

Modellanalyse liefert Hinweise auf Verluste von Fluginsekten in Windparks

Franz Trieb, Thomas Gerz und Matthias Geiger

Lange Zeit dachte man, Windparks und Insekten würden sich nicht in die Quere kommen. Wie eine umfassende Literaturrecherche belegt, besteht jedoch ein potenzieller Konflikt zwischen Fluginsekten und Windparks: Fluginsekten nutzen zur Migration nämlich starken Wind in bis zu 2.000 m Höhe. Die Analyse der Windenergie seit 1990 und der daraus ableitbaren Volumen- und Massenströme zeigt trotz bestehender Unsicherheiten eine Entwicklung, die besorgniserregend ist.

Die aktuelle Diskussion über einen Rückgang der Fluginsekten [1] sowie Berichte über Effizienzverluste von Windkraftanlagen aufgrund von Verschmutzungen der Rotorblätter mit Überresten von Fluginsekten legen eine Überprüfung beider Phänomene bezüglich eines möglichen Zusammenhangs nahe [2]. Dabei zeigt sich, dass ausgewachsene, flugfähige Insekten kurz vor der Eiablage in großen Schwärmen hohe, schnelle Luftströmungen aufsuchen, um sich vom Wind zu entfernten Brutplätzen tragen zu lassen. Die Jahrmillionen alten Pfade, die sie dabei nutzen, werden seit etwa 30 Jahren zunehmend von den Rotoren großer Windkraftanlagen gesäumt, deren Rotorblätter mit Blattspitzengeschwindigkeiten von mehreren hundert Stundenkilometern die Luft durchschneiden. Eine Modellanalyse beziffert die heute in Deutschland potenziell gefährdeten Insektenmengen mit etwa 24.000 t pro Jahr, und die beim Durchqueren der Rotoren entstehenden Verluste mit mindestens 1.200 t pro Jahr bzw. etwa 5-6 Mrd. Insekten pro Tag während der warmen Saison [3].

Literaturrecherche belegt potenziellen Konflikt zwischen Fluginsekten und Windparks

Die Annahme, Fluginsekten bewegten sich fast ausschließlich unterhalb von etwa 30 Metern über Grund und damit außerhalb des Bereichs der meisten Windrotoren [4], ist ebenso wenig belastbar wie die Annahme, dass Insekten nicht bei hohen Windgeschwindigkeiten fliegen [5]. Bereits seit der Mitte des vergangenen Jahrhunderts existiert umfassende Literatur zur Insektenmigration [6], die während der warmen Saison Massenbewegungen großer Schwärme in hunderten Metern Höhe nachweist und bezogen auf die Anzahl der Insekten pro Luftvolumen von



Die Windenergie hat sich in Deutschland in den vergangenen Jahren rasant entwickelt
Bild: Fotolia | industrieblick

einer annähernd logarithmischen Verteilung der Insektdichte über der Höhe ausgeht (Abb.1).

Durch direkte Beobachtungen und Messungen mit Boden- und Flugzeug-Radar konnten weltweit hohe Insektenkonzentrationen im unteren Teil der atmosphärischen Grenzschicht nachgewiesen werden [8], in eben dem Höhenbereich der Atmosphäre, der seit den 1990er Jahren zunehmend von den Rotoren von Windkraftanlagen in Anspruch genommen wird. Ein Verträglichkeitsnachweis musste dafür bisher nicht erbracht werden, weil man offenbar annahm, dass sich die Rotoren außerhalb des natürlichen Habitats von Fluginsekten befinden und diese im Betriebsbereich moderner Windkraftanlagen bei Windgeschwindigkeiten über 5 m pro Sek nicht fliegen. Leider entspricht keine dieser Annahmen der Realität.

Als Folge davon tritt teilweise massiver Insektenschlag an Rotorblättern auf, der die Leistung von Windkraftanlagen um bis zu 50 % gegenüber ihrem erwarteten Wert verringern kann [9]. Dieses Phänomen, das die Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen stark beeinträchtigen kann, ist inzwischen theoretisch und praktisch intensiv untersucht worden und gut modellierbar. Unter anderem führte es weltweit zur Etablierung einer Reinigungsindustrie für Rotorblätter [10]. Allerdings wurde bis heute nicht untersucht und quantifiziert, welche Folgen der Insektenschlag an Windrotoren für die betroffene Insektenpopulation haben könnte. Glücklicherweise können wie weiter unten beschrieben die gleichen Modelle, die zur Quantifizierung von Insektenrückständen an Rotorblättern dienen, auch zur Quantifizierung der dabei verletzten Insekten eingesetzt werden.

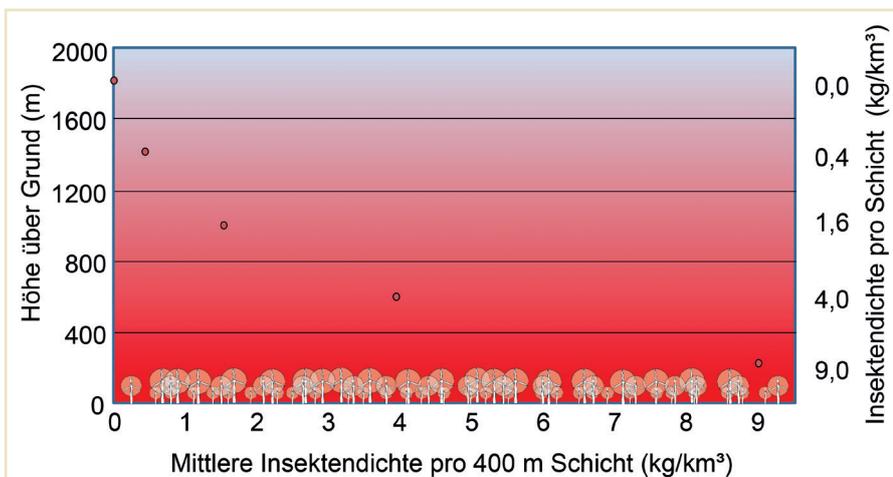


Abb. 1 Beispiel für eine typische Verteilung der Insektdichte (hier bezogen auf die Biomasse pro Luftvolumen) in fünf Bändern der atmosphärischen Grenzschicht mit je 400 m Dicke angelehnt an C. G. Johnson [6]. Als Referenzwert wurde ein Mittelwert über die Gesamthöhe von 3 kg/km³ entsprechend Messungen in Schleswig-Holstein im Rahmen einer Dissertation von H. Weidel [7] vorgegeben. Diese Verteilung mit einer Dichte von etwa 9 kg/km³ in Rotorhöhe wurde für die weiteren Berechnungen verwendet

Fluginsekten nutzen zur Migration starken Wind in bis zu 2.000 m Höhe

Insekten nutzen starke, gleichmäßige Luftströmungen, um ihre Fluggeschwindigkeit über Grund während der Migration zu erhöhen [11]. Solche Strömungen finden sie oberhalb der untersten, turbulentesten Ebene der atmosphärischen Grenzschicht, der sogenannten Prandtl-Schicht. Diese ist tagsüber bei ruhigem Wetter ca. 60 bis 100 m und nachts bis zu etwa 40 m hoch. Thermische Aufwinde werden tagsüber von geflügelten und nicht geflügelten Insekten und anderen Kleinlebewesen wie z.B. Spinnen genutzt, um höhere Schichten zu erreichen und sich dort von starken horizontalen Winden davontragen zu lassen. Abends, wenn die Thermik nachlässt, kehren die meisten Tiere zum Boden zurück. Nachts sind vorwiegend größere Insekten unterwegs, die zum Aufstieg keine Thermik brauchen, sondern aus eigener Kraft in höhere Regionen aufsteigen und sich aktiv Schichten aussuchen, die geeignete Windgeschwindigkeiten, Windrichtung und Temperatur haben, um sie in ferne Regionen zu transportieren. Die turbulente Prandtl-Schicht ist nachts weniger dick, was ihnen den Aufstieg erleichtert. In der Regel starten tagaktive Insekten morgens und kehren am späten Nachmittag zum Boden zurück, während nachtaktive Spezies nach Sonnenuntergang starten und vor Sonnenaufgang zum Boden zurückkehren. Jedes migrierende Insekt passiert damit min-

destens zweimal am Tag die kritische Höhe der Windrotoren, unabhängig davon, ob es in dieser oder in einer höheren Schicht migriert.

Insekten können an einem Tag bzw. in einer Nacht schnell und effizient mehrere hundert Kilometer Entfernung zurücklegen. Migrationen dieser Art in der atmosphärischen Grenzschicht sind während der warmen Jahreszeit alltäglich und finden in großen Schwärmen statt, die aus verschiedenen Spezies zusammengesetzt sein können. Die gesamte atmosphärische Grenzschicht bis 2.000 m Höhe könnte ohne Weiteres und ggf. sogar treffender als „Insektenmigrationsschicht“ bezeichnet werden, wobei allgemein bekannt ist, dass dieser wichtige Lebensraum auch von Vögeln und Fledermäusen zur Migration genutzt wird.

Die Migration von Fluginsekten dient hauptsächlich der Fortpflanzung und der Verbreitung der Art. War ihr Reproduktionszyklus erfolgreich und gibt es vor Ort viele ausgewachsene, flugfähige Nachkommen, dann heben viele von ihnen aufgrund wachsender Nahrungskonkurrenz ab und lassen sich vom Wind mit Geschwindigkeiten von bis zu 100 km/h in ferne, neu zu besiedelnde Gebiete tragen. Eine solche Migration kann, wie z.B. beim Distelfalter, das ganze Jahr und sechs Generationen in Anspruch nehmen, wenn er von Afrika bis Skandinavien und im Herbst zurückwandert. Auch der Admiral legt ebenso

wie der Marienkäfer oft große Entfernungen zurück, bevor er sich zur Brut niederlässt.

Eine systematische Erhebung von Aeroplankton fand jeweils von April bis Oktober zwischen 1998 und 2004 in Schleswig-Holstein statt. Im Rahmen der in Abb. 1 genannten Dissertation von H. Weidel wurden mit einer auf ein Flugzeug montierten Falle regelmäßig Insekten in verschiedenen Flughöhen bis 1.750 m über Grund gefangen und ausgewertet. In der Literatur findet sich eine große Anzahl von Hinweisen auf in großer Höhe und mit hoher Geschwindigkeit migrierende Spezies, die von Fruchtfliegen und Blattläusen über Ameisen und Wespen bis hin zu Heuschrecken, Zikaden, Schmetterlingen und Käfern quer durch die gesamte Taxonomie der Fluginsekten reichen [12].

Entwicklung der Windenergie seit 1990 und daraus ableitbare Volumen- und Massenströme

Tab. 1 zeigt die Entwicklung der installierten Leistung von Windgeneratoren in Deutschland seit 1990 [13]. Im Jahr 2017 war eine Leistung von insgesamt $P_{windpark} = 56.356$ MW in ca. 31.000 Turbinen installiert. Die kritische Rotorebene reicht dabei von der Unterkante kleinerer, älterer Turbinen in ca. 20 m Höhe bis zur Oberkante moderner Turbinen in etwa 220 m Höhe über Grund. Geht man von einer mittleren spezifischen Rotorfläche von $a_{mittel} = 2.800$ m²/MW aus [14], so waren im Jahr 2017 etwa 158 Mio. m² Rotorfläche im deutschen Luftraum bis 220 m Höhe in Betrieb:

$$A = a_{mittel} \cdot P_{windpark} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die mittlere Auslastung des deutschen Windparks liegt zwischen 1.750 und 2.150 Volllaststunden pro Jahr [15]. Davon fallen etwa $\Delta t = 1.000$ h mit der Insektenflugsaison zwischen April und Oktober zusammen. Mit der diesen Volllaststunden entsprechenden nominalen Windgeschwindigkeit von $v_{wind} = 14$ m/s [16] lässt sich der Volumenstrom durch den deutschen Windpark V_{wind} abschätzen (Gl.2). Die Berechnung ergibt für das Jahr 2017 einen saisonalen Luftdurchsatz von etwa 8 Mio. km³, der mehr als dem Zehnfachen des gesamten deutschen Luftraums bis 2.000 m Höhe über Grund entspricht:

$$V_{wind} = A \cdot v_{wind} \cdot \Delta t \quad (\text{Gl. 2})$$

In der eingangs genannten Dissertation von H. Weidel wurde anhand von regelmäßigen Fangflügen über Schleswig-Holstein eine mittlere Insektendichte von etwa 3 kg/km³ während der Flugsaison in den Jahren 1998 bis 2004 festgestellt. Geht man vereinfachend und mangels genauerer Daten von einer vertikalen Verteilung der Fluginsekten in ganz Deutschland entsprechend dem Modell nach C.G. Johnson in Abb.1 aus, ergibt das in Rotorhöhe im gewählten Referenzjahr 2003 eine

Dichte von $\delta_{insekt} = 9 \text{ kg/km}^3$. Mit Gl.3 lässt sich nun berechnen, welche Insektenmasse M_{Rotor} während einer Saison von der Luft durch die Rotoren des deutschen Windparks getragen wird:

$$M_{Rotor} = V_{wind} \cdot \delta_{insekt} \quad (\text{Gl. 3})$$

Dabei können zwei Modellfälle unterschieden werden (Tab. 1 und Abb. 2):

■ a) Die Dichte der Fluginsekten in Rotorhöhe verändert sich im gesamten Bundesgebiet entsprechend den von Hallmann et al. [17] in norddeutschen Naturschutzgebieten festgestellten Verlusten an Biomasse von etwa 75 % in 27 Jahren. Ausgehend vom Referenzjahr 2003 mit 9 kg/km³ steigt die Insektendichte damit rückwärts bis 1990 linear um etwa +2.5 %/a auf 12 kg/km³ an, während sie vorwärts bis 2017 um etwa -5%/a auf 3 kg/km³ abnimmt. In diesem

Tab. 1: Verlauf der installierten Leistung, der Rotorfläche und des saisonalen Luftdurchsatzes durch den deutschen Windpark seit 1990 sowie daraus resultierende Modellberechnungen der gefährdeten und der beschädigten Insektenbiomasse unter der Annahme a) abnehmender Insektendichte und b) gleichbleibender Insektendichte in Rotorhöhe

Jahr	Installierte Leistung $P_{windpark}$ MW	Rotorfläche A 10 ⁶ km ³	Saisonaler Durchsatz V_{wind} 10 ⁶ km ³	a) Abnehmende Insektendichte			b) Konstante Insektendichte		
				Insekten-dichte δ_{insekt} kg/km ³	Gefährdete Biomasse M_{Rotor} 1000 t	Beschädigte Biomasse $M_{Schaden}$ 1000 t	Insekten-dichte δ_{insekt} kg/km ³	Gefährdete Biomasse M_{Rotor} 1000 t	Beschädigte Biomasse $M_{Schaden}$ 1000 t
1990	63	0,2	0,0	12,00	0,1	0,0	9,00	0,2	0,0
1991	105	0,3	0,0	11,77	0,3	0,0	9,00	0,2	0,0
1992	175	0,5	0,0	11,54	0,4	0,0	9,00	0,3	0,0
1993	319	0,9	0,0	11,31	0,6	0,0	9,00	0,5	0,0
1994	612	1,7	0,1	11,08	1,1	0,1	9,00	0,9	0,0
1995	1.092	3,1	0,2	10,85	1,8	0,1	9,00	1,5	0,1
1996	1.525	4,3	0,2	10,62	2,4	0,1	9,00	2,0	0,1
1997	2.037	5,7	0,3	10,38	3,1	0,2	9,00	2,7	0,1
1998	2.849	8,0	0,4	10,15	4,2	0,2	9,00	3,7	0,2
1999	4.352	12,2	0,6	9,92	6,2	0,3	9,00	5,6	0,3
2000	6.069	17,0	0,9	9,96	8,4	0,4	9,00	7,8	0,4
2001	8.710	24,4	1,2	9,46	11,7	0,6	9,00	11,2	0,6
2002	11.873	33,2	1,7	9,23	15,6	0,8	9,00	15,2	0,8
2003	14.546	40,7	2,1	9,00	18,6	0,9	9,00	18,6	0,9
2004	16.534	46,3	2,3	8,57	20,1	1,0	9,00	21,1	1,1
2005	18.346	51,4	2,6	8,14	21,2	1,1	9,00	23,4	1,2
2006	20.527	57,5	2,9	7,71	22,5	1,1	9,00	26,2	1,3
2007	22.144	62,0	3,1	7,29	22,9	1,1	9,00	28,2	1,4
2008	23.704	66,4	3,3	6,86	23,0	1,2	9,00	30,2	1,5
2009	25.508	71,4	3,6	6,43	23,2	1,2	9,00	32,5	1,6
2010	26.926	75,4	3,8	6,00	22,9	1,1	9,00	34,3	1,7
2011	28.873	80,8	4,1	5,57	22,8	1,1	9,00	36,8	1,8
2012	31.095	87,1	4,4	5,24	22,7	1,1	9,00	39,6	2,0
2013	34.227	95,8	4,8	4,71	22,9	1,1	9,00	43,6	2,2
2014	39.153	109,6	5,5	4,29	23,8	1,2	9,00	49,8	2,5
2015	45.043	126,1	6,4	3,86	24,6	1,2	9,00	57,3	2,9
2016	50.011	140,0	7,1	3,43	24,3	1,2	9,00	63,6	3,2
2017	56.356	157,8	8,0	3,00	24,0	1,2	9,00	71,7	3,6
Kumulierte Biomasse (1990 - 2017)					395	19,8		629	31,4

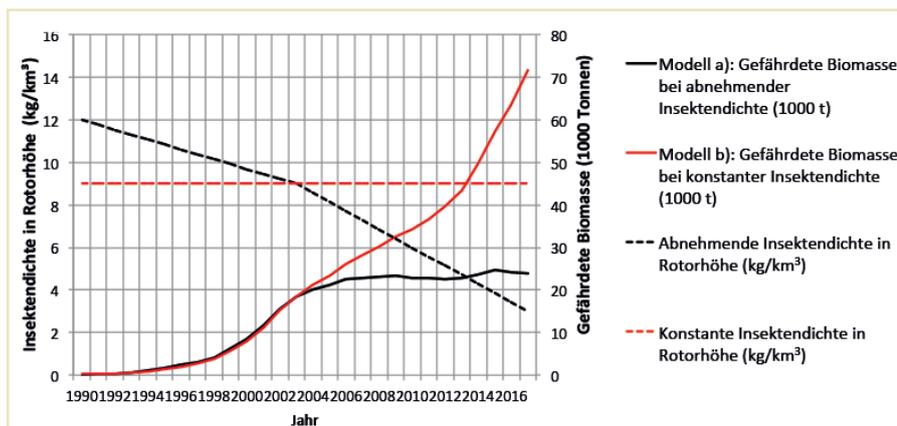


Abb. 2 Veränderung der Insektendichte in Rotorhöhe und daraus resultierender Verlauf der durch Windrotoren gefährdeten Biomasse seit 1990 in zwei Modellanalysen

Fall stagniert die Anzahl der durch die Rotoren getragenen Insekten mangels verfügbarer Insektenbiomasse nach 2003 bei etwa 24.000 t pro Jahr, obwohl der deutsche Windpark weiterhin stark anwächst.

■ b) Die Dichte der Fluginsekten in Rotorhöhe von 9 kg/km³ bleibt von 1990 bis 2017 unverändert. In diesem Fall würde die Anzahl der durch die Rotoren getragenen Insekten direkt proportional zur installierten Leistung der Windturbinen ansteigen und im Jahr 2017 einen Wert von ca. 72.000 t pro Jahr erreichen.

Die durch Windrotoren getragenen Fluginsekten werden hier als „gefährdete Biomasse“ bezeichnet und sind nicht identisch mit dem Anteil, der beim Durchfliegen der Rotoren tatsächlich beschädigt wird. Der Anteil „beschädigter Biomasse“ muss gesondert berechnet bzw. abgeschätzt werden.

Da Insektenrückstände an Rotorblättern wie an jeder Tragfläche zu einem Strömungsabriss und damit zu Energieverlusten von Windgeneratoren führen können, gibt es inzwischen detaillierte Untersuchungen und Modelle zu diesem Phänomen. Der durchschnittliche Anteil $\rho_{Schaden}$ der Fluginsekten, die beim Durchfliegen eines Rotors auf der Blattfläche aufschlagen, ist annähernd proportional zum Quotienten aus der effektiven Windgeschwindigkeit gegenüber dem sich drehenden Rotorblatt v_{eff} und der nominalen Windgeschwindigkeit v_{wind} , zu dem sog. Sammelwirkungsgrad des Rotorblatts bezüglich Fluginsekten (Collection Efficiency β) und zu dem Verhältnis der Blattfläche zur Rotorfläche (ρ_{Blatt}). Er lässt sich mit den Durchschnittswerten

$$\beta \approx 32\%, \frac{v_{eff}}{v_{wind}} \approx 3,2 \text{ und } \rho_{Blatt} \approx 5\% \text{ wie folgt abschätzen [18]:}$$

$$\rho_{Schaden} = \rho_{Blatt} \cdot \beta \cdot \frac{v_{eff}}{v_{wind}} \quad (Gl. 4)$$

Der resultierende Wert $\rho_{Schaden} = 5\%$ bedeutet, dass 95% der gefährdeten, durch einen Rotor fliegenden Insekten unbeschadet bleiben. Damit können die in Tab. 1 angegebenen Mengen beschädigter Biomasse nach Gl.5 berechnet werden:

$$M_{Schaden} = \rho_{Schaden} \cdot M_{Rotor} \quad (Gl. 5)$$

Entsprechend dem Fall a) ergibt sich bei abnehmender Insektendichte seit etwa 2003 ein mehr oder weniger gleichbleibender Verlust von etwa 1.200 t Fluginsekten pro Jahr. Dieser verteilt sich auf eine stetig wachsende Anzahl von Turbinen und ist im Lauf der Zeit bei rückgängiger Insektenpopulation immer weniger sichtbar. Im Fall b) mit gleichbleibender Insektendichte wäre der jährliche Verlust inzwischen auf etwa 3.600 t angestiegen (Tab.1). Dieser Zusammenhang ist relativ besorgniserregend, besagt er doch, dass im Falle einer Erholung der Insektenpopulation entsprechend mehr Insekten getötet würden, sobald sich deren Dichte in der Luft wieder erhöht.

Auch die Größenordnung potenziell getöteter Insekten ist besorgniserregend: geht man wie Hu et al. [19] von einem durchschnittlichen Gewicht von etwa einem Milligramm pro Fluginsekt aus, entspräche ein Verlust von 1.200 t im Jahr etwa 1.200 Mrd. Insekten, eine Größenordnung, die durchaus relevant für die Stabilität der gesamten Population sein könn-

te. Hu et al. haben z.B. über einer Fläche von 70.000 km² in Südengland eine migrierende Insektenpopulation von durchschnittlich 3.370 Mrd. (3.200 t) pro Saison festgestellt, eine Zahl, die in derselben Größenordnung liegt wie die hier berechneten Verluste.

Tab. 2 fasst die wichtigsten in den Modellen berücksichtigten und vernachlässigten Modellannahmen zusammen. Insgesamt müssen die hier getroffenen Abschätzungen als konservativ eingeschätzt werden, da wichtige Randbedingungen, die zu einer deutlich höheren Anzahl beschädigter Insekten führen könnten, vernachlässigt wurden.

Werden Weibchen, die mehrere hundert Eier legen können, ausgerechnet während der Migration und damit kurz vor der Eiablage von einem Rotorblatt getroffen, wirkt sich das mit entsprechender Hebelwirkung verstärkt auf die nachfolgende Generation aus, da diese Eier nicht mehr am Kreislauf des Lebens teilnehmen. Darüber hinaus ist das gesamte Ökosystem an seiner Basis von den Verlusten betroffen: wird ein Teil der Insekten der Nahrungskette entzogen, entsteht für die übrigen ein erhöhter Druck durch Jäger und für diese erhöhter Aufwand bei der Jagd oder sogar Nahrungsknappheit. Weiterhin tragen beschädigte Insekten nicht mehr zur Bestäubung von Blütenpflanzen bei.

Besorgniserregende Entwicklung

Es ist bisher unmöglich, die Auswirkung der hier geschätzten Verluste auf die Gesamtpopulation der Fluginsekten zu quantifizieren, weil die Größe der Gesamtpopulation unbekannt ist. Da der Einfluss anderer menschlicher Aktivitäten wie die Ausbringung von Pestiziden, intensive Landwirtschaft, Verkehrsaufkommen, Urbanisierung, Klimawandel u.a. bisher ebenfalls nicht quantifiziert wurde, ist auch kein Vergleich der hier geschätzten Verluste mit diesen anderen Auswirkungen möglich.

Gleichwohl gibt es deutliche Hinweise auf eine sehr besorgniserregende Entwicklung:

■ Die Annahmen, die vor ca. 30 Jahren zu einem Verzicht auf einen Verträglichkeitsnachweis von Windkraftanlagen gegenüber Fluginsekten im Luftraum geführt haben,

sind falsch: Insekten aller Art fliegen sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Windgeschwindigkeiten in der Höhe moderner Windrotoren und werden dabei verletzt.

■ Die unter der Annahme abnehmender Insektdichte geschätzten Verluste aus dem Modellergebnis a) haben eine Größenordnung von 1.200 t/a entsprechend durchschnittlich 5-6 Mrd. Insekten pro Tag während der warmen Jahreszeit (etwa 200 Tage von April bis Oktober). Diese Größenordnung könnte relevant für die Stabilität der gesamten Fluginsektenpopulation sein und ist sicherlich relevant für den Artenschutz.

■ Das Modellergebnis b) unter der Annahme gleichbleibender Insektdichte besagt, dass der heute in Deutschland installierte Windpark deutlich mehr Insekten (bis zu 3.600 t/a) töten würde, wenn diese verfügbar wären und die Insektdichte in der Luft aus irgend einem Grund wieder ansteigen würde, z.B. wenn sich die Insekten aufgrund verbesserter Umweltbedingungen regenerieren würden. Dies ist extrem besorgniserregend, weil es einer Erholung der Insektenpopulation direkt entgegenwirkt.

■ Die Verluste treten selektiv während der Migration und damit kurz vor der Eiablage der Insekten auf und wirken sich damit verstärkt auf die nachfolgende Generation aus.

■ Die geschätzten Verluste von mindestens 1.200 t Fluginsekten pro Jahr werden nicht nur dem jährlichen Reproduktionspro-

zess der Insektenpopulation, sondern auch der gesamten nachfolgenden Nahrungskette entzogen.

Abschließend muss gesagt werden, dass die hier theoretisch berechneten Verluste dringend empirisch verifiziert und umfassende Maßnahmen zum Monitoring und zur Vermeidung von Insektenschlag an Windkraftanlagen getroffen werden müssen, es sei denn man wolle Verluste dieser Größenordnung weiterhin ungeprüft und unbesehen in Kauf nehmen. Der anhaltende Verzicht auf einen Verträglichkeitsnachweis von Windkraftanlagen gegenüber im Luftraum migrierender Fluginsekten nach mehr als 30 Jahren Ausbau der Windenergie ist sicherlich keine gesellschaftlich akzeptable Option und steht im Konflikt mit dem in Artikel 20a des Grundgesetzes verankerten Vorsorgeprinzip. Obwohl der Rückgang der Fluginsekten seit den 1990er Jahren sicherlich viele Gründe hat, ist ein Beitrag zur Minderung der Verluste auch von Seiten der Windenergienutzung wünschenswert, insbesondere da hier ein hohes Vermeidungspotential von bis zu 3.600 Tonnen pro Jahr besteht. Den deutschen Windpark dauerhaft abzuschalten oder gar rückzubauen ist keine befriedigende Option. Vielmehr ist es wichtig, die Zusammenhänge von Insektenmigration und Windpark-betrieb besser als bisher zu verstehen und zeitnah Schaden begrenzende Maßnahmen zu ergreifen, wie z.B. ein Monitoring

von Insektenmigration begünstigenden Umweltbedingungen, Metabarcoding von Insektenrückständen an Rotorblättern zur Bestimmung der betroffenen Arten und die Installation von automatischen Schwarmerkennungssystemen in Verbindung mit einer entsprechenden Steuerung der Rotoren. Erste Vorschläge zu wirksamen Schutzmaßnahmen stammen aus dem Jahr 1990 [20]. Diese und den heutigen technischen Möglichkeiten entsprechende Maßnahmen sollten rasch und flächendeckend an allen Windkraftanlagen zum Schutz migrierender Fluginsekten eingesetzt werden, um den Kampf gegen deren Rückgang zu unterstützen.

Anmerkungen

[1] Hallmann C. A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H. et al.: More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* 12 (10): e0185809. 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

[2] In Trieb, F.: Wege zur regenerativen Stromversorgung III – Elemente und Ausgestaltung, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 68. Jg. (2018) Heft 6, 58 – 63 wird auf bisher ungeklärte Umweltwirkungen verschiedener erneuerbarer Energietechnologien bezüglich Fluginsekten hingewiesen.

[3] Weitere Angaben zu den hier verwendeten Modellen und weitere Literatur finden sich in Trieb, F.; Gerz, T.; Geiger, M.: Insect decline and wind farms – is there a problem for wildlife conservation? *Biodiversity and Conservation* (2018) im Review.

[4] Alle weiteren Anmerkungen und eine umfangreiche Literaturliste sowie der Projektbericht stehen unter www.dlr.de/tt/fluginsekten zum Download bereit.

Tab. 2: In den Modellrechnungen berücksichtigte und unberücksichtigte Vorgänge

Berücksichtigte Modellannahmen	Unberücksichtigte Vorgänge
Mittlere Insektdichte im Jahr 2003 im Luftraum über Schleswig-Holstein bis 2.000 m Höhe von 3 kg/km ³ angenommen für ganz Deutschland.	Selektive Nutzung schneller Luftströme durch migrierende Fluginsekten und dadurch gegenüber dem Mittelwert der Atmosphäre erhöhte Insektdichte in Windparks.
Annähernd logarithmische vertikale Verteilung der Insektdichte bis 2.000 m Höhe, Annahme von durchschnittlich 9 kg/km ³ in Rotorhöhe im Jahr 2003.	Tag- und Nachtverhalten verschiedener Spezies. Auf- und Abstieg migrierender Insekten morgens und abends und damit zweimaliges durchqueren der kritischen Rotorhöhe pro Tag.
Betrieb aller Rotoren bei nominal 14 m/s Windgeschwindigkeit über 1.000 äquivalente Vollaststunden während der Flugsaison (ca. 7 Monate im Sommerhalbjahr) zur Berechnung des Luftdurchsatzes von 8 Mio. km ³ /a im Jahr 2017.	Höhere tatsächliche Betriebsstunden bei nicht nominalen Windgeschwindigkeiten, sowie Eigengeschwindigkeit der Insekten relativ zur umgebenden Luftströmung mit entsprechend höherem Gefährdungspotenzial.
Statistisch mittlere wirksame Aufschlagfläche eines Rotors von ca. 32% der Blattfläche, berechnet aus theoretischen Modellen zur Ermittlung der Verschmutzung durch Fluginsekten.	Unterschiedliche Massenträgheit verschieden großer Insekten: große Insekten treffen deutlich wahrscheinlicher auf ein Rotorblatt als sehr kleine.
Wahrscheinlichkeit eines direkten Aufschlags auf das Rotorblatt mit sichtbaren Rückständen von 5% der gesamten, durch einen Rotor fliegenden Insektenmenge.	Potenzielles zusätzliches Barotrauma beim Durchfliegen des Unterdrucks am Rotorblatt und Schäden durch teilweisen Aufschlag (z.B. an Fühlern und Mundwerkzeugen) ohne sichtbare Rückstände.

Dr. F. Trieb, Institut für Technische Thermodynamik – Abteilung Energiesystemanalyse, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart
franz.trieb@dlr.de

Dr. T. Gerz, Institut für Physik der Atmosphäre – Abteilung Verkehrsmeteorologie, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen
thomas.gerz@dlr.de

Dr. M. Geiger, Projektkoordination GBOL – German Barcode of Life, Zoologisches Forschungsmuseum Alexander Koenig, Leibniz Institut für Biodiversität der Tiere, Bonn
m.geiger@leibniz-zfmk.de