windgeschwindigkeiten (ab ca. 10...11 m/s - Anlage gibt maximale Leistung ab) fast nicht als solche wahrgenommen - auch bei einem geringen Abstand von nur 2 Rotordurchmessern hinter der Anlage.

Ferner wurde eine Windreduktion hinter den Rotoren (Nachlaufdelle) bis zu maximal 9 m/s gemessen. Dieses Winddefizit ist i. Allg. am stärksten ausgeprägt kurz vor Erreichen der Nennleistung (hier bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 10 m/s). Dies Defizit bedingt bei einem transversalen Nachlaufdurchflug mit vorher ausgetrimmtem Vorhaltewinkel besonders im Randbereich zusätzliche Schiebewinkel von bis zu 9° , die sich aufgrund der Stabilität selbstständig wieder abbauen. Als Folge ergibt sich i. Allg. eine selbstständige Gierbewegung (Azimuthänderung) des Flugzeugs. Für die hier geflogenen typischen 70-80 kt Fluggeschwindigkeit gegenüber der Luft wurden Azimuthänderungen von maximal 10° gemessen. Beim Nachlaufeinflug dreht das Flugzeug selbstständig die Nase vom Rotor weg, beim Ausflug zurück in die ursprüngliche Richtung. Es sei angemerkt,

dass die Höhe der im Nachlauf auftretenden Schiebewinkel auch außerhalb des Nachlaufs bei mittlerer Turbulenz gemessen wurde. Der Kurs des Flugzeugs über Grund (Track) wurde während der transversalen Durchflüge eher wenig beeinflusst.

Besondere Aufmerksamkeit des Piloten erforderten allerdings Nachlaufdurchflüge, die deutlich von einem quasiparallelen Flug zur Rotorebene abwichen. Hier können durch den Anströmverlust bei geringer Eigengeschwindigkeit kurzzeitig Anstellwinkel bis in die Nähe der Stallgrenze auftreten. Dies gilt allerdings nur für solche Schrägdurchflüge, die dicht hinter der Anlage stattfinden, und wo die Nachlaufdelle sehr deutlich ausgeprägt ist. Eine erhöhte Fahrreserve ist in solchen Fällen angeraten, dies gilt allerdings grundsätzlich immer bei Flügen in Bodennähe ab mittleren Windgeschwindigkeiten oder ausgeprägtem Seitenwind.

Als Ausblick verbleiben im Wesentlichen folgende Punkte, die Beachtung und auch weitere Flugversuche erfordern:

- (a) **Spezielle Einflogszszenarien.** Hier ist an einen kernzentralen Einflug in den Blattspitzenwirbel gedacht, wie er theoretisch beim rotorparallelen Nachlaufdurchflug im oberen und unteren Randbereich des Nachlaufs vorstellbar ist. Hier sind bei sehr grossen Anlagen - wenn auch in einem recht kleinen Bereich - theoretisch hohe Rollbeschleunigungen möglich. Solche sehr lokalen Effekte sind allerdings im Flugversuch nur durch eine Wirbelsichtbarmachung (z.B. mit Rauch) zu erfliegen. Eine Erkenntnis aus den hier ausgewerteten Versuchen (ohne Wirbelsichtbarmachung) ist allerdings auch, dass bei den über 330 Nachlaufdurchflügen (=660 Durchflüge im Bereich der Blattspitzenwirbel) kein Fall von stark ausgeprägter Rollbeschleunigung oder größeren Rollwinkeln aufgetreten ist.
- (b) **WEA-Anlagentyp und -größe.** Die hier gewonnenen Erkenntnisse sollten auch für andere Anlagentypen in der Klasse bis ca. 120 m Rotordurchmesser Gültigkeit haben. Das gilt auch für Anlagen, die erst bei höheren Windgeschwindigkeiten abgeregelt werden (und dann 3 bis 3,5 MW leisten bei gleichem Rotordurchmesser). Allerdings werden für noch größere Anlagen mit bis zu 5 und 7 MW Leistung und Rotoren mit Durchmessern von 130 m und mehr weitere Flugversuche empfohlen. Hier wäre dann der Blattspitzenwirbel auch bei kleinen und mittleren Windgeschwindigkeiten deutlich ausgeprägter. Solche Flugversuche sollten dann idealerweise in Kombination mit der schon unter (a) erwähnten Wirbelsichtbarmachung durchgeführt werden.

7. DANKSAGUNG

Der Fa. Landwind GmbH, Gevensleben, wird gedankt für die sehr kooperative Zusammenarbeit und die Bereitstellung der Anlagenbetriebsdaten für die Zeiträume der Flugversuche.

8. LITERATUR

- [1] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017), Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/
- [2] Mulinazzi, T., Zheng, Z., Wind Farm Turbulence Impacts on General Aviation Airports in Kansas, University of Kansas, Report No. K-TRAN: KU-13-6 ▪ FINAL REPORT ▪ January 2014
- [3] Wang, Y., et al. Wind Turbine Wake Encounter Study, University of Liverpool, 2015
- [4] Schmidt, J., Daniele, E., Stoevesandt, B., Böenbelastung von UL-Flugzeugen durch den turbulenten Nachlauf von Windenergieanlagen, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Projektbericht 14-511-053 Okt. 2014
- [5] Schimmels, H., "Untersuchung zum Nachlaufeinfluss von Windenergieanlagen auf Segelflugzeuge, Diplomarbeit, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014
- [6] Janser, F., et al. Windenergieanlagen in Flugplatznähe, Gutachten zur Feststellung notwendiger Mindestabstände von Windenergieanlagen zu Flugbetriebsräumen an Flugplätzen der Allgemeinen Luftfahrt unter Berücksichtigung sämtlicher Luftfahrzeugklassen, insbesondere auch der im Luftsport verwendeten, Gutachterliche Stellungnahme, Fachbereich 6 Luft- und Raumfahrttechnik FH Aachen, Dez. 2015
- [7] Carrion, M. et al: CFD Analysis of the Wake of the MEXICO Wind Turbine, Journal of Physics: Conference Series, Volume 555, 2014
- [8] Cremer, M. Genauigkeitsanforderungen an Sensorik zur Windmessung an Bord eines Flugzeugs, Vortrag DGLR 2004-016, Dresden, 21. Sep. 2004
- [9] Nordex, Produktbeschreibung Windenergieanlage N117/2400, <http://www.nordex-online.com/de/>
- [10] Leistungskurven von modernen Binnenland-Windenergieanlagen, <http://www.windenergie-im-binnenland.de/powercurve.php>
- [11] Betz, A., Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, Heft 26, 1920
- [12] Leishman, J.G., Principles of Helicopter Aerodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, UK, 2000
- [13] Fischenberg, D., van der Wall, B. G., Gefährdungsbeurteilungen für Sport- und Segelflugzeuge im Nachlauf von großen Windkraftanlagen, Vortrag auf dem 39. Symposium für Segelflugzeugentwicklung, 19./20.11.2015, Darmstadt
- [14] Jategaonkar, J. V., Flight Vehicle System Identification: A Time Domain Methodology, Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 216, Published by AIAA 2006