Arbeitsgruppe für
regionale Struktur- und
Umweltforschung GmbH

The Regional Planning and
Environmental Research Group

Wirtschaftliche Aspekte ereignis-bezogener Abschaltung zum Vogel-schutz an Windenergieanlagen

Brutplatzszenarien – Ertragseinbußen – Einfluss auf die Anlagentechnik

In Kooperation mit

8.2 | The Experts in Renewable Energy

10.12.2020

Erstellt im Auftrag von:

KNE | Kompetenzzentrum
Naturschutz und Energiewende

Auftraggeber:

Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende KNE gGmbH

Kochstraße 6-7, 10969 Berlin

Vorhaben:

Wirtschaftliche Aspekte ereignisbezogener Abschaltung zum Vogelschutz an Windenergieanlagen

Brutplatzszenarien – Ertragseinbußen – Einfluss auf die Anlagentechnik

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit im Rahmen des FuE-Projektes „Anforderungen an technische Überwachungs- und Abschaltsysteme an Windenergieanlagen
(FKZ 3519861200)."

Stand:

10.12.2020

Auftragnehmer:

ARSU GmbH

Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH
Escherweg 1, 26121 Oldenburg
Postfach 11 42, 26001 Oldenburg

Tel. +49 441 971 74 97
Fax +49 441 971 74 73

www.arsu.de, info@arsu.de

8.2 Ingenieurbüro Holzmüller

Oldersumer Straße 10, 26603 Aurich

Tel. +49 4941°60°444-110

www.8p2.de, juergen.holzmueller@8p2.de

Bearbeiter:

Dr. Marc Reichenbach, Dipl.-Biol., Dipl.-Ökol. (ARSU)

Tim Aussieker, M.Sc. Landschaftsökologie (ARSU)

Jürgen Holzmüller, Dipl.-Ing. Maschinenbau (8.2), von der IHK für Ostfriesland und Papenburg öffentlich bestellt und vereidigt als Sachverständiger für Windenergieanlagen und deren Bewertung

INHALTSVERZEICHNIS

0 Zusammenfassung 5
1 Aufgabe und Vorgehensweise 6
2 Material und Methoden 7
2.1 Flugaktivität – Abschaltungen - Brutplatzszenarien 8
2.1.1 Überblick 8
2.1.2 Allgemeine saisonale und diurnale Verteilung der Flugaktivität von Rotmilanen 10
2.1.3 Prognose von Abschaltereignissen über die gesamte Brutdauer 11
2.1.4 Abhängigkeit der Flugaktivität von verschiedenen Standortparametern 18
2.1.5 Lineare Regression 21
2.1.6 Szenarienbildung 23
2.2 Ertragseinbußen und Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb 23
2.2.1 Windpotenziale 23
2.2.2 Windenergieanlagen 27
2.2.3 Abschätzung der Ertragsverluste 31
3 Ergebnisse 32
3.1 Relation zwischen Flugaktivität und Abschaltungen 32
3.2 Abhängigkeit der Flugaktivität von verschiedenen Standortparametern 35
Bildung von Szenarien zu Flugaktivität und Brutplatzverteilung 39
3.3 Wirtschaftliche Auswirkungen 41
3.3.1 Ertragseinbußen durch pauschale und ereignisbezogene Abschaltungen 42
3.3.2 Einfluss der Anlagentechnik 44
3.3.3 Einfluss der Nabenhöhe 46
3.3.4 Ereignisbezogene Stopp- und Startvorgänge 46
3.3.5 Auswirkungen auf die Anlagentechnik 48
3.4 „Trudelmodus“ von Windenergieanlagen 49
4 Diskussion 53

4.1 Flugaktivität – Abschaltungen – Brutplatzszenarien 53
4.1.1 Repräsentativität der Datengrundlage 53
4.1.2 Relation zwischen Flugaktivität und Abschaltungen 53
4.1.3 Abhängigkeit der Flugaktivität von verschiedenen Standortparametern 54
4.1.4 Szenarienbildung 55
4.1.5 Weitere Zielarten 56
4.2 Wirtschaftliche Konsequenzen 57
4.3 Fragestellungen zum Trudelmodus 58
5 Literatur 60

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematischer Ablauf der Ermittlung der Relation der Flugaktivität zur Ertragseinbuße 9
Abbildung 2: Verteilung der Rotmilan-Flugaktivität über einen Tag während der vier Brutphasen des Rotmilans 11
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Funktionsraums des IDF-Systems 13
Abbildung 4: Lage der IDF-Standorte in den Regionen Deutschlands mit unterschiedlicher mittlerer Windgeschwindigkeit An Standort B wurden zwei IDF-Testreihen in geringer Entfernung zueinander durchgeführt. An Standort A fanden keine Test statt 14
Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse einer Raumnutzungsanalyse (RNA) 19
Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit für sechs Standorte für das Jahr 2019 (135 m) 26
Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Windgeschwindigkeit in Stundenwerten für das Jahr 2019 27
Abbildung 8: Leistungskennlinien der Windenergieanlagen Enercon E-141 EP4, Nordex N-149 und Vestas V150-4.2 29
Abbildung 9: Histogramm der durchschnittlichen Flugaktivität im Nahbereich der untersuchten WEA-Standorte 35

Abbildung 10: Signifikante Abhängigkeiten der Flugaktivität im Nahbereich um WEA von der Entfernung zum nächsten Horst sowie dem jeweiligen Anteil von Offenland und Wald 37

Abbildung 11: Signifikante Unterschiede der Flugaktivität an Wald- bzw. Nicht-Waldstandorten 37

Abbildung 12: Graphische Darstellung des besten multivariaten Modells zur Schätzung der Flugaktivität im Nahbereich der WEA-Standorte 38

Abbildung 13: Liste und Tabelle zu den Ergebnissen für Erträge und Einbußen 42

Abbildung 14: Anzahl der zusätzlichen, ereignisbezogenen Stopp- und Startvorgänge pro Jahr 47

Abbildung 15: Rotordrehzahlen für Blattspitzengeschwindigkeiten von 30km/h und 50km/h 50

Abbildung 16: Messungen von Zeitspannen, die beim Abregeln mit Standardprozeduren auftraten 52

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Flugaktivität des Rotmilans während der Brutphasen in Mitteleuropa 11

Tabelle 2: Dauer der IDF-Testphasen 13

Tabelle 3: Exemplarische Verteilung der durchschnittlichen Anzahl Abschaltungen pro Tag über die einzelnen Tagesstunden am Standort B1 während der Balzzeit 17

Tabelle 4: WEA-Standortparameter 21

Tabelle 5: Charakterisierung der betrachteten Standorte 24

Tabelle 6: Zeitreihen der Windgeschwindigkeitswerte für verschiedene Höhen 24

Tabelle 7: Mittlere Jahresgeschwindigkeiten für sechs ausgewählte Standorte 25

Tabelle 8: Mittlere Jahresgeschwindigkeiten für sechs Standorte und drei Höhenwerte (Jahr 2019) 25

Tabelle 9: Liste der bezuschlagten Anlagentypen nach 14 Ausschreibungsrunden (die für die Analyse gewählten Anlagentypen sind hervorgehoben durch rotgefärbte Unterlegung) 28

Tabelle 10: Repräsentative Anlagentypen für die Auswertungen 28

Tabelle 11: Beispiel des angewendeten Berechnungsverfahren 32

Tabelle 12: Daten zu den Rotmilanflügen im Nahbereich sowie den Abschaltungen an den IDF-Standorten 34
Tabelle 13: Durchschnittliche Anzahl täglicher Abschaltungen während den unterschiedlichen Brutphasen an den IDF-Standorten 35
Tabelle 14: Wirkrichtung und Modellgüte der univariaten Modelle für die Flugaktivität des Rotmilans 36
Tabelle 15: Einteilung der Flugaktivitätsklassen auf Grundlage der Ergebnisse der linearen Regression 39
Tabelle 16: Definition der Flugaktivitätsszenarien 40
Tabelle 17: Einordnung der IDF-Standorte in die Flugaktivitätsklassen 41
Tabelle 18: Ergebnisse der Auswertungen zu Ertragseinbußen für sechs Standorte und vier allgemeine Szenarien 43
Tabelle 19: Ergebnisse der Auswertungen zu Ertragseinbußen für fünf Standorte und standortspezifische Szenarien 44
Tabelle 20: Ergebnisse zu Ertragseinbußen mit Detailauswertungen zu Anlagetypen 45
Tabelle 21: Ergebnisse zu Eintragseinbußen mit Detailauswertungen zu Nabenhöhen 46
Tabelle 22: Blattspitzengeschwindigkeiten verschiedener Enercon-Windenergieanlagen im Trudelmodus 50
Tabelle 23: Ausschnittsweiser Jahresgang der Abschaltungen am Standort B2 63

0 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie ist eine Abschätzung der wirtschaftlichen Auswirkungen bedarfsgerechter Abschaltungen von WEA zum Schutz von Vögeln vor Kollisionen mit Hilfe technischer Systeme. Hierdurch soll eine Orientierungshilfe für die überschlägige Kalkulation der Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs geschaffen werden. Stellvertretend für die windenergiesensiblen Arten wird als Grundlage die Flugaktivität des Rotmilans (*Milvus milvus)* auf der Basis von jeweils mehrmonatigen und ganztägigen Flugaktivitätsmessungen durch das Kamerasystem IdentiFlight an sechs Standorten in Deutschland verwendet. Die dabei ermittelte Anzahl und Dauer von Abschaltereignissen wurde auf die gesamte Brutzeit extrapoliert und diente als Grundlage für die Berechnung der Einbußen der Stromproduktion. Im Mittel wurden dabei zwischen 2,1 und 27,4 Abschaltungen pro Tag registriert.

Um diese Daten in beispielhafte Szenarien anhand von Brutplatzzahlen und -entfernungen einordnen zu können, wurden 17 Raumnutzungsanalysen für insgesamt 73 Anlagenstandorte ausgewertet. In Abhängigkeit der Standortparameter „Landnutzung“ und „Entfernung zum nächstgelegenen Rotmilanhorst“ konnten drei Szenarien beschrieben werden, mit deren Hilfe eine erste grobe Einschätzung von erwartbaren Stromproduktionseinbußen an potenziellen Anlagenstandorten ermöglicht wird. Die Anzahl an durchschnittlichen Abschaltungen pro Tag beträgt für die drei Szenarien 3,4, 8,6 bzw. 15,0. An „Extrem Standorten“ (z.B. sehr geringer Abstand zum nächsten Brutplatz) muss jedoch mit einer deutlich höheren Rotmilan-Flugaktivität entsprechend auch mit höheren Abschaltzahlen gerechnet werden.

Die Ergebnisse der Abschätzungen der Auswirkungen von ereignisbezogenen Abschaltungen auf den Ertrag von Windenergieanlagen variieren sehr stark in Abhängigkeit des jeweils angewendeten Szenarios. Es ergeben sich prozentuale Ertragseinbußen von 0,4 % bis 7,7 % - im Vergleich zu einem pauschalen Abschaltszenario über die gesamte Brutzeit mit Einbußen um die 28 %. Die Anlagentechnik sowie die Nabenhöhe haben im Gegensatz zu den Szenarien einen sehr geringen Einfluss auf die prozentualen Ertragsverluste.

Ereignisbezogener Abschaltungen zum Vogelschutz führen zu einer Erhöhung der Stopp- und Startvorgänge während der Betriebsdauer einer WEA, die teils zu einer Zunahme der Abnutzung und damit zu einer geringen Erhöhung der Instandhaltungskosten führen können.

Ziel einer ereignisbezogenen Abschaltung ist der Übergang des Anlagenrotors bei Ereigniseintritt in eine ausreichend niedrige Rotordrehzahl (Trudelmodus) innerhalb einer möglichst kurzen Zeitspanne. Technische Entwicklungen zur Optimierung dieses Vorgangs stehen erst am Anfang. Weitere Diskussionen und Initiativen sind notwendig, um zu einer technisch ausgereiften und für die Anwendung angepassten und zuverlässigen Lösung zu kommen. Ebenso ist eine Verbreiterung der hier verwendeten Datengrundlage zu den Relationen von Standortparametern, Flugaktivität und Abschaltungen anzustreben, um die Verlässlichkeit der Prognose wirtschaftlicher Auswirkungen weiter zu verbessern.

1 Aufgabe und Vorgehensweise

Der Vermeidung einer Erfüllung des artenschutzrechtlichen Tötungsverbotes, formuliert in § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG, kommt eine zentrale Bedeutung für die Genehmigungsfähigkeit von neuen Windenergieanlagen (WEA) zu (SPRÖTGE *et al.* 2018). Um einen WEA-Betrieb im Einklang mit dem Artenschutz zu ermöglichen, werden zunehmend technische Möglichkeiten als eine Lösungsoption diskutiert. Derzeit stehen unter anderem der Rotmilan wegen seiner besonderen Kollisionsgefährdung und fast flächenhaften Verbreitung, aber auch der Seeadler im Zentrum der Entwicklung von Bilderkennungsalgorithmen zur artspezifischen Erkennung und daran gekoppelten bedarfsgesteuerten Abschaltung (AMMERMANN *et al.* 2020).

Mit Hilfe solcher Systeme können auch Standorte zur Windenergieerzeugung genutzt werden, die zuvor aufgrund von artenschutzrechtlichen Konflikten beispielsweise nur mit umfangreichen pauschalen Abschaltzeiten betrieben werden konnten. Demgegenüber stehen jedoch Befürchtungen von Betreibern, dass durch ereignisbezogene Abschaltungen unvorhersehbare und umfassende wirtschaftliche Einbußen entstehen. Insbesondere die mangelnde Prognostizierbarkeit und das Fehlen von Orientierungswerten, anhand derer der zu erwartende Umfang der Abschaltungen und die damit verbundene Größenordnung wirtschaftlicher Einbußen abgeschätzt werden können, führen zu Vorbehalten gegenüber dem Einsatz derartiger Systeme.

In diesem Zusammenhang stehen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Quantifizierung der Einbußen bei der Stromproduktion durch ereignisbezogene Abschaltungen (Anzahl und Dauer)
- Vergleich zu Verlusten aus herkömmlichen Schutzmaßnahmen, insbesondere durch pauschale tägliche Abschaltungen während der gesamten Brutzeit
- Kosten aufgrund des aus den Abschaltungen resultierenden Anlagenverschleißes sowie zusätzlich anfallender Betriebskosten bei Stillstand,

In dem vorliegenden Gutachten soll exemplarisch anhand ausgewählter Szenarien eine erste Annäherung und Abschätzung wirtschaftlicher Einbußen durch ereignisbezogene Abschaltungen erfolgen. Ziel ist es, eine Orientierungshilfe für die überschlägige Kalkulation der Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs zu erhalten. Es soll eingeschätzt werden können, bis zu welcher Abschaltdauer und -häufigkeit von einem wirtschaftlichen Betrieb ausgegangen werden kann und ab wann sich der Einsatz eines technischen Systems etwa gegenüber einer pauschalen Abschaltung für den Betreiber lohnt.

Stellvertretend für die windenergiesensiblen Arten wird die Flugaktivität des Rotmilans (*Milvus milvus)* betrachtet. Aufgrund seiner Lebensweise als Beute suchender Segelflieger besteht für den Rotmilan ein besonderes Kollisionsrisiko an Windenergieanlagen (DREWITT & LANGSTON 2008). So ist der Rotmilan in Deutschland nach den drei Adlerarten See-, Schrei- und Fischadler die in Relation zur Bestandsgröße am stärksten von Kollisionen an Windenergieanlagen betroffene Art (SPRÖTGE *et al.* 2018). Bedingt durch die weite Verbreitung dieser Art in Deutschland (GRÜNEBERG & KARTHÄUSER 2019) besteht bei der Planung und Genehmigung von Windenergiestandorten oftmals ein großes Konfliktpotenzial.

Ausgehend von der zentralen Prämisse, dass die Häufigkeit und Dauer ereignisbezogener Abschaltungen an einem WEA-Standort von dem konkreten Ausmaß der Rotmilan-Flugaktivität im Nahbereich dieser WEA abhängt, wurde im Überblick wie folgt vorgegangen:

1. Verwendung von Daten aus jeweils mehrmonatigen und ganztägigen Flugaktivitätsmessungen durch das Kamerasystem IdentiFlight an sechs Standorten in Deutschland: Ermittlung der stundengenauen Flugaktivität im 350 m Radius um einen WEA-Standort inklusive der Anzahl und Dauer der dadurch von IdentiFlight ausgelösten Abschaltsignale;
2. Extrapolation dieser Daten auf die gesamte Brutzeitperiode des Rotmilans (01.03. – 30.09.) unter Verwendung der tageszeitlichen und jahreszeitlichen Phänologie von telemetrierten Rotmilanen aus Hessen (HEUCK *et al.* 2019);
3. Berechnung der Einbußen der Stromproduktion auf der Basis der vorgenannten Abschalt-Daten und der jeweiligen stundengenauen Windgeschwindigkeiten an den sechs untersuchten Standorten;
4. Korrelation von Flugaktivitätsdaten mit Brutplatzsituationen des Rotmilans durch Auswertung von visuellen Raumnutzungsbeobachtungen an 73 WEA-Standorten mit bekannter Brutplatzverteilung unter Einbeziehung grundlegender Habitatparameter;
5. Ableitung beispielhafter Szenarien anhand von Brutplatzzahlen und -entfernungen, Wald-Offenlandverteilung, erwartbarer Flugaktivität und resultierenden Abschaltungen mit entsprechenden Ertragseinbußen.
6. Weitergehende Aussagen zu erwartbaren Kosten (Materialermüdung, Verschleiß).

Im Ergebnis soll hierdurch ein Projektierer in die Lage versetzt werden, für einen geplanten Windenergiestandort anhand eines Abgleichs der im Zuge der Bestandserhebungen ermittelten Brutplatz- und Flugaktivitätssituation unter Berücksichtigung der landschaftlichen Situation mit den in diesem Gutachten beschriebenen Szenarien eine erste Abschätzung der wirtschaftlichen Einbußen vornehmen zu können, die mit dem Einsatz eines ereignisbezogenen Abschaltsystems verbunden sein können.

2 Material und Methoden

Sämtliche Arbeitsschritte in Bezug auf die Flugaktivität des Rotmilans wurden von der ARSU GmbH vorgenommen (Kap. 2.1, 3.1, 3.2 und 4.1), wohingegen die Auswertungen hinsichtlich der wirtschaftlichen und technischen Folgen ereignisbezogener Abschaltungen von dem 8.2 Ingenieurbüro Holzmüller (Mitglied der 8.2 Group e.V.) erfolgten (Kap. 2.2, 3.3, 3.4 sowie 4.2 und 4.3).

2.1 Flugaktivität – Abschaltungen - Brutplatzszenarien

2.1.1 Überblick

Die Auswertung stützt sich auf zwei Datengrundlagen. Zum einen stehen Daten von insgesamt sechs IdentiFlight (IDF) Standorten zur Verfügung, an denen das Kamerasystem in Deutschland getestet wurde. Aus den Testreihen stehen Angaben zu Flügen von Rotmilanen im Nahbereich der Anlagen sowie von Abschaltanzahl und -dauer aus einem Zeitraum von mehreren Wochen während der Brutdauer zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der artspezifischen Phänologie der Flugaktivität können diese Daten auf die gesamte Dauer der Brut extrapoliert und auf die einzelnen Tagesstunden verteilt werden (s. Kapitel 2.1.3.2). Für diese sechs Anlagenstandorte kann die Verteilung von Anzahl und -dauer der induzierten Abschaltungen in jeder Tagesstunde eines Jahres zur Verfügung gestellt werden, um auf dieser Basis die jährlichen Stromproduktionseinbußen zu berechnen. Zusätzlich können aus diesen Daten Angaben zum Verhältnis von Flügen im Nahbereich um die WEA und zur Anzahl und Dauer von bedarfs-gerechteten Abschaltungen, ausgelöst durch den Rotmilan, gezogen werden. Diese Angaben werden im Folgenden genutzt, um Abschaltereignisse auch an anderen Anlagenstandorten prognostizieren zu können. Von den IDF-Standorten stehen allerdings mit einer Ausnahme keine Informationen über die Anzahl sowie die Entfernung von Rotmilanhorsten in WEA-Nähe zur Verfügung. Es können somit keine direkten Rückschlüsse von der Brutplatzverteilung in der Anlagenumgebung auf die Häufigkeit und Dauer der erfolgten Abschaltereignisse gezogen werden.

Um diese Relation herzustellen und um daraufhin die Flugaktivität in WEA-Nähe in Abhängigkeit von der Brutplatzsituation prognostizieren zu können, werden daher eine Reihe von im Internet verfügbaren Raumnutzungsbeobachtungen/-analysen (RNA) des Rotmilans ausgewertet (s. Kapitel 2.1.4). Die RNA enthalten Angaben zu den Flugbewegungen im Nahbereich um die WEA, zu besetzen Brutplätzen im Umfeld sowie zur Landnutzung, Standortparametern, welche die Flugaktivität maßgeblich beeinflusst. Durch die Ermittlung des Ausmaßes der Flugaktivität in Abhängigkeit von diesen Standortparametern kann die Anzahl der Flugbewegungen im Nahbereich an (potenziellen) WEA-Standorten überschlägig geschätzt werden, sofern Angaben der relevanten Standortparameter vorhanden sind. Unter Berücksichtigung des ermittelten Verhältnisses von Flügen und Abschaltungen sowie der artspezifischen Verteilung der Flugaktivität über das Jahr und den Tag können analog zum Vorgehen in Kapitel 2.1.3.2 Abschaltereignisse für die einzelnen Tagesstunden des Jahres prognostiziert werden.

Anschließend werden Szenarien beschrieben, die auf verschiedenen Intensitäten der in der Realität erwartbaren Flugaktivität basieren und unterschiedlichen Ausprägungen der relevanten Standortparameter zugeordnet werden können. Auf dieser Basis werden die jährlichen Stromproduktionseinbußen von Standorten mit mittlerer bis hoher Flugaktivität betrachtet (s. Abbildung 1). Dies dient der Einordnung der zuvor ausgewerteten IDF-Standorte und erlaubt darüber hinaus eine erste, wenn auch grobe, Einschätzung der finanziellen Auswirkungen bedarfsgerechter Abschaltungen (für den Rotmilan) an potenziellen neuen Anlagenstandorten.

Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH
The Regional Planning and Environmental Research Group

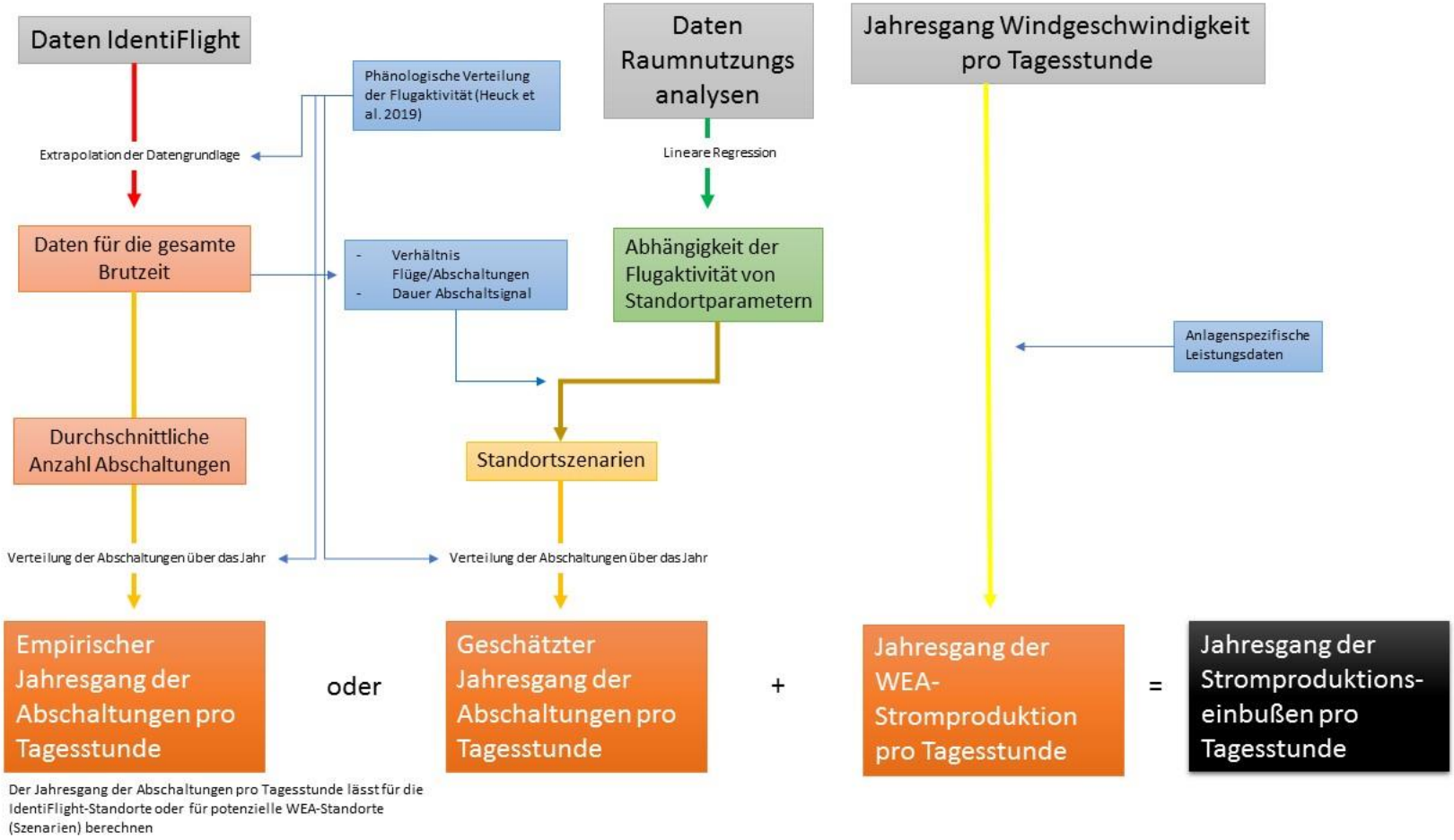


Abbildung 1: Schematischer Ablauf der Ermittlung der Relation der Flugaktivität zur Ertragseinbuße

2.1.2 Allgemeine saisonale und diurnale Verteilung der Flugaktivität von Rotmilanen

Für die Extrapolation der Datengrundlage aus den zeitlich begrenzten IdentiFlight-Testreihen sowie für die Verteilung der erwartbaren Abschaltereignisse über die einzelnen Tagesstunden eines Jahres muss die artspezifische Phänologie der Flugaktivität der Zielart Rotmilan berücksichtigt werden. Die Flugaktivität verteilt sich weder gleichmäßig über den Tag noch über die Brutdauer. Es ist daher, auch aufgrund entsprechend unterschiedlicher Verteilung der Windgeschwindigkeiten, von Bedeutung in welchem Zeitraum die Flugbewegungen stattgefunden haben bzw. welcher Zeitraum durch Prognosen abgedeckt werden soll. Nachfolgend wird daher die saisonale und diurnale Verteilung der Flugaktivität von Rotmilanen als Grundlage für die weiteren Auswertungsschritte dargestellt.

Für die Prognose der erwartbaren bedarfsgerechten Abschaltungen für Rotmilane in Deutschland wird eine durchschnittliche Anwesenheit im Brutrevier vom 01. März bis zum 30. September eines jeden Jahres angenommen. Rotmilane kommen etwa Anfang März in ihren Brutrevieren in Mitteleuropa an und brechen im Herbst wieder zu den Überwinterungsgebieten, vornehmlich in Südfrankreich und Spanien, auf (KRÜGER 2009).

Die Brutperiode des Rotmilans lässt sich in vier Phasen einteilen (s. Tabelle 1). Dies beruht auf Durchschnittswerten, wie sie auch in der umfangreichen Telemetriestudie von HEUCK *et al.* (2019) ermittelt wurden. Zu Beginn der Brutdauer halten sich die Rotmilane überwiegend in der Nähe des zukünftigen Horstes auf, um dort zu balzen und das Revier vor potenziellen Konkurrenten zu schützen. Während der eigentlichen Brut sitzt das Weibchen größtenteils auf dem Horst, um die Eier auszubrüten. In dieser Phase kümmert sich das Männchen um die Versorgung des Weibchens. Die beiden ersten Brutphasen sind durch eine vergleichsweise geringe Flugaktivität der Rotmilane gekennzeichnet. Sobald die Jungen geschlüpft sind, beteiligt sich auch das Weibchen an der Jagd, um den gestiegenen Futterbedarf zu decken. Die Flugaktivität der Rotmilane erreicht in dieser Brutphase ihren Höhepunkt. Während der Nachbrutzeit nimmt die Flugaktivität wieder allmählich ab, gleichzeitig verlieren die Rotmilane nach und nach die Bindung zum Horst. Die in Tabelle 1 aufgeführte Verteilung der Flugaktivität ist vergleichbar mit der in mehreren Studien nachgewiesenen Verteilung über das Jahr (MAMMEN *et al.* 2013; GSCHWENG *et al.* 2014; PFEIFFER & MEYBURG 2015). In den von HEUCK *et al.* (2019) ermittelten und in dieser Arbeit verwendeten Angaben fließen in jeder Brutphase die Flugbewegung sowohl von männlichen als auch von weiblichen Rotmilanen ein. Die Flugaktivität der beiden Geschlechter verläuft dabei allerdings unterschiedlich (insbesondere während der Brutzeit) (SPATZ *et al.* 2019). Für diese Auswertungen wird somit jeweils die Verteilung der Flugaktivität eines Rotmilanpaares betrachtet.

Tabelle 1: Flugaktivität des Rotmilans während der Brutphasen in Mitteleuropa
Geändert aus HEUCK *et al.* (2019)

Brutphase	Beginn	Ende	Anzahl Tage	Anteil Jahresflug-aktivität [%]	Anteil Jahresflugakti-vität pro Tag [%]
Balzzeit	15. März	14. April	32	10	0,31
Brutzeit	15. April	19. Mai	36	14	0,39
Aufzuchtzeit	20. Mai	30. Juni	42	37	0,88
Nachbrutzeit	01. Juli	30. September	92	39	0,42

Für die weiteren Berechnungen in dieser Studie wurde als Beginn der Balzzeit der 01. März angenommen

Die Flugaktivität von Rotmilanen folgt zudem einer Kurve über den Tag, die in den Mittags- und frühen Nachmittagsstunden ihr Maximum hat. In Richtung Sonnenauf- bzw. Untergang flacht die Kurve hingegen deutlich ab (s. Abbildung 2). Der Verlauf der täglichen Flugaktivität entzerrt sich über die Brutdauer leicht in Abhängigkeit der Tagesslänge (HEUCK *et al.* 2019).

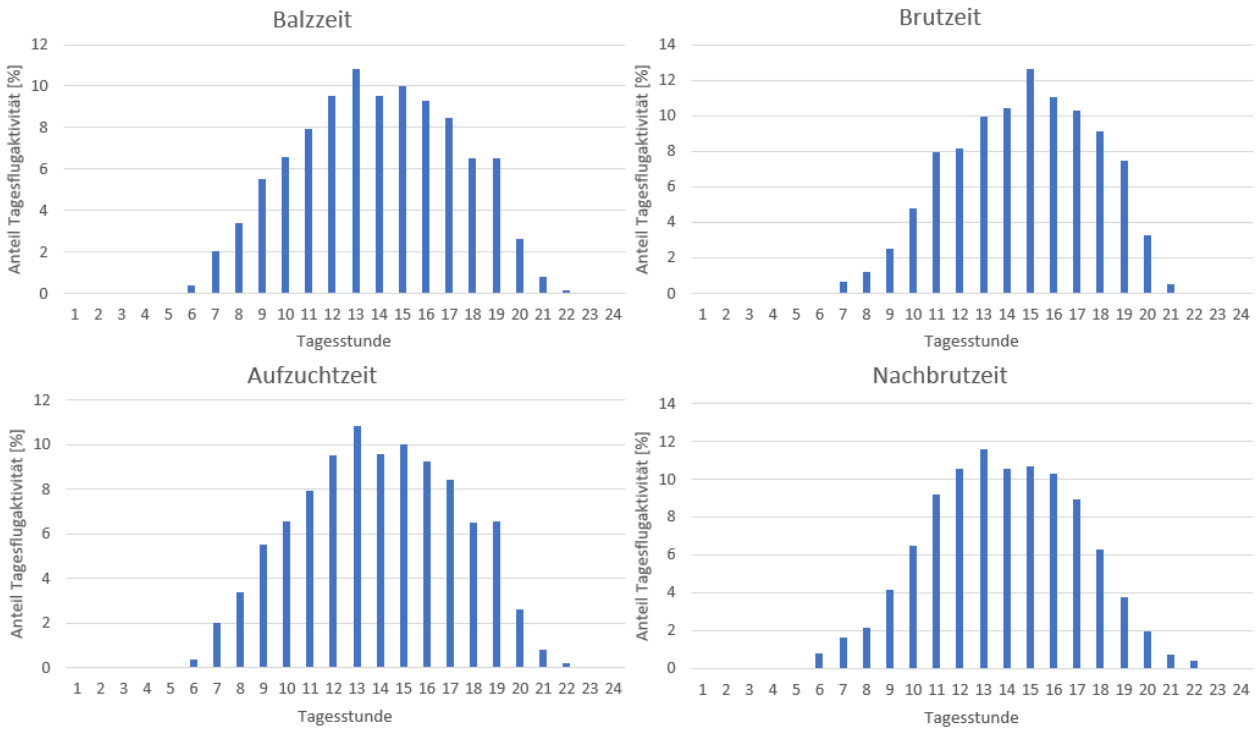


Abbildung 2: Verteilung der Rotmilan-Flugaktivität über einen Tag während der vier Brutphasen des Rotmilans
Verändert aus HEUCK *et al.* (2019)

2.1.3 Prognose von Abschaltereignissen über die gesamte Brutdauer

Dieser Teil der Auswertung befasst sich mit den Daten, die während der IdentiFlight (IDF)-Testreihen erhoben wurden. Ziel ist die Vervollständigung der ermittelten Abschaltereignisse über

die gesamte Brutdauer, die jeweils auf den standortspezifischen Werten von Abschalthäufigkeit und -dauer basiert. Die Verteilung der Abschaltungen über das Jahr und den Tag orientiert sich an dem artspezifischen Verlauf der Flugaktivität des Rotmilans (siehe voriges Kapitel). Die ermittelten Durchschnittswerte bezüglich des Verhältnisses von Flügen zu Abschaltungen sowie der Abschaltdauer dienen darüber hinaus als Hilfsdaten für die Szenarienbildung (s. Kapitel 2.1.6).

2.1.3.1 Aufbereitung der Datengrundlage

Die Aufbereitung sowie die Analyse der Daten erfolgte mit Hilfe von *Microsoft Excel* sowie der Programmiersprache *R* in der Version 4.0.3 (R CORE TEAM 2020).

Empirische Daten von erfassten Rotmilanflügen und Abschaltungen stehen von insgesamt sechs Standorten zur Verfügung, an denen in den Jahren 2018 bis 2020 das Kamerasystem IdentiFlight[1] (IDF) getestet wurde. Diese Daten repräsentieren derzeit die einzige Quelle ereignisbezogener Abschaltungen, die durch Rotmilane an realen Standorten ausgelöst wurden und die somit eine Quantifizierung der Relation zwischen Flugaktivität und Abschalthäufigkeit bzw. -dauer erlauben. Durch die Extrapolation dieser Datensätze über die gesamte Brutdauer des Rotmilans können somit Stromproduktionseinbußen auf der Basis von tatsächlich erfassten Daten ermittelt werden (s. Kapitel 2.1.3.2).

Bei IDF handelt es sich um ein System, dass mit Hilfe einer Kombination von mehreren Weitwinkelkameras mit einer beweglichen Stereo-Telekamera in der Lage ist, verschiedene Zielarten zu identifizieren und zu lokalisieren. Sobald sich ein Individuum einem virtuellen Schutz-Zylinder, dessen Ausmaße abhängig von der Größe der WEA sind, nähert und potenziell auf Kollisionskurs ist, erteilt das System ein Abschaltsignal, das dazu führt, dass sich die WEA in den Trudelbetrieb[2] begibt, um so eine Kollision zu verhindern (s. Abbildung 3). Die Zielart Rotmilan kann zuverlässig bis zu einer Entfernung von ca. 750 m identifiziert werden.

Der Funktionsnachweis des Systems wurde durch die umfangreichen Tests[3] erbracht, der Abschlussbericht wird für Anfang des Jahres 2021 erwartet. IDF soll in den folgenden Auswertungen exemplarisch für mehrere Kamera-basierte Systeme stehen, die sich aktuell in der Entwicklung befinden (KNE 2020).

[1] https://cdn2.hubspot.net/hubfs/195771/IdentiFlight%20e3%20release%209.4.18.pdf (abgerufen am 21.10.2020)

[2] Erläuterung und rechtliche Einordnung unter:
https://www.naturschutz-energiewende.de/fragenundantworten/233-trudelbetrieb-blattspitzengeschwindigkeit-windenergieanlagen-kollisionsrisiko-voegel-fledermaeuse/ (abgerufen am 30.11.2020)

[3] https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/Reichenbach_Reers_KNE-Konferenz.pdf (abgerufen am 21.10.2020)

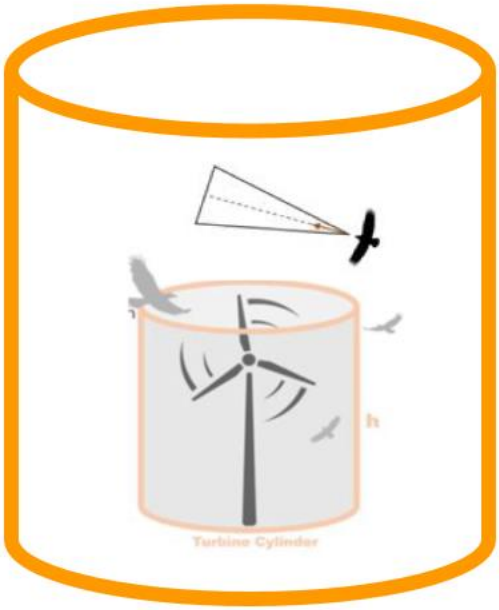


Abbildung 3: Schematische Darstellung des inneren und äußeren Abschaltzylinders des IDF-Systems mit jeweils unterschiedlichen Abschaltalgorithmen

An den sechs IDF-Standorten wurden an 30 bis 80 zusammenhängenden Tagen Daten erhoben (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Dauer der IDF-Testphasen
Ergänzungen

IDF-Standort	Beginn des Tests	Ende des Tests	Anzahl Tage
B1	01.07.2019	19.09.2019	80
B2	15.08.2018	18.10.2018	47
C	30.04.2020	28.05.2020	30
D	15.08.2018	18.10.2020	80
E	12.07.2019	10.08.2019	30
F	16.04.2020	16.06.2020	63

Die Verteilung der Standorte über die Bundesrepublik Deutschland ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Standorte B1 und B2 liegen in so einer räumlichen Nähe zueinander, dass ihre Standorte zusammengefasst sind. Standort A steht stellvertretend für einen Standort mit besonders hoher mittlerer Windgeschwindigkeit. In diesem Teil Deutschlands fand keine IDF-Testreihe statt, dennoch wird dieser Standort zum Vergleich in die anschließende Auswertung aufgenommen (s. Kapitel 2.2.1).

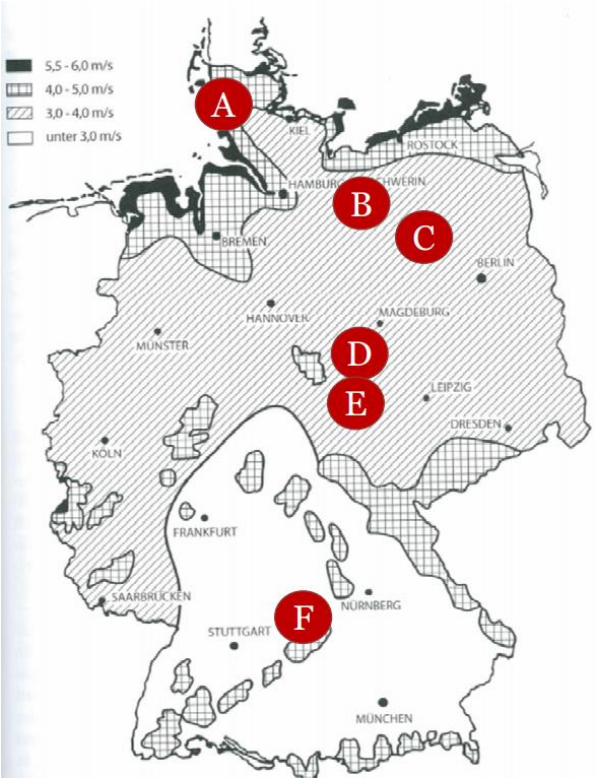


Abbildung 4: **Lage der IDF-Standorte in den Regionen Deutschlands mit unterschiedlicher mittlerer Windgeschwindigkeit**
An Standort B wurden zwei IDF-Testreihen in geringer Entfernung zueinander durchgeführt. An Standort A fanden keine Test statt

An den jeweiligen Standorten wurde über die Dauer der Testphase die tatsächlichen Flugbewegungen von Rotmilanen bis ca. 750 m um die WEA erfasst. Zusätzlich wurde die Anzahl und Dauer der Abschaltungen erfasst, die durch die Zielart Rotmilan ausgelöst wurde. Die Daten der Flugbewegungen wurden für den vorliegenden Zweck dahingehend aufbereitet, dass nur die Flüge im 350 m-Radius um die jeweilige WEA betrachtet werden. Hierdurch werden einerseits Flüge ausgeklammert, die in so großer Entfernung von der WEA verliefen, dass sie in Bezug auf das Kollisionsrisiko irrelevant waren. Andererseits umfasst der 350 m-Radius denjenigen Bereich, der von verschiedenen Kamerasystemen überwacht werden kann bzw. überwacht werden muss, um rechtzeitig noch Abschaltsignale auslösen zu können.

Beispielhafte Segregation von Flugbewegungen unterhalb von 40 m Flughöhe

Flüge deutlich oberhalb des Rotors stellen in der Regel kein Kollisionsrisiko dar. Entsprechend werden durch Flüge in großen Höhen keine Abschaltungen durch das IDF-System veranlasst (s. Abbildung 3). Relevant ist auch die Höhe der Rotorunterkante über Grund, die bei modernen WEA-Typen bis ca. 90 m hoch sein kann. Laut HEUCK *et al.* (2019) findet etwa die Hälfte der Rotmilanflüge unterhalb von 50 m statt. Dementsprechend kann angenommen werden, dass für einen Großteil der Rotmilanflugbewegungen kein Kollisionsrisiko mit (neuen) WEA besteht. So haben auch aktuelle Telemetriestudien beim Uhu (*Bubo bubo*) ergeben, dass nahezu alle Flüge

unterhalb von 50 m stattfinden (GRÜNKORN & WELCKER 2019; MIOSGA *et al.* 2019). Für den Uhu wird auf Grundlage dieser Ergebnisse nicht mehr von einem generellen Kollisionsrisiko mit WEA ausgegangen.

Technisch können Kamerasysteme wie IDF potenziell auch niedrige Flüge gesondert bewerten und ggf. zukünftig keine Abschaltungen mehr veranlassen (der Schutzzylinder in Abbildung 3 würde quasi ein Stück vom Boden abgehoben). Um die Auswirkungen auf den Abschaltungsumfang bzw. Ertragsverlust abzuschätzen, wenn der Faktor Flughöhe einbezogen wird, werden beispielhaft aus dem Datensatz des Standort F alle Flugbewegungen, die durchgehend unterhalb von 40 m über Oberkante Grund bleiben, herausgenommen. Es verbleiben somit nur noch Flugbewegungen, die in Höhen stattgefunden haben, die als potenziell kollisonsrisikoreich definiert wurden.

2.1.3.2 Prognose der erwartbaren Flüge im Nahbereich sowie der erwartbaren Abschaltungen

Je nach Dauer der Testreihen stehen von den IDF-Standorten Angaben zur Anzahl und zur Dauer der Abschaltungen für unterschiedlich große Zeiträume zur Verfügung (s. Tabelle 2). Um die gesamten erwartbaren Abschaltungen an den sechs IDF-Standorten zu berechnen, müssen die tatsächlichen Abschaltungen während der Testphase extrapoliert werden. Dabei spielt es eine Rolle in welchem Zeitraum der Brutdauer des Rotmilans die Tests stattgefunden haben (s. Kap. 2.1.2).

Für diejenigen Brutphasen, innerhalb derer die IDF-Tests (teilweise) durchgeführt wurden, kann ein Durchschnittswert für Flüge bzw. Abschaltungen pro Tag per Dreisatz berechnet werden. Für die übrigen Brutphasen kann dieser Wert anschließend unter Berücksichtigung der jeweiligen Flugaktivität ermittelt werden. Es wird angenommen, dass die Anzahl der Abschaltungen positiv mit der Anzahl der Flüge (Flugaktivität) korreliert.

$$Abschaltungen\ Brutphase\ 1 * \frac{Flugaktivität\ Brutphase\ 2}{Flugaktivität\ Brutphase\ 1} = Abschaltungen\ Brutphase\ 2$$

Abschaltungen Brutphase 1 = vollständig bzw. teilweise erfasste und extrapolierte Abschaltungen während einer der vier Brutphasen

Flugaktivität Brutphase = Anteil der Flugaktivität einer Brutphase an der gesamten Flugaktivität des Jahres (nach HEUCK et al. (2019))

Um anschließend die durchschnittlichen Abschaltungen für jede einzelne Tagesstunde in diesem Zeitraum prognostizieren zu können, wird die tägliche Verteilung der Rotmilan-Flugaktivität berücksichtigt, wie sie in HEUCK *et al.* (2019) ermittelt wurde (s. Kap. 2.1.2). Unterschieden wird jeweils zwischen den vier Brutphasen. Mit Hilfe der prozentualen Flugaktivität pro Tagesstunde wird die durchschnittliche Anzahl der Abschaltungen pro Tagesstunde berechnet.

$$Abschaltungen\ pro\ Tag * Flugaktivität\ Tagesstunde\ X = Abschaltungen\ Tagesstunde\ X$$

Abschaltungen pro Tag = durchschnittliche Anzahl Abschaltungen pro Tag

Flugaktivität Tagesstunde X = Anteil der täglichen Flugaktivität für die jeweilige Tagesstunde (nach HEUCK et al. (2019)

Abschaltungen Tagesstunde X = durchschnittliche Anzahl Abschaltungen in der jeweiligen Tagesstunde

In Tabelle 3 ist dieser Rechenschritt exemplarisch für den Standort B1 während der Balzzeit dargestellt. Während dieser Brutphase finden im Schnitt 1,7 Abschaltungen pro Tag statt. Die höchste Flugaktivität gibt es während der Tagesstunden 13 bis 18. Während dieser Tagesstunden finden im Schnitt jeweils etwas über 10 % aller täglichen Flüge statt. Dies entspricht unter Annahme einer Korrelation zwischen Flugaktivität und Anzahl der Abschaltungen durchschnittlich jeweils rund 0,2 Abschaltungen pro Tag während dieser Tagessstunden. Über die gesamte Balzzeit betrachtet kommt es somit rund alle fünf Tage zu einer Abschaltung während dieser Tagesstunden; in der Tagesstunde 19, während der die Flugaktivität allgemein bereits abnimmt (HEUCK *et al.* 2019), nur rund alle 10 Tage. Während der Aufzuchtzeit finden am Standort B1 durchschnittlich 4,7 Abschaltungen pro Tag statt. Dementsprechend finden in dieser Phase im Schnitt fast dreimal so viele Abschaltungen pro Tagesstunde statt wie während der Balzzeit.

Tabelle 3: Exemplarische Verteilung der durchschnittlichen Anzahl Abschaltungen pro Tag über die einzelnen Tagesstunden am Standort B1 während der Balzzeit
Anteil Flugaktivität nach HEUCK *et al.* (2019), 1,7 Abschaltungen pro Tag

Tagesstunde	Anteil tägliche Flugaktivität [%]	Durchschnittliche Anzahl Abschaltungen
1	0,0	0,00
2	0,0	0,00
3	0,0	0,00
4	0,0	0,00
5	0,0	0,00
6	0,0	0,00
7	0,0	0,00
8	0,9	0,01
9	2,8	0,05
10	3,3	0,06
11	5,5	0,09
12	8,6	0,15
13	10,1	0,17
14	12,5	0,21
15	12,7	0,22
16	12,1	0,21
17	11,7	0,20
18	11,2	0,19
19	6,5	0,11
20	1,9	0,03
21	0,0	0,00
22	0,0	0,00
23	0,0	0,00
24	0,0	0,00

Kommt es laut den Berechnungen zu einer oder mehreren Abschaltungen in einer Tagesstunde, so wird die Anzahl mit der ermittelten durchschnittlichen Dauer des Abschaltsignals multipliziert. Somit erhält man eine Tabelle, die den Jahresgang der stündlichen Abschaltanzahlen und -dauern aufführt.

Für jeden Standort werden die Zeiträume zwischen dem 01. März und 30. September, die nicht durch die Testphasen abgedeckt wurden, mit Hilfe der durchschnittlich erwartbaren Abschaltungen ergänzt. Darüber hinaus ist es möglich, den gesamten Zeitraum ausschließlich mit der Verteilung der durchschnittlich erwartbaren Abschaltungen abzudecken. Durch den Vergleich dieser

beiden Vorgehensweisen können eventuelle Einflüsse der extrapolierten Daten auf die Berechnung der Stromproduktionseinbußen ermittelt werden. So finden die Abschaltungen in der Realität zum Teil gehäuft in kurzen Abständen statt, wohingegen die prognostizierten Abschaltungen einer gleichmäßigen Verteilung unterliegen.

Die Jahrestabellen der IDF-Standorte, die die tatsächlich erfasste Verteilung der Abschaltungen für die Zeiträume der Testreihen enthalten, sind mit dem Kürzel „real" gekennzeichnet (für real erfasste Abschaltungen). Die Jahrestabellen, welche allein auf der Verteilung der durchschnittlich erwartbaren Abschaltungen basieren, erhalten das Kürzel „prog" (für ausschließlich prognostizierte Abschaltungen).

Zur Übersicht und zum Vergleich zwischen den Varianten „prog" und „real" sind Auszüge des Jahresgangs der Abschaltereignisse am Standort B1 im Anhang aufgeführt.

2.1.4 Abhängigkeit der Flugaktivität von verschiedenen Standortparametern

Die Anzahl der erwartbaren bedarfsgerechten Abschaltung ist in erster Linie abhängig von der Flugaktivität der Zielarten im Nahbereich der WEA. Die Flugaktivität wiederum ist abhängig von verschiedenen Standortparametern. Von den IDF-Standorten ist zwar die Flugaktivität bekannt, nicht jedoch die Ausprägung relevanter Standortparameter (insbesondere der umliegenden Brutvorkommen). Die Ergebnisse der IDF-Standorte lassen sich somit nicht ohne weiteres auf andere potenzielle WEA-Standorte übertragen.

Ziel dieses Teils der Auswertungen ist daher die Ermittlung und Quantifizierung der Abhängigkeit der Flugaktivität des Rotmilans von verschiedenen Standortparametern in Anlagennähe unter Nutzung weiterer Datenquellen. Dadurch kann die erwartbare Flugaktivität an unterschiedlichen Standorten geschätzt werden. Ebenso kann auf dieser Basis eine vergleichende Einordnung der Flugaktivitätsdaten der IDF-Standorte erfolgen. Mit Hilfe der erwartbaren Abschaltungen, basierend auf den Ergebnissen der Auswertungen aus Kapitel 2.1.3, können dann die jährlichen Stromeinbußen an repräsentativen Standorten (Szenarien) prognostiziert werden (s. Kapitel 2.1.6).

2.1.4.1 Aufbereitung der Datengrundlage

Die Aufbereitung sowie die Analyse der Daten erfolgte mit Hilfe von *Microsoft Excel* sowie der Programmiersprache *R* in der Version 4.0.3 (R CORE TEAM 2020).

Als zusätzliche Datenquelle neben den IDF-Ergebnissen wurden im Internet verfügbare Raumnutzungsanalysen (RNA) von 17 Windparkprojekten, verteilt auf die Bundesländer Baden-Württemberg, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt, ausgewertet. Die Anzahl der betrachteten (potenziellen) WEA-Standorte beträgt 73. Die Erfassungen fanden in den Jahren 2015 bis 2019 statt und orientierten sich bei der Dauer und den Zeitpunkten der Kartiertermine jeweils an anerkannten Empfehlungen (z.B. NLT 2014; ISSELBÄCHER *et al.* 2018).

Flugbewegungen

Die RNA enthalten Angaben zu den während der Erfassungsterminen beobachteten Rotmilanflugbewegungen. Diese sind standardmäßig in einem Gitternetz mit Zellengrößen von 200 m-Kantenlänge dargestellt (s. Abbildung 5). Für die vorliegende Auswertung wurden die Flugbewegungen im 350 m-Radius um die WEA ermittelt.

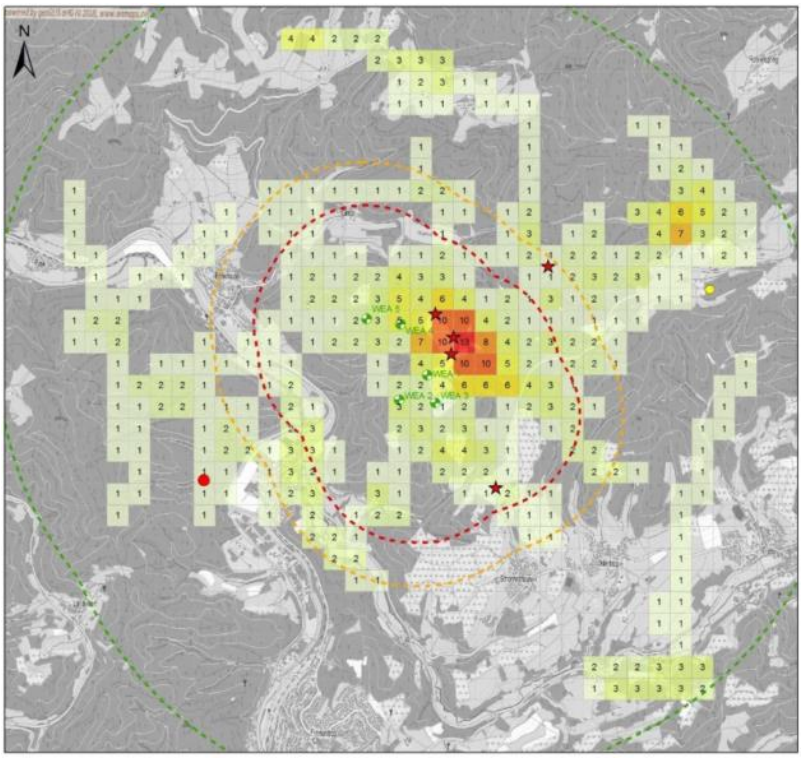


Abbildung 5: **Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse einer Raumnutzungsanalyse (RNA)**
Roter Punkt = Rotmilanhorst; Grüne Punkte = Potenzielle WEA-Standorte; Sterne = Beobachtungspunkte

Die erfassten Flugbewegungen wurden für die weiteren Auswertungsschritte sowie zur besseren Vergleichbarkeit auf durchschnittliche Flugbewegungen pro Tag während der Brutdauer des Rotmilans hochgerechnet. Als Betrachtungszeitraum wird wie bei den IDF-Daten der Zeitraum vom 01. März eines jeden Jahres bis zum 30. September definiert.

Für die Berechnung der durchschnittlichen Flugbewegungen pro Tag spielt neben der Anzahl der Erfassungstermine auch deren Verteilung über den Tag eine wichtige Rolle (s. Kap. 2.1.2). Raumnutzungsbeobachtungen finden in der Regel zu Tageszeiten statt, in denen die Flugaktivität sehr hoch ist, um in der begrenzten Anzahl von Terminen ein möglichst aussagekräftiges Bild der Flugbewegungen zu erhalten. Eine einfache Extrapolation der tatsächlich erfassten Flugbewegungen auf den Mittelwert eines Tages würde zu einer deutlichen Überschätzung der Flugaktivität führen. Aus diesem Grund wurde auf der Basis der Tagesphänologien nach HEUCK *et al.* (2019)zusätzlich berechnet, wie viel Prozent der täglichen Flüge während der jeweiligen

Erfassungstermine theoretisch beobachtet wurden. Dabei zeigte sich, dass während den durchschnittlich sechsstündigen RNA-Terminen bereits ein Großteil der täglichen Flugbewegungen potenziell beobachtet werden konnte (im Schnitt 55 bis 60 %), der daraufhin gewichtet auf die gesamte Tageslänge hochgerechnet wurde.

Darüber hinaus fanden die Beobachtungen größtenteils während guter Witterungsverhältnisse statt. Im Gegensatz zur Tagesszeit hat die Witterung insgesamt nur einen geringen Einfluss auf die Flugaktivität von Rotmilanen (HEUCK *et al.* 2019). Eine etwaige witterungsbedingte Überschätzung der Flugaktivität wurde für eine konservative Betrachtung der Fragestellung in Kauf genommen.

Des Weiteren können aus den RNA weitere Informationen zu nachstehenden Habitatparametern gewonnen werden, die das jeweilige Untersuchungsgebiet charakterisieren und die Flugaktivität des Rotmilans maßgeblich beeinflussen.

Entfernung zwischen WEA-Standort und Rotmilanhorst

Die Größe des Aktionsraums von Rotmilanpaaren hängt von unterschiedlichen Faktoren wie der Nahrungsverfügbarkeit und der Revierdichte ab und verändert sich im Laufe des Jahres deutlich. Größtenteils beschränken sich die Flüge der Rotmilane jedoch auf eine Entfernung von ca. 1.500 m vom Horst (BUSCHE 2008; WALZ 2008; HEUCK *et al.* 2019). Es ist daher zu erwarten, dass die Flugaktivität umso höher ist, je geringer die Entfernung zu einem Rotmilanhorst ist. Dies folgt auch bereits aus geometrischen Gründen (SPRÖTGE *et al.* 2018).

Aus diesem Grund wurde jeweils der Abstand der 73 WEA-Standorte und den im Umfeld erfassten Rotmilanhorsten ermittelt.

Anzahl Rotmilanhorste im Umfeld des WEA-Standorts

Es wird erwartet, dass sich die Flugaktivität im untersuchten Bereich mit der Anzahl der Rotmilane in der näheren Umgebung potenziell erhöht. Bei der Wahl der Betrachtungsradien werden der 1.500 m-Radius um den Horst als Hauptaktivitätsraum definiert. Gleichzeitig wird damit die Abstandsempfehlung der Länderarbeitsgemeinschaften der Vogelschutzwarten von 1.500 m zwischen Rotmilanrevieren und WEA aufgegriffen (LAG VSW 2015). Als zweiter Betrachtungsraum wurde die Entfernung vom Revierzentrum bis 4.000 m festgelegt. Hierdurch werden nahezu die gesamten weiteren Flüge während der Brutsaison berücksichtigt (HEUCK *et al.* 2019). Diese Entfernung entspricht zudem dem geforderten Prüfbereich der LAG VSW (2015).

In beiden Radien um die WEA-Standorte wurde die Anzahl der Rotmilanhorste ermittelt

Landnutzung im Nahbereich um die WEA-Standorte

Die Landnutzung und die Habitatqualität haben großen Einfluss auf die Größe und die Ausdehnung des Aktionsraums von Rotmilanen (WALZ 2005; PFEIFFER & MEYBURG 2015). Da Rotmilane im Offenland jagen, werden Grünländer und Ackerflächen überproportional aufgesucht. Waldflächen werden tendenziell gemieden (HEUCK *et al.* 2019). Die verwendeten Informationen zur

Landnutzung stammen aus den Daten zur Bodenbedeckung des CORINE Land Cover[4] Projekts und liegen als shape-Datei vor. Die aktuellsten Daten des CORINE Land Cover Projekts stellen die Bodenbedeckung des Jahres 2018 dar. Es wird angenommen, dass die dargestellte Landnutzung repräsentativ für alle WEA-Standorte während der RNAs ist, auch wenn Landnutzungsänderung nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Dargestellt werden Bodenbedeckungen mit einer Größe von mindestens 25 ha. Die geometrische Genauigkeit liegt bei ungefähr 100 m.

Für die Habitatparameter der Landnutzung werden die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Bodenbedeckungskategorien der Corine Daten im 350 m-Radius um die WEA ermittelt. In die weitere Betrachtung gehen die Anteile an Offenland (Acker, Weiden und Wiesen zusammengefasst) sowie Waldfläche im Nahbereich um die WEA ein.

Der prozentuale Anteil der Landnutzungskategorie im Nahbereich der WEA ergibt sich aus folgender Formel:

$$Prozentualer\ Anteil = \left(\frac{Fläche\ Kategorie}{Gesamtfläche\ Betrachtungsraum}\right) * 100$$

2.1.5 Lineare Regression

Die Abhängigkeit der Flugaktivität von den ausgewählten Standortparametern wird mit Hilfe einer Regressionsanalyse ermittelt. Die Übersicht der erklärenden Variablen ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: WEA-Standortparameter
Ergänzungen

Variable	Einheit
Rotmilanhorste im 1.500 m Radius	Anzahl
Rotmilanhorste im 4.000 m Radius	Anzahl
Entfernung zum nächstgelegenen Rotmilanhorst	Meter
Anteil Offenland im 350 m Radius	Prozent
Anteil Waldfläche im 350 m Radius	Prozent

Der Anteil Offenland stellt die Summe der Anteile von Acker- und Grünlandflächen im Betrachtungsraum dar

Da sowohl die abhängige Variable als auch die erklärenden Variablen ratioskaliert[5] sind, wird eine lineare Regression durgeführt (LEYER & WESCHE 2007; DORMANN & KUHN 2008).

Um den Schnittpunkt (intercept) und die Steigung der Regressionslinie zu berechnen, wurde die Methode der „kleinsten Quadrate“ (least squares) verwendet. Dabei wird der Verlauf der Linie so

[4] https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover (abgerufen am 01.10.2020)

[5] Ratioskalierte Variablen haben einen natürlichen Nullpunkt. Zusätzlich lassen sich Aussagen über die Verhältnisse der Merkmalsausprägungen treffen. Eine Entfernung von 100 m ist tatsächlich doppelt so groß wie eine Entfernung von 50 m

gewählt, dass die Summe der quadrierten Residuen (Abweichung zwischen Datenpunkt und Modellkurve) maximal klein bleibt (LEYER & WESCHE 2007).

Zunächst werden für die einzelnen unabhängigen Variablen univariate logistische Regressionen durchgeführt. Das Modell wird anschließend auf Signifikanz (p-Wert < 0,05) und den „Erklärwert" hin untersucht. Der Anteil der erklärten Varianz und damit der Nutzen des Modells werden über das Pseudo-Bestimmtheitsmaß R^2 nach Nagelkerke angegeben. R^2 kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 bedeutet, dass die unabhängige Variable ein Vorkommen exakt vorhersagt (BRUIN 2006).

Mehrere erklärende Variablen können anschließend in einem Modell zusammengefasst werden und als multiple lineare Regression getestet werden. Korrelieren zwei Variablen miteinander, schmälert dies den Anteil der erklärten Varianz innerhalb der logistischen Regression. Darüber hinaus lässt starke Korrelation und damit verbundene Multikollinearität die Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse fehlerhaft werden. Auf die Verwendung von zwei Variablen mit hoher Korrelation muss in einem multiplen Modell daher verzichtet werden (BACKHAUS *et al.* 2006; DORMANN *et al.* 2013). Als Indikator für Multikollinearität dient der Korrelationskoeffizient. DORMANN *et al.* (2013) ermittelten in ihrer Studie einen rho-Grenzwert von 0,7.

2.1.5.1 Varianzanalyse

Eine zusätzliche Betrachtung findet für Standorte statt, die sich gänzlich in geschlossenen Waldbeständen befinden.

Mit Hilfe einer Varianzanalyse soll überprüft werden, ob sich die Flugaktivität an Wald- und Nicht-Waldstandorten signifikant unterscheiden.

Als statistischer Test zum Vergleich zweier unabhängiger Stichproben wurde der U-Test nach Mann und Whitney gewählt (SACHS 2004). Diese Test vergleicht die Mediane von zwei nicht-parametrischen, unverbundenen Proben (MEDDIS 1984; FOWLER *et al.* 1998). Dabei wird geprüft, ob die Unterschiede zwischen den beiden Stichproben zufällig oder nicht zufällig sind.

Zur Berechnung der Prüfgröße U werden die Werte der beiden Stichproben (n_1 und n_2) in eine gemeinsame Rangfolge gebracht. Anschließend werden die Summen der Rangzahlen (R_1 und R_2) der jeweiligen Stichproben ermittelt. U_1 und U_2 werden nach den folgenden Gleichungen berechnet:

$$U_1 = mn\,\frac{m(m+1)}{2} - R_1$$

$$U_2 = mn\,\frac{m(m+1)}{2} - R_2$$

Die kleinere der beiden Größen U_1 und U_2 ist die gesuchte Prüfgröße, anhand der die Signifikanz aus der entsprechenden Tabelle (z. B. SACHS (2004)) abgelesen werden kann.

2.1.6 Szenarienbildung

Ziel dieses Auswertungsschritts ist die Ableitung repräsentativer Brutplatzsituationen in Bezug auf geplante WEA-Standorte, denen erwartbare Größenordnungen an Flugaktivität und Abschaltungshäufigkeiten zugeordnet werden (Szenarien). Diese Szenarien basieren auf unterschiedlichen Ausprägungen der analysierten Standortparameter, die eine entsprechende Flugaktivität des Rotmilans erwarten lassen (s. Kapitel 2.1.4). Auf dieser Grundlage können analog zu dem Vorgehen bei den sechs IDF-Standorten der Jahresgang der Abschaltereignisse prognostiziert und somit die jährlichen Stromproduktionseinbußen berechnet werden. Die ermittelten Einbußen können als erste grobe Einschätzung der finanziellen Auswirkungen von bedarfsgerechten Abschaltungen (für den Rotmilan) für potenzielle WEA-Standorte herangezogen werden.

Für die Szenarienbildung werden verschiedene Werte von durchschnittlichen Flügen pro Tag ausgewählt, die das Ausmaß der Flugaktivität im Nahbereich von WEA-Standorten repräsentieren, und unterschiedlichen Ausprägungen der analysierten Habitatparameter zugeordnet. Die Werte der täglichen Flüge können mit Hilfe der an den IDF-Standorten ermittelten Relationen von Flugaktivität zu Abschaltungen auf Werte der täglichen Abschaltungen umgerechnet werden. Die Berechnungen der erwartbaren Abschaltungen in jeder Tagesstunde während der Brutzeit erfolgt analog zu den Auswertungsschritten in Kapitel 2.1.3.2.

2.2 Ertragseinbußen und Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb

Für die Abschätzung der Ertragseinbußen sind erstens die Standorte und deren Windpotenziale zu berücksichtigen, zweitens die vorgesehene Anlagentechnik und drittens die Szenarien der Rotmilan-Flugaktivität.

2.2.1 Windpotenziale

Ein wesentlicher Eingangsparameter bei den Abschätzungen der Ertragseinbußen stellen die jeweiligen Windpotenziale am Standort dar. Für dieses Projekt wurde auf Windpotenzialstudien der Firma anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH[6] zurückgegriffen, die für jeden beliebigen Koordinatenpunkt in Deutschland Winddaten bereitstellen und Prognosen anfertigen können.

Für alle ausgewählten Standorte von A bis F wurden von der anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH Zeitreihen bestellt, in denen für mehrere Höhen sämtliche Stundenwerte der erfassten Windgeschwindigkeiten für die Jahre 1999 bis 2020 enthalten sind. In Tabelle 5 wird neben den bereits erwähnten Standorten B-F noch ein Standort A an der Nordseeküste Schleswig-Holsteins mit aufgeführt. Dieser befindet sich in der Windzone 4 im Gegensatz zu allen übrigen Standorten, die sich in der Windzone 2 befinden.

[6] https://anemos.de/de/

Tabelle 5: Charakterisierung der betrachteten Standorte

Standort	Windzone	Charakteristik
A	Zone 4	Nordseeküste SH
B	Zone 2	Nordostdeutsche Tiefebene
C	Zone 2	Brandenburgische Seenplatte
D	Zone 2	Mansfelder Land
E	Zone 2	Mitteldeutschland
F	Zone 2	Süddeutsches Mittelgebirge

In der folgenden Tabelle 6 sind exemplarisch für den Standort A die Zeitreihen (Stundenmittel) aus dem Jahr 2019 für die Höhen 105m, 125m, 135m, 145m und 165m in Auszügen dargestellt.

Tabelle 6: Zeitreihen der Windgeschwindigkeitswerte für verschiedene Höhen
Quelle: anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbh

Date/Time	105m	125m	135m	145m	165m
01.01.2019 00:00	14,0	14,7	15,0	15,3	16,0
01.01.2019 01:00	14,4	15,1	15,5	15,8	16,5
01.01.2019 02:00	14,7	15,4	15,8	16,1	16,8
01.01.2019 03:00	14,9	15,6	15,9	16,3	16,9
01.01.2019 04:00	14,2	14,9	15,2	15,5	16,1
01.01.2019 05:00	13,2	13,9	14,2	14,5	15,2
01.01.2019 06:00	13,1	13,8	14,1	14,4	15,1
01.01.2019 07:00	13,2	13,9	14,2	14,5	15,2
01.01.2019 08:00	12,7	13,4	13,7	14,1	14,7
01.01.2019 09:00	12,6	13,2	13,5	13,8	14,4
01.01.2019 10:00	13,1	13,7	14,0	14,3	14,8
01.01.2019 11:00	14,0	14,6	14,9	15,2	15,8
31.12.2019 15:00	7,7	8,3	8,6	8,8	9,3
31.12.2019 16:00	7,7	8,3	8,6	8,8	9,3
31.12.2019 17:00	7,5	8,1	8,3	8,6	9,0
31.12.2019 18:00	6,8	7,2	7,4	7,5	7,8
31.12.2019 19:00	5,8	6,0	6,1	6,2	6,5
31.12.2019 20:00	4,8	5,0	5,1	5,2	5,4
31.12.2019 21:00	4,0	4,1	4,2	4,3	4,5
31.12.2019 22:00	3,8	3,9	3,9	4,0	4,2
31.12.2019 23:00	3,9	3,9	4,0	4,1	4,3
Mittelwert	7,5	7,9	8,1	8,3	8,6
MAX	20,7	21,6	22,0	22,4	23,2
MIN	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0

Aus den jeweiligen Zeitreihen mit insgesamt 8760 Stundenwerten können die mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Höhen ermittelt werden.

Die mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten an den Standorten A bis F für den Zeitraum 1999 bis 2020 (1. Halbjahr) zeigt die folgende Tabelle 7. Der Standort A (Nordseeküste) weist das größte Windpotenzial auf, der Standort F (Süddeutsches Mittelgebirge) das geringste Windpotenzial.

Die weiteren Standorte liegen vom Potenzial erwartungsgemäß zwischen den beiden Standorten A und F.

Tabelle 7: Mittlere Jahresgeschwindigkeiten für sechs ausgewählte Standorte
Quelle: anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH

Standortvergleich Windpotenzial für den Zeitraum 1999-2020					
Höhe	105m	125m	135m	145m	165m
Windmittel	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
A	7,4	7,7	7,9	8,1	8,4
B	6,5	6,9	7,1	7,3	7,7
C	6,5	6,9	7,0	7,2	7,5
D	6,1	6,4	6,6	6,8	7,1
E	6,3	6,7	6,8	7,0	7,3
F	5,6	5,9	6,0	6,2	6,4

Bei den Abschätzungen zu Ertragseinbußen wurde nicht das langjährige Jahresmittel verwendet, sondern ausschließlich auf die Werte des zurückliegenden Jahres 2019 zurückgegriffen. Die mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten sowie die Häufigkeitsverteilungen für die Standorte A bis F für das Jahr 2019 zeigen Tabelle 8 und Abbildung 6.

Tabelle 8: Mittlere Jahresgeschwindigkeiten für sechs Standorte und drei Höhenwerte (Jahr 2019)
Quelle: anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH

Standortvergleich Windpotenzial für das Jahr 2019			
Höhe	105m	135m	165m
Windmittel	[m/s]	[m/s]	[m/s]
A	7,5	8,1	8,6
B	6,7	7,3	7,9
C	6,7	7,3	7,8
D	6,2	6,8	7,2
E	6,6	7,1	7,5
F	5,7	6,2	6,6

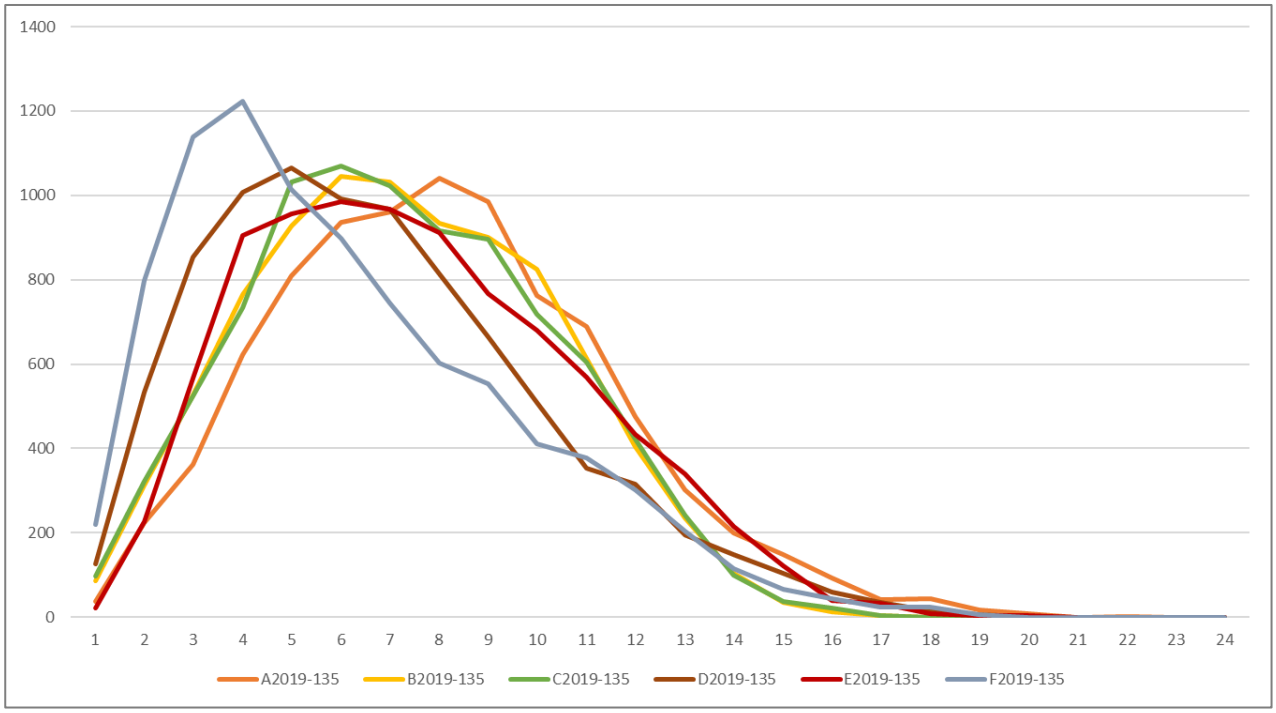


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit für sechs Standorte für das Jahr 2019 (135 m)
Quelle: Aufbereitete Daten der anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mgH

Sowohl bei den mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten als auch bei den Häufigkeitsverteilungen ist beim Vergleich der Standorte die Spreizung zwischen den Standorten A bis F gut zu erkennen.

Die auftretenden Windgeschwindigkeiten sind über den Jahresverlauf einer hohen Fluktuation unterworfen und haben auch sehr individuelle Charakteristiken für verschiedene Jahre. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Zeitreihe der insgesamt 8760 Stundenwerte für das gesamte Jahr 2019 am Standort A in grafischer Form:

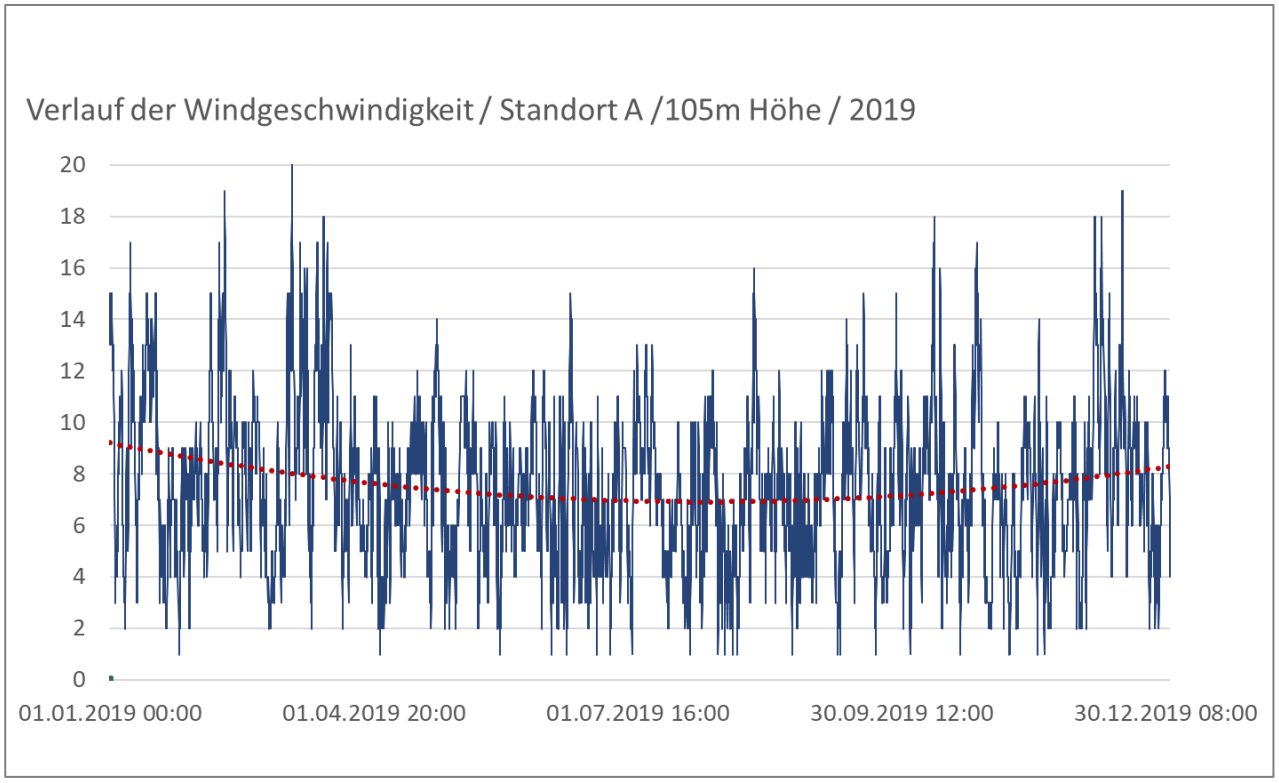


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der Windgeschwindigkeit in Stundenwerten für das Jahr 2019
Quelle: Aufbereitete Daten der anemos Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH

Allen Standorten in Deutschland ist gemein, dass die Windpotenziale im Sommer geringer sind als in den Wintermonaten (siehe rote Trendlinie in der Abbildung 7). Werden ereignisbezogene Abschaltungen vermehrt in der warmen Jahreszeit auftreten, beeinflusst das die zu erwartenden Einbußen positiv.

2.2.2 Windenergieanlagen

Die Auswertungen und Analyse sollen auf Basis von Windenergieanlagentypen durchgeführt werden, die insbesondere das derzeitige und zukünftige Marktgeschehen repräsentieren.

2.2.2.1 Auswahl der Windenergieanlagen

Seit Beginn der Ausschreibungen bzw. in den ersten 14 Ausschreibungsrunden bekamen insgesamt 1.390 Windenergieanlagen einen Zuschlag, wobei bei den bezuschlagten Anlagen 43 verschiedene Anlagentypen vertreten sind (s. Tabelle 9). Zur Abschätzung von Ertragsverlusten wurden drei Anlagentypen von drei Herstellern ausgewählt, die einerseits einen großen Rotordurchmesser aufweisen und die andererseits häufig bezuschlagt wurden und daher in Zukunft auch häufig errichtet werden.

Tabelle 9: Liste der bezuschlagten Anlagentypen nach 14 Ausschreibungsrunden (die für die Analyse gewählten Anlagentypen sind hervorgehoben durch rotgefärbte Unterlegung)
Quelle: diverse Veröffentlichungen zu Ausschreibungsergebnissen

Bezuschlagte Anlagentypen nach 14 Ausschreibungen					
Hersteller	**Typ**	**Anzahl**	**Hersteller**	**Typ**	**Anzahl**
Vestas	V126	135	Enercon	E-82 EP2/EP4	38
Vestas	V136	107	GE Wind Energy	GE 2.5/2.75-120	26
Enercon	E-115	104	Senvion	3.2/3.4/3.6 M114	21
Enercon	E-138	86	Senvion	3.4/3.6/4.2 M140	20
Vestas	V150	80	Senvion	3.2/3.4 M122	19
Enercon	E-126 EP3/EP4	72	Vensys	VE-120	17
Vestas	V117	71	Siemens Gamesa	SWT-3.0/3.2-113	16
Nordex	N117	59	GE Wind Energy	GE 3.2-130	15
Nordex	N149	58	Siemens Gamesa	SWT-3.15/DD-142	14
Nordex	N131	55	Siemens Gamesa	SWT-3.3/3.6/DD-130	12
Enercon	E-92	55	Vensys	VE-136	12
Enercon	E-141	53	eno energy	eno 126	9
Vestas	V112	53	Enercon	E-70	9
Enercon	E-101	42	Senvion	4.2 M118	7
GE Wind Energy	GE 4.8/5.3/5.5-158	40	Enercon	E-58	6
GE Wind Energy	GE 3.4/3.6-137	38	...	...	...
			Gesamt	**43**	**1.390**

Unter den ersten 14 Listeneinträgen befinden sich ausschließlich Anlagen der Hersteller Vestas, Enercon und Nordex, daher sind Anlagen dieser Hersteller für die Auswertungen prädestiniert. Es wurde jeweils ein Anlagentyp von diesen drei Herstellern ausgewählt:

Tabelle 10: Repräsentative Anlagentypen für die Auswertungen

Hersteller	Anlagentyp	Nabenhöhe	Windzone
Vestas	V150-4.2	166	DIBT WZ 2
Enercon	E-141 EP4 4.2	159	DIBT WZ 3
Nordex	N149/4.0-4.5	164	DIBT WZ 2

2.2.2.2 Leistungskennlinien

Für den jeweiligen Anlagentyp weisen die Hersteller (ENERCON GMBH 2017; NORDEX ENERGY GMBH 2017; VESTAS WIND SYSTEMS A/S 2017) in ihren Betriebsbeschreibungen (Enercon E-141, Nordex N-149, Vestas V150) folgende theoretischen Leistungskurven aus (Leistungsvermögen aufgetragen über der Windgeschwindigkeit, die auf den Rotor einwirkt) (s. Abbildung 8).

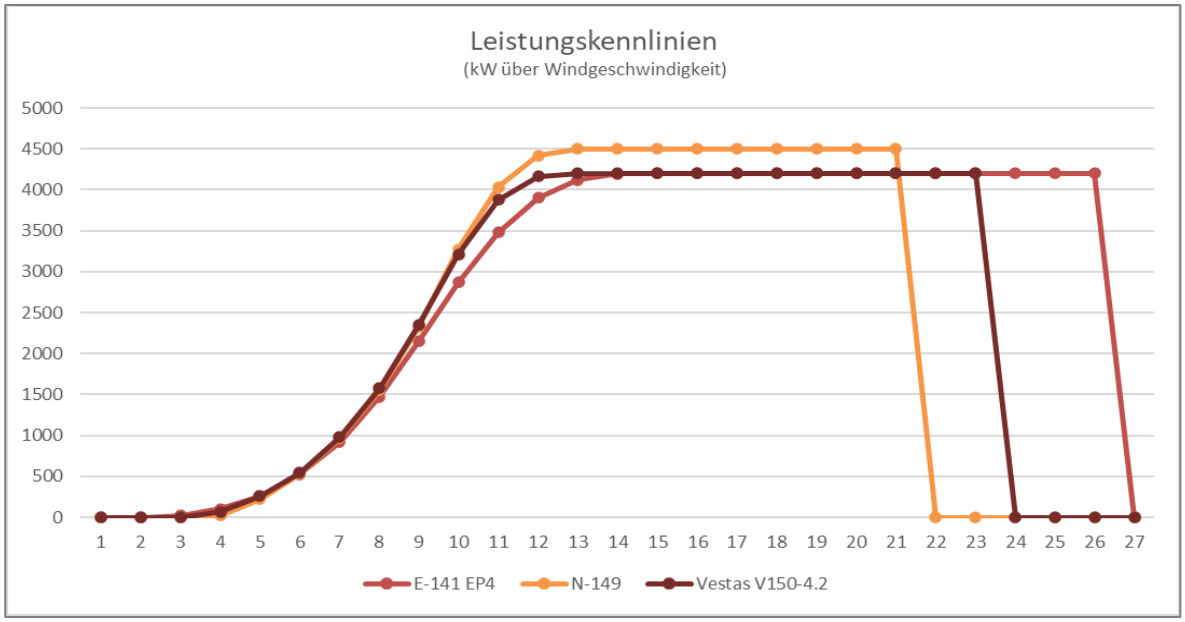


Abbildung 8: Leistungskennlinien der Windenergieanlagen Enercon E-141 EP4, Nordex N-149 und Vestas V150-4.2
Quelle: ENERCON GMBH (2017); NORDEX ENERGY GMBH (2017); VESTAS WIND SYSTEMS A/S (2017)

2.2.2.3 Start- und Stopp-Prozeduren von Windenergieanlagen

Extern veranlasste ereignisbezogene Abschaltungen zum Vogelschutz werden mit passender Signalverarbeitung an die Anlagensteuerung übermittelt. Die Anlagensteuerung wird daraufhin unmittelbar den Stoppvorgang beginnen. Zum Stoppen der Anlage werden die Rotorblätter von der Arbeitsposition auf Fahnenposition gedreht. Durch diese Blattwinkelverstellung wird der Rotor sofort verzögert und nach einer gewissen Zeit erreicht der Rotor den Trudelmodus (s. Kap. 3.4).

Ändert das externe Signal den Status von Stopp auf Start, so wird unmittelbar die Startvorbereitung initiiert. Allerdings ist der Zeitbedarf für den Startvorgang erheblich länger als beim Stoppvorgang. Im Rahmen des Startvorganges werden zuerst einige Umgebungsparameter wie vorherrschende Windgeschwindigkeit und Windrichtung abgefragt, im Bedarfsfall muss der Rotor dem Wind nachgeführt werden. Erst wenn die Ausrichtung den Sollwerten entspricht und auch sämtliche weiteren Startparameter erfüllt sind, werden die Subsysteme der Anlage aktiviert (z.B. Lüftung, Kühlung, Heizung, Schmierung, elektrische Systeme, Lastmessungen). Gelingt die Aktivierung der Subsysteme fehlerfrei, werden die Rotorblätter von der Fahnenposition in Richtung Arbeitsposition verdreht, die Anlage kann allmählich die Drehzahl und die Leistungsaufnahme am Rotor steigern und schließlich den Generator auf das Netz zuschalten.

Beispielhaft sei hier die Beschreibung einer Startprozedur einer Megawattanlage des Herstellers Enercon dargestellt (Auszug zur Startprozedur aus einer Betriebsbeschreibung (ENERCON GMBH 2019b)):

6.3.1 Startvorbereitung

Solange ein Hauptstatus > 0 ansteht, bleibt die Windenergieanlage angehalten. Sobald der Hauptstatus 0 wird, ist die Anlage bereit und der Startvorgang wird eingeleitet. Sollten

Während der Startvorbereitung beginnt eine 150 Sekunden dauernde Windmess- und Ausrichtungsphase der Windenergieanlage.

Sofern sich die Steuerung im Automatikbetrieb befindet, die gemittelte Windgeschwindigkeit größer als 1,8 m/s ist und die Abweichung der Windrichtung ausreichend für eine Windnachführung ist, beginnt die Windenergieanlage sich zum Wind auszurichten. Die Windenergieanlage geht 60 Sekunden nach Abschluss der Startvorbereitung in den Trudelbetrieb über. Die Rotorblätter fahren langsam vor und gleichzeitig werden die Kondensatoreinheiten der Rotorblattnotverstellung geprüft.

Ist die Windenergieanlage mit Blattlastsensoren ausgestattet, stoppen die Rotorblätter bei einem Winkel von 70° und führen dort den unter Umständen mehrere Minuten andauernden Abgleich der Lastmessstellen durch. Während dieser Zeit wird der Status `0:5 Abgleich Load Control` angezeigt.

Von der Freigabe zum Start bis zur tatsächlichen Zuschaltung auf das Netz dauert es bei allen hier betrachteten Anlagentypen mehrere Minuten. Die Dauer eines Startvorganges ist niemals exakt gleich, bewegt sich aber grundsätzlich in einem Bereich von mindestens 5 Minuten bis hin zu 11 Minuten, manchmal noch länger.

Bei den in diesem Projekt vorgenommenen Abschätzung der Ertragsverluste durch ereignisbezogene Abschaltungen zum Vogelschutz wird vereinfachend immer und ohne Ausnahme eine Dauer von 9 Minuten (entspricht 0,15 Stunden) für den Startvorgang angesetzt.

Würde die Startprozedur bei einem Anlagentyp immer kürzer als 9 Minuten ausfallen, so wären die ausgewiesenen Ertragsverluste überschätzt. Würde die Startprozedur bei einem Anlagentyp immer länger als 9 Minuten ausfallen, so wären die Ertragsverluste unterschätzt. Insofern ist es bei zukünftigen Projektkalkulationen zu empfehlen, zunächst belastbare Zahlen über die mittlere Dauer der Startprozeduren für den am Standort errichteten Anlagentyp zu ermitteln.

Zuletzt soll hier noch erwähnt werden, dass die Zeitdauer der Startprozedur derart lang ist, dass es für das externe Signal zum Starten der Anlage keiner Hysterese bedarf.

2.2.3 Abschätzung der Ertragsverluste

Um die Ertragsverluste, die durch ereignisbezogene Abschaltungen einer Anlage eintreten, abschätzen und vergleichen zu können, wird ein überschlägiges Verfahren angewendet, das grundsätzlich auf Zeitreihen mit 8.760 gemittelten Stundenwerten für alle Eingangsparameter basiert (s. Tabelle 11).

Zunächst wird für jede Stunde im Jahr für den Standort die jeweilige Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe dargestellt (Im Beispiel: Am Standort C auf 165m Höhe für den 13.08.2019 sind das Werte zwischen 7m/s und 10m/s). Mit diesen Windgeschwindigkeitswerten und den dazugehörigen Leistungswerten aus der Leistungskennlinie der Windenergieanlage werden die Erträge pro Stunde in kWh ermittelt (Im Beispiel: für die Enercon E-141 zwischen 1.471 und 3.481 kWh pro Stunde für den 13.08.2019). Die Erträge für alle Stunden über das gesamte Jahr 2019 summiert ergeben den erwarteten Jahresenergieertrag (Beispiel: 17.833.744kWh im Jahr 2019).

Im zweiten Schritt wird für das gewünschte Szenario die Häufigkeit der Abschaltungen und die Dauer der jeweiligen Abschaltung pro Stunde aufgetragen (Beispiel: Für das Szenario C_{theor} werden die Werte aus der von ARSU ermittelten Zeitreihen extrahiert. Maximal 2 Abschaltungen pro Stunde und eine Dauer von 0,09968361 Stunden -entspricht 6 Minuten- pro Abschaltung sind der Tabelle für den 13.08.2019 zu entnehmen).

Im dritten Schritt wird die Betriebszeit der Windenergieanlage für jede Stunde bestimmt, wobei neben der ereignisbezogenen Abschaltzeit auch noch die benötigte Zeit für den Startvorgang inkludiert wird. (Im Beispiel: Die jeweiligen Werte für Abschaltzeiten und Anfahrzeiten werden addiert und von der vollen Stunde abgezogen).

Im vierten Schritt wird der Ertrag der Anlage für jede Stunde des Jahres ermittelt, allerdings unter Berücksichtigung der durch das Szenario reduzierten Betriebszeit (im Beispiel: für das Szenario C_{theor} zwischen 1.435 und 2.867 kWh pro Stunde für den 13.08.2019). Die Erträge für alle Stunden über das gesamte Jahr 2019 summiert führen dann zu dem reduzierten Jahresenergieertrag (Beispiel: 16.959.490kWh im Jahr 2019).

Der Ertragsverlust durch das Szenario C_{theor} beläuft sich für das gesamte Jahr auf 874.254kWh (17.833.744 kWh minus 16.959.490 kWh) bzw. 4,9% des normalen Jahresertrages.

Zu weiteren Analysen können sowohl die Anzahl der Abschaltungen als auch die Abschalt- und Anfahrzeiten, die in einem Jahr auftreten, aufsummiert werden (Im Beispiel sind folgende Zeiten für das gesamte Jahr 2019 ausgewiesen: 2.235 Abschaltungen; 222,8 Stunden ereignisbezogene Abschaltzeit; 335,2 Stunden Anfahr- bzw. Startzeit für die Anlage; 8.202 Stunden Betriebszeit).

Tabelle 11: Beispiel des angewendeten Berechnungsverfahren

		ohne	C theor	C theor	C theor	C theor	C theor
Date/Time	WIND (165m)	E141 Ertrag [kWh]	Abschalt-ungen	Dauer Ab-schaltung	Anfahr-zeit	Betriebs-zeit	E141 Ertrag [kWh]
01.01.2019 00:00	12	4119	0	0	0	1	4119
01.01.2019 01:00	12	4119	0	0	0	1	4119
.....							
13.08.2019 09:00	9	2867	0	0	0	1	2867
13.08.2019 10:00	9	2867	1	0,09968361	0,15	0,7503164	2151
13.08.2019 11:00	10	3481	1	0,09968361	0,15	0,7503164	2612
13.08.2019 12:00	9	2867	2	0,19936721	0,3	0,5006328	1435
13.08.2019 13:00	10	3481	1	0,09968361	0,15	0,7503164	2612
13.08.2019 14:00	10	3481	1	0,09968361	0,15	0,7503164	2612
13.08.2019 15:00	9	2867	1	0,09968361	0,15	0,7503164	2151
13.08.2019 16:00	8	2151	1	0,09968361	0,15	0,7503164	1614
13.08.2019 17:00	7	1471	0	0	0	1	1471
.....							
31.12.2019 22:00	7	1471	0	0	0	1	1471
31.12.2019 23:00	7	1471	0	0	0	1	1471
SUMME		17.833.744	2.235	222,8	335,2	8.201,96	16.959.490
Ertragsverlust		100,0%					**4,9%**

3 Ergebnisse

3.1 Relation zwischen Flugaktivität und Abschaltungen

Die ermittelten sowie hochgerechneten Werte der Rotmilanflüge im 350 m-Radius um die sechs IDF-Standorte sowie die damit in Zusammenhang stehenden Abschaltungen sind in Tabelle 12 aufgeführt. Dabei werden deutliche Unterschiede zwischen den Standorten ersichtlich.

Die prognostizierte Anzahl der gesamten Flüge schwankt zwischen 967 an den Standorten B1 und E und 9.776 an Standort F. Dies entspricht durchschnittlich einer Anzahl von 5,6 bzw. 54,7 Flügen pro Tag. Die arithmetischen Mittel für die Gesamtanzahl sowie für die tägliche Anzahl an Flüge für alle sechs IDF-Standorte betragen 3.733 bzw. 20,7.

Die Anzahl an Abschaltungen korreliert stark mit der Anzahl an Flügen im Nahbereich um die WEA-Standorte. Das Verhältnis zwischen Anzahl der Flüge und Anzahl der Abschaltungen schwankt zwischen 0,25 (Standort C) und 0,54 (Standort D), das arithmetische Mittel für alle Standorte beträgt 0,43.

Die prognostizierte Anzahl der Abschaltungen während der gesamten Brutdauer liegt zwischen 366 an den Standorten B1 und E sowie 4.937 am Standort F. Die sich daraus ergebenden erwartbaren täglichen Abschaltungen reichen von 2,1 bis 27,4. Das arithmetische Mittel aller Standorte für die Gesamtanzahl an Abschaltungen beträgt 1.629 und respektive 9,0 für die durchschnittliche Anzahl an täglichen Abschaltungen.

Bei einer Beschränkung des Datensatzes am Standort F auf Flüge oberhalb von 40 m NN zeigt sich eine deutliche Reduzierung der erfassten Fluganzahl im Nahbereich um etwa 30 %. Die Anzahl der Abschaltungen nimmt sogar um etwa die Hälfte ab. Dementsprechend verringert sich das Verhältnis von Flügen und Abschaltungen von 0,50 auf 0,36. Lediglich die durchschnittliche Dauer des Abschaltsignals nimmt geringfügig zu.

In Tabelle 13 sind die Mittelwerte der während der unterschiedlichen Brutphasen erwartbaren Abschaltungen pro Tag aufgeführt. Die Werte sind abhängig von jahreszeitlichen Flugaktivität (s. Kapitel 2.1.3.2). Die Abschaltungen pro Tag aus Tabelle 12 ergeben sich aus dem gewichteten Mittelwert der Werte der einzelnen Brutphasen.

Tabelle 12: Daten zu den Rotmilanflügen im Nahbereich sowie den Abschaltungen an den IDF-Standorten

Standort	Erfasst		Extrapoliert				Durchschnittliche Dauer des Abschaltsignals [s]	Verhältnis Flüge 350 m Radius/ Abschaltungen
			Gesamtbrutdauer		Pro Tag			
	Flüge im 350m Radius	Abschaltungen	Flüge im 350m Radius	Abschaltungen	Flüge im 350m-Radius	Abschaltungen		
B1	325	123	967	366	5,6	2,1	215	0,38
B2	477	180	1.419	535	8,2	3,1	155	0,38
C	1.262	392	6.022	1.829	31,4	9,4	239	0,25
D	641	344	3.246	1.741	18,7	10,0	161	0,54
E	409	193	967	366	5,6	2,1	217	0,47
F	3.903	1.775	9.776	4.937	54,7	27,4	276	0,50
F Ü40[1]	2.731	975	6.866	2.457	38,5	13,7	287	0,36
Durchschnitt[2]	**1.385**	**536**	**3.733**	**1.629**	**20,7**	**9,0**	**211**	**0,43**

1 In dieser gesonderten Betrachtung des Standort F sind keine Flugbewegungen eingegangen, die dauerhaft unterhalb einer Höhe von 40 m NN stattgefunden haben

2 Die Mittelwerte für alle Standorte wurden ohne die Ergebnisse der gesonderten Betrachtung am Standort F gebildet

Tabelle 13: Durchschnittliche Anzahl täglicher Abschaltungen während den unterschiedlichen Brutphasen an den IDF-Standorten
Ergänzungen

Brutphasen	Standorte					
	B1	B2	C	D	E	F
Balzzeit	1,2	1,7	10,7	5,5	4,8	20
Brutzeit	1,5	2,1	13,6	7	6,1	25,2
Aufzuchtzeit	3,2	4,7	11,5	15,2	13,4	39,4
Nachbrutzeit	1,5	2,2	5,5	7,3	6,4	18,9

3.2 Abhängigkeit der Flugaktivität von verschiedenen Standortparametern

Die ermittelte Flugaktivität im Nahbereich der betrachteten WEA-Standorte, die während der RNA untersucht wurden, schwankt zwischen durchschnittlich einem Flug bis hin zu 55 Flügen pro Tag. Die Flugaktivität von knapp zwei Dritteln der Standorte beträgt maximal zehn Flüge pro Tag, höhere Werte verteilen sich in geringer Anzahl auf die übrigen Standorte (s. Abbildung 9).

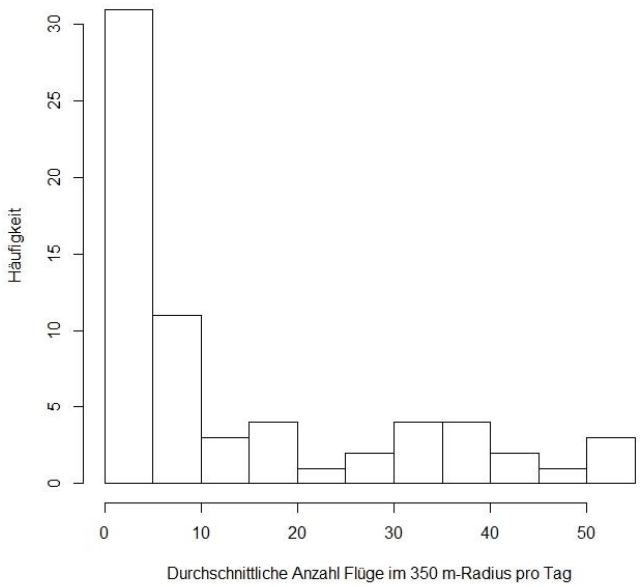


Abbildung 9: Histogramm der durchschnittlichen Flugaktivität im Nahbereich der untersuchten WEA-Standorte
Betrachtet wurden 73 WEA aus 17 RNA

Für drei der fünf betrachteten Standortparameter ergab die univariate Modellierung einen sigmoidalen (linearen) signifikanten Zusammenhang mit der Flugaktivität von Rotmilanen (s. Tabelle 14). Die Modelle der Landnutzung erreichen die höchsten Nagelkerke-R^2-Werte, die allerdings jeweils recht niedrig sind. Für die Anzahl der Rotmilanbrutvorkommen im Umfeld der WEA-Standorte wurde ein positiver Zusammenhang ermittelt, der allerdings deutlich nicht signifikant ist.

Tabelle 14: Wirkrichtung und Modellgüte der univariaten Modelle für die Flugaktivität des Rotmilans

Variable	Wirkrichtung	Signifikanzniveau (P-Wert)	Nagelkerke-R^2
Anzahl RM-Horste im 1.500 m-Radius	sigmoidal +	0,168	0,030
Anzahl RM-Horste im 4.000 m-Radius	sigmoidal +	0,541	0,006
Entfernung zum nächstgelegenen Horst	sigmoidal -	0,009**	0,103
Anteil Offenland im 350 m-Radius	sigmoidal +	0,002**	0,147
Anteil Waldfläche im 350 m-Radius	sigmoidal -	0,002**	0,147

+ = je größere die Werte der Variable, desto größer ist die Flugaktivität

- = je größer die Werte der Variable, desto kleiner die Vorkommenswahrscheinlichkeit,

Signifikanzniveau: $p \leq 0,05$ = signifikant *; $p \leq 0,01$ = sehr signifikant **; $p \leq 0,001$ = hoch signifikant ***; - = Modell nicht signifikant

In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass die Flugaktivität in geringerer Entfernung zu Rotmilanhorsten prinzipiell höher ist. Bei der Landnutzung zeigt sich ein signifikanter Anstieg der Flugaktivität mit Zunahme des Offenlandanteils und eine Abnahme mit Zunahme des Waldanteils.

Die durchgeführte Varianzanalyse bestätigte zusätzlich, dass ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$, höchstsignifikant) bei der Flugaktivität an Standorten in geschlossenen Waldflächen und überwiegend gehölzfreien Standorten besteht (Abbildung 11).

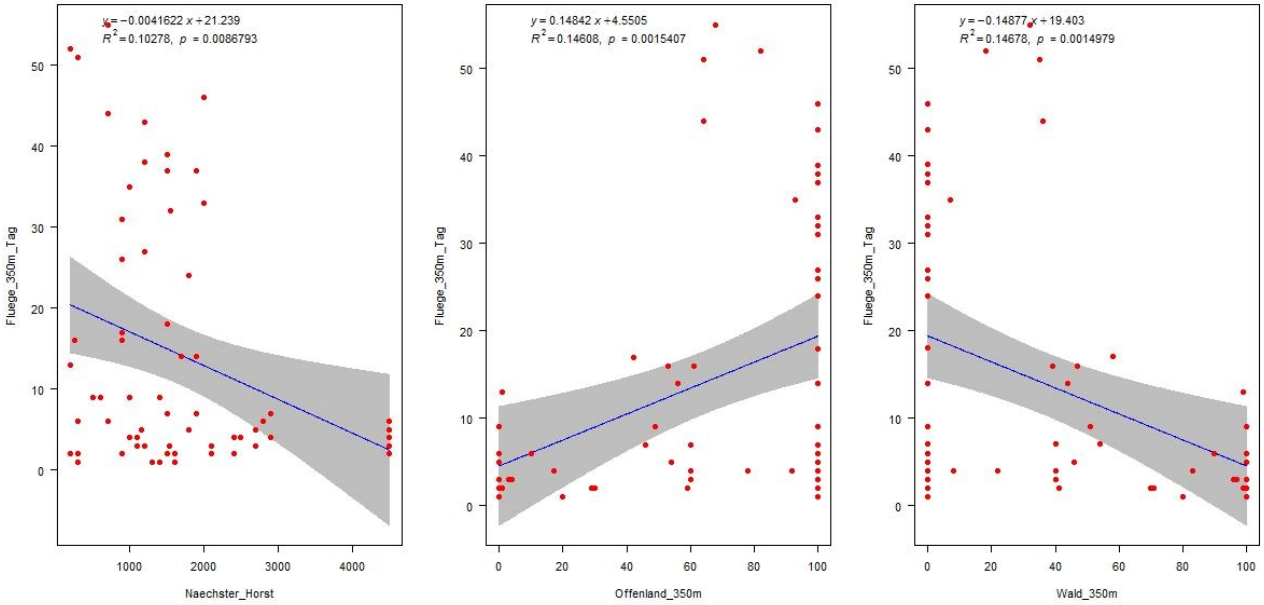


Abbildung 10: Signifikante Abhängigkeiten der Flugaktivität im Nahbereich um WEA von der Entfernung zum nächsten Horst sowie dem jeweiligen Anteil von Offenland und Wald
Rote Punkte = durchschnittliche Anzahl Flüge pro Tag im 350 m-Radius, blaue Linie = Regressionslinie, graue Fläche = Konfidenzintervall

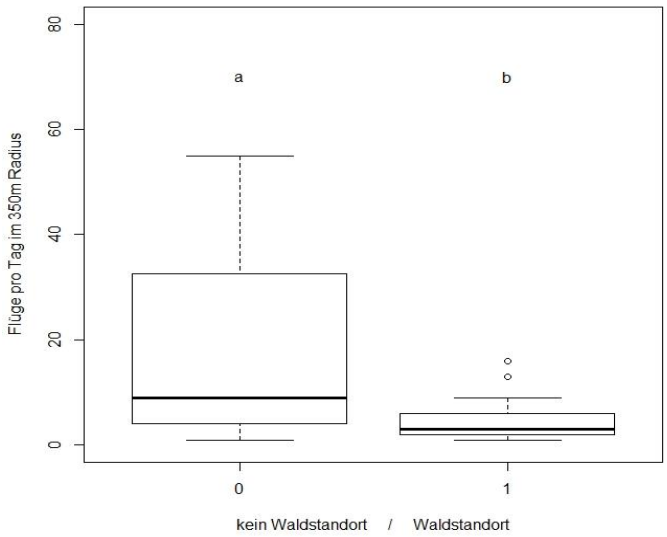


Abbildung 11: Signifikante Unterschiede der Flugaktivität an Wald- bzw. Nicht-Waldstandorten
Signifikanzniveau: p < 0,001; Waldstandort = überwiegend geschlossene Gehölzfläche im 350 m-Radius um den WEA-Standort

Zwischen dem Anteil Offenland und dem Anteil Waldfläche im Nahbereich um die WEA besteht eine starke negative Korrelation. Aufgrund von Multikollinearität muss auf eine gemeinsame Nutzung in einem multivariaten Modell verzichtet werden. Das beste multivariate Modell wird aus den Variablen „Entfernung zum nächstgelegenen Horst“ und „Anteil Offenland im 350 m-Radius“ gebildet (Abbildung 12, $p < 0{,}001$; $R^2 = 0{,}38$). Durch die Kombination dieser beiden Parameter werden somit 38 % der Varianz der Daten erklärt. Anhand dieses Modells lässt sich eine erste näherungsweise Abschätzung hinsichtlich der erwartbaren Rotmilan-Flugaktivität an einem gegebenen WEA-Standort vornehmen. Die maximale durchschnittlich erwartbare Flugaktivität beträgt 30 bis 35 Flüge pro Tag.

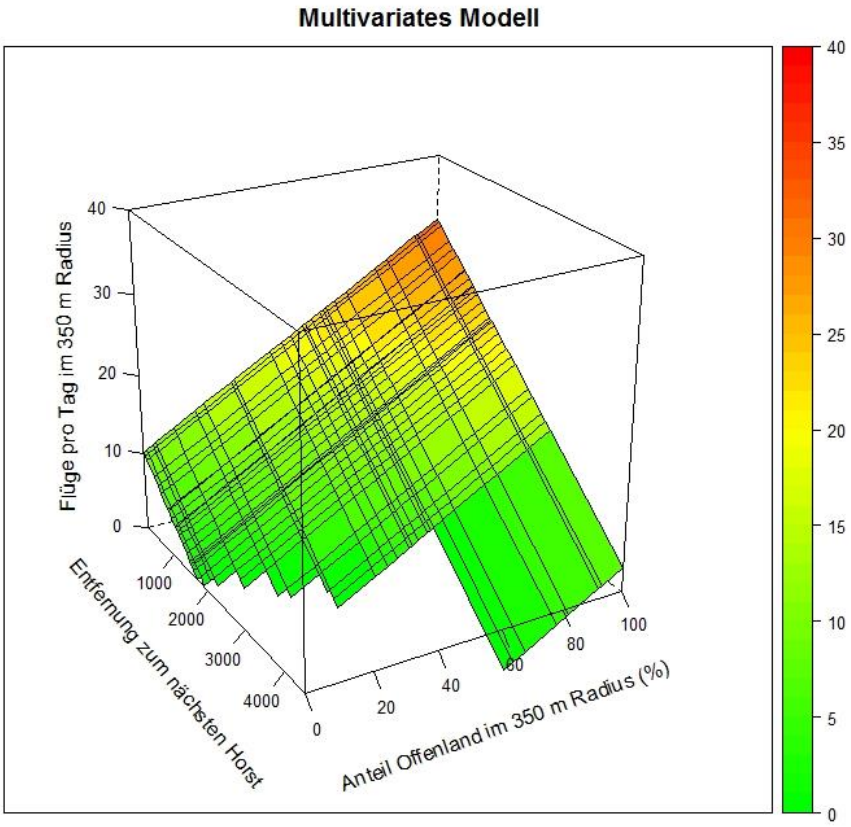


Abbildung 12: Graphische Darstellung des besten multivariaten Modells zur Schätzung der Flugaktivität im Nahbereich der WEA-Standorte
$p < 0.001$; $R^2 = 0{,}38$

Bildung von Szenarien zu Flugaktivität und Brutplatzverteilung

In einem ersten Schritt wird für die ermittelten Flugaktivitäten an den 73 WEA-Standorten der betrachteten RNA eine Klasseneinteilung vorgenommen. Basis hierfür ist die farbliche Einteilung der Flugaktivität in Abbildung 12, die bis etwa 15 Flügen pro Tag eine einheitliche Kennzeichnung erkennen lässt. An einem Großteil der untersuchten WEA-Standorte liegt allerdings die durchschnittliche Anzahl der täglichen Flüge bei einem bis fünf (s. Abbildung 11 und Abbildung 9). Für die Szenarienbildung wurde daher eine weitere Unterteilung der Flugaktivität vorgenommen (s. Tabelle 15). An Standorten mit weniger als sechs Flügen pro Tag wird die Flugaktivität im Kontext der Auswertungen als gering angesehen. Eine mittlere Flugaktivität entspricht einem Wert von durchschnittlich sechs bis zu 15 Flügen pro Tag. Dies trifft auf etwa die Hälfte der untersuchten WEA-Standorte zu. Dementsprechend wird die darüber liegende Flugaktivität als hoch angesehen. Werte von über 30 Flügen pro Tag sind in diesem Kontext bereits als sehr hoch anzusehen, da sie bereits über den gemäß der verwendeten Datenbasis durchschnittlich maximal erwartbaren Flügen pro Tag liegen.

Tabelle 15: Einteilung der Flugaktivitätsklassen auf Grundlage der Ergebnisse der linearen Regression

Klasse	Flüge pro Tag im 350 m-Radius
Gering	< 6
Mittel	6 - 15
Hoch	16 - 30
Sehr hoch	> 30

Mit Hilfe der Ergebnisse der linearen Regression können die so umrissenen Flugaktivitätsklassen verschiedenen Standortverhältnissen zugeordnet werden (s. Tabelle 16). Betrachtet wird die Entfernung zum nächstgelegenen Rotmilanhorst und der Anteil Offenland (bzw. Wald) im Nahbereich um die (potenziellen) Anlagenstandorte (350 m Radius). Es ergeben sich drei Szenarien, die sich durch unterschiedliche Ausprägungen ihrer Standortparameter definieren. Die Definition ist in erster Linie gültig für die jeweilige Flugaktivitätsklasse und nicht für exakte Werte der Flugaktivität. Für die Berechnungen wurde den Flugaktivitätsklassen jeweils ein repräsentativer Wert der „Flüge pro Tag“ zugeordnet. Die entsprechenden Abschaltungen ergeben sich aus den in Kapitel 3.1 ermittelten Verhältnis von Flügen im Nahbereich und tatsächlichen Abschaltungen, bekannt aus den IDF-Testreihen. Es wird angenommen, dass für die Flugaktivitätsklasse „gering“ keine technischen Systeme notwendig sind, daher wird hierauf bei der Szenarienbildung verzichtet.

Das Szenario S08 stellt einen WEA-Standort mit durchschnittlich acht Flügen pro Tag über den Zeitraum der gesamten Brutdauer dar. Die Flugaktivität ist entsprechen als „mittel“ zu bezeichnen. Von der Anzahl der Flüge auszugehend, sind durchschnittlich 3,4 Abschaltungen pro Tag zu erwarten. Dieses Szenario ist gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 3.2 in etwa an Standorten zu erwarten, in dessen Umgebung lediglich ein Rotmilanpaar an der Grenze des 1.500 m

Betrachtungsraums vorkommt. Befindet sich der Standort in einem geschlossenen Waldstück, können Rotmilanvorkommen auch in geringerer Entfernung vorhanden sein.

Im Falle des Vorkommens eines Rotmilanpaares in größerer Nähe ist bei Offenlandstandorten potenziell auch mit einer höheren Flugaktivität im Nahbereich der WEA zu rechnen. Ebenfalls nimmt die Häufigkeit von Flügen zu, sobald mehrere Paare in der weiteren Umgebung vorhanden sind. Vorausgesetzt ist ein attraktiver Standort für die Jagd. Diese Konstellation entspricht in etwa dem Szenario S20, für das durchschnittlich 20 Flüge und knapp neun Abschaltungen pro Tag erwartet werden.

Im Falle von Rotmilanvorkommen in nochmals verringerter Entfernung zum Anlagenstandort erhöht sich die Flugaktivität potenziell weiter. Der Anlagenstandort kann teilweise bereits zum Nahbereich des Horsts gehören. Demensprechend viele Flugbewegungen sind potenziell zu erwarten. Durch einen hohen Anteil an Offenland wird der Anlagenstandort zudem häufig und intensiv für die Jagd genutzt. Sofern in der weiteren Umgebung keine guten Jagdhabitate vorhanden sind, nimmt die Wahrscheinlichkeit einer sehr hohen Flugaktivität auch bei weiter entfernt gelegten Rotmilanhorsten zu. Für das Szenario S35 werden durchschnittlich 35 Flüge pro Tag angenommen, das entspricht im Mittel 15 Abschaltungen täglich.

Tabelle 16: Definition der Flugaktivitätsszenarien

Szenario	Flugaktivitätsklasse	Flüge pro Tag	Abschaltungen pro Tag	Definition (Ausprägung der Standortparameter
S08	Mittel	8	3,4	- 1 RM-Horst in ca. 1.500 m Entfernung oder Standort in geschlossenem Wald
S20	Hoch	20	8,6	- Mehrere RM-Horste in ca. 1.500 m Entfernung oder 1 RM-Horst in 500-1.000 m Entfernung - Hoher Anteil Offenland
S35	Sehr hoch	35	15,0	- 1 RM-Horst in < 500 m Entfernung - Sehr hoher Anteil Offenland

In Tabelle 17 ist die Zuordnung der ausgewerteten IDF-Standorte aus Kap. 3.1 zu den einzelnen Flugaktivitätsklassen dargestellt. Drei der sechs Standorte verfügen über eine geringe Rotmilanflugaktivität. An den Standorten D und C gibt es eine hohe bzw. sehr hohe Flugaktivität. Damit liegt die Flugaktivität an fünf der sechs IDF-Standorte in dem Bereich, der durch die lineare Regression ermittelt wurde.

Lediglich am Standort F wurde mit durchschnittliche 54,7 Flügen pro Tag eine noch deutlich höhere Flugaktivität registriert. Dieser Wert ist jedoch vergleichbar mit den Ergebnissen einzelner WEA-Standorte aus den RNA (s. Abbildung 9). Vom Standort F ist bekannt, dass zwischen der WEA und einem RM-Horst weniger als 500 m Entfernung liegen. Der Horst befindet sich an einem Waldrand, sodass die Tiere hauptsächlich in Richtung des angrenzenden Offenlandes fliegen und somit überwiegend in Richtung des IDF-Systems.

Tabelle 17: Einordnung der IDF-Standorte in die Flugaktivitätsklassen

Standort	Flüge pro Tag	Flugaktivitätsklasse
B1	5,6	Mittel
E	5,6	Mittel
B2	8,2	Mittel
D	18,7	Hoch
C	31,4	Sehr hoch
F	54,7	Äußerst hoch

3.3 Wirtschaftliche Auswirkungen

Betrachtet werden die Auswirkungen von ereignisbezogenen Abschaltungen zum Vogelschutz auf die Stromproduktion bzw. die Erträge von Windenergieanlagen. Zunächst werden die prozentualen Ertragseinbußen für die beschriebenen Szenarien und Konfigurationen dargestellt, im Weiteren werden die Auswirkungen auf die Anlagenabnutzung beschrieben. Dabei sind folgende Projektvorgaben berücksichtigt worden:

- Der gewährte Aufwand für die Analysen war limitiert, somit wurden nicht alle möglichen Kombinationen von Szenarien, Standorten, Anlagentypen und Nabenhöhen berücksichtigt.
- Für den Standort A (Starkwindstandort) sind keine konkreten Szenarien erstellt worden, daher können auch keine Auswirkungen auf den Ertrag benannt werden.
- Es wurden nur Auswertungen unter Zugrundelegung der Windpotenziale aus dem Jahr 2019 durchgeführt.
- Die Auswertungen erfolgten mit einer Ausnahme ausschließlich für Nabenhöhen von 165m
- Zur Abschätzung der monetären Ertragsverluste wurde grundsätzlich und ausnahmslos eine Vergütung von 6,14 Cent/kWh angenommen. Dieser Preis entspricht in etwa der Zuschlagshöhe aus den letzten Ausschreibungsrunden.

Die in diesem Dokument ausgewiesenen Ertragsverluste beziehen sich ausschließlich auf ereignisbezogene Abschaltungen zum Vogelschutz. Mit Sicherheit wird es an den Anlagen noch weitere Ertragsverluste wegen anderer Abschaltkriterien geben (sei es wegen technischer Verfügbarkeit, zur Reduzierung der Schallemissionen, zur Unterdrückung von Schattenwurf, aufgrund des externen Eingreifens des Netzbetreibers oder Direktvermarkters, wegen Fledermausabschaltungen, etc.). Die gesamten Ertragseinbußen für einen Standort ergeben sich durch Kumulation aller Einbußen, wobei es zu beachten gilt, dass unterschiedliche Abschaltkriterien auch zeitgleich auftreten können.

3.3.1 Ertragseinbußen durch pauschale und ereignisbezogene Abschaltungen

Das jeweils angewendete Szenario von pauschalen und ereignisbezogenen Abschaltungen übt einen erheblichen Einfluss auf die prozentualen Ertragseinbußen aus. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Abschätzungen in der Übersicht. Abbildung 14 zeigt die zusätzliche Anzahl an Abschaltungen, welche die Ertragsverluste verursachen.

Szenario	Ertrag
Ohne	100,0%
Pauschal	72,3%
S08	99,6%
S20	98,8%
S35	97,7%
B1 theor	99,6%
B1 mess	99,6%
B2 theor	99,4%
B2 mess	99,1%
C theor	95,1%
C mess	94,9%
D theor	97,8%
D mess	97,3%
E theor	98,0%
E mess	98,0%
Fü40 theor	95,9%
Fü40 mess	95,7%
F theor	92,3%
F mess	92,9%

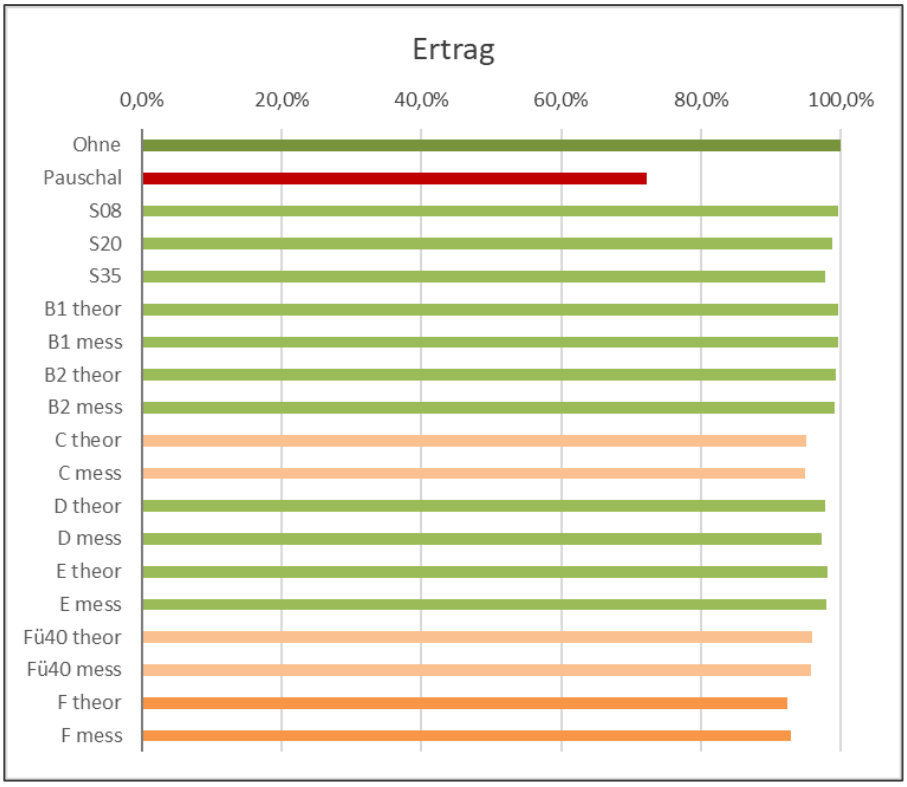


Abbildung 13: Liste und Tabelle zu den Ergebnissen für Erträge und Einbußen
Bewertung durch Farbcodierung dargestellt

Ergebnisse mit weniger als 3% Einbußen sind hellgrün markiert
Ergebnisse mit Einbußen zwischen 3% und 6% sind hellgelb markiert
Ergebnisse mit Einbußen zwischen 6% und 9% sind orangefarben markiert.
Ergebnisse mit mehr als 9% sind rot markiert

Die Einbußen variieren sehr stark in Abhängigkeit des jeweils angewendeten Szenarios. Einbußen um wenige Prozentpunkte bis zu Werten im Bereich von 28 % sind durch die Ertragsabschätzungen ermittelt worden. Dabei ist eindeutig und zweifellos festzustellen, dass das pauschale Szenario mit Abstand die größten Einbußen verursacht. Zur Erläuterung: Das pauschale Szenario bedeutet, dass die Windenergieanlage im Zeitraum vom 01. März bis zum 30. September bei Sonnenaufgang abgeschaltet und bei Sonnenuntergang wieder zugeschaltet wird.

Szenarien mit ereignisbezogenen Abschaltungen verursachen Ertragseinbußen von weniger als 8 % und sind im Vergleich zu einer pauschalen Abschaltung mit Einbußen um die 28 % hinsichtlich der wirtschaftlichen Aspekte grundsätzlich zu bevorzugen.

Ohne die Berücksichtigung von Abschaltungen wäre unter den gewählten Randbedingungen für den Standort B ein jährlicher Ertrag in der Größenordnung von 1.182.124 EUR möglich, für den Standort F ein deutlich geringerer Ertrag um die 840.844 EUR. Die Differenz in den absoluten Erträgen ist einzig den unterschiedlichen Windpotenzialen an den Standorten geschuldet.

Durch die Anwendung der allgemeinen, nicht standortspezifischen Szenarien auf alle gewählten Standorte werden die Erträge immer vermindert, wobei die Werte in Tabelle 18 zeigen, dass sich die jeweiligen Szenarien hinsichtlich der prozentualen Ertragsminderungen im Prozentbereich unterscheiden.

Tabelle 18: Ergebnisse der Auswertungen zu Ertragseinbußen für sechs Standorte und vier allgemeine Szenarien

2019	Naben-	6,14cent/kWh	Szenarien und deren Verluste			
Standorte	höhe	EUR	Pauschal	S 08	S 20	S 35
B	165	1.182.124 €	29,4%	0,4%	1,3%	2,4%
C	165	1.152.479 €	28,8%	0,4%	1,2%	2,3%
D	165	977.046 €	27,8%	0,4%	1,2%	2,4%
E	165	1.063.061 €	27,1%	0,4%	1,2%	2,3%
F	165	840.844 €	25,5%	0,4%	1,1%	2,1%
∅		1.089.405 €	28,6%	0,4%	1,3%	2,3%

Mit Abstand die höchsten prozentualen Ertragseinbußen mit durchschnittlich 28,6% werden durch eine pauschale Abschaltung über die Sommermonate verursacht. Die Varianz über die fünf betrachteten Standorte beträgt nur wenige Prozentpunkte.

Bei den ereignisbezogenen Szenarien S08, S20 und S35 sind die jeweils durchschnittlichen Ertragsverluste im Vergleich zur pauschalen Abschaltung dagegen gering (2,3 %) bis sehr gering (0,4 %). Die obige Tabelle 18 zeigt, dass die Varianz über die Standorte lediglich im Promillebereich liegt.

Auf die Standorte B bis F wurden jeweils auch die standortbezogenen Szenarien angewendet. Das Ergebnis ist in Tabelle 19 zu sehen.

Tabelle 19: Ergebnisse der Auswertungen zu Ertragseinbußen für fünf Standorte und standortspezifische Szenarien

2019	Naben-höhe	Jährlicher Ertrag [EUR]	Szenarien und deren Einbußen			
Standort			B1 theor	B1 mess	B2 theor	B2 mess
B	165	1.182.124 €	0,4%	0,4%	0,6%	0,9%
Standort			C theor	C mess		
C	165	1.152.479 €	4,9%	5,1%		
Standort			D theor	D mess		
D	165	977.046 €	2,2%	2,7%		
Standort			E theor	E mess		
E	165	1.063.061 €	2,0%	2,0%		
Standort			Fü40 theor	Fü40 mess	F theor	F mess
F	165	840.844 €	4,1%	4,3%	7,7%	7,1%

Die durchschnittlichen prozentualen Ertragsverluste durch ereignisbezogene Abschaltungen der Windenergieanlagen belaufen sich auf Werte zwischen minimal 0,4 % (Szenario $B1_{theor}$) bis maximal 7,7 % (Szenario F_{theor}). Einen entscheidenden Einfluss übt das jeweils angewandte Szenario bzw. dessen Charakteristik aus. So zeigt sich z.B. am Standort F, dass die Berücksichtigung der Flughöhe (Fü40) die Ertragseinbußen beträchtlich reduzieren kann.

3.3.2 Einfluss der Anlagentechnik

Im Rahmen der Analysen wurde auch der Einfluss der Anlagentechnik auf die prozentuale Ertragsminderung untersucht. Dazu wurden für alle Standorte B bis F und für alle Szenarien die Werte für die drei ausgewählten Anlagentypen Enercon E-141, Nordex N-149 und Vestas V150 ermittelt (s. Tabelle 20).

Tabelle 20: Ergebnisse zu Ertragseinbußen mit Detailauswertungen zu Anlagetypen

2019	WEA	Naben-	6,14cent/kWh	Szenarien und deren Verluste			
Standorte		höhe	EUR	Pauschal	S 08	S 20	S 35
B	E-141	165	1.122.566 €	29,3%	0,4%	1,3%	2,4%
B	V150	165	1.192.202 €	29,6%	0,4%	1,3%	2,4%
B	N-149	165	1.231.603 €	29,2%	0,4%	1,3%	2,4%
C	E-141	165	1.094.992 €	28,8%	0,4%	1,2%	2,3%
C	V150	165	1.162.392 €	29,0%	0,4%	1,3%	2,4%
C	N-149	165	1.200.054 €	28,6%	0,4%	1,2%	2,3%
D	E-141	165	932.460 €	27,9%	0,4%	1,2%	2,4%
D	V150	165	985.568 €	28,0%	0,4%	1,2%	2,4%
D	N-149	165	1.013.110 €	27,6%	0,4%	1,2%	2,4%
E	E-141	165	1.013.666 €	27,2%	0,4%	1,2%	2,3%
E	V150	165	1.070.700 €	27,4%	0,4%	1,2%	2,3%
E	N-149	165	1.104.818 €	26,9%	0,4%	1,2%	2,3%
F	E-141	165	805.357 €	25,6%	0,4%	1,1%	2,1%
F	V150	165	847.323 €	25,7%	0,4%	1,1%	2,1%
F	N-149	165	869.852 €	25,2%	0,4%	1,1%	2,1%

2019	WEA	Naben-	6,14cent/kWh	Szenarien und deren Verluste			
Standorte		höhe	EUR	B1 theor	B1 mess	B2 theor	B2 mess
B	E-141	165	1.122.566 €	0,4%	0,4%	0,6%	0,9%
B	V150	165	1.192.202 €	0,4%	0,4%	0,6%	0,9%
B	N-149	165	1.231.603 €	0,4%	0,4%	0,6%	0,9%

Standorte		höhe	EUR	C theor	C mess	D theor	D mess
C	E-141	165	1.094.992 €	4,9%	5,1%		
C	V150	165	1.162.392 €	4,9%	5,1%		
C	N-149	165	1.200.054 €	4,9%	5,1%		
D	E-141	165	932.460 €			2,2%	2,8%
D	V150	165	985.568 €			2,2%	2,8%
D	N-149	165	1.013.110 €			2,2%	2,7%

Standorte		höhe	EUR	E theor	E mess
E	E-141	165	1.013.666 €	2,0%	2,1%
E	V150	165	1.070.700 €	2,0%	2,1%
E	N-149	165	1.104.818 €	1,9%	2,0%

Standorte		höhe	EUR	Fü40 theor	Fü40 mess	F theor	F mess
F	E-141	165	805.357 €	4,1%	4,3%	7,7%	7,2%
F	V150	165	847.323 €	4,1%	4,3%	7,8%	7,2%
F	N-149	165	869.852 €	4,0%	4,2%	7,6%	7,0%

Es zeigen sich so gut wie keine bzw. nur marginale Unterschiede in den prozentualen Ertragseinbußen beim Anlagenbezogenen Vergleich. Der Einfluss der Anlagentechnik auf die prozentualen Ertragseinbußen durch ereignisbezogene Abschaltungen zum Vogelschutz kann vernachlässigt werden.

3.3.3 Einfluss der Nabenhöhe

Dasselbe Ergebnis ist für den Einfluss der Nabenhöhe festzustellen. Für den Standort B wurden die prozentualen Ertragseinbußen für zwei unterschiedliche Nabenhöhen mit 105m und 165m ermittelt und verglichen (s. Tabelle 21).

Tabelle 21: Ergebnisse zu Eintragseinbußen mit Detailauswertungen zu Nabenhöhen

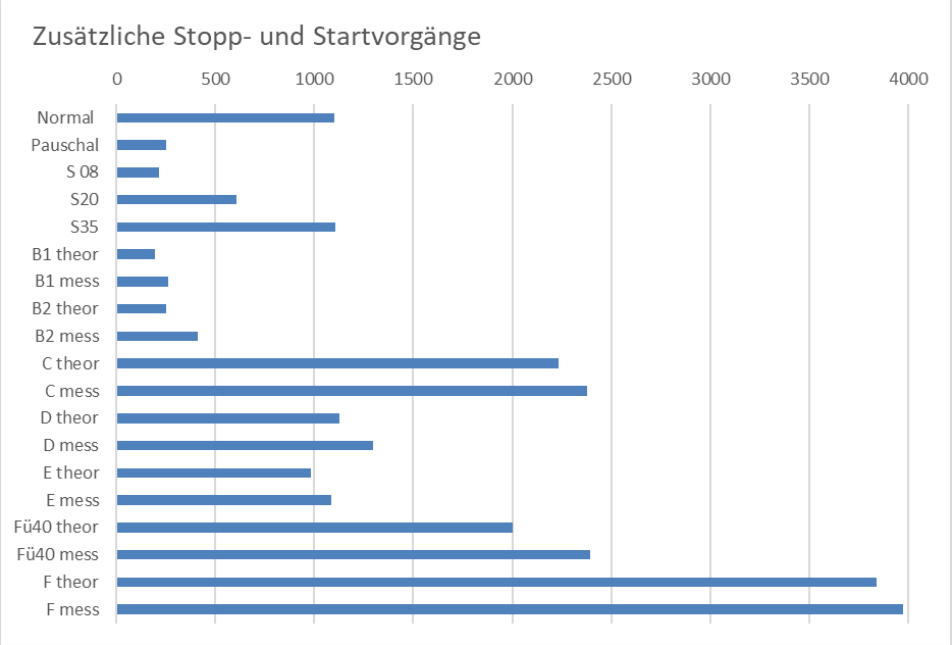
2019	WEA	Naben-	6,14cent/kWh	Szenarien und deren Verluste				Szenarien und deren Verluste			
Standorte		höhe	EUR	Pauschal	S 08	S 20	S 35	B1 theor	B1 mess	B2 theor	B2 mess
B	E-141	165	1.122.566 €	29,3%	0,4%	1,3%	2,4%	0,4%	0,4%	0,6%	0,9%
B	V150	165	1.192.202 €	29,6%	0,4%	1,3%	2,4%	0,4%	0,4%	0,6%	0,9%
B	N-149	165	1.231.603 €	29,2%	0,4%	1,3%	2,4%	0,4%	0,4%	0,6%	0,9%
B	E-141	105	849.291 €	29,9%	0,4%	1,3%	2,5%	0,4%	0,4%	0,5%	0,8%
B	V150	105	918.360 €	29,8%	0,4%	1,3%	2,5%	0,4%	0,4%	0,5%	0,8%
B	N-149	105	931.638 €	29,5%	0,4%	1,3%	2,4%	0,4%	0,4%	0,5%	0,8%

Die absoluten Ertragszahlen liegen bei der großen Nabenhöhe verständlicherweise deutlich höher, da das Windpotenzial über die Nabenhöhe beträchtlich ansteigt. Aber die prozentualen Ertragsverluste sind bei allen Szenarien im Vergleich der beiden Nabenhöhen nahezu identisch.

Der Einfluss der Nabenhöhe auf die prozentualen Ertragseinbußen durch ereignisbezogene Abschaltungen kann somit vernachlässigt werden.

3.3.4 Ereignisbezogene Stopp- und Startvorgänge

Ereignisbezogene Abschaltungen zum Vogelschutz führen zwangsläufig zu einer größeren Zahl an Stoppvorgängen und den im Anschluss erforderlichen Startvorgängen. Die Analysen für alle Szenarien zeigen erhebliche Unterschiede in der Anzahl von veranlassten Stopp- und Startvorgängen (s. Abbildung 14).



Bezeichnung Szenario	Anzahl der Abschaltungen pro Jahr
Pauschal	214
S 08	213
S 20	608
S 35	1107
B1 theor	196
B1 mess	260
B2 theor	313
B2 mess	453
C theor	2235
C mess	2378
D theor	1128
D mess	1298
E theor	984
E mess	1087
F theor	3841
F mess	3978
Fü40 theor	2000
Fü40 mess	2394

Abbildung 14: Anzahl der zusätzlichen, ereignisbezogenen Stopp- und Startvorgänge pro Jahr

Zur Bewertung der Zahlen ist wichtig zu wissen, dass bei der Entwicklung und Berechnung von Windenergieanlagen gemäß den einschlägigen Richtlinien[7] 1.100 Stopp- und Startvorgänge pro Jahr berücksichtigt werden müssen (Normal). Diese „normale“ Anzahl von Stopp- und Startvorgängen bildet sich gemäß Richtlinie aus der Summe von 1.000 Einschaltvorgängen bei niedrigem Einschaltwind (ca. 3m/s) und jeweils 50 Startvorgängen bei Nennwind (ca. 12m/s) und Ausschaltwind (> 20m/s). Das sind durchschnittlich etwas mehr als 3 Start- und Stoppvorgänge pro Tag.

Durch die ereignisbezogenen Abschaltungen zum Vogelschutz werden Stopp- und Startvorgänge in einem Umfang generiert, der sich im Extremfall auf bis zu maximal 4.000 Stopp- und Startvorgänge pro Jahr kumulieren kann (Szenario F_{mess}). Lediglich 200 bis 300 zusätzliche Stopp- und Startvorgänge ergeben sich auf der anderen Seite bei den moderaten Szenarien.

Welchen Einfluss das jeweilige Szenario auf die Anzahl der Stopp- und Startvorgänge hat, zeigt insbesondere der Vergleich zwischen den vier standortspezifischen Szenarien für den Standort F. Bei Berücksichtigung der Flughöhe ergibt sich eine drastische Reduzierung der Abschaltvorgänge um ca. 40% (von 3.978 bei F_{mess} auf nur noch 2.394 Abschaltungen bei $F_{ü40mess}$).

[7] DIN EN IEC 61400-1 VDE 0127-1:2019-12

3.3.5 Auswirkungen auf die Anlagentechnik

Die durch ereignisbezogene Abschaltungen zum Vogelschutz zusätzlich veranlassten Stopp- und Startvorgänge führen zu einer Zunahme an Abnutzung bei diversen Komponenten. Abnutzung bei Windenergieanlagen geschieht durch unterschiedliche Mechanismen: Abnutzung durch Verschleiß / Abnutzung durch Korrosion bzw. Erosion / Abnutzung durch Materialermüdung.

Abnutzung durch Korrosion und Erosion ist geprägt von äußeren Witterungseinflüssen und spielt bei der Betrachtung von zusätzlichen Stopp- und Startvorgängen keine Rolle. Daher werden im Folgenden nur die Themen „Verschleiß“ und „Materialermüdung“ näher betrachtet.

3.3.5.1 Materialermüdung durch Abschaltungen

Materialermüdung muss betrachtet werden für alle Komponenten, die die Belastungen von der Blattspitze zum Fundament ertragen müssen und somit relevant sind für die Standsicherheit der Anlage. Materialermüdung entsteht durch andauernde Lastwechsel, wobei insbesondere zwei Einflussparameter die Materialermüdung prägen:

- Einflussparameter 1: Anzahl der auftretenden Lastwechsel
- Einflussparameter 2: Amplituden der Lastwechsel

Während Stopp- und Startvorgängen werden zum Ersten die Lastamplituden im Vergleich zu einem ununterbrochenen Anlagenbetrieb geringer und zum Zweiten nimmt auch die Anzahl der Lastwechsel im Vergleich zum nicht unterbrochenen Anlagenbetrieb ab.

Bei der gestoppten Anlage ermüden die Materialien weniger als bei einer Anlage im Produktionsbetrieb. Je nach Dauer der Stillstandzeit wird sich die Materialermüdung mehr oder weniger verringern, aber immer verringern.

Im Ergebnis kann konstatiert werden, dass zusätzliche Stopp- und Startvorgänge sowie zusätzliche Stillstandzeiten nicht zu einer erhöhten Materialermüdung bzw. Abnutzung führen werden.

3.3.5.2 Verschleiß durch Abschaltungen

Verschleiß entsteht insbesondere bei Komponenten, die eine Funktionalität aufweisen und bei Ausführen der Funktion zwei Materialen aneinander reiben. Dies betrifft z.B. Lagerungen, Verzahnungen, Schalter, Motoren, etc. Der Verschleiß wird insbesondere durch folgende Parameter geprägt:

- Einflussparameter 1: Dauer der Verschleißvorgänge
- Einflussparameter 2: Anzahl der Verschleißvorgänge
- Einflussparameter 3: Belastung in den Kontaktzonen der beiden Materialien
- Einflussparameter 4: Schmierung an den Kontaktzonen

Bei der Auslegung der Anlagen müssen gemäß Richtlinie 1.100 Stopp- und Startvorgänge pro Jahr berücksichtigt werden. Auswertungen der Betriebsdaten von diversen Windenergieanlagen

in der Vergangenheit haben gezeigt, dass bei der Mehrzahl der untersuchten Anlagen in der Realität weniger als 1.100 Start- und Stoppvorgänge pro Jahr auftreten. Für diese Anlagen sind zusätzliche ereignisbezogene Stopp- und Startvorgänge im niedrigen dreistelligen Bereich zu vernachlässigen. Relevant für die Betrachtung der Verschleißsteigerung sind daher nur die Szenarien, die pro Jahr mehr als 500 Stopp- und Startvorgänge zusätzlich generieren.

Durch eine höhere Anzahl an ereignisbezogenen Abschaltungen erhöht sich die Anzahl der Verschleißvorgänge an den Komponenten, die mit ihren Funktionalitäten bei Start- und Stoppprozeduren involviert sind. Es sind hier vor allem folgende Komponenten zu nennen, die vermehrtem Verschleiß unterliegen: Pitchverzahnungen, Pitchantriebe, Blattverstelleinrichtungen (mechanisch-elektrisch-hydraulisch), Azimutantriebe, Azimutverzahnungen, Akkumulatoren, Schaltelemente im elektrischen Antriebsstrang.

Für diese Komponenten sind entweder zusätzliche Wartungsarbeiten erforderlich (Erhöhung der Schmierkapazitäten zur Bewahrung vor Verschleiß) oder verschlissene Teile müssen häufiger als sonst instandgesetzt oder erneuert werden. Diese Maßnahmen verursachen zusätzliche Kosten.

Für eine exakte quantitative Aussage zu den zusätzlichen Kosten für die unterschiedlichen Anlagentypen und diversen Szenarien würde es weitere aufwändige Berechnungen bedürfen. Qualitativ kann zumindest die Aussage getroffen werden, dass sich die Kostensteigerungen bei den Instandhaltungskosten im einstelligen Prozentbereich bewegen werden, denn die Instandhaltungskosten insgesamt werden dominiert von den erforderlichen Arbeiten an den Hauptkomponenten der Anlage. Bei den o.g. Komponenten, die insbesondere bei Start- und Stoppvorgängen mehr verschleißen können, handelt es sich ausnahmslos um Sub-Baugruppen, deren Instandhaltung in der Regel mit einfachen Bordmitteln und relativ geringem zusätzlichem Zeitaufwand bewältigt werden kann.

3.4 „Trudelmodus“ von Windenergieanlagen

Bei der Minderung des signifikant erhöhten Tötungsrisikos spielt es eine Rolle, ob ein Anlagenrotor eine ausreichend niedrige Rotordrehzahl realisieren kann und wieviel Zeit vergeht zwischen dem Auslösen des Abschaltsignals und dem Erreichen dieser ausreichend niedrigen Rotordrehzahl.

Eindeutige Sollvorgaben für diese beiden Kriterien existieren noch nicht. In der derzeitigen Diskussion werden die Blattspitzengeschwindigkeit als Kriterium und die beiden Werte 30 km/h und 50 km/h Blattspitzengeschwindigkeit häufiger genannt. Für die zulässige Zeitspanne bis zum Erreichen der niedrigen Blattspitzengeschwindigkeit sind die beiden Werte 30 Sekunden und 40 Sekunden in der Diskussion präsent.

Abbildung 15 verdeutlicht den theoretischen Zusammenhang zwischen Blattspitzengeschwindigkeit und Drehzahl für Rotordurchmesser von 100m bis 200m.

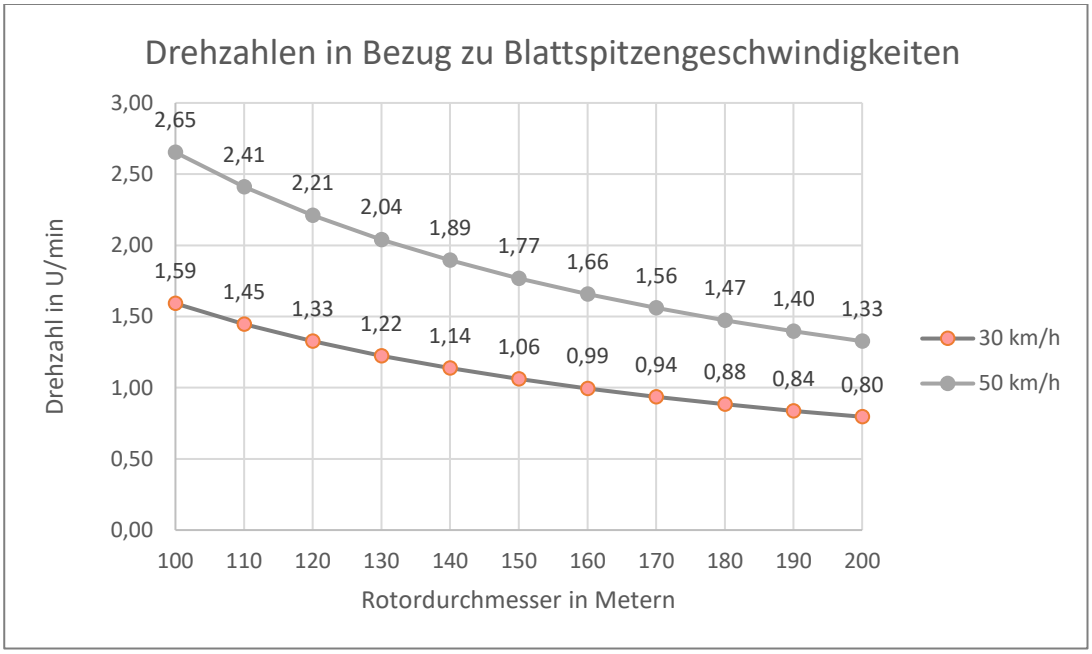


Abbildung 15: Rotordrehzahlen für Blattspitzengeschwindigkeiten von 30km/h und 50km/h

Ein Dokument des Herstellers Enercon weist für die Enercon-Anlagentypen Drehzahlen und Blattspitzengeschwindigkeiten (sowohl Maximal- als auch Durchschnittswerte) für den Trudelmodus aus (ENERCON GMBH 2019a). Demnach wäre z. B. die Anlage des Typs Enercon E-141 EP4 in der Lage, bei Windgeschwindigkeiten bis 6,5m/s eine Rotordrehzahl unterhalb 1U/min (entspricht 25,6km/h Blattspitzengeschwindigkeit) zu realisieren (s. Tabelle 22). Bei höheren Windgeschwindigkeiten würden lt. Enercon-Tabelle auch Rotordrehzahlen bis maximal 2U/min bzw. maximal 53,3km/h Blattspitzengeschwindigkeiten auftreten.

Tabelle 22: Blattspitzengeschwindigkeiten verschiedener Enercon-Windenergieanlagen im Trudelmodus
Quelle: ENERCON GMBH (2019a)

Windenergieanlage	Max. Trudeldrehzahl (n_1)	Windgeschwindigkeit (V_1)	Max. Blattspitzengeschwindigkeit	Trudeldrehzahl bei Windgeschwindigkeit ≤ 6,5 m/s	Blattspitzengeschwindigkeit bei Windgeschwindigkeit ≤ 6,5 m/s
E-103 EP2	3,0 U/min	15,7 m/s	16,2 m/s	≤ 1,2 U/min	≤ 6,7 m/s
E-115	2,8 U/min	16,7 m/s	17,0 m/s	≤ 1,1 U/min	≤ 6,6 m/s
E-115 E2	2,8 U/min	16,5 m/s	17,0 m/s	≤ 1,1 U/min	≤ 6,7 m/s
E-115 EP3 E3[1]	2,5 U/min	14,8 m/s	15,1 m/s	≤ 1,1 U/min	≤ 6,7 m/s
E-126 EP3	2,5 U/min	16,5 m/s	16,6 m/s	≤ 1,0 U/min	≤ 6,6 m/s
E-126 EP4	2,5 U/min	14,9 m/s	16,6 m/s	≤ 1,1 U/min	≤ 7,3 m/s
E-138 EP3	2,5 U/min	17,5 m/s	18,1 m/s	≤ 0,9 U/min	≤ 6,7 m/s
E-138 EP3 E2[1]	2,5 U/min	17,5 m/s	18,1 m/s	≤ 0,9 U/min	≤ 6,7 m/s
E-141 EP4	2,0 U/min	13,6 m/s	14,8 m/s	≤ 1,0 U/min	≤ 7,1 m/s

Von anderen Herstellern sind im Verlauf der Recherche noch keine vergleichbaren Dokumente vorgelegt worden. Es ist aber davon auszugehen, dass die Anlagen anderer Hersteller vergleichbare Werte erzielen können, da diese auf aerodynamischen Effekten beruhen, die für alle dreiflügligen Anlagen mit horizontaler Drehachse gelten.

Das Dokument von ENERCON GMBH (2019a) enthält auch Angaben zur Abregelzeit, sowohl für eine Abregelung in den Trudelmodus als auch für die Abregelung in die Fahnenposition:

Dauer des Übergangs vom Normalbetrieb in den Trudelbetrieb

Wenn die Windenergieanlage im Normalbetrieb angehalten wird, erreicht der Rotor der Windenergieanlage innerhalb von 35 s eine anlagenabhängige Trudeldrehzahl oder steht bei völliger Windstille still. Die Dauer kann, je nach Ursache, durch einen Gradientenstopp erhöht werden.

Dauer des Übergangs vom Normalbetrieb in die Fahnenstellung

Wenn die Windenergieanlage im Normalbetrieb angehalten wird, erreicht der Rotor der Windenergieanlage innerhalb von 35 s eine Drehzahl von nahezu 0 U/min. Die Dauer kann, je nach Ursache, durch einen Gradientenstopp erhöht werden.

Für beide Fälle wird eine Abregelzeit von maximal 35 Sekunden genannt. Sicherlich werden die Abregelzeiten variieren, denn diese hängen davon ab, welche Windgeschwindigkeit am Standort gerade vorherrscht, welche Drehzahl der Rotor zu Beginn hatte, welche Blattwinkel gerade eingestellt sind und mit welcher Blattverstellgeschwindigkeit die Rotorblätter von der Arbeitsposition in die gewünschte Position gefahren werden.

Ein Vergleich der theoretischen Daten aus dem Dokument von Enercon mit realen Werten an bestehenden Anlagen bietet eine Messkampagne der Firma „Fleximaus“ (RÖßLER 2020). Diese liefert grobe Hinweise zu Abregelzeiten von unterschiedlichen Anlagentypen in den Trudelmodus. Die Zeitmessungen erfolgten an realen Windenergieanlagen mit vereinfachten Methoden. Nach einem durch ein externes Ereignis veranlassten Stopp der Anlage wurde die Abregelzeit gemessen. Für die jeweiligen Messwerte ist nicht bekannt, bei welcher Drehzahl und bei welcher Blattwinkeleinstellung die Prozedur eingeleitet wurde. Außerdem wurden die Messungen lediglich diskontinuierlich in 10-Sekunden-Abständen vorgenommen (eine Ausnahme mit 5 Sekunden), weshalb ein Messwert von z.B. 40 Sekunden aussagt, dass die Anlage mehr als 30 Sekunden und bis zu maximal 40 Sekunden benötigte. In der Darstellung der Messergebnisse in Abbildung 16 werden deshalb die wahrscheinlicheren Kernzeiten farblich hervorgehoben.

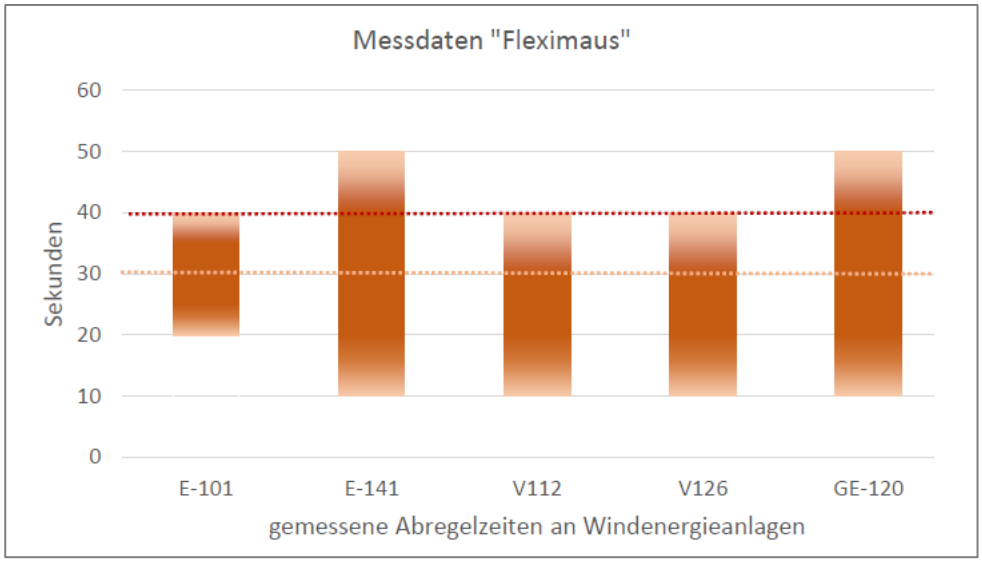


Abbildung 16: Messungen von Zeitspannen, die beim Abregeln mit Standardprozeduren auftraten
Quelle: aufbereitete Daten aus einer Messkampagne der Fleximaus GmbH (RÖßLER 2020)

Es wurden Abregelzeiten zwischen 10 und 50 Sekunden erfasst, wobei es aufgrund der Messmethode wahrscheinlicher ist, dass die Abregelzeiten eher im mittleren Bereich zwischen 20 und 40 Sekunden lagen. Allerdings zeigen die Messdaten für die Enercon E-141 EP4 auch Werte über 35 Sekunden, der Wert, der im Dokument von Enercon als Maximalwert genannt ist. Die Abweichungen können auf Seiten der Messtechnik liegen, da es sich bei der Messmethode um eine überschlägige Herangehensweise handelte.

4 Diskussion

4.1 Flugaktivität – Abschaltungen – Brutplatzszenarien

4.1.1 Repräsentativität der Datengrundlage

Die IDF-Daten zur Flugaktivität im 350 m Radius und zu den von diesen hervorgerufenen Abschaltungen stammen von sechs Standorten in Deutschland (drei in Mecklenburg-Vorpommern, zwei in Sachsen-Anhalt, einer in Baden-Württemberg). Die ermittelte Spanne der Daten reicht von ca. 5-54 Flügen pro Tag und deckt damit schon einen sehr großen Bereich ab. Gleiches gilt für die Zahl der täglichen Abschaltungen (ca. 2 bis 27) mit einem deutlichen Höhepunkt während der Aufzuchtzeit. Angesichts dieser Bandbreite kann trotz der noch geringen Zahl an Probestandorten von einem zumindest ansatzweisen repräsentativen Gesamtbild ausgegangen werden.

Die Daten der Raumnutzungsanalysen stammen aus 17 Untersuchungen, die zwar insgesamt 73 WEA-Standorte umfassen, aber letztlich auf 17 verschiedenen Brutplatzsituationen beruhen. Die dabei ermittelte Flugaktivität im 350 m Radius der betrachteten WEA-Standorte schwankt zwischen durchschnittlich 1-55 Flügen pro Tag, was zunächst sehr gut zu den IDF passt. Allerdings beträgt die Flugaktivität von knapp zwei Dritteln der Standorte maximal zehn Flüge pro Tag, während höhere Werte sich in geringer Anzahl auf die übrigen Standorte verteilen (s. Abbildung 9).

Grundsätzlich gilt somit für beiden Datenquellen, dass sie noch auf einer geringen Stichprobengröße beruhen und Standorte mit vergleichsweise geringer Flugaktivität überrepräsentiert sind. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie können somit erste Abschätzungen ermöglichen und die grundlegende Größenordnung ereignisbezogener Abschaltungen im Vergleich zu einem pauschalen Stillstand während der gesamten Brutzeit verdeutlichen. Für genauere und belastbarere Prognosen ist jedoch die Einbeziehung von Daten weiterer Standorte erforderlich.

4.1.2 Relation zwischen Flugaktivität und Abschaltungen

Da in den IDF-Daten keine vollständigen Erfassungen von Flugbewegungen und Abschaltungen für die komplette Brutdauer des Rotmilans vorliegen, müssen die „Fehlzeiten“ zwangsläufig mit anderen Daten ergänzt werden, um Informationen über das gesamte Jahr zu erhalten. In dieser Studie wurde hauptsächlich auf Durchschnittswerte zurückgegriffen, die während anderer Untersuchungen erhoben wurden (insbesondere HEUCK *et al.* (2019)) oder mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Daten berechnet wurden. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Ausprägung der einzelnen Variablen unterschiedlich stark vom tatsächlichen Standort abhängt und daher in der Realität schwankt, auch zwischen verschiedenen Jahren. Hinweise darauf liefern die in Tabelle 12 aufgeführten Ergebnisse der einzelnen IDF-Standorte. Beispielsweise ist anzunehmen das die durchschnittliche Dauer des Abschaltsignals vom Nahrungsangebot im Nahbereich des

WEA-Standorts abhängt. Eine Berücksichtigung derartiger Standorteinflüsse konnte in der vorliegenden Studie nicht geleistet werden.

Die Ergebnisse von HEUCK *et al.* (2019) basieren zwar auf hochmoderner Sendertechnik, allerdings wurde nur eine relativ geringe Anzahl an Tieren besendert. Die Ergebnisse stimmen jedoch denen anderer Studien weitgehend überein (MAMMEN *et al.* 2013; GSCHWENG *et al.* 2014; PFEIFFER & MEYBURG 2015).

Die Verteilung der Abschaltungen über den Tag unterscheidet sich zwischen realen und Durchschnittswerten. In der Realität kann es zu gehäuften Abschaltungen während eines Jagdvorgangs kommen, die sich bei einer gleichmäßigen Verteilung nicht ergeben. Die Betrachtung der Szenarien „real“ und „prog“ zeigt geringfügige Unterschiede beim Verlust der Stromproduktion. Denkbar ist allerdings, dass mehrere Abschaltsignale in kurzer Abfolge in der Realität nicht zu mehreren tatsächlichen Abschaltungen führen, da die Anlagen noch gar nicht wieder angelaufen sind.

Die Verwendung von Durchschnittswerten wird jedoch im Hinblick auf das Ziel der Studie, eine erste Einschätzung der erwartbaren Leistungseinbußen durch bedarfsgerechte Abschaltungen zu ermöglichen, als gerechtfertigt angesehen. Vorteilhaft ist zudem, dass sich die Berechnungen so einfacher auf andere Standorte übertragen lassen.

Beispielhaft konnte am Standort F gezeigt werden, dass beim Rotmilan die Einbeziehung der Flughöhe eine beträchtliche Rolle für die Anzahl der Abschaltungen spielen kann. Durch eine Beschränkung der Abschaltungen auf Flüge über 40 m Höhe konnte die Zahl der Abschaltungen um nahezu 50 % reduziert werden. In Abhängigkeit von der Höhe der Rotorunterkante (z.B. ab mind. 80 m) könnte dies eine zusätzliche Option zur Optimierung der Stromproduktion ohne wesentliche Einschränkungen beim Artenschutz eröffnen. Dies ist jedoch offensichtlich abhängig ist abhängig vom Standort und vom spezifischen Flugverhalten der jeweiligen Zielart (s. Kap. 4.1.5).

4.1.3 Abhängigkeit der Flugaktivität von verschiedenen Standortparametern

Als erklärende Variablen wurden in erster Linie solche Standortparameter betrachtet, die bekanntermaßen einen signifikanten Einfluss auf die Raumnutzung von Rotmilanen haben (WALZ 2008; PFEIFFER & MEYBURG 2015; HEUCK *et al.* 2019). Durch das entwickelte Modell können rund 38 % der Varianz erklärt werden kann. Im Kontext landschaftsökologischer Fragestellung ist dieser Wert als sehr zufriedenstellend zu erachten (MOLLER & JENNIONS 2002; PEEK *et al.* 2003; LOW-DECARIE *et al.* 2014; MARTIN 2015). Als großer Vorteil des Models stellt sich die geringe Anzahl an erklärenden Variablen dar. Dadurch wird es möglich, eine erste Einschätzung der erwartbaren Flugaktivität mit Hilfe von lediglich zwei Standortparametern (Offenlandanteil sowie die Entfernung zu Rotmilanhorsten) durchzuführen. Sofern bereits eine RNA durchgeführt wurde, können deren Ergebnisse zur noch besseren Abschätzung der erwartbaren Abschaltungen herangezogen werden.

Die Rückschlüsse auf die Flugaktivität besitzen jedoch in erster Linie Gültigkeit für (erfolgreich) brütende Rotmilanpaare, da eine starke Bindung an den Horst für den Einfluss der Entfernung

von entscheidender Bedeutung ist. Für nicht brütende Tiere ist über das gesamte Jahr gesehen von einer geringeren Flugaktivität auszugehen, da keine Jungtiere versorgt werden müssen. Die Bedeutung von guten Jagdhabitaten spielt hingegen sowohl für Brüter als auch für Nicht-Brüter eine wichtige Rolle. Insgesamt ist zu erwarten, dass die Annahme einer Brut im Untersuchungsbereich einer „Worst-Case Betrachtung" der Flugaktivität entspricht.

Änderungen der relevanten Standortparameter sind im Fall des Offenlandanteils in der Regel eher auszuschließen. Die Nutzung von einzelnen Horsten kann bei Rotmilanen hingegen variieren – dies hat regelmäßig Auswirkungen auf die Entfernung zwischen genutzten Horst und Anlagenstandort. Nach den Ergebnissen von SCHNEIDER *et al.* (1987) wurden in drei nordhessischen Untersuchungsgebieten Rotmilanreviere mindestens fünf Jahre genutzt. In jedem Revier sind etwa ein bis drei Wechselhorste zu finden, die alternativ genutzt werden können. In der Studie von HEUCK *et al.* (2019) waren von 32 Horsten rund 40 % über beide Untersuchungsjahre besetzt, von weiteren 41 Horsten hingegen nur rund 24 %. Nach erfolgreichen Bruten wird der Horst im nächsten Jahr häufiger wieder genutzt (SCHNEIDER *et al.* 1987).

Demgemäß kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Abschaltungen in Abhängigkeit von Änderungen in der Brutplatzverteilung von Jahr zu Jahr variieren kann.

4.1.4 Szenarienbildung

An Standorten ohne Rotmilanvorkommen im 1.500 m-Radius ist i.d.R. von einer geringen Rotmilan-Flugaktivität auszugehen, sofern in der weiteren Umgebung überhaupt Reviere vorhanden sind. Konstellationen, wie sie am IDF-Standort F vorkommen, stellen das andere Extrem dar. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten – geringe Entfernung zum Horst, Flugrichtungen vom Waldrand zur Kamera – werden dort Rotmilanflüge örtlich regelrecht konzentriert. Beim Standort F führen somit die spezifischen Landschaftsstrukturen dazu, dass nahezu alle Abflüge vom Brutplatz durch das System registriert wurden. Anthropogene Nahrungsangebote können ebenfalls ein möglicher Grund für äußerst hohe Flugaktivitäten sein. Dabei kann es sich beispielweise um eine Hühnerfarm mit Freilandhaltung handeln, die durch das Mäuseangebot eine sehr hohe Anziehungskraft für Greifvögel aufweist.

Für alle weiteren Standorte mit Rotmilanvorkommen in einer Entfernung zwischen 1.500 und wenigen hundert Metern liefern die Ergebnisse der IDF-Standorte B1 bis E eine Übersicht der erwartbaren Produktionseinbußen durch bedarfsgerechte Abschaltungen für den Rotmilan.

Die drei Szenarien, welche auf Grundlage der Flugaktivitätsklassen gebildet wurden, lassen sich entsprechenden Ausprägungen der betrachteten Standortparameter zuordnen. Die Unterteilung der Szenarien sowie die Zuordnung der Standortparameter ist bewusst grob gewählt, da es sich um ein Werkzeug handelt, mit dem nur eine erste Einschätzung der Flugaktivität am Standort und daran anschließend der Produktionseinbußen von WEA geleistet werden soll. Die Ergebnisse der linearen Regression, als Basis dieses Werkzeugs, stellen durchschnittlich erwartbare Werte dar. Mit Hilfe von RNA können die erwartbaren Abschaltungen im Einzelfall deutlich konkreter prognostiziert werden.

Im Gegensatz zu den Zusammenhängen zwischen der Flugaktivität und der räumlichen Ausprägung von einzelnen Standortparameter können spezielle zeitliche Aspekte der Standortqualität mit dem vorliegenden Ansatz nicht adäquat erfasst werden. Dabei handelt es sich in erster Linie um kurze vorübergehende Zeiträume mit besonders hohem Rotmilanaufkommen, bspw. nach einer Mahd der Flächen im Nahbereich der Anlagen (WASMUND 2013; GOTTSCHALK *et al.* 2015; KARTHÄUSER *et al.* 2019).

4.1.5 Weitere Zielarten

Aufgrund seiner Lebensweise als Beute suchender Segelflieger besteht für den Rotmilan im Vergleich zu anderen Arten ein besonderes Kollisionsrisiko an Windenergieanlagen (DREWITT & LANGSTON 2008). So ist der Rotmilan in Deutschland nach den drei Adlerarten See-, Schrei- und Fischadler die in Relation zur Bestandsgröße am stärksten von Kollisionen an Windenergieanlagen (WEA) betroffene Art (SPRÖTGE *et al.* 2018). Vertreibungseffekte durch Windenergie auf die Art sind nicht bekannt (MADDERS & WHITFIELD 2006; FA WIND 2019). Angesichts seiner weiten Verbreitung in Deutschland (GEDEON *et al.* 2014) ist anzunehmen, dass der Rotmilan bundesweit die bedeutendste Rolle beim Einsatz von technischen Systemen für bedarfsgerechte Abschaltunten einnehmen wird.

Es ist jedoch zu erwarten, dass technische Systeme zur ereignisbezogenen Abschaltung auch für weitere Zielarten eingesetzt werden sollen. Entscheidend für die Schätzung der Abschalthäufigkeiten und der damit verbundenen wirtschaftlichen Konsequenzen sind die Verhaltensweisen der jeweiligen Zielarten. Diese können in einer ersten Näherung mit denen des Rotmilans verglichen werden, umso eine Abschätzung der Abschalthäufigkeit in Relation zum Rotmilan zu ermöglichen.

Eine Auswertung des Flugverhaltens von 14 GPS-besenderten Seeadlern in Finnland hat ergeben, dass die Tiere ca. 11 % der Zeit zwischen Sonnenaufgang und -untergang im Flug verbringen (TIKKANEN *et al.* 2018). HEUCK *et al.* (2019) geben an, dass von insgesamt 74.767 Ortungspunkte der besenderten Rotmilane 25.336 im Flug erfasst wurden, das entspricht rund 34 %. Hinzu kommt, dass Seeadler WEA-Standorte auf landwirtschaftlichen Flächen i.d.R. nur mit Distanzflügen überqueren, ohne dort zu jagen, im Gegensatz zum Rotmilan. Es kann somit erwartet werden, dass die Anzahl an ereignisbezogenen Abschaltungen für Seeadler deutlich geringer ausfällt als für Rotmilane.

Ähnliches dürfte auch für die Zielart Schwarzstorch gelten, die ihre Nahrung schreitend im Wasser oder an feuchten Waldstellen bzw. Wiesen erbeutet. Entsprechend registrierten HAGER & THIELEN (2018) in fünf Raumnutzungsbeobachtungen an bestehenden Windparks im Mittel nur rund 7 % „konfliktträchtige“ Flüge (27 von 406), so dass für diese Art ebenfalls nur von einer geringen Anzahl an ereignisbezogenen Abschaltungen zu rechnen ist.

4.2 Wirtschaftliche Konsequenzen

Es wurden Untersuchungen durchgeführt, um belastbare Aussagen zu den wirtschaftlichen Folgen durch Abschaltungen zum Vogelschutz zu ermitteln. Als Eingangsgrößen zur Untersuchung wurden Zeitreihen für Windgeschwindigkeitsprofile für unterschiedliche Nabenhöhen an sechs unterschiedlichen Standorten in Deutschland sowie diverse Abschaltszenarien (siehe Kapitel 4.1) verwendet.

Auf Basis der Eingangsgrößen wurden Jahreserträge für drei unterschiedliche Windenergieanlagentypen ermittelt, einmal ohne die Anwendung der Szenarien, einmal mit Anwendung der Szenarien. Aus der Differenz ergeben sich die Einbußen für das jeweilige Szenario. Die drei Anlagentypen wurden ausgewählt aus einer Liste der Anlagentypen, die in den Ausschreibungsrunden sehr häufig bezuschlagt wurden.

Durch die Verwendung von sechs Standorten mit sehr unterschiedlichen Profilen sowie durch die Verwendung von drei unterschiedlichen Anlagentypen sind die Ergebnisse weitgehend repräsentativ. Nur bei der Eingangsgröße Windpotenzial wurde auf eine breitere Basis verzichtet und lediglich die Daten aus dem Jahr 2019 verwendet. Da jedes Jahr eine eigene Charakteristik im Windverlauf hat und die ereignisbezogenen Szenarien nur bei bestimmten Zeiten eine hohe Abschaltrate haben, können sich hier Verschiebungen im Ergebnis ergeben. Auf lange Sicht sollten bei der Berechnung der Ertragsverluste allgemeinere Werte für das Windpotenzial verwendet werden, ggf. wäre die Verwendung von P50-, P75- und P90-Werten sinnvoll.

Weiterhin wurden bei der Abschätzung der Ertragsverluste immer ein Fix-Wert von 9 Minuten für die Zeitdauer der Startvorgänge verwendet. Diese Zeitdauer ist in der Realität größeren Varianzen unterlegen durch die Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen und auch von den Regelalgorithmen des jeweiligen Anlagentyps (ca. 4 Minuten bis ca. 11 Minuten). Zur Verbesserung der Genauigkeit bei der Kalkulation von realen Projekten und zur Unterscheidung der Anlagentypen wäre es notwendig, reale Werte für die Zeitdauer der Startprozeduren zu verwenden.

Die prozentualen Ertragseinbußen variieren sehr stark in Abhängigkeit des jeweils angewendeten Szenarios. Dabei ist eindeutig und zweifellos festzustellen, dass das pauschale Szenario, bei dem über die gesamte Brutzeit täglich während den Tageszeiten die Anlagen abgeschaltet werden, mit Abstand die größten Einbußen verursacht. Szenarien mit ereignisbezogenen Abschaltungen verursachen Ertragseinbußen von weniger als 8 % und wären im Vergleich zu einer pauschalen Abschaltung mit Einbußen um die 28 % hinsichtlich der wirtschaftlichen Aspekte grundsätzlich zu bevorzugen.

Die Größe der prozentualen Ertragsverluste bei ereignisbezogenen Abschaltungen ist sehr stark abhängig vom Szenario, das für die Analyse verwendet wird. Eine Spanne von 0,4 % bis hin zu 7,7 % bei den Ergebnissen zeigt den großen Einfluss der Szenarien, d.h. der angenommenen Flugaktivität bzw. Brutplatzsituation. Am Standort F wurde zusätzlich der Faktor Flughöhe einbezogen und das Ergebnis zeigt, dass dahingehende Optimierung der Szenarien bei der Reduzierung von wirtschaftlichen Verlusten hilft, ohne eine Erhöhung des Tötungsrisikos in Kauf zu nehmen (bei ausreichend großer Höhe der Rotorunterkante).

Bei den Abschätzungen der Ertragseinbußen konnten bei den Ergebnissen nur marginale Unterschiede zwischen den drei analysierten Anlagentypen festgestellt werden. Dies würde sich ggf. ändern, wenn die realen Zeiten für die Dauer der Startprozeduren verwendet würden und diese sich bei den Anlagentypen unterscheiden. Weitere und genauere Datenanalysen wären hier sinnvoll.

Die absoluten Ertragszahlen liegen bei großen Nabenhöhen verständlicherweise deutlich höher als bei den niedrigen Nabenhöhen, da das Windpotenzial mit zunehmender Nabenhöhe beträchtlich ansteigt. Dennoch sind die prozentualen Ertragsverluste bei allen Szenarien im Vergleich der ausgewerteten Nabenhöhen nahezu identisch.

Die Anzahl der durch ereignisbezogene Abschaltungen zum Vogelschutz veranlassten Stopp- und Startvorgänge variiert im Vergleich der Szenarien zwischen wenigen hundert Abschaltungen bis hin zu 4.000 Abschaltungen. Insbesondere der Vergleich der am Standort F angewendeten Szenarien zeigt ein Optimierungspotenzial, das nicht ungenutzt bleiben sollte.

Viele zusätzliche Stopp- und Startvorgänge aufgrund ereignisbezogener Abschaltungen führen teils zu einer Zunahme der Abnutzung bei einigen Sub-Komponenten und damit zu mehr Bedarf an Instandhaltung. Eine quantitative Abschätzung der zusätzlichen Instandhaltungskosten in Abhängigkeit der Anzahl der Start- und Stoppvorgänge sowie der Anlagentechnik wäre sicher hilfreich für die zukünftige Planung von Windenergieanlagen.

4.3 Fragestellungen zum Trudelmodus

Zur Minderung des Tötungsrisikos sollte ein Anlagenrotor bei Ereigniseintritt eine ausreichend niedrige Rotordrehzahl in einer möglichst kurzen Zeitspanne realisieren.

Bisher sind für diese beiden Kriterien Sollwerte in der Diskussion (u.a. 30km/h bzw. 50km/h für die Blattspitzengeschwindigkeit und 30 Sekunden bzw. 40 Sekunden für die Zeitspanne zwischen Erkennen des Vogels und Erreichen der Soll-Blattspitzengeschwindigkeit), aber noch nicht spezifiziert.

Reale Werte für Abregelzeiten und erreichbare Blattspitzengeschwindigkeiten sind für Megawattanlagen vereinzelt vorhanden, deren Belastbarkeit für allgemeingültige Aussagen ist allerdings noch gering und die realen Werte weichen in einem Fall auch von den theoretischen Werten ab.

Während der „Fleximaus-Messkampagne“ wurden Abregelzeiten zwischen 10 und 50 Sekunden erfasst, wobei es aufgrund der Messmethode wahrscheinlicher ist, dass die Abregelzeiten eher im mittleren Bereich zwischen 20 und 40 Sekunden lagen. Allerdings zeigen die Messdaten für die Enercon E-141 EP4 auch Werte über 35 Sekunden, der Wert, der im Dokument von Enercon als Maximalwert genannt ist. Die Abweichungen können auf Seiten der Messtechnik liegen, da es sich bei der Messmethode um eine überschlägige Herangehensweise handelte. Nichtsdestotrotz gilt es für die Zukunft, die Zuverlässigkeit der Aussagen und Stoppcharakteristiken zu steigern.

Dazu sind weitere Messkampagnen und sicherlich auch Optimierungen bei den Stopp-Prozeduren von Windenergieanlagen vorzunehmen.

Eine Verkürzung der Zeitspanne durch die Ergänzung einer spezifischen Stopp-Prozedur in der Anlagensteuerung wäre grundsätzlich zielführend. Herstellervertreter haben schon vorsichtig angedeutet, dass durch zusätzlich angepasste Stopp-Prozeduren die Zeitspanne zur Verminderung des Kollisionsrisikos prinzipiell an Anlagen realisiert werden könnte. Weitere Maßnahmen der Hersteller und Absprachen zwischen den Beteiligten sind erforderlich.

Zum Stand der Technik als Input für die Diskussion kann wie folgt ausgeführt werden:

Bei der Auslegung der Anlagen sind bislang nur wenige Richtlinienanforderungen zum Trudelmodus zu beachten, daher haben die Hersteller die Prozedur zumeist nach eigenen individuellen Gesichtspunkten erstellt und programmiert. Eine Regelung bzw. strikte Begrenzung der Blattspitzengeschwindigkeit beim Trudelmodus gehört nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht dazu. Gemäß dem Stand der Technik ist jedoch eine Regelung der Blattspitzengeschwindigkeit im Trudelmodus prinzipiell möglich.

Windenergieanlagen mit größerem Rotordurchmesser benötigen aufgrund der Massenträgheit des Rotors tendenziell etwas länger für die Abbremsung auf niedrige Blattspitzengeschwindigkeiten als Anlagen mit kleinerem Rotordurchmesser, sofern die Verzögerung des Rotors nur auf aerodynamischen Effekten beruht. Um höhere Verzögerungen am Rotor zu erreichen, könnten ggf. Generatormomente mit einbezogen werden. Dieses Verfahren wird bei Kleinstwindanlagen schon seit vielen Jahren angewendet. Eine Prüfung zur möglichen Anwendung bei Großwindanlagen wird angeregt.

5 Literatur

AMMERMANN, K., E. BRUNS, J. PONITKA, E. SCHUSTER, D. SUDHAUS & F. TUCCI (2020): Technische Systeme zur Minderung von Vogelkollisionen an Windenergieanlagen - Entwicklungsstand und Fragestellungen. Bfn Skripten (571): 30 S.

BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE & R. WEIBER (2006): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. In, Berlin.

BRUIN, J. (2006): Introduction to SAS. .

BUSCHE, G. (2008): Zum brutzeitlichen Aktionsraum eines Rotmilanpaares Milvus milvus im Kreis Dithmarschen. Corax 21.

DORMANN, C., J. ELITH & S. BACHER (2013): Collinearity: A review of methods to deal with it an a simulation study evaluating their performance. Ecography 36 (1): 27-46.

DORMANN, C. & I. KUHN (2008): Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften. . In. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung.

DREWITT, A. L. & R. H. LANGSTON (2008): Collision effects of wind-power generators and other obstacles on birds. Ann. N. Y. Acad. Sci. 1134: 233-266. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18566097.

ENERCON GMBH (2017): ENERCON Produktübersicht - Für jeden Standort die passende Windenergieanlage. 21 S.

ENERCON GMBH (2019a): Technische Beschreibung Anhalten der Windenergieanlagen EP1, EP2, EP3 und EP4.

ENERCON GMBH (2019b): Technische Beschreibung ENERCON Windenergieanlage E-138 EP3 E2. 25 S.

FA WIND (Fachagentur Windenergie an Land) (2019): Rotmilan und Windenergie im Kreis Paderborn - Untersuchung von Bestandsentwicklung und Bruterfolg. 48 S.

FOWLER, J., L. COHEN & P. JARVIS (1998): Practical Statistics for Field Biology. In.

GEDEON, K., C. GRÜNEBERG, A. MITSCHKE, C. SUDFELDT, W. EICKHORST, S. FISCHER, M. FLADE, S. FRICK, I. GEIERSBERGER, B. B. KOOP, M. KRAMER, T. KRÜGER, N. ROTH, T. RYSLAVY, S. STÜBING, S. R. SUDMANN, R. STEFFENS, F. VÖKLER & K. WITT (2014): Atlas Deutscher Brutvogelarten – Atlas of German Breeding Birds. In. Herausgegeben von der Stiftung Vogelmonitoring und dem Dachverband Deutscher Avifaunisten, Münster.

GOTTSCHALK, E., N. WASMUND, B. SAUER & R. BAYOH (2015): Nahrungsmangel beim Rotmilan Milvus milvus? Was können zusätzliche Mahdflächen zur Nahrungsverfügbarkeit beitragen? Abh. Ber. Mus. Heineanum 10: 17-32.

GRÜNEBERG, C. & J. KARTHÄUSER (2019): Verbreitung und Bestand des Rotmilans *Milvus milvus* in Deutschland - Ergebnisse der bundesweiten Kartierung 2010-2014. Vogelwelt 139: 101-116.

GRÜNKORN, T. & J. WELCKER (2019): Erhebung von Grundlagendaten zur Abschätzung des Kollisionsrisikos von Uhus an Windenergieanlagen im nördlichen Schleswig-Holstein. 68 S.

GSCHWENG, M., M. RIEPL & E. K. V. KALKO (2014): Rotmilan (Milvus milvus) und Windenergie: Problematik und Praxis bei der Erfassung windkraftsensibler Greifvogelarten. Ber. Vogelschutz 51: 61-82.

HAGER, A. & J. THIELEN (2018): Untersuchung des Flugverhaltens von Schwarzstörchen in Abhängigkeit von Witterung und Landnutzung unter besonderer Berücksichtigung vorhandener WEA im Vogelschutzgebiet Vogelsberg. Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. https://landesplanung.hessen.de/sites/landesplanung.hessen.de/files/Fassung%20B_Schwarzstorch_Endber_ohne%20Thibout_20190426_D_final.pdf.

HEUCK, C., M. SOMMERHAGE, P. STELBRINGK, C. HÖFS, K. GEISLER, C. GELPKE & S. KOSCHKAR (2019): Untersuchung des Flugverhaltens von Rotmilanen in Abhängigkeit von Wetter und Landnutzung unter besonderer Berücksichtigung vorhandener Windenergieanlagen im Vogelschutzgebiet Vogelsberg - Abschlussbericht. im Auftrag des Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen.

ISSELBÄCHER, T., C. GELPKE, T. GRUNWALD, H. KORN, J. KREUZIGER, J. SOMMERFELD & S. STÜBING (2018): Leitfaden zur visuellen Rotmilan-Raumnutzungsanalyse. Untersuchungs- und Bewertungsrahmen zur Behandlung von Rotmilanen (Milvus milvus) bei der Genehmigung für Windenergieanlagen. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten. Mainz, Linden, Bingen. 22 S.

KARTHÄUSER, J., J. KATZENBERGER & C. SUDFELD (2019): Evaluation von Maßnahmen zur Verbesserung des Nahrungsangebotes für den Rotmilan Milvus milvus in intensiv genutzten Agrarlandschaften. Vogelwelt 139**:** 71-86.

KNE (2020): Synopse - Detektionssysteme zur ereignisbezogenen Abschaltung von Windenergieanlagen zum Schutz von tagaktiven Brutvögeln. 38 S.

KRÜGER, T. (2009): Ökologie, Gefährdung und Schutz des Rotmilans Milvus milvus in Europa. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen 3/09.

LAG VSW (Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten) (2015): Abstandsempfehlungen für Windenergieanlagen zu bedeutsamen Vogellebensräumen sowie Brutplätzen ausgewählter Vogelarten in der Überarbeitung vom 15. April 2015. 29 S.

LEYER, I. & K. WESCHE (2007): Mulitvariate Statistik in der Ökologie: Eine Einführung. In. Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg.

LOW-DECARIE, E., C. CHIVERS & M. GRANADOS (2014): Rising complexity and falling explanatory power in ecology. Frontiers in Ecology**:** 412-418.

MADDERS, M. & D. P. WHITFIELD (2006): Upland raptors and the assessment of wind farm impacts. Ibis 148**:** 43-56. http://dx.doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00506.x.

MAMMEN, K., U. MAMMEN & A. RESETARITZ (2013): Rotmilan. In: HÖTKER, H., O. KRONE & G. NEHLS: Greifvögel und Windkraftanlagen: Problemanalyse und Lösungsvorschläge. Schlussbericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Michael-Otto-Institut im NABU, Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung, BioConsult SH, Bergenhusen, Berlin, Husum.

MARTIN, L. J. (2015): Mathematizing Nature's Messiness: Graphical Representations of Variation in Ecology, 1930-present. Enviromental Humanities (7)**:** 59-88.

MEDDIS, R. (1984): Statistics using Ranks. A unified approach.

MIOSGA, O., S. BÄUMER, S. GERDES, D. KRÄMER, F.-B. LUDESCHER & R. VOHWINKEL (2019): Telemetriestudien am Uhu. Raumnutzungskartierung, Kollisionsgefährdung mit Windenergieanlagen. Natur in NRW 1**:** 36-40.

MOLLER, A. P. & M. JENNIONS (2002): How much Variance can be explained by ecologists and evolutionary biologists? Oecologia (132): 492-500.

NLT (Niedersächsischer Landkreistag) (2014): Naturschutz und Windenergie - Hinweise zur Berücksichtigung des Naturschutzes und der Landschaftspflege bei Standortplanung und Zulassung von Windenergieanlagen (Stand: Oktober 2014). Hannover. 37 S. http://www.nlt.de/pics/medien/1_1414133175/2014_10_01_Arbeitshilfe_Naturschutz_und_Windenergie__5__Auflage__Stand_Oktober_2014_Arbeitshilfe.pdf.

NORDEX ENERGY GMBH (2017): Schallemission, Leistungskurven, Schubbeiwerte - Nordex N149/4.0 - 4.5 STE. 9 S.

PEEK, M. S., A. J. LEFFLER & S. D. FLINT (2003): How much variance is explained by ecologists? Additional perspectives. Oecologia (137): 161-170.

PFEIFFER, T. & B.-U. MEYBURG (2015): GPS tracking of Red Kites (Milvus milvus) reveals fledgling number is negatively correlated with home range size. Journal of Ornithology 156 (4): 963-975. http://link.springer.com/article/10.1007/s10336-015-1230-5/fulltext.html.

R CORE TEAM (2020): A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna.

RÖßLER, J. (2020): Auswertung von Stop-Zeiten an Windenergieanlagen. Skizzen zu einer Messkampange der Fleximaus GmbH.

SACHS, L. (2004): Angewandte Statistik. In. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

SCHNEIDER, H.-G., A. GOTTMANN & M. WILKE (1987): Der Rotmilan (Milvus milvus) in Nordhessen - Ergebnisse zehnjähriger Untersuchungen zur Bestandsentwicklung, Siedlungsdichte, Siedlungsweise, Brutbiologie und Zugverlauf auf drei Probeflächen. Vogelkundliche Hefte Edertal 13: 19-37.

SPATZ, T., D. SCHABO, N. FARWIG & S. RÖSNER (2019): Raumnutzung des Rotmilans Milvus milvus im Verlauf der Brutzeit: Eine Analyse mittels GPS-besierter Bewegungsdaten. Vogelwelt 139: 161-169.

SPRÖTGE, M., E. SELLMANN & M. REICHENBACH (2018): Windkraft Vögel Artenschutz. In. Books on Demand, Norderstedt.

TIKKANEN, H., F. BALOTARI-CHIEBAO, T. LAAKSONEN, V.-M. PAKANEN & S. RYTKÖNEN (2018): Habitat use of flying subadult White-tailed Eagles (*Haliaeetus albicilla*): implications for land use and wind power plant planning. Ornis Fenn. (95): 137-150.

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (2017): Leistungsspezifikationen V150-4, 0/4,2 MW 50/60 Hz. 17 S.

WALZ, J. (2005): Rot- und Schwarzmilan. Flexible Jäger mit Hang zur Geselligkeit. . In. AULA-Verlag; Auflage: 1., Aufl. (Juli 2005).

WALZ, J. (2008): Aktionsraumnutzung und Territorialverhalten von Rot- und Schwarzmilanpaaren (Milvus milvus, M. migrans) bei Neuansiedlungen in Horstnähe. Ornithol. Jh. Bad.-Württ. 24: 21-38.

WASMUND, N. (2013): Der Rotmilan (Milvus milvus) im Unteren Eichsfeld. Brutbestand, Nahrungsökologie und Gefährdungsursachen. . Georg-August-Universität Göttingen.

Anhang 1

Tabelle 23: Ausschnittsweiser Jahresgang der Abschaltungen am Standort B2
Der grau unterlegte Zeitraum zeigt die während der IDF-Testreihe tatsächlich erfassten Abschaltungen. Die übrigen Abschaltungen basieren auf Mittelwerten.

Datum	Tagesstunde	Real		Prog	
		Abschaltung	Abschaltdauer	Abschaltung	Abschaltdauer
14.08.2015	1	0	0	0	0
14.08.2015	2	0	0	0	0
14.08.2015	3	0	0	0	0
14.08.2015	4	0	0	0	0
14.08.2015	5	0	0	0	0
14.08.2015	6	0	0	0	0
14.08.2015	7	0	0	0	0
14.08.2015	8	0	0	0	0
14.08.2015	9	0	0	0	0
14.08.2015	10	0	0	0	0
14.08.2015	11	0	0	0	0
14.08.2015	12	0	0	0	0
14.08.2015	13	0	0	0	0
14.08.2015	14	0	0	0	0
14.08.2015	15	0	0	0	0
14.08.2015	16	0	0	0	0
14.08.2015	17	1	0,076348926	1	0,076348926
14.08.2015	18	0	0	0	0
14.08.2015	19	0	0	0	0
14.08.2015	20	0	0	0	0
14.08.2015	21	0	0	0	0
14.08.2015	22	0	0	0	0
14.08.2015	23	0	0	0	0
14.08.2015	24	0	0	0	0
15.08.2015	1	0	0	0	0
15.08.2015	2	0	0	0	0
15.08.2015	3	0	0	0	0
15.08.2015	4	0	0	0	0
15.08.2015	5	0	0	0	0
15.08.2015	6	0	0	0	0
15.08.2015	7	0	0	0	0
15.08.2015	8	0	0	0	0
15.08.2015	9	0	0	1	0,076348926
15.08.2015	10	0	0	0	0
15.08.2015	11	0	0	0	0

15.08.2015	12	0	0	0	0
15.08.2015	13	0	0	0	0
15.08.2015	14	0	0	0	0
15.08.2015	15	0	0	0	0
15.08.2015	16	0	0	0	0
15.08.2015	17	0	0	0	0
15.08.2015	18	0	0	0	0
15.08.2015	19	0	0	0	0
15.08.2015	20	0	0	0	0
15.08.2015	21	0	0	0	0
15.08.2015	22	0	0	0	0
15.08.2015	23	0	0	0	0
15.08.2015	24	0	0	0	0
16.08.2015	1	0	0	0	0
16.08.2015	2	0	0	0	0
16.08.2015	3	0	0	0	0
16.08.2015	4	1	0,033756389	0	0
16.08.2015	5	0	0	0	0
16.08.2015	6	0	0	0	0
16.08.2015	7	1	0,043214722	0	0
16.08.2015	8	1	0,058920278	0	0
16.08.2015	9	1	0,046319444	0	0
16.08.2015	10	1	0,035425	0	0
16.08.2015	11	0	0	0	0
16.08.2015	12	0	0	0	0
16.08.2015	13	0	0	1	0,076348926
16.08.2015	14	0	0	0	0
16.08.2015	15	1	0,034138056	0	0
16.08.2015	16	0	0	0	0
16.08.2015	17	0	0	0	0
16.08.2015	18	0	0	0	0
16.08.2015	19	0	0	1	0,076348926
16.08.2015	20	0	0	0	0
16.08.2015	21	0	0	0	0
16.08.2015	22	0	0	0	0
16.08.2015	23	0	0	0	0
16.08.2015	24	0	0	0	0
17.08.2015	1	0	0	0	0
17.08.2015	2	0	0	0	0
17.08.2015	3	0	0	0	0
17.08.2015	4	0	0	0	0
17.08.2015	5	0	0	0	0

17.08.2015	6	0	0	0	0
17.08.2015	7	0	0	0	0
17.08.2015	8	1	0,04134	0	0
17.08.2015	9	0	0	0	0
17.08.2015	10	0	0	0	0
17.08.2015	11	1	0,076152778	0	0
17.08.2015	12	2	0,073020278	1	0,076348926
17.08.2015	13	0	0	0	0
17.08.2015	14	0	0	1	0,076348926
17.08.2015	15	0	0	1	0,076348926
17.08.2015	16	0	0	0	0
17.08.2015	17	0	0	0	0
17.08.2015	18	0	0	0	0
17.08.2015	19	0	0	0	0
17.08.2015	20	0	0	0	0
17.08.2015	21	0	0	0	0
17.08.2015	22	0	0	0	0
17.08.2015	23	0	0	0	0
17.08.2015	24	0	0	0	0
18.08.2015	1	0	0	0	0
18.08.2015	2	0	0	0	0
18.08.2015	3	0	0	0	0
18.08.2015	4	0	0	0	0
18.08.2015	5	0	0	0	0
18.08.2015	6	0	0	0	0
18.08.2015	7	0	0	0	0
18.08.2015	8	0	0	0	0
18.08.2015	9	0	0	0	0
18.08.2015	10	1	0,0401175	0	0
18.08.2015	11	1	0,044069444	0	0
18.08.2015	12	1	0,068770278	0	0
18.08.2015	13	0	0	0	0
18.08.2015	14	1	0,0351325	0	0
18.08.2015	15	0	0	0	0
18.08.2015	16	0	0	1	0,076348926
18.08.2015	17	0	0	0	0
18.08.2015	18	0	0	0	0
18.08.2015	19	0	0	0	0
18.08.2015	20	0	0	0	0
18.08.2015	21	0	0	0	0
18.08.2015	22	0	0	0	0
18.08.2015	23	0	0	0	0

18.08.2015	24	0	0	0	0
19.08.2015	1	0	0	0	0
19.08.2015	2	0	0	0	0
19.08.2015	3	0	0	0	0
19.08.2015	4	0	0	0	0
19.08.2015	5	0	0	0	0
19.08.2015	6	0	0	0	0
19.08.2015	7	2	0,141048056	0	0
19.08.2015	8	0	0	0	0
19.08.2015	9	0	0	0	0
19.08.2015	10	0	0	1	0,076348926
19.08.2015	11	0	0	0	0
19.08.2015	12	1	0,047388056	0	0
19.08.2015	13	0	0	0	0
19.08.2015	14	0	0	0	0
19.08.2015	15	0	0	0	0
19.08.2015	16	0	0	0	0
19.08.2015	17	0	0	0	0
19.08.2015	18	0	0	1	0,076348926
19.08.2015	19	0	0	0	0
19.08.2015	20	0	0	0	0
19.08.2015	21	0	0	0	0
19.08.2015	22	0	0	0	0
19.08.2015	23	0	0	0	0
19.08.2015	24	0	0	0	0
20.08.2015	1	0	0	0	0
20.08.2015	2	0	0	0	0
20.08.2015	3	0	0	0	0
20.08.2015	4	0	0	0	0
20.08.2015	5	0	0	0	0
20.08.2015	6	0	0	0	0
20.08.2015	7	0	0	0	0
20.08.2015	8	0	0	0	0
20.08.2015	9	0	0	0	0
20.08.2015	10	0	0	0	0
20.08.2015	11	0	0	1	0,076348926
20.08.2015	12	0	0	0	0
20.08.2015	13	0	0	0	0
20.08.2015	14	0	0	0	0
20.08.2015	15	0	0	0	0
20.08.2015	16	0	0	0	0
20.08.2015	17	0	0	1	0,076348926

20.08.2015	18	0	0	0	0
20.08.2015	19	0	0	0	0
20.08.2015	20	0	0	0	0
20.08.2015	21	0	0	0	0
20.08.2015	22	0	0	0	0
20.08.2015	23	0	0	0	0
20.08.2015	24	0	0	0	0