

Fachliche Erläuterungen zum Windkrafteerlass Bayern

Verringerung des Kollisionsrisikos durch fledermausfreundlichen Betrieb der Anlagen

Oliver Behr & Bernd-Ulrich Rudolph

Februar 2013



An einer WEA bei Creußen, Lkr. BT, kollidierte Rauhautfledermaus. April 2009
Foto Wolfgang Völkl

Impressum:

Herausgeber:
Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

Telefon: 0821 9071-0
Telefax: 0821 9071-5556
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Postanschrift:
Bayerisches Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

Bearbeitung:
Ref.54/ Bernd-Ulrich Rudolph
Universität Erlangen-Nürnberg: Dr. Oliver Behr



Stand:
Februar 2013

Die folgenden Erläuterungen beruhen zum Teil auf einem unveröffentlichten Gutachten des Freiburger Instituts für angewandte Tierökologie GmbH (Dr. Robert Brinkmann, Johanna Hurst) im Auftrag der **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg**, das dankenswerterweise dem Bayerischen Landesamt für Umwelt zur Verfügung gestellt worden ist. Es wurde von Bernd-Ulrich Rudolph (LfU) und Dr. Oliver Behr (Universität Erlangen-Nürnberg) ergänzt und verändert.

Der hier verwendete Begriff „Forschungsvorhaben“ bezieht sich auf das durch das BMU geförderte und durch die Universitäten Hannover und Erlangen-Nürnberg durchgeführte Projekt „Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an On-Shore-Windenergieanlagen“. „Forschungsbericht“ bezieht sich auf den gleichnamigen Endbericht des genannten Vorhabens (R. Brinkmann, O. Behr, I. Niermann und M. Reich (2011). Göttingen, Cuvillier Verlag, Umwelt und Raum Bd. 4).

Inhalt

1	Vorbemerkungen	4
2	Vorgehensweise	4
3	Berechnung fledermausfreundlicher Betriebsalgorithmen	6
3.1	Schritt 1: Formatierung und Prüfung des Datensatzes.	6
3.2	Schritt 2: Anwendung (oder – in seltenen Fällen – Entwicklung) eines Modells zur Schätzung der Fledermausaktivität	10
3.3	Schritt 3: Extrapolation der Aktivität in 10-min-Intervallen auf ganze Nächte	11
3.4	Schritt 4: Schätzung der Schlagopferzahl	13
3.5	Schritt 5: Extrapolation des Schlagrisikos von ganzen Nächten auf 10-min-Intervalle	15
3.6	Schritt 6: Korrektur für unterschiedliche Rotorradien	16
3.7	Schritt 7: Entwicklung des Betriebsalgorithmus	17
4	Literatur	27

1 Vorbemerkungen

Im Rahmen eines bundesweiten Forschungsvorhabens (BRINKMANN et al. 2011) wurde ein Modell entwickelt, mit dem sich die Zahl der zu erwartenden Fledermaus-Schlagopfer an einer Windenergieanlage (WEA) in einer Nacht aus der Zahl der akustischen Aufnahmen von Fledermausrufen in Gondelhöhe und der Windgeschwindigkeit schätzen lässt (KORNER-NIEVERGELT et al. 2011). Mit diesem Modell kann, basierend auf den Daten einer akustischen Aktivitätserfassung, geprüft werden, ob der Schwellenwert für die durchschnittliche Zahl jährlich getöteter Fledermäuse an einer Anlage überschritten wird. Im bayerischen Windkrafteerlass wurde dieser Schwellenwert bei unter zwei Tieren festgelegt.

Nach dem momentanen Forschungsstand sind zeitweise Abschaltungen die einzige wirksame Methode zur Verringerung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen mit WEA. Abschaltzeiten orientieren sich gewöhnlich an der Jahres- und Nachtzeit, Windgeschwindigkeit und Temperatur. BEHR et al. (2011a) haben eine Methode zur Berechnung anlagenspezifischer Betriebsalgorithmen entwickelt. Basierend auf den Daten einer akustischen Aktivitätserfassung während eines Jahres an der Gondel einer Windenergieanlage kann ein dem spezifischen Aktivitätsniveau an dieser Anlage angepasster fledermausfreundlicher Betrieb umgesetzt werden. Gegenüber der herkömmlichen Methode einer pauschalen Abschaltung können dadurch bei gleichem positiven Effekt für Fledermäuse die Abschaltzeiten und -kosten in nahezu allen Fällen verringert werden. In diesem Zusammenhang kommt einer geschickten Standortwahl eine hohe Bedeutung zu, da an Standorten mit geringer Fledermausaktivität auch nur geringe Abschaltzeiten notwendig sind.

Diese Hinweise dienen dazu, die in dem Forschungsvorhaben entwickelten Modelle, deren Anwendung im Windkrafteerlass Bayern empfohlen wird, zu erläutern.

2 Vorgehensweise

Um die im Forschungsvorhaben entwickelten fledermausfreundlichen Betriebsalgorithmen den Gegebenheiten an der jeweiligen Windenergieanlage anzupassen, sind verschiedene Berechnungen notwendig, die auf zwei im Forschungsvorhaben erstellten Modellen basieren. Es handelt sich hierbei im ersten Schritt um ein Modell, das aus der aktuellen Windgeschwindigkeit, dem Monat und der Nachtzeit die Fledermausaktivität im Gondelbereich vorhersagt. Basierend auf diesem Ergebnis wird in einem zweiten Schritt mit diesem Modell das aktuelle Schlagrisiko berechnet.

Das Modell zur Aktivitätsvorhersage ist dabei an das Aktivitätsniveau (Zahl der im Gondelbereich aufgenommenen Fledermausrufsequenzen) und ggf. an das Aktivitätsmuster (Verteilung der Fledermausaktivität über das Jahr und über die Nacht) anzupassen, wie wir im Folgenden darstellen. Um das spezifische Aktivitätsmuster (jahreszeitliche und tageszeitliche Phänologie, Abhängigkeit der Aktivität von der Windgeschwindigkeit) an einer WEA zu berücksichtigen, sind die Berechnung eines eigenen anlagenspezifischen Modells und damit der Einsatz einer Statistik-Software und entsprechende Kenntnisse unumgänglich (BEHR et al. 2011b). Soll jedoch, wie hier für die meisten Standorte empfohlen wird, nur das Aktivitätsniveau der WEA (also der sog. Anlagenfaktor) aus dem Datensatz geschätzt und die anderen Parameter aus dem Datensatz des Forschungsvorhabens übernommen werden, so vereinfachen sich die notwendigen Berechnungen stark (näheres zu den jeweiligen Voraussetzungen und zum Vorgehen weiter unten). Das Aktivitätsniveau ist dabei als relatives Maß anzusehen, das die Unterschiede zwischen verschiedenen WEA in der Gesamtaktivität (d. h. der Anzahl von Aufnahmen pro Beobachtungszeit) quantifiziert.

In einem Folgeprojekt des vom BMU finanzierten Forschungsvorhabens ist in naher Zukunft die Veröffentlichung eines Software-Tools für die Ermittlung des Aktivitätsniveaus aus den Felddaten und die

darauf aufbauende Erstellung der fledermausfreundlichen Betriebsalgorithmen geplant. Diese Software wird die Berechnungen noch einmal stark vereinfachen.

Liegen nach dem ersten Betriebsjahr akustische Aktivitätsmessungen aus der Gondel der WEA vor, kann anhand derer das Kollisionsrisiko am jeweiligen Standort differenziert eingeschätzt werden. Nach dem zweiten Betriebsjahr mit akustische Aktivitätsmessungen auf Gondelhöhe erfolgt eine Überprüfung und ggf. Konkretisierung der aus dem ersten Betriebsjahr abgeleiteten Vorgaben (siehe weiter unten).

Die akustische Aktivitätserfassung soll jeweils vom 15.03. bis zum 31.10. durchgeführt werden. Außerhalb dieses Zeitraums ist nur eine sehr geringe Fledermausaktivität zu erwarten, so dass die für den Messzeitraum errechnete Zahl der Schlagopfer auf das gesamte Jahr übertragen werden kann.

Von den 230 Nächten im Zeitraum 15.03. bis 31.10. sollten dabei möglichst drei Viertel, also 173 Nächte, mindestens jedoch zwei Drittel, also 154 Nächte, gültige Aufnahmenächte sein. Von diesen Nächten sollten 68, mindestens jedoch 61, im Hauptaktivitätszeitraum 01.07. bis 30.09. liegen. Die hier angegebenen Mindestzeiträume beruhen bislang auf allgemeinen Erfahrungswerten von Experten. Entsprechende wissenschaftliche Untersuchungen können daher ggf. noch zu einer Modifizierung der Vorgaben führen.

Gültige Aufnahmenächte sind solche, in denen das Aufnahmegerät aktiv ist (d.h. keine Ausfälle) und die Empfindlichkeit (und damit die Aufnahmeschwelle) des Mikrofons maximal 6 dB von der ursprünglichen Kalibrierung des Herstellers (bzw. beim Anabat SD1 der kalibrierenden Person) abweicht (s. u.). Darüber hinaus müssen für mindestens 80 % der 10-Minuten-Intervalle der Nacht (Sonnenunter- bis -aufgang) gültige Windgeschwindigkeitswerte von der Gondel der WEA vorliegen.

Auf Grundlage der akustischen Messungen und der Windgeschwindigkeitsdaten an der Gondel der Anlage können nun anlagenspezifische Betriebsalgorithmen für den Zeitraum zwischen dem 15. März und dem 31. Oktober entwickelt werden. Dabei soll nach der im Bundesforschungsvorhaben durch BEHR et al. (2011a) entwickelten und im Folgenden erläuterten Methodik vorgegangen werden.

Die Berechnung der Abschaltalgorithmen erfolgt in mehreren Schritten:

Schritt 1: Formatierung und Prüfung des Datensatzes.

Schritt 2: Anwendung (oder in seltenen Fällen Entwicklung) eines Modells zur Schätzung der Fledermausaktivität aus der Windgeschwindigkeit, dem Monat, der Nachtzeit und dem anlagenspezifischen Aktivitätsniveau.

Schritt 3: Extrapolation der Aktivität in 10-min-Intervallen auf ganze Nächte, da die Aktivität für 10-min-Intervalle vorhergesagt wird. Hierbei werden unterschiedliche Aktivitätsverteilungen in den Monaten und während der Nacht durch Gewichtungsfaktoren berücksichtigt.

Schritt 4: Schätzung der Schlagopferzahl (Schlagrisiko).

Schritt 5: Verteilung des Schlagrisikos von ganzen Nächten auf 10-min-Intervalle. Auch hierbei werden unterschiedliche Aktivitätsverteilungen in den Monaten und während der Nacht durch Gewichtungsfaktoren berücksichtigt.

Schritt 6: Korrektur für unterschiedliche Rotorradien.

Schritt 7: Entwicklung des optimalen Betriebsalgorithmus basierend auf dem Quotienten aus Energieertrag und erwarteter Schlagopferzahl.

Die Schritte ab Punkt 2 können z. B. in einem einfachen Tabellenkalkulationsprogramm berechnet werden, sofern für die Aktivitätsvorhersage Parameter aus dem Modell des Forschungsvorhabens verwendet werden (was, von wenigen Ausnahmen abgesehen, empfohlen wird – siehe weiter unten). Bei erstmaliger Durchführung der Berechnungen sollte der hierfür notwendige Aufwand jedoch nicht unterschätzt werden! Das genannte Software-Tool wird die notwendigen Berechnungen stark vereinfachen.

3 Berechnung fledermausfreundlicher Betriebsalgorithmen

3.1 Schritt 1: Formatierung und Prüfung des Datensatzes.

Für die Berechnung der Abschaltalgorithmen müssen die Daten zunächst in die passende Form gebracht werden. Grundlage für die Abschaltalgorithmen sind 10-min-Intervalle, beginnend bei der vollen Stunde. Als Maß für die Fledermausaktivität muss für jedes 10-min-Intervall im Aufnahmezeitraum die gemessene Anzahl der akustischen Aufnahmen von Fledermausrufen bestimmt werden. Die Anzahl der Rufe pro Aufnahme sowie die aufgenommenen Arten werden dabei derzeit nicht berücksichtigt.

Die Modelle zur Berechnung der Abschaltalgorithmen beruhen auf den Variablen Windgeschwindigkeit, Jahreszeit und Tageszeit. Jedem 10-min-Intervall müssen daher in der Folge Werte für diese Variablen zugeteilt werden (zusätzlich geht ein anlagenspezifischer Faktor ein, der das Aktivitätsniveau der jeweiligen Anlage beschreibt – siehe unten).

Die **Windgeschwindigkeit** geht als numerische Variable in die Modelle ein. Sie wird im Normalfall von den anlageninternen Systemen bereits für 10-min-Intervalle gemessen (Messwerte des an der WEA-Gondel installierten Anemometers) und wird vom Betreiber zur Verfügung gestellt. Für die Erstellung der Modelle wird die durchschnittliche Windgeschwindigkeit pro 10-min-Intervall in Metern pro Sekunde (m/s) verwendet, die in der Regel in den Datenauszügen der WEA angegeben ist.

Die Bearbeiter sollten im Interesse einer einfachen Bearbeitung darauf achten, die Daten in einem gängigen Datenformat (z. B. *.xls oder *.csv) zu erhalten und nicht z.B. als *.pdf. Es ist sinnvoll, hier auch die Ertragswerte (z.B. in kW pro 10-min-Intervall) abzufragen, da dann eine Kostenabschätzung für den fledermausfreundlichen Betrieb möglich ist.

Es ist von entscheidender Bedeutung, die vom Betreiber zur Verfügung gestellten Werte zur Windgeschwindigkeit auf ihre Plausibilität hin zu prüfen (ein entsprechender Hinweis findet sich in den **FAQs, Abschnitt E**). In diesen Daten finden sich häufig Fehler, Lücken oder Doppelungen. Darüber hinaus ist es sehr wichtig, die den Windgeschwindigkeitsdaten zugeordneten Uhrzeiten zu prüfen. Am sichersten und einfachsten sollte dies mehrfach während der Datenerfassung geschehen. An den meisten WEA kann vor Ort die interne Uhrzeit der Anlage abgelesen werden, die dann meist auf den Datenauszügen erscheint. Diese Uhrzeit entspricht häufig nicht der tatsächlichen Ortszeit (häufig kommen z. B. Sommer-Winterzeit-Fehler vor).

Nach der Datenerfassung müssen die erhobenen Rufdaten einer **Plausibilitätsprüfung** unterzogen werden. Geprüft werden muss z. B. die Verteilung der Aufnahmezeit (z. B. als Gesamtaufnahmezeit in Stunden) in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeiten, Monat und Nachtzeit, (siehe Abbildungen 1.1, 1.2, 1.7, 1.8, 1.9 und 1.10 auf den Seiten 243 bis 245 des Forschungsberichtes – jeweils das unterste Feld der Abbildung mit der Aufnahmedauer, da in diesen Abbildungen einige typische Fehler im Datensatz gut zu erkennen sind (z. B. keine Gleichverteilung der Aufnahmezeit über Nachtintervalle)). Auch die mittlere akustische Aktivität (als Anzahl Aufnahmen pro Stunde) muss in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit, Monat und Nachtzeit dargestellt und mit der im Forschungsvorhaben ermittelten Verteilung verglichen werden (siehe Abbildung 6 auf den Seiten 199 und 200 des Forschungsberichtes für den Batcorder bzw. Abbildung 8 für den Anabat SD1).

Diese Prüfung sollte am besten anhand entsprechender Grafiken erfolgen. Nimmt zum Beispiel die Aktivität (als Aufnahmenanzahl pro Stunde) mit hohen Windgeschwindigkeiten (über 6 m/s) nicht oder nur zum Teil ab, so kann dies ein Hinweis darauf sein, dass die zeitliche Zuordnung Fledermausaktivität – Windgeschwindigkeit zumindest teilweise nicht korrekt ist.

Bei einer **starken Abweichung im Aktivitätsmuster**, die sich nicht durch Fehler im Datensatz erklären lässt und die vermutlich nicht auf einem einmaligen Ausreißer beruht (also z. B. in zwei Erfassungsjahren in ähnlicher Weise auftritt oder sich aus Besonderheiten am untersuchten Standort erklären lässt), kann das hier dargestellte vereinfachte Verfahren zur Berechnung des fledermausfreundlichen Betriebs nicht angewendet werden. Es muss dann ein eigenes Modell zur Aktivitätsvorhersage berechnet werden. Solche Abweichungen sind zum Beispiel: Hauptaktivität im Frühjahr statt im Spätsommer, stark abweichendes Aktivitätsmuster über die Nacht in der Nähe von Quartieren oder deutlich höhere Aktivität bei hohen Windgeschwindigkeiten als im Forschungsvorhaben.

Auch das **Artenspektrum** als der prozentuale Anteil einzelner Arten an der Gesamtaktivität sollte mit den Mittelwerten des Datensatzes des Forschungsvorhabens abgeglichen werden. Insbesondere der Anteil der Artengruppen Nyctaloid und Pipistrelloid sollte verglichen werden, da diese Artengruppen unterschiedliche Rufcharakteristika und daher unterschiedliche Anzahlen möglicherweise zu Tode kommender Tiere je Aufnahme zeigen. Wird das Artenspektrum sehr stark (> 85 %) von einer der beiden Artengruppen dominiert, so ist zu prüfen, ob die für diese Artengruppe spezifischen Modelle (Aktivitätsvorhersage und Berechnung des Schlagrisikos aus der akustischen Aktivität) bessere Ergebnisse als das allgemeine Modell für alle Arten liefern.

Ist die in Gondelhöhe **gemessene Aktivität in den Monaten März und April** sehr gering bis gering (unter 20 Aufnahmen pro ganzer Monat für den Batcorder bzw. unter 15 Aufnahmen für den Anabat SD1), so müssen diese Monate bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt werden (d. h. die entsprechenden Daten können aus dem Datensatz entfernt werden). In Zeiträumen mit sehr geringer Fledermausaktivität kann andernfalls das Schlagrisiko überschätzt werden.

Für die **Jahreszeit** wird der jeweilige Monat als kategorisierte Variable verwendet (also Werte von 3 für den März bis 10 für den Oktober oder 11 für den November).

Die **Nachtzeit** geht ebenfalls als kategorisierte Variable in die Modelle ein. Um Nächte unterschiedlicher Länge miteinander vergleichen zu können, werden alle Nächte in zehn gleich lange Intervalle von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang aufgeteilt. Zusätzlich wird ein Intervall der anderthalbfachen Länge vor Sonnenuntergang berücksichtigt, da gerade Abendsegler häufig auch bereits vor Sonnenuntergang aktiv sind. Dazu müssen zunächst die ortsgenauen Sonnenauf- und -untergangszeiten ermittelt werden. Dem Sonnenuntergang wird der Wert 0 zugeteilt, dem Sonnenaufgang der Wert 1. Als Bezugspunkt für die Einteilung in Intervalle wird jeweils die Uhrzeit zu Beginn der 10-min-Intervalle verwendet. Die seit dem Sonnenuntergang bis zum jeweiligen 10-min-Intervall vergangene Zeit wird durch die gesamte Nachtlänge geteilt. Die Zuteilung zu den Nachtintervallen erfolgt dann in Schritten von 0,1 (siehe Tabelle 3).

Schließlich wird für die Berechnungen die Anzahl der 10-min-Intervalle (nZI) in der jeweiligen Nacht benötigt. Dazu wird die aufgerundete Anzahl der 10-min-Intervalle von Beginn des ersten Intervalls vor Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang verwendet. Tabelle 1 zeigt die genannten Zusammenhänge an einem Beispiel:

Tabelle 1 Windgeschwindigkeit pro 10-min-Intervall. Gezeigt sind Winddaten in 10-min-Intervallen wie im Text beschrieben für einen Zeitraum am 22.05.2010 zwischen 19:40 Uhr und 22:50 Uhr. Die Daten wurden vom Betreiber der WEA zur Verfügung gestellt.

Datum/Uhrzeit	Wind (m/s)
22.5.10 19:40	2,7
22.5.10 19:50	2,5
22.5.10 20:00	2,7
22.5.10 20:10	3,2
22.5.10 20:20	3,6
22.5.10 20:30	3,8
22.5.10 20:40	3,5
22.5.10 20:50	4,8
22.5.10 21:00	4,9
22.5.10 21:10	5
22.5.10 21:20	4,3
22.5.10 21:30	5,4
22.5.10 21:40	5,6
22.5.10 21:50	5,4
22.5.10 22:00	4,6
22.5.10 22:10	4
22.5.10 22:20	4,7
22.5.10 22:30	4,9
22.5.10 22:40	4,6
22.5.10 22:50	4,8

Daten zur gemessenen Fledermausaktivität im gleichen Zeitraum liegen typischerweise in folgender Form vor:

Tabelle 2 Aufnahmen des akustischen Detektors an der Gondel. Hier als Beispiel Daten eines Batcorders. Beim Batcorder sind pro Zeile / Aufnahme bis zu drei verschiedene Artbestimmungen möglich.

Datum/Uhrzeit der Aufnahme	Art1	Art2	Art3
22.5.10 22:11	Ptief		
22.5.10 22:11	Ppip		
22.5.10 22:11	Ptief		
22.5.10 23:11	Pipistrelloid	Ppip	
22.5.10 23:11	Pipistrelloid	Ppip	

22.5.10 23:11	Pipistrelloid		
22.5.10 23:21	Nyctaloid		
22.5.10 23:21	Nycmi		
22.5.10 23:21	Nycnoc		
22.5.10 23:21	Nyctaloid		

Die Zuordnung der Aufnahmen zu den 10-min-Intervallen im hier betrachteten Zeitraum ist in folgender Tabelle 3 dargestellt. Angegeben sind hier auch die jeweilige Nachtzeit und das entsprechende Nachtzeitintervall:

Tabelle 3 Kombination von Wind- und Detektordaten, ergänzt um die Nachtzeit und das entsprechende Nachtzeitintervall. Der Zeitraum der ersten beiden Zeilen liegt außerhalb des für die Berechnungen relevanten Nachtzeitraumes von -0,15 bis 1. Es ist daher kein Nachtzeitintervall zugeordnet. In die Berechnung der Nachtzeitintervalle gehen die Uhrzeit des Sonnenaufgangs und Sonnenuntergangs ein. Letztere hängen wiederum von der geographischen Lage der Windenergieanlage ab (Längengrad/Breitengrad). Alle Zeiten als mitteleuropäische Sommerzeit. Die Tabelle zeigt lediglich einen sehr kleinen Ausschnitt des zur Berechnung herangezogenen Zeitraums.

Start des 10-min-Intervalls	Sonnenuntergang	Sonnenaufgang	Nachtzeit	Nachtzeit-Intervall	Wind (m/s)	Anzahl gemessener Aufnahmen
22.05.2010 19:40	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,18		2,7	0
22.05.2010 19:50	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,16		2,5	0
22.05.2010 20:00	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,14	-0,15-0	2,7	0
22.05.2010 20:10	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,12	-0,15-0	3,2	0
22.05.2010 20:20	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,10	-0,15-0	3,6	0
22.05.2010 20:30	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,09	-0,15-0	3,8	0
22.05.2010 20:40	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,07	-0,15-0	3,5	0
22.05.2010 20:50	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,05	-0,15-0	4,8	0
22.05.2010 21:00	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,03	-0,15-0	4,9	0
22.05.2010 21:10	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	-0,01	-0,15-0	5	2
22.05.2010 21:20	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	0,01	0-0,1	4,3	0
22.05.2010 21:30	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	0,03	0-0,1	5,4	0
22.05.2010 21:40	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	0,04	0-0,1	5,6	3
22.05.2010 21:50	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	0,06	0-0,1	5,4	0
22.05.2010 22:00	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	0,08	0-0,1	4,6	6

22.05.2010 22:10	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	0,10	0,1-0,2	4	0
22.05.2010 22:20	22.05.2010 21:16	23.05.2010 06:12	0,12	0,1-0,2	4,7	0

3.2 Schritt 2: Anwendung (oder – in seltenen Fällen – Entwicklung) eines Modells zur Schätzung der Fledermausaktivität

Zunächst wird ein Modell angewendet, das die Vorhersage der Fledermausaktivität als Anzahl Aufnahmen pro 10-min-Intervall aus den Einflussvariablen Windgeschwindigkeit, Nachtzeit und Jahreszeit für Zeiträume ermöglicht, in denen keine Erfassung der Fledermausaktivität stattfindet (BEHR et al. 2011b). Als weitere Einflussvariable wird zudem die Fledermausaktivität an der konkreten Anlage in das Modell mit aufgenommen. So können Unterschiede im allgemeinen Aktivitätsniveau zwischen den Anlagestandorten berücksichtigt werden. Vereinfacht und auf Einfluss- und Zielgrößen reduziert dargestellt, lautet das Modell:

$$\text{Anzahl Aufnahmen} = e^{(\text{Windgeschwindigkeit} + \text{Windgeschwindigkeit}^2 + \text{Monat} + \text{Nachtzeit} + \text{Anlage} + \text{Intercept})}$$

Oder entsprechend in mathematischer Notation: Anzahl Aufnahmen = $e^{\text{Windgeschwindigkeit} + \text{Quadrat der Windgeschwindigkeit} + \text{Monat} + \text{Nachtzeit} + \text{Anlage} + \text{Intercept}}$

Alle ins Modell eingehenden Einflussfaktoren (Windgeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit², Monat, Nachtzeit und Aktivitätsniveau der jeweiligen Anlage) werden vor dem Summieren durch entsprechende Modellparameter (siehe Anhang 1) gewichtet. Windgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit² werden dabei mit dem entsprechenden Faktor multipliziert, für Monat und Nachtzeit ist der jeweilige Faktor aus der Liste der Modellparameter auszuwählen und für den Effekt der Anlage ist ein konstanter Faktor einzusetzen (Aktivitätsniveau der jeweiligen Anlage – zur Berechnung dieses Faktors aus den Daten siehe weiter unten). Zusätzlich wird eine vom verwendeten Detektor abhängige Konstante (Intercept) innerhalb des exp() Ausdruckes hinzu addiert (siehe Anhang 1).

Zum Beispiel ergibt sich für ein mit dem Batcorder gemessenes 10-min-Intervall bei 4,1 m/s Windgeschwindigkeit im Juli (siehe Anhang 1, Spalte „Batcorder“, Zeile „Monat 7“) zur Nachtzeit 0-0,1 (siehe Anhang 1, Spalte „Batcorder“, Zeile „Nachtzeit 0,1-0,2“) für eine Anlage mit Aktivitätsniveau 3,2516 (dieser Wert quantifiziert das allgemeine Aktivitätsniveau einer Anlage – also die Anzahl von Aufnahmen pro Erfassungszeit – im Vergleich zu anderen WEA – zur Berechnung dieses anlagenspezifischen Aktivitätsniveaus siehe weiter unten) folgende Berechnung der vorhergesagten Anzahl von Aufnahmen pro 10-min-Intervall:

$$\text{Anzahl Aufnahmen} = e^{-0,71349484*4,1 + 0,00822059*4,1^2 + 1,06121241 + 2,06797641 + 3,2516 - 5,02545202} = 0,23887761$$

Die Modellparameter für die Parameter der Einflussvariablen Windgeschwindigkeit, Monat und Nachtzeit wurden bereits anhand umfassender Datensätze für zwei Detektortypen (Anabat SD1 und Batcorder) im Bundesforschungsvorhaben geschätzt (BEHR et al. 2011b und Anhang 1). In der Regel sollten für einen anderen Datensatz diese Modellparameter aus dem Forschungsvorhaben verwendet und nur der Anlagenfaktor neu berechnet werden. Da die Parameter im Forschungsvorhaben anhand eines sehr großen Datensatzes ermittelt wurden, sollten diese generell einem eigenen Modell vorgezogen werden (BEHR et al. 2011a). Ein eigenes Modell ist nur zu empfehlen, wenn der Datensatz ausreichend groß ist (Erfassung über mindestens zwei vollständige Saisons) und wenn sich die im Feld gemessene Aktivität und die mittels der Parameter aus dem Forschungsvorhaben geschätzte Aktivität zu stark unterscheiden. Bei einem kleinen Datensatz besteht die Gefahr, dass bei der Erstellung eines neuen Modells Zufallseffekte eine zu große Rolle spielen (Wetterlage im Erfassungsjahr etc.).

Für die Berechnung eines eigenen anlagenspezifischen Modells sind der Einsatz einer Statistik-Software und entsprechende Kenntnisse unumgänglich (BEHR et al. 2011b). Soll jedoch, wie dies in der Regel der Fall ist, nur der Anlagenfaktor (d. h. das spezifische Aktivitätsniveau der WEA) aus dem Datensatz geschätzt und die anderen Parameter aus dem Datensatz des Forschungsvorhabens übernommen werden, so vereinfachen sich die notwendigen Berechnungen stark. Die oben stehende Formel lässt sich dann nach dem Anlagenfaktor auflösen, da alle weiteren Variablen der Gleichung bekannt sind:

$$\text{Anlagenfaktor} = \log(\text{Anzahl Aufnahmen} / \exp(\text{Windgeschwindigkeit} + \text{Windgeschwindigkeit}^2 + \text{Monat} + \text{Nachtzeit}))$$

Oder entsprechend in mathematischer Notation:

$$\text{Anlagenfaktor} = \log\left(\frac{\text{Anzahl.Aufnahmen}}{e^{\text{Windgeschwindigkeit} + \text{Windgeschwindigkeit}^2 + \text{Monat} + \text{Nachtzeit}}}\right)$$

Anzahl.Aufnahmen bezeichnet in diesem Fall die **gemessene** Anzahl Aufnahmen im Datensatz. Sowohl der Nenner (Potenz von e) als auch der Zähler (Anzahl.Aufnahmen) des Bruchs sind als Mittelwert über alle beprobten 10-min-Intervalle zu berechnen. Diese Berechnung lässt sich z.B. in einem Tabellenkalkulationsprogramm durchführen.

Liegen Messwerte aus zwei Erfassungsjahren vor, so ist für beide Jahre unabhängig der entsprechende Anlagenfaktor zu berechnen. Weichen die Werte stark (Differenz > 1) voneinander ab, so ist zunächst nach plausiblen Erklärungen für diese Abweichung zu suchen. Dies können z. B. ungewöhnlich kalte und regnerische Witterung in einem der beiden Erfassungsjahre oder z. B. ein nur in einem Jahr aufgetretenes Schwärmereignis von Zwergfledermäusen an der WEA sein. Lassen diese Erklärungen es als wesentlich wahrscheinlicher erscheinen, dass einer der beiden Werte dem langjährigen Mittel der Aktivität entspricht, so ist dieser Wert im weiteren Betrieb zu verwenden.

Lassen sich keine sehr deutlichen Hinweise finden, die zur Bevorzugung eines der beiden Werte führen, so ist im weiteren Betrieb (und entsprechend bei der Berechnung der fledermausfreundlichen Betriebsalgorithmen) der Mittelwert der beiden Werte zu verwenden.

Da der Anlagenfaktor exponentiell in die Berechnung der Aktivität eingeht, ist die Mittelung wie folgt vorzunehmen:

$$\text{Mittlerer Anlagenfaktor} = \ln((e^{\text{Anlagenfaktor1}} + e^{\text{Anlagenfaktor2}}) / 2)$$

Oder entsprechend in mathematischer Notation:

$$\text{Mittlerer Anlagenfaktor} = \ln\left(\frac{e^{\text{Anlagenfaktor 1. Jahr}} + e^{\text{Anlagenfaktor 2. Jahr}}}{2}\right)$$

Steht das anlagenspezifische Modell, so werden im Anschluss für jedes 10-min-Intervall des Untersuchungszeitraums anhand dieses Modells die Anzahl der Aufnahmen (und damit das Kollisionsrisiko) geschätzt. Es wird also das Modell zur Vorhersage der Aktivität verwendet, so wie es im späteren Betrieb der WEA der Fall sein wird, wenn keine Messwerte zur aktuellen akustischen Aktivität vorliegen. Diese Schätzwerte werden im folgenden Schritt benötigt.

3.3 Schritt 3: Extrapolation der Aktivität in 10-min-Intervallen auf ganze Nächte

Die Formel zur Schätzung der Zahl der Schlagopfer aus der akustischen Aktivität bezieht sich auf ganze Nächte. Daher muss vor der Schätzung des Schlagrisikos zunächst die Anzahl der Rufe in einem 10-min-Intervall auf die ganze Nacht hochgerechnet werden (so wie es im späteren Betrieb der WEA der Fall sein wird, wenn keine Messwerte zur aktuellen akustischen Aktivität vorliegen). Dazu wurden im Forschungsvorhaben Gewichtungsfaktoren G verwendet, die berücksichtigen, dass die Fledermausaktivität sich im Laufe der Nacht ändert (BEHR et al. 2011a und Anhang 2) und die daher für

Nachtintervalle spezifiziert sind. Die geschätzte Aktivität im 10-min-Intervall wird zunächst mit der Anzahl der 10-min-Intervalle (nZI) der jeweiligen Nacht (Anzahl der 10-min-Intervalle von Sonnenunter- bis -aufgang zuzüglich 15 % der Nachtlänge vor Sonnenuntergang in Minuten geteilt durch zehn) multipliziert und dann durch den Gewichtungsfaktor G dividiert (Anzahl Aufnahmen bezeichnet hier die vorhergesagte Anzahl pro 10-min-Intervall):

$\text{Anzahl Aufnahmen pro Nacht} = \text{Anzahl Aufnahmen pro 10min} * \text{nZI} / G$
--

Fortführung des Beispiels von weiter oben:

Nachdem der Anlagenfaktor berechnet wurde, lässt sich unter Anwendung der Formel zur Schätzung der Fledermausaktivität pro 10 Minuten (siehe Formel unter Schritt 2) und obiger Formel Tabelle 3 um die Fledermausaktivität pro Nacht erweitern:

Tabelle 4 Auf die gesamte Nacht hochgerechnete Fledermausaktivität für jedes 10-min-Intervall. Sonnenuntergang, Sonnenaufgang und Nachtzeit sind hier nicht mehr dargestellt, um die Tabelle übersichtlicher zu gestalten. Die Gewichtungsfaktoren G wurden für den Batcorder entsprechend Anhang 2 eingesetzt. nZI hängt von Sonnenuntergang und Sonnenaufgang ab und wird daher abhängig von der geographischen Lage der WEA berechnet.

Start des 10-min-Intervalls	Nachtzeit Intervall	Wind (m/s)	gemessene Anzahl Aufnahmen	Vorhergesagte Anzahl Aufnahmen pro Nacht
.....
22.05.2010 20:00	-0,15-0	2,7	0	49,26
22.05.2010 20:10	-0,15-0	3,2	0	35,33
22.05.2010 20:20	-0,15-0	3,6	0	27,16
22.05.2010 20:30	-0,15-0	3,8	0	23,83
22.05.2010 20:40	-0,15-0	3,5	0	29,00
22.05.2010 20:50	-0,15-0	4,8	0	12,53
22.05.2010 21:00	-0,15-0	4,9	0	11,76
22.05.2010 21:10	-0,15-0	5	0	11,04
22.05.2010 21:20	0-0,1	4,3	0	20,04
22.05.2010 21:30	0-0,1	5,4	0	9,98
22.05.2010 21:40	0-0,1	5,6	0	8,81
22.05.2010 21:50	0-0,1	5,4	0	9,98
22.05.2010 22:00	0-0,1	4,6	0	16,54
22.05.2010 22:10	0,1-0,2	4	3	27,60
22.05.2010 22:20	0,1-0,2	4,7	0	17,61
22.05.2010 22:30	0,1-0,2	4,9	0	15,51

.....
-------	-------	------	-----	-------

Die Tabelle zeigt viele Intervalle ohne erfasste Fledermausrufe. Das Modell sagt jedoch auch für diese Intervalle Fledermausaktivität vorher. Dies stellt jedoch nur einen vermeintlichen Widerspruch dar: Das Modell der Aktivitätsvorhersage leistet eine im Mittel richtige Risikovorhersage, kann aber das Auftreten von Fledermäusen im Einzelfall nicht vollständig wiedergeben. In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass die Daten der akustischen Erfassung nur ein relatives Maß sind - Es werden nicht alle im Rotorbereich aktiven Fledermäuse aufgenommen. Deshalb kann ein Schlagrisiko bestehen, auch wenn der Detektor keine Aufnahmen aufzeichnet.

3.4 Schritt 4: Schätzung der Schlagopferzahl

Nun wird das Schlagrisiko für die gesamte Nacht aus der geschätzten Anzahl Aufnahmen und der Windgeschwindigkeit ermittelt. Für die Schätzung der Schlagopfer wird eine im Forschungsvorhaben entwickelte Formel benutzt (KORNER-NIEVERGELT et al. 2011):

Die Formel, um die erwartete Zahl verunglückter Fledermäuse in einer Nacht zu schätzen, lautet:

$$\text{Anzahl Schlagopfer} = \exp(a_0 + a_1 \cdot \text{scAkt} + a_2 \cdot \text{scWind} + a_3 \cdot \text{scWind}^2)$$

Oder entsprechend in mathematischer Notation:

$$\text{Anzahl.Schlagopfer} = e^{a_0 + a_1 \cdot \text{scAkt} + a_2 \cdot \text{scWind} + a_3 \cdot \text{scWind}^2}$$

a_0 , a_1 , a_2 und a_3 sind Modellparameter, die aus dem Datensatz des Forschungsvorhabens geschätzt wurden (KORNER-NIEVERGELT et al. 2011); scAkt ist die logarithmierte und skalierte Aktivität der jeweiligen gesamten Nacht (s. Schritt 3) und scWind die skalierte Windgeschwindigkeit der jeweiligen gesamten Nacht.

Die Skalierungen werden nach den Angaben im Bundesforschungsvorhaben wie folgt vorgenommen:

Für den Anabat SD1:

$$\text{scAkt} = (\log(\text{Akt} + 1) - 0,79538) / 1,088398$$

$$\text{scWind} = (\text{Wind} - 5,211521) / 1,892224$$

Für den Batcorder:

$$\text{scAkt} = (\log(\text{Akt} + 1) - 1,098) / 1,51947$$

$$\text{scWind} = (\text{Wind} - 5,543) / 1,801978$$

Die Modellparameter werden ebenfalls aus dem Forschungsvorhaben übernommen. Demnach ergeben sich folgende Formeln:

Für den Anabat SD1:

$$\text{Anzahl.Schlagopfer} = \exp(-2,811 + 0,662 \cdot \text{scAkt} - 0,277 \cdot \text{scWind} - 0,231 \cdot \text{scWind}^2)$$

Für den Batcorder:

$$\text{Anzahl.Schlagopfer} = \exp(-3,492 + 0,402 * \text{scAkt} - 1,776 * \text{scWind} - 0,802 * \text{scWind}^2)$$

Fortführung des Beispiels von weiter oben:

Aus der Fledermausaktivität pro Nacht in Tabelle 4 wird das Schlagrisiko pro Nacht anhand der obigen Formel für den Batcorder errechnet.

Tabelle 5 Errechnetes Schlagrisiko pro Nacht. „Akt“ in der Formel entspricht „Aktivität pro Nacht“ in der Tabelle. Die Modellparameter wurden gemäß den obigen Formeln für den Batcorder verwendet.

Start des 10-min-Intervalls	Nachtzeit Intervall	Wind (m/s)	gemessene Anzahl Aufnahmen	vorhergesagte Anzahl Aufnahmen pro Nacht	vorhergesagte Anzahl Schlagopfer pro Nacht
.....
22.05.2010 20:00	-0,15-0	2,7	0	49,26	0,1436
22.05.2010 20:10	-0,15-0	3,2	0	35,33	0,1527
22.05.2010 20:20	-0,15-0	3,6	0	27,16	0,1470
22.05.2010 20:30	-0,15-0	3,8	0	23,83	0,1401
22.05.2010 20:40	-0,15-0	3,5	0	29,00	0,1495
22.05.2010 20:50	-0,15-0	4,8	0	12,53	0,0823
22.05.2010 21:00	-0,15-0	4,9	0	11,76	0,0760
22.05.2010 21:10	-0,15-0	5	0	11,04	0,0698
22.05.2010 21:20	0-0,1	4,3	0	20,04	0,1184
22.05.2010 21:30	0-0,1	5,4	0	9,98	0,0491
22.05.2010 21:40	0-0,1	5,6	0	8,81	0,0393
22.05.2010 21:50	0-0,1	5,4	0	9,98	0,0491
22.05.2010 22:00	0-0,1	4,6	0	16,54	0,0987
22.05.2010 22:10	0,1-0,2	4	3	27,60	0,1404
22.05.2010 22:20	0,1-0,2	4,7	0	17,61	0,0950
22.05.2010 22:30	0,1-0,2	4,9	0	15,51	0,0813
.....

3.5 Schritt 5: Extrapolation des Schlagrisikos von ganzen Nächten auf 10-min-Intervalle

Entsprechend der bereits in Schritt 3 verwendeten Gewichtungsfaktoren wird das Schlagrisiko dann von der ganzen Nacht auf das jeweilige 10-min-Intervall zurückgerechnet:

$\text{Anzahl Schlagopfer pro 10min} = \text{Anzahl Schlagopfer pro Nacht} / nZI * G$

Fortführung des Beispiels von weiter oben:

Tabelle 5 wird unter Anwendung der Formel um das Schlagrisiko pro 10 min Intervall ergänzt.

Tabelle 6 Errechnetes Schlagrisiko pro 10-min-Intervall.

Start des 10-min-Intervalls	Nachtzeit Intervall	Wind (m/s)	gemessene Anzahl Aufnahmen	Vorhergesagte Anzahl Aufnahmen pro Nacht	Vorhergesagte Anzahl Schlagopfer pro Nacht	Vorhergesagte Anzahl Schlagopfer pro 10-min-Intervall
.....
22.05.2010 20:20	-0,15-0	2,7	0	49,2633312	0,1436	0,000445328270935
22.05.2010 20:20	-0,15-0	3,2	0	35,3282648	0,1527	0,000473693224886
22.05.2010 20:20	-0,15-0	3,6	0	27,1572875	0,1470	0,000455936488711
22.05.2010 20:30	-0,15-0	3,8	0	23,8339953	0,1401	0,000434453364691
22.05.2010 20:40	-0,15-0	3,5	0	28,9960116	0,1495	0,000463681799389
22.05.2010 20:50	-0,15-0	4,8	0	12,5323739	0,0823	0,000255160042157
22.05.2010 21:00	-0,15-0	4,9	0	11,7627728	0,0760	0,000235585558786
22.05.2010 21:10	-0,15-0	5	0	11,0422475	0,0698	0,000216466158817
22.05.2010 21:20	0-0,1	4,3	0	20,0382741	0,1184	0,002500277713067
22.05.2010 21:30	0-0,1	5,4	0	9,97930612	0,0491	0,001037445956355

22.05.2010 21:40	0-0,1	5,6	0	8,81010977	0,0393	0,000830359571195
22.05.2010 21:50	0-0,1	5,4	0	9,97930612	0,0491	0,001037445956355
22.05.2010 22:00	0-0,1	4,6	0	16,5360803	0,0987	0,002084498635978
22.05.2010 22:10	0,1-0,2	4	3	27,6039455	0,1404	0,005372585918459
22.05.2010 22:20	0,1-0,2	4,7	0	17,6119165	0,0950	0,003633602124205
22.05.2010 22:30	0,1-0,2	4,9	0	15,5127198	0,0813	0,003110711947933
.....

3.6 Schritt 6: Korrektur für unterschiedliche Rotorradien

Das Modell für die Schätzung der Schlagopferzahl aus der Anzahl der Aufnahmen wurde anhand von Daten erstellt, die an Anlagen der Firma ENERCON mit Rotordurchmessern von im Mittel 70 m erfasst wurden. Es ist davon auszugehen, dass bei Anlagen mit einem größeren Rotordurchmesser auch höhere Schlagopferzahlen zu erwarten sind beziehungsweise bei kleineren Rotordurchmessern geringere Zahlen.

Momentan liegen keine vergleichbaren Daten für größere oder kleinere Anlagen vor. Man kann aber von der einfachen Hypothese ausgehen, dass das Schlagrisiko im Prinzip proportional zur vom Rotor überstrichenen Fläche ansteigt, dass also die Wahrscheinlichkeit für Fledermausschlag unabhängig von der Entfernung von der Gondel ist.

Darüber hinaus werden die Gondel selbst und ein gondelnaher Bereich (20 % des Rotordurchmessers) als für Fledermäuse weniger gefährlich ausgeschlossen, da sich hier der Rotor deutlich langsamer bewegt (mit maximal einem Fünftel der Rotorspitzen geschwindigkeit – bei den meisten Anlagentypen also mit unter 40 km/h bei 6 m/s Windgeschwindigkeit).

Solange keine weiteren Forschungsergebnisse zu dieser Frage vorliegen, ist demnach folgender Korrekturfaktor für Anlagen mit von 70 m abweichendem Rotordurchmesser anzuwenden: Der Korrekturfaktor entspricht dem Flächenverhältnis der vom Rotor überstrichenen Fläche der jeweiligen Anlage und der im Forschungsvorhaben beprobten Anlagen (der Durchmesser geht daher als quadratischer Wert in die Formel ein). Vom Rotordurchmesser wird jeweils eine innere Kreisfläche mit einem Durchmesser von 20 % des gesamten Rotor- und Gondeldurchmessers abgezogen, da das Kollisionsrisiko hier als gering angenommen wird. Der Korrekturfaktor K für eine Anlage mit Rotordurchmesser d lautet somit:

$$K = (d^2 * \pi - (0,2 * d)^2 * \pi) / (70^2 * \pi - 14^2 * \pi)$$

was sich vereinfachen lässt zu

$$K = 0,000204 * d^2$$

Die Anzahl Schlagopfer (pro 10-min-Intervall oder Nacht) muss jeweils mit diesem K multipliziert werden.

Innerhalb der nächsten Zeit sind möglicherweise erste Forschungsergebnisse zu dieser Thematik zu erwarten, so dass sich die Vorgehensweise bei der Schätzung der Schlagopfer bei Anlagen mit von 70 m abweichendem Rotordurchmesser noch ändern könnte.

3.7 Schritt 7: Entwicklung des Betriebsalgorithmus

Die fledermausfreundlichen Betriebsalgorithmen werden so errechnet, dass die durch die Abschaltzeiten entstehenden Ertragsverluste möglichst gering sind. Dazu wird zunächst für jedes 10-min-Intervall der Quotient aus der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit („Windgeschwindigkeit hoch drei“), die bei den hier relevanten Windgeschwindigkeiten annähernd proportional zum Ertrag ist, und der geschätzten Schlagopferzahl gebildet. Die dritte Potenz der Windgeschwindigkeit ist also ein relatives Maß für den Ertrag:

$$Q = \text{Windgeschwindigkeit}^3 / \text{Anzahl Schlagopfer pro 10min}$$

Es ergeben sich hohe Werte für Intervalle, in denen der Ertrag groß und die Gefährdung für Fledermäuse gering ist und entsprechend niedrige Werte bei hoher Gefährdung und geringem Ertrag. Die 10-min-Intervalle, in denen die Anlage aus dem Betrieb genommen werden sollte, sind diejenigen mit geringem Ertrag und hoher Gefährdung für Fledermäuse, also mit geringen Werten für Q. Der Schwellenwert für Q kann nun so gewählt werden, dass die Zahl toter Fledermäuse in den übriggebliebenen Intervallen, in denen die Anlage normal betrieben wird, den vorgegebenen Schwellenwert tolerierbarer Fledermausverluste (in Bayern: unter 2 pro Jahr und Anlage) nicht mehr überschreitet. Um den Schwellenwert für Q zu berechnen, wird die vorhergesagte Zahl toter Fledermäuse aufsummiert, beginnend beim Intervall mit dem **höchsten** Wert für Q, bis die noch tolerierte Anzahl Kollisionsopfer erreicht ist.

Falls vorhanden, können hier auch die Ertragswerte (meist in mittlere Leistung je 10-min-Intervall in kW und als bisherige Gesamtsumme des Energieertrags der WEA angegeben) aufsummiert werden, womit eine Kostenschätzung für den fledermausfreundlichen Betrieb möglich wird. Es sind in diesem Fall die Ertragswerte beginnend mit dem **niedrigsten** Wert für Q aufzusummieren, bis der Schwellenwert für Q überschritten wird (also die 10-Minuten-Intervalle, in denen die Anlage still zu stellen ist).

Im letzten Schritt wird für jede mögliche Kombination aus Nachtzeit und Monat anhand der genannten Formeln die Windgeschwindigkeit errechnet, ab der der Schwellenwert für Q nicht mehr überschritten wird. Diese Windgeschwindigkeit entspricht der Anlaufgeschwindigkeit für den jeweiligen Monat und die konkrete Nachtzeit. Um diese Windgeschwindigkeit zu ermitteln, kann man z. B. eine Tabelle mit allen möglichen Kombinationen aus Nachtzeit, Monat und Windgeschwindigkeit (jeweils innerhalb des sinnvollen Bereichs) erstellen und für alle diese Kombinationen den Wert von Q entsprechend der hier dargestellten Vorgehensweise berechnen (als nZI der Schritte 3 und 5 kann dabei ein mittlerer Wert für den jeweiligen Monat verwendet werden – der Unterschied im Ergebnis im Vergleich zu tagesspezifischen Werten für nZI ist vernachlässigbar).

Eine Ergebnistabelle zur WEA-Steuerung entsprechend dem errechneten federmausfreundlichen Betriebsalgorithmus findet sich beispielhaft in

Tabelle 10.

Fortführung des Beispiels von weiter oben:

Zunächst wird Q für jedes der gemessenen 10-min-Intervalle anhand der dritten Potenz der gemessenen Windgeschwindigkeit und des errechneten Schlagrisikos ermittelt. Tabelle 7 zeigt die entsprechende Erweiterung der Tabelle 8.

Tabelle 7 Erweiterung von Tabelle 6 um Q, dem Quotienten aus der dritten Potenz der gemessenen Windgeschwindigkeit und dem errechneten Schlagrisiko

Start des 10-min-Intervalls	Nachtzeit Intervall	Wind (m/s)	Vorhergesagte Anzahl Schlagopfer pro 10-min-Intervall	Q
.....
22.05.2010 20:00	-0,15-0	2,7	0,000445328270935	44198,86
22.05.2010 20:10	-0,15-0	3,2	0,000473693224886	69175,57
22.05.2010 20:20	-0,15-0	3,6	0,000455936488711	102330,04
22.05.2010 20:30	-0,15-0	3,8	0,000434453364691	126301,24
22.05.2010 20:40	-0,15-0	3,5	0,000463681799389	92466,43
22.05.2010 20:50	-0,15-0	4,8	0,000255160042157	433422,09
22.05.2010 21:00	-0,15-0	4,9	0,000235585558786	499389,69
22.05.2010 21:10	-0,15-0	5	0,000216466158817	577457,47
22.05.2010 21:20	0-0,1	4,3	0,002500277713067	31799,27
.....

Zur Bestimmung des **Schwellenwertes** für Q wird Tabelle 7 nach Q absteigend sortiert. Der Schwellenwert für Q ist nun derjenige Wert, für den die laufende Summe des Schlagrisikos einen bestimmten tolerierten Schwellwert toter Fledermäuse pro Jahr gerade nicht überschreitet. Tabelle 8 zeigt dies für den Ausschnitt um den Wert für maximale Anzahl Schlagopfer = 1 pro Jahr. Der Schwellenwert für Q ergibt sich aus der blau markierten Zeile zu $Q = 251261$.

Zur Berechnung der laufenden Summe ist zu beachten, dass **alle** 10-min-Intervalle des Betrachtungszeitraums berücksichtigt werden müssen. Wurde nicht der gesamte relevante Zeitraum beprobt, d. h. sind Datenlücken vorhanden, so ist an dieser Stelle eine lineare Extrapolation der laufenden Summe der vorhergesagten Zahl der Schlagopfer vorzunehmen: Jeder Wert für die summierte vorhergesagte Anzahl der Schlagopfer pro 10-min-Intervall ist mit einem Korrekturfaktor Z zu multiplizieren. Der Wert für den Korrekturfaktor Z ergibt sich dabei als die Anzahl der eigentlich zu beprobenden 10-min-Intervalle geteilt durch die Anzahl tatsächlich beprobter 10-min-Intervalle. Sowohl die Zahl der tatsächlich beprobten als auch die Zahl eigentlich zu beprobender Intervalle bezieht sich

dabei auf den für die Erfassung relevante Zeitraum (Nachtzeit -0.15 bis 1 und Start- und Enddatum der Erfassung laut bayerischem Windkrafteerlass).

D. h., wenn z. B. für 80 % der 10-min-Intervalle des Messzeitraums gültige Messdaten vorliegen, so ist die laufende Summe mit dem Wert 1,25 zu multiplizieren (d. h. die Anzahl der Schlagopfer wird linear auf den Gesamtzeitraum extrapoliert). Entsprechend den Erläuterungen zum Windkrafteerlass Bayern (Fledermäuse, Fragen und Antworten, Frage 21) sollte ein solcher Wert in der Regel zwischen 1 und 1,5 liegen.

Der Korrekturfaktor Z berechnet sich als:

$$Z = \frac{\text{Anzahl zu beprobender 10-min-Intervalle}}{\text{Anzahl tatsächlich beprobter 10-min-Intervalle}}$$

Die summierte vorhergesagte Anzahl der Schlagopfer muss jeweils mit diesem Z multipliziert werden.

Tabelle 8 Bestimmung des Q-Schwellenwertes aus der laufenden Summe des Schlagrisikos

Start des 10-min-Intervalls	Wind (m/s)	Laufende Summe der Anzahl vorhergesagter Schlagopfer pro 10-min-Intervall	Q absteigend sortiert
.....
07.06.2010 21:00:00	4,3	0,978631942787549	266595
07.06.2010 20:50:00	4,3	0,978631942787549	266595
07.06.2010 20:40:00	4,3	0,978631942787549	266595
03.06.2010 21:00:00	4,3	0,978631942787549	266595
05.06.2010 22:20:00	6,1	0,984160254858494	257216
02.08.2010 03:10:00	5,7	0,993340374134542	252759
02.08.2010 03:00:00	5,7	0,993340374134542	252759
28.05.2010 02:20:00	5,6	0,997719011341821	251261
20.05.2010 21:40:00	5,7	1,002339467188980	251096
08.06.2010 03:00:00	5,5	1,010655314241020	250676
08.06.2010 03:10:00	5,5	1,010655314241020	250676
03.06.2010 22:10:00	5,7	1,020015463499090	247898
.....

Wie oben beschrieben, kann nun für alle Monate und Nachtzeiten diejenige Windgeschwindigkeit ermittelt werden, ab der die WEA anlaufen darf bzw. abgeschaltet werden muss, um oberhalb des ermittelten Q-Schwellenwertes von 251261 zu bleiben. Dies geschieht durch sukzessive Annäherung über Windgeschwindigkeitswerte im Bereich von 0 bis 10 m/s in Schritten von 0,1 m/s. Das Verfahren veranschaulicht Tabelle 9: Sie zeigt einen Ausschnitt um den Q-Schwellenwert von 251261 herum. Im blau markierten Bereich befinden sich die gesuchten Anlauf-Windgeschwindigkeiten.

Tabelle 9 Bestimmung der Anlauf-Windgeschwindigkeiten durch Approximation

Monatsmitte	Monat	Nachtzeit Intervall	Wind (m/s)	Q absteigend sortiert
.....
16.05.2010	05	0,2-0,3	5,8	256208
15.04.2010	04	0,3-0,4	5,7	255980
16.05.2010	05	-0,15-0	4,3	255166
16.05.2010	05	0,7-0,8	5,2	254779
16.07.2010	07	0,5-0,6	5,6	253543
16.08.2010	08	0-0,1	5,9	253430
16.10.2010	10	0,4-0,5	5,3	252310
15.04.2010	04	0,4-0,5	5,7	251131
16.10.2010	10	0,7-0,8	4,7	250457
15.09.2010	09	0,4-0,5	5,6	250267
16.07.2010	07	-0,15-0	4,6	250193
15.07.2010	06	0,7-0,8	5,1	250137
.....

Die gefundenen Anlauf-Windgeschwindigkeiten können schließlich in einer Ergebnistabelle verfügbar gemacht werden.

Tabelle 10 zeigt diese komplett für das betrachtete Beispiel und den Zeitraum von April bis Oktober.

Tabelle 10 Anlauf-Windgeschwindigkeiten: Beispieltabelle zur Steuerung einer Windenergieanlage entsprechend dem errechneten fledermausfreundlichen Betriebsalgorithmus. Für eine spezifische Anlage ist für jede Monat-Nachtzeit-Kombination die Windgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde angegeben, ab der der Rotor beginnen darf, sich zu drehen – also die Anlaufwindgeschwindigkeit. Die Nachtzeit ist in relativen 10 %-Intervallen von 0 (Sonnenuntergang) bis 1 (Sonnenaufgang) angegeben (siehe oben, Schritt 1). Gezeigt ist eine Steuerungstabelle für die Monate April bis Oktober. Die entsprechend dem bayerischen Windkrafterlass zu erstellende Tabelle muss den gesamten Zeitraum von Mitte März bis Ende Oktober umfassen. Der jeweils zugehörige, über dem Schwellwert liegende Wert für Q ist hier lediglich zur Information gezeigt.

Monat	Nachtzeit Intervall	Anlauf-Wind-geschwindigkeit (m/s)	Q
04	-0,15-0	4,3	281633
04	0-0,1	5,6	265875
04	0,1-0,2	6	290006
04	0,2-0,3	5,8	283213
04	0,3-0,4	5,7	256083
04	0,4-0,5	5,8	299492
04	0,5-0,6	5,5	271265
04	0,6-0,7	5,5	256738
04	0,7-0,8	5,2	281550
04	0,8-0,9	5,1	274697
04	0,9-1	3,8	258563
05	-0,15-0	4,3	255268
05	0-0,1	5,7	285796
05	0,1-0,2	6	262417
05	0,2-0,3	5,8	256311
05	0,3-0,4	5,8	276371
05	0,4-0,5	5,8	270849
05	0,5-0,6	5,6	290282
05	0,6-0,7	5,6	274646
05	0,7-0,8	5,2	254881
05	0,8-0,9	5,2	289855
05	0,9-1	3,9	261577

06	-0,15-0	4,2	259751
06	0-0,1	5,7	273524
06	0,1-0,2	6,1	284084
06	0,2-0,3	5,8	259083
06	0,3-0,4	5,8	268370
06	0,4-0,5	5,7	259634
06	0,5-0,6	5,5	282962
06	0,6-0,7	5,5	276418
06	0,7-0,8	5,2	291360
06	0,8-0,9	5	256818
06	0,9-1	3,7	269584
07	-0,15-0	4,7	286584
07	0-0,1	5,9	270008
07	0,1-0,2	6,3	298866
07	0,2-0,3	6	274223
07	0,3-0,4	5,9	260836
07	0,4-0,5	5,9	292366
07	0,5-0,6	5,6	253645
07	0,6-0,7	5,7	284272
07	0,7-0,8	5,4	272246
07	0,8-0,9	5,4	276962
07	0,9-1	4,2	272686
08	-0,15-0	4,6	267078
08	0-0,1	5,9	253532
08	0,1-0,2	6,3	268835
08	0,2-0,3	6,1	277549
08	0,3-0,4	6	258768
08	0,4-0,5	5,9	257321

08	0,5-0,6	5,7	295667
08	0,6-0,7	5,7	294246
08	0,7-0,8	5,3	259171
08	0,8-0,9	5,3	269626
08	0,9-1	4,1	261547
09	-0,15-0	4,1	275092
09	0-0,1	5,5	268771
09	0,1-0,2	5,9	270626
09	0,2-0,3	5,7	266727
09	0,3-0,4	5,7	272425
09	0,4-0,5	5,7	297219
09	0,5-0,6	5,4	281881
09	0,6-0,7	5,4	288284
09	0,7-0,8	5	278073
09	0,8-0,9	5	266100
09	0,9-1	3,7	262583
10	-0,15-0	3,9	257709
10	0-0,1	5,4	261725
10	0,1-0,2	5,8	283533
10	0,2-0,3	5,5	261927
10	0,3-0,4	5,4	262838
10	0,4-0,5	5,3	252411
10	0,5-0,6	5,1	289259
10	0,6-0,7	5,1	268946
10	0,7-0,8	4,8	287352
10	0,8-0,9	4,8	279162
10	0,9-1	3,4	265547

4 Literatur

BEHR, O., R. BRINKMANN, I. NIERMANN und F. KORNER-NIEVERGELT (2011a). Fledermausfreundliche Betriebsalgorithmen für Windenergieanlagen. - in: Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. R. Brinkmann, O. Behr, I. Niermann und M. Reich. Göttingen, Cuvillier Verlag: Umwelt und Raum Bd. 4, 354-383.

BEHR, O., R. BRINKMANN, I. NIERMANN und F. KORNER-NIEVERGELT (2011b). Vorhersage der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen. - in: Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. R. Brinkmann, O. Behr, I. Niermann und M. Reich. Göttingen, Cuvillier Verlag: Umwelt und Raum Bd. 4, 287-322.

BRINKMANN, R., O. BEHR, F. KORNER-NIEVERGELT, J. MAGES, I. NIERMANN und M. REICH (2011). Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. Göttingen, Cuvillier Verlag.

KORNER-NIEVERGELT, F., O. BEHR, I. NIERMANN und R. BRINKMANN (2011). Schätzung der Zahl verunglückter Fledermäuse an Windenergieanlagen mittels akustischer Aktivitätsmessungen und modifizierter N-mixture Modelle. - in: Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. R. Brinkmann, O. Behr, I. Niermann und M. Reich. Göttingen, Cuvillier Verlag Umwelt und Raum Bd. 4, 323-353.

5 Anhang

Anhang 1: Modellparameter für die Vorhersage der Fledermausaktivität aus BEHR et al. 2011b. Zusätzlich zu den im Forschungsvorhaben beprobten Monaten Mai bis Oktober sind hier Werte für April und November angegeben, die aus einer kleinen Stichprobe des Forschungsvorhabens und aus Untersuchungen anderer Bearbeiter extrapoliert wurden. Für den März liegen derzeit keine Informationen vor, weshalb hier die Werte für den folgenden Monat April übernommen wurden.

Effekt	Koeffizient	
	Anabat SD1	Batcorder
(Intercept)	-4,68073388	-5,02545202
Windgeschwindigkeit	-0,53621608	-0,71349484
Windgeschwindigkeit ²	-0,00948506	0,00822059
Monat 3	-3,73018264	-2,73546727
Monat 4	-3,73018264	-2,73546727
Monat 5	0	0
Monat 6	-0,56840205	-0,41252796
Monat 7	0,22239053	1,06121241
Monat 8	0,89802724	1,73730991
Monat 9	-0,6986055	-0,31263601
Monat 10	-2,09566584	-1,35923434
Monat 11	-3,86165258	-2,83187856
Nachtzeit -0,15-0	0	0
Nachtzeit 0-0,1	2,2041148	2,06797641
Nachtzeit 0,1-0,2	3,09224942	2,7891016
Nachtzeit 0,2-0,3	2,87092966	2,39731079
Nachtzeit 0,3-0,4	2,67845904	2,32699306
Nachtzeit 0,4-0,5	2,71636459	2,16340943
Nachtzeit 0,5-0,6	2,5221675	1,73251191
Nachtzeit 0,6-0,7	2,40349565	1,7331581
Nachtzeit 0,7-0,8	1,73371857	1,20753397
Nachtzeit 0,8-0,9	1,26312535	1,16304089
Nachtzeit 0,9-1	-0,03548228	-0,48150431

Anhang 2: Gewichtungsfaktoren für die Umrechnung der Anzahl Aufnahmen im 10-min-Intervall auf die gesamte Nacht (vgl. BEHR et al. 2011a). Für die im Forschungsvorhaben nicht beprobten Monate März, April und November sind hier jeweils die Werte der angrenzenden Monate Mai bzw. Oktober angegeben.

Monat	Nachtzeit	relative Aktivität SD1	relative Aktivität Batcorder
3	-0.15-0	0,11911782	0,16747887
3	0-0.1	0,98083295	1,14007392
3	0.1-0.2	1,9897065	2,0657284
3	0.2-0.3	1,62232736	1,49436472
3	0.3-0.4	1,1079144	1,38369452
3	0.4-0.5	1,65131459	1,49499438
3	0.5-0.6	1,30443553	0,99023661
3	0.6-0.7	1,33474629	1,06446376
3	0.7-0.8	0,52253823	0,59106468
3	0.8-0.9	0,28928748	0,50586878
3	0.9-1	0,07777886	0,10203137
4	-0.15-0	0,11911782	0,16747887
4	0-0.1	0,98083295	1,14007392
4	0.1-0.2	1,9897065	2,0657284
4	0.2-0.3	1,62232736	1,49436472
4	0.3-0.4	1,1079144	1,38369452
4	0.4-0.5	1,65131459	1,49499438
4	0.5-0.6	1,30443553	0,99023661
4	0.6-0.7	1,33474629	1,06446376
4	0.7-0.8	0,52253823	0,59106468
4	0.8-0.9	0,28928748	0,50586878
4	0.9-1	0,07777886	0,10203137
5	-0.15-0	0,11911782	0,16747887
5	0-0.1	0,98083295	1,14007392
5	0.1-0.2	1,9897065	2,0657284
5	0.2-0.3	1,62232736	1,49436472
5	0.3-0.4	1,1079144	1,38369452
5	0.4-0.5	1,65131459	1,49499438
5	0.5-0.6	1,30443553	0,99023661
5	0.6-0.7	1,33474629	1,06446376
5	0.7-0.8	0,52253823	0,59106468
5	0.8-0.9	0,28928748	0,50586878
5	0.9-1	0,07777886	0,10203137
6	-0.15-0	0,08828033	0,14724443
6	0-0.1	0,87430925	1,2608325
6	0.1-0.2	2,24931211	2,47442475
6	0.2-0.3	1,7039196	1,54010743
6	0.3-0.4	1,36295047	1,50203046
6	0.4-0.5	1,45673016	1,31175342
6	0.5-0.6	1,23077725	0,85999816
6	0.6-0.7	1,13494549	0,88631009
6	0.7-0.8	0,54796819	0,52010105
6	0.8-0.9	0,27659371	0,41936083
6	0.9-1	0,07421345	0,07783689
7	-0.15-0	0,12930221	0,19413999
7	0-0.1	0,89583691	1,35030241
7	0.1-0.2	2,13190944	2,56350263

7	0.2-0.3	1,58012373	1,51471744
7	0.3-0.4	1,26391957	1,2950043
7	0.4-0.5	1,4283495	1,17508097
7	0.5-0.6	1,2922652	0,80873492
7	0.6-0.7	1,17994645	0,87496624
7	0.7-0.8	0,61841479	0,56240359
7	0.8-0.9	0,37706604	0,55803108
7	0.9-1	0,10286617	0,10311644
8	-0.15-0	0,12484749	0,15821485
8	0-0.1	1,18138442	1,31469073
8	0.1-0.2	2,57636597	2,64885756
8	0.2-0.3	1,85135107	1,71810816
8	0.3-0.4	1,3050236	1,49955504
8	0.4-0.5	1,31622299	1,24625191
8	0.5-0.6	1,03123945	0,74068711
8	0.6-0.7	0,84142028	0,7453582
8	0.7-0.8	0,43721789	0,43088692
8	0.8-0.9	0,26190044	0,41490604
8	0.9-1	0,07302641	0,08248348
9	-0.15-0	0,10812025	0,1546251
9	0-0.1	0,91135371	1,10416234
9	0.1-0.2	2,11800927	2,17525605
9	0.2-0.3	1,56061867	1,57174188
9	0.3-0.4	1,31677138	1,56265513
9	0.4-0.5	1,52760418	1,46648048
9	0.5-0.6	1,26847999	0,92930802
9	0.6-0.7	1,1543559	0,90206123
9	0.7-0.8	0,53504839	0,49467833
9	0.8-0.9	0,38893228	0,53204502
9	0.9-1	0,110706	0,10698642
10	-0.15-0	0,13147452	0,19953194
10	0-0.1	1,10646439	1,42716146
10	0.1-0.2	2,18279366	2,49112718
10	0.2-0.3	1,61398439	1,60411369
10	0.3-0.4	1,19531989	1,32348982
10	0.4-0.5	1,3427605	1,19082098
10	0.5-0.6	1,15413232	0,76218264
10	0.6-0.7	1,14622447	0,83691288
10	0.7-0.8	0,60601112	0,5124595
10	0.8-0.9	0,40357392	0,53886704
10	0.9-1	0,11726083	0,11333288
11	-0.15-0	0,13147452	0,19953194
11	0-0.1	1,10646439	1,42716146
11	0.1-0.2	2,18279366	2,49112718
11	0.2-0.3	1,61398439	1,60411369
11	0.3-0.4	1,19531989	1,32348982
11	0.4-0.5	1,3427605	1,19082098
11	0.5-0.6	1,15413232	0,76218264
11	0.6-0.7	1,14622447	0,83691288
11	0.7-0.8	0,60601112	0,5124595
11	0.8-0.9	0,40357392	0,53886704
11	0.9-1	0,11726083	0,11333288