

ProBIRD

Prognose des regionalen und lokalen Vogelzugs und des kumulativen Vogelschlagrisikos an Offshore-Windenergieanlagen

Endbericht

Jorg Welcker, Raúl Vilela



Gefördert durch



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
(BMU)
Stresemannstraße 128-130
10117 Berlin, Germany

Das Forschungsprojekt ProBIRD (FKZ UM15 86 2000) wurde mit Mitteln des BMU gefördert (Resortforschungsplan 2015).

Koordiniert und unterstützt von



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg, Germany

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt ausschließlich bei den Autoren.

Autoren:



Dr. Jorg Welcker and Dr. Raúl Vilela
BioConsult SH GmbH & Co. KG
Schobüller Str. 36
25813 Husum, Germany

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Titelfoto: Kai Gauger

Inhaltsverzeichnis

1 ZUSAMMENFASSUNG 1

2 HINTERGUND UND AUFGABENSTELLUNG 6

2.1 Anlass und Hintergrund 6

2.2 Ziele von ProBIRD..... 8

3 MATERIAL UND METHODEN 10

3.1 Zugruferfassungen 10

3.1.1 Datenaufnahme 10

3.1.2 Datenanalyse 12

3.2 Radarerfassungen 14

3.2.1 Datenaufnahme 14

3.2.2 Datenanalyse 15

4 ERGEBNISSE 21

4.1 Beschreibung des nächtlichen Vogelzugs in der deutschen AWZ 21

4.1.1 Zeitliche Muster 21

4.1.2 Räumliche Muster 25

4.1.3 Zughöhe 33

4.1.4 Gesamtzahl Flugbewegungen in OWPs..... 35

4.2 Modellierung des nächtlichen Vogelzugs anhand von Wetterdaten 36

4.2.1 Wetterparameter..... 38

4.2.2 Zeitparameter 44

4.3 Prognose der Vogelzugintensität 47

4.4 Kumulatives Kollisionsrisiko von Nachtziehern an Offshore-WEA 50

5 DISKUSSION 54

5.1 Datengrundlage 54

5.2	Muster des nächtlichen Vogelzugs offshore	55
5.3	Wettereinfluss und Prognose von Starkzugereignissen	58
5.4	Kollisionsmodelle und kumulatives Kollisionsrisiko	61
6	LITERATUR.....	65
A	ANHANG	70
A.1	Ergebnisbericht 1: Analysis of bird flight calls from the German North and Baltic Seas .	70
A.2	Ergebnisbericht 2: Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas	71
A.3	Ergebnisbericht 3: Weather-dependence of nocturnal bird migration and cumulative collision risk at offshore wind farms in the German North and Baltic Seas	72

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1	Standorte der Zugruferfassungen in der AWZ der Nord- (links) und Ostsee (rechts).....	10
Abb. 3-2	Zugruf-Aufnahmesysteme am Standort OSS „Butendiek“ und OSS „Nordsee Ost“ (links) sowie auf FINO1.....	11
Abb. 3-3	Histogramm der nächtlichen Rufintensität [Rufe/h].....	13
Abb. 3-4	Linke Seite: Kumulative Darstellung der Anzahl der Rufe [%] pro Erfassungszeit [%]. Zwei Werte werden veranschaulicht: 71% der Rufe wurden in 5% der Nächte, und 90% der Rufe in 14% der Nächte festgestellt. Rechte Seite: Mittlere Rufintensität pro Nacht in aufsteigender Reihenfolge und Darstellung der gewählten Schwellenwerte.	13
Abb. 3-5	Darstellung der Radar-Rohsignale eines Untersuchungsjahrs eines Radarstandorts.	16
Abb. 3-6	Beispielhafte Darstellung einer Detektionsfunktion	16
Abb. 3-7	Monatliche Flughöhenverteilung des Nachtzugs auf Grundlage der Radardaten aller Erfassungsstandorte in der deutschen AWZ.	18
Abb. 4-1	Saisonales Muster der nächtlichen Zugintensität in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee.21	
Abb. 4-2	Vergleich der monatlichen nächtlichen Zugintensität [MTR] zwischen der Nordsee (links) und der Ostsee (rechts).....	22
Abb. 4-3	Saisonale Muster der Rufintensitäten [Rufe/h] von zwei Limikolen-, vier Drossel- und 4 weiteren Singvogelarten in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee.	23
Abb. 4-4	Tageszeitlicher Verlauf der Zugintensität [%] in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee.	24
Abb. 4-5	Tageszeitlicher Verlauf der Zugintensität [%] im Frühjahr (rot) und Herbst (schwarz) in verschiedenen Bereichen der deutschen AWZ.	25

Abb. 4-6	Zusammenhang zwischen der Korrelation der nächtlichen Vogelzugintensität zweier Standorte (Spearman’s Rangkorrelationskoeffizient rho) und der Entfernung dieser Standorte für die Frühjahrs- (oben) und Herbstsaison (unten).	27
Abb. 4-7	Wahrscheinlichkeit [\pm SE] des gleichzeitigen Auftretens eines Starkzugereignisses (MTR >250) an zwei Standorten in der Nordsee in Abhängigkeit der Entfernung der Standorte zueinander für Frühjahr (rechts) und Herbst (links).	28
Abb. 4-8	Zusammenhang zwischen der Korrelation der nächtlichen Zugrufrate zweier Standorte (Spearman’s Rangkorrelationskoeffizient rho) und der Entfernung dieser Standorte für Frühjahrs- und Herbstzug von Limikolen (links) und Drosseln (rechts).	28
Abb. 4-9	Vergleich der Zugintensität [MTR, log-transformiert] in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee in Nächten gleichzeitiger Erfassung.	29
Abb. 4-10	Vergleich der Rufintensität [Rufe/h, log-transformiert] in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee in Nächten gleichzeitiger Erfassung für Limikolen (links), Drosseln (Mitte) und die übrigen Singvogelarten (rechts).	30
Abb. 4-11	Vergleich der Zugintensität [MTR, log-transformiert] an Standorten in der Nordsee mit unterschiedlicher Distanz zur Küste.	30
Abb. 4-12	Differenz der Zugintensität zwischen zwei Standorten in der Nordsee in Abhängigkeit zu deren Differenz der Entfernung zur Küste für die Frühjahrs- (links) und Herbstsaison (rechts).	31
Abb. 4-13	Differenz der Rufintensität zwischen zwei Standorten in der Nordsee in Abhängigkeit zu deren Differenz der Entfernung zur Küste.	32
Abb. 4-14	Prozentuale Flughöhenverteilung des Nachtzugs bis 1.000 m Höhe	33
Abb. 4-15	Vergleich der mittleren Flughöhe [\pm SE] zwischen Standorten in der Nord- und Ostsee und zwischen Frühjahr und Herbst.	34
Abb. 4-16	Abhängigkeit der Flughöhe [m, wurzeltransformiert] von der Zugintensität [MTR, log-transformiert].	34
Abb. 4-17	Mittlere Flughöhe [m \pm SE] im Verlauf der Nacht.	35
Abb. 4-18	Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Zugintensität [MTR, wurzeltransformiert, obere Abbildungen] und der mittleren Flughöhe [m, untere Abbildungen] von der Rückenwind-Komponente (TWC, [m/s])	38
Abb. 4-19	Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Rufintensität [Rufe/h, wurzeltransformiert] von der Rückenwind-Komponente (TWC, [m/s]).	39
Abb. 4-20	Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Zugintensität [MTR, wurzeltransformiert, obere Abbildungen] und der mittleren Flughöhe [m, untere Abbildungen] von der Seitenwind-Komponente (CWC, [m/s])	40
Abb. 4-21	Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Rufintensität [Rufe/h, wurzeltransformiert] von der Seitenwind-Komponente (CWC, [m/s])	41
Abb. 4-22	Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Zugintensität [MTR, wurzeltransformiert, obere Abbildungen] und der mittleren Flughöhe [m, untere Abbildungen] von der relativen Luftfeuchtigkeit [%]	42

Abb. 4-23	Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Rufintensität [Rufe/h, wurzel-transformiert] vom Bedeckungsgrad [8/8]	43
Abb. 4-24	Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der mittleren Flughöhe [m] von der Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert]	43
Abb. 4-25	Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert, obere Abbildungen] und der mittleren Flughöhe [m, untere Abbildungen] vom Julianischen Tag	44
Abb. 4-26	Partial dependence plots der RF-Modelle: Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert, obere Abbildungen] und mittlere Flughöhe [m, untere Abbildungen] im Verlauf der Nacht	45
Abb. 4-27	Partial dependence plots der RF-Modelle: Rufintensität [Rufe/h, wurzel-transformiert] im Verlauf der Nacht	46
Abb. 4-28	Vom Modell vorhergesagte und tatsächlich gemessene Zugintensitäten [MTR]	47
Abb. 4-29	Punktdiagramme der Modellvorhersagen und der tatsächlich gemessenen Zugintensitäten [MTR] während des Frühjahrszugs in allen Untersuchungsjahren.	48
Abb. 4-30	Punktdiagramme der Modellvorhersagen und der tatsächlich gemessenen Zugintensitäten [MTR] während des Herbstzugs in allen Untersuchungsjahren.	48

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Erfassungsstandorte, Aufnahmemethodik und Stichprobengröße der Zugruferfassungen.	11
Tab. 3-2	Erfassungsstandorte und Stichprobengröße der Radarerfassungen.	15
Tab. 3-3	Liste der Offshore-Windparks in der deutschen AWZ, die bei den Berechnungen der Flugbewegungen und Kollisionsopferzahlen berücksichtigt wurden. Zusätzlich ist angegeben, von welchen Standorten die Radardaten für diese Berechnungen verwendet wurden.	19
Tab. 3-4	Verwendete Werte vogelbezogener Eingangsparameter der Kollisionsmodelle.	20
Tab. 3-5	Turbinenbezogene Eingangsparameter der Kollisionsmodelle.	20
Tab. 4-1	Mittlere Korrelationskoeffizienten (Spearman's Rangkorrelationskoeffizient rho) für Korrelationen der nächtlichen Zug- bzw. Rufintensität zwischen Standorten in der Nordsee und zwischen Standorten in der Nord- und Ostsee.	26
Tab. 4-2	Monatliche Differenz der nächtlichen mittleren Zugintensität [MTR, log-transformiert] zwischen Standorten in der Ost- und Nordsee in Nächten gleichzeitiger Erfassung.	29
Tab. 4-3	Anteile der Radarsignale unterhalb von 200 m bzw. 500 m Höhe.....	33
Tab. 4-4	Anzahl der geschätzten Radarsignale [$\pm 95\%$ CI] in Offshore-Windparks in der deutschen AWZ.36	
Tab. 4-5	Übersicht über die Random Forest-Modelle (volle Modelle) zu Zugintensitäten und Flugrufen.37	
Tab. 4-6	Konfusionsmatrix der vorhergesagten und tatsächlichen Klassifizierung von Zugereignissen, deren Intensität den Schwellenwert von 250 MTR überschritt.....	49
Tab. 4-7	Konfusionsmatrix der vorhergesagten und tatsächlichen Klassifizierung von Starkzugereignissen (>250 MTR) nach Optimierung von Cohen's Kappa	49

Tab. 4-8	Schätzwerte des kumulativen Vogelschlags von Nachtziehern an allen Offshore-Windparks, die sich derzeit in der deutschen AWZ in Betrieb oder Bau befinden.....	50
Tab. 4-9	Schätzwerte des kumulativen Vogelschlags von Nachtziehern getrennt nach Nord- und Ostsee	51
Tab. 4-10	Schätzwerte des kumulativen Vogelschlags von Nachtziehern getrennt nach Monaten	51
Tab. 4-11	Anzahl der geschätzten Kollisionen für verschiedene Schwellenwerte der Zugintensität.	52
Tab. 4-12	Analyse der Sensitivität des Band-Modells auf Variation verschiedener Eingangsparameter. ...	53

1 ZUSAMMENFASSUNG

Millionen Vögel queren auf ihrem Zug zwischen Brut- und Überwinterungsgebieten die deutsche Nord- und Ostsee. Die Mehrzahl dieser Vögel, insbesondere Singvögel, ziehen dabei nachts.

Beim weiteren Ausbau der Windenergienutzung auf See wird die potenzielle Gefährdung des Vogelzugs häufig als ein wesentlicher Konflikt mit dem Natur- und Artenschutz angesehen. Nachtzieher gelten dabei als besonders gefährdet, da sie einem erhöhten Kollisionsrisiko mit Windenergieanlagen ausgesetzt sein könnten. Dabei wird davon ausgegangen, dass Vögel bei Nacht die Anlagen nur eingeschränkt wahrnehmen können und zudem von deren Beleuchtung eine anziehende Wirkung auf die Tiere ausgeht.

Aufgrund technischer und logistischer Herausforderungen ist über den nächtlichen Vogelzug in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nord- und Ostsee bislang relativ wenig bekannt. Dies gilt hinsichtlich des räumlichen und zeitlichen Ablaufs des Zugeschehens und in besonderem Maße in Bezug auf das Kollisionsrisiko bzw. den zu erwartenden kumulativen Vogelschlag an den Offshore-Turbinen.

Der Vogelzug unterliegt einer hohen täglichen Variation, die sowohl die Zugintensität als auch die Flughöhe betrifft. Ein wesentlicher Teil dieser Variation wird durch die starke Wetterabhängigkeit des Vogelzugs verursacht. Der große Einfluss des Wetters auf die Zugaktivität wurde zur Erstellung von Vorhersagemodellen genutzt, die beispielsweise in der Flugsicherheit zur Anwendung kommen.

In der vorliegenden Studie konnten erstmals die Daten, die im Rahmen der Umweltverträglichkeitsstudien sowie des Bau- und Betriebsmonitorings von Offshore-Windparks erhoben wurden, zusammengefasst und projektübergreifend ausgewertet werden. Dies betraf die Datenerhebungen von 13 verschiedenen Standorten in der deutschen AWZ über einen Zeitraum von neun Jahren. Es wurden dabei zum einen Radarerfassungen hinsichtlich der Zugintensität und Flughöhe, zum anderen die Erfassungen der nächtlichen Zugrufe der 10 häufigsten und am stetigsten vorkommenden Arten analysiert. Dies waren zwei Limikolen-, vier Drossel- sowie vier weitere Singvogelarten.

Die übergeordneten Ziele des Projekts waren dabei i.) die zeitlichen und räumlichen Muster des nächtlichen Vogelzugs in der gesamten deutschen AWZ zu beschreiben; ii.) die Modellierung der Vogelzugintensität anhand von Wetterdaten, sowie die Entwicklung eines Vorhersagemodells des Vogelzugs; iii.) die Modellierung des kumulativen Vogelschlagrisikos an OWPs in der deutschen AWZ; sowie iv.) die Erarbeitung von Kriterien für potenzielle Minderungsmaßnahmen.

Der vorliegende Bericht stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Studie dar. Detaillierte Informationen sind in drei Teilberichten enthalten, die im Anhang zu finden sind.

Die Zugintensität in der AWZ zeigte deutliche saisonale Muster mit Zugmaxima im April und Oktober. Der Verlauf des Herbstzugs unterschied sich dabei zwischen der Nord- und Ostsee. Während an den Standorten in der Nordsee die Zugaktivität im Oktober gipfelte, war dies in der Ostsee bereits im August/September der Fall. Dies ist vermutlich auf Unterschiede des beteiligten Artenspektrums zurückzuführen. Wie die Analyse der Zugrufe ergab, war die Hauptzugzeit der einzelnen Arten meist auf etwa 4-8 Wochen pro Saison begrenzt.

Die Zug- und Rufintensität zeigte zudem ein deutliches zeitliches Muster innerhalb der Nacht. Allgemein nahm die Zugintensität kurz nach Sonnenuntergang stark zu und erreichte vor Mitternacht

das Maximum. In der zweiten Nachthälfte nahm die Zugaktivität meist kontinuierlich ab. Saisonale und räumliche Unterschiede im nächtlichen Verlauf standen im Einklang mit der Annahme, dass die Mehrzahl der Nachtzieher, die auf See festgestellt werden, etwa bei Sonnenuntergang von küstennahen Bereichen aufbrechen. Die Rufintensitäten zeigten teilweise stark davon abweichende Muster. Die Rufintensität nahm in der Regel im Verlauf der Nacht deutlich zu und gipfelte kurz vor Sonnenaufgang. Der Verlauf der Zunahme war dabei artspezifisch. Diese divergierenden Muster der Zug- und Rufintensitäten verdeutlichen, dass die Rufraten nicht notwendigerweise die Zugintensität der Arten widerspiegeln, sondern von weiteren Faktoren wie der Flughöhe, den Wetterbedingungen oder möglichen Anlockeffekten durch die Beleuchtung der Strukturen abhängig sind.

Sowohl die Zug- als auch die Rufintensität wies eine hohe Variation zwischen einzelnen Nächten und Untersuchungsjahren auf. Nichtsdestotrotz war die Zugintensität mit einem mittleren Korrelationskoeffizienten ρ von 0,48 (Spearman's Rang-Korrelation) über alle Standorte relativ hoch korreliert, was der Annahme von nächtlichem Breitfrontenzug im Untersuchungsraum entspricht. Die Stärke der Korrelation nahm dabei innerhalb der Nordsee nur geringfügig und während des Herbstzugs mit zunehmender Distanz zwischen den Erfassungsstandorten ab. Sie war innerhalb der Nordsee insgesamt jedoch wesentlich höher als zwischen Nord- und Ostsee. Das Zuggeschehen in einzelnen Nächten scheint damit zwischen Nord- und Ostsee weitgehend unabhängig zu sein. Auch Massenzug, im Rahmen dieser Studie definiert als >500 MTR (migration traffic rate), bzw. Starkzugeignisse (>250 MTR), traten nur selten gleichzeitig in beiden Regionen auf. In der Nordsee war das gleichzeitige Überschreiten dieser Schwellenwerte stark distanzabhängig; eine hohe Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Starkzug war nur bei geringer Entfernung zwischen Erfassungsstandorten zu verzeichnen. Die Zugruferfassungen zeigten insbesondere bei der häufigen Artgruppe der Drosseln ähnliche Ergebnisse, insgesamt war die räumliche und zeitliche Korrelation der Rufintensitäten jedoch stark artspezifisch.

Im Mittel lagen die Zugintensitäten in der Ostsee etwa 10 % höher als in der Nordsee. Auch die Rufintensität der meisten der untersuchten Arten folgten diesem Muster. Der regionale Gradient wies jedoch systematische zeitliche Schwankungen auf. Aufgrund der Unterschiede im saisonalen Verlauf des Zuggeschehens waren die Zugintensitäten zu Beginn der Frühjahrs- und zum Ende der Herbstsaison in der Nordsee im Mittel höher als in der Ostsee. Innerhalb der Nordsee bestand zudem ein Gradient der Zugintensität mit Entfernung zur Küste. Die Zugintensität nahm mit zunehmender Entfernung zur Küste ab. Die Ergebnisse der Zugrufe deuten darauf hin, dass hierbei artspezifische Unterschiede bestehen könnten. So nahm beispielsweise die Rufintensität der Drosseln im Frühjahr mit der Entfernung zur Küste zu.

Mit Hilfe der Radargeräte wurde der Vogelzug bis in 1.000 m Höhe aufgezeichnet. Innerhalb dieses Höhenbereichs wurden insgesamt etwa 35 % der Flugbewegungen unterhalb von 200 Höhenmetern festgestellt. Dies bestätigt die Annahme, dass Nachtzieher auf See häufig niedrige Flughöhen bevorzugen. Hier muss beachtet werden, dass ein variabler Anteil des Vogelzugs oberhalb der erfassten 1.000 m stattfindet. Gleichzeitig ist jedoch auch die Detektionswahrscheinlichkeit von Vögeln in den unteren 50 Höhenmetern eingeschränkt. Zumindest in einzelnen Nächten ist bedingt durch den begrenzten Erfassungsbereich mit einer Überschätzung niedriger Flugbewegungen zu rechnen; insgesamt zeigen jedoch auch Studien ohne Höhenbegrenzung einen Anteil der Flugbewegungen unterhalb von 200 m zwischen 25 - 50 %.

In der Nordsee zeigte die Flughöhe ein deutliches saisonales Muster mit einer etwa 100 m höheren mittleren Flughöhe im Frühjahr im Vergleich zum Herbst. In der Ostsee konnte ein vergleichbares Muster nicht festgestellt werden. Die mittlere Flughöhe nahm darüber hinaus im Verlauf der Nacht

merklich ab. Die Vögel zogen zu Ende der Nacht durchschnittlich etwa 70 m niedriger als zu Beginn. Dies könnte mit einem zunehmenden Anteil Vögel in Zusammenhang stehen, die auf der Suche nach einem geeigneten Rastplatz ihre Flughöhe reduzieren. Weiterhin zeigte sich eine positive Korrelation der Flughöhe mit der Zugintensität. In Nächten mit hoher Zugaktivität flogen die Vögel demnach im Mittel höher als in Nächten mit geringer Zugintensität. Dieser Zusammenhang ist vermutlich dadurch bedingt, dass sowohl die Zugintensität als auch die Flughöhe bei günstigen Zugbedingungen zunehmen.

Die Gesamtzahl der Flugbewegungen von Vögeln, die jährlich während der Zugzeiten in Frühjahr und Herbst die Windparks der deutschen AWZ queren, wurde anhand der Radardaten auf knapp 100 Millionen geschätzt, wovon etwa 24 Millionen auf die Rotorhöhe entfielen. Trotz des großen Unsicherheitsbereichs zeigt diese Schätzung, dass in den Windparks der AWZ mit Flugbewegungen in achtstelliger Größenordnung gerechnet werden muss.

Wetter- und Zeitparameter erklärten über 70 % der Varianz der Zugintensität an den Erfassungsstandorten in der AWZ. Unter Berücksichtigung weiterer Faktoren wie Untersuchungsjahr und Projektstandort konnte dieser Anteil auf bis zu 80 % erhöht werden. Die Performance der Modelle zur Rufintensität war stark artspezifisch. Hier konnte zwischen 1 und 67 % der Varianz erklärt werden. Dies verdeutlicht, dass zumindest bei einigen Arten die ermittelte Rufaktivität von Faktoren abhängt, die bei der Modellierung unberücksichtigt blieben.

Die Windverhältnisse, insbesondere die Rückenwind-Komponente, war der meteorologische Faktor mit dem größten Einfluss auf die Zug- und Rufintensität. Die Zugintensität nahm mit zunehmendem Rückenwind deutlich zu, wobei die Vögel im Herbst in höherem Maße moderaten Gegenwind akzeptierten. Die Seitenwind-Komponente hatte insgesamt einen geringeren Einfluss auf die Zugaktivität. Die Zugintensität nahm, insbesondere im Frühjahr, mit ablandigen Winden zu, was als ein Hinweis auf Winddrift gewertet werden kann. Unsere Ergebnisse wiesen zudem darauf hin, dass ungünstige Windverhältnisse in vorangegangenen Nächten zu einer Akkumulation der Nachtzieher in den Abfluggebieten führte. Die Modelle zur Rufintensität zeigten hinsichtlich des Effekts der Windverhältnisse weitgehend damit übereinstimmende Ergebnisse.

Weiterhin zeigten die Modelle, dass Nachtzieher in der AWZ geringe Luftfeuchtigkeit und hohen Luftdruck bevorzugten; Bedingungen, die in der Regel mit klarem Himmel, geringer Windstärke und geringem Niederschlag verbunden sind. Der Effekt der Lufttemperatur war insgesamt geringer und divergierte zwischen Frühjahr und Herbst. Während die Zugintensität im Frühjahr bei steigenden Temperaturen zunahm, war dies im Herbst bei sinkenden Temperaturen der Fall.

Die Rufintensität zeigte eine deutliche Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad. Im Frühjahr und Herbst war die höchste Rufaktivität bei vollständiger Bedeckung zu verzeichnen. Im Gegensatz zum Frühjahr war im Herbst der Zusammenhang zwischen der Rufintensität und dem Bedeckungsgrad meist U-förmig mit ebenfalls erhöhten Rufraten bei geringer oder fehlender Bedeckung. Dieses Ergebnis deutet daraufhin, dass die Vögel bei starker Bedeckung und geringer Sicht ihre Flughöhe reduzieren und möglicherweise ihre Rufaktivität erhöhen. Hohe Rufintensität bei geringer Bedeckung ist hingegen vermutlich auf hohe Zugaktivität zurückzuführen. Dass dieser Effekt im Frühjahr nicht festgestellt werden konnte, könnte mit den insgesamt größeren Flughöhen in dieser Zugsaison in Zusammenhang stehen.

Die Variation der mittleren Flughöhe konnte durch die Modelle etwas weniger gut erklärt werden als die der Zugintensität. Der Anteil der erklärten Varianz lag hier bei 50-60 %. Dabei war die

Zugintensität die wichtigste erklärende Variable. Der Zusammenhang zwischen der mittleren Flughöhe und den meteorologischen Variablen entsprach weitgehend den Ergebnissen der Zugintensität. Eine Ausnahme stellte die Rückenwind-Komponente dar. Im Gegensatz zur Zugintensität nahm die Flughöhe mit zunehmendem Gegenwind zu. Neben anderen Faktoren spielt hier möglicherweise eine Rolle, dass sich die verwendeten Winddaten auf die Verhältnisse knapp über der Wasseroberfläche beziehen und keine Informationen zur Variation mit zunehmender Höhe vorlagen. Weiterhin zeigten sich bei der Flughöhe saisonale Muster. Im Frühjahr stieg die mittlere Flughöhe im Verlauf der Saison, im Herbst war eine saisonale Abnahme zu verzeichnen. Hier könnten saisonale Änderungen der Artzusammensetzung mit entsprechenden Änderungen in der Präferenz der Flughöhe und/oder systematische Änderungen der Windverhältnisse einen Erklärungsansatz darstellen.

Die Vorhersagemodelle der nächtlichen Zugintensität bis 200 m Höhe erklärten etwa 40 % der Varianz und ergaben eine hohe Korrelation der vorhergesagten und der tatsächlichen Zugintensitäten. Die Genauigkeit des Modells, Nächte vorherzusagen, in welchen die Zugintensität einen Schwellenwert von 250 MTR überschreitet, war mit etwa 30-60 % relativ gering. Dies war auf die allgemeine Tendenz der Modelle zurückzuführen, hohe Zugintensitäten zu unterschätzen. Eine Optimierung des Schwellenwerts für die Vorhersage verbesserte die Prognosegenauigkeit auf etwa 85 %.

Der kumulative Vogelschlag von Nachtziehern an Windturbinen in der deutschen AWZ wurde innerhalb der Zugsaisons auf etwa 35.000, 16.000 bzw. 8.000 geschätzt unter Voraussetzung einer angenommenen Meiderate von 0,956; 0,980 oder 0,990. Die starke Variation der Schätzwerte verdeutlicht die zentrale Bedeutung der angenommenen Meidereaktion auf die Modellergebnisse. Variation und Unsicherheit bezüglich der weiteren turbinen- und vogelbezogenen Eingangsparameter führte zu zusätzlicher Variation der geschätzten Kollisionen. Wie eine Sensitivitätsanalyse ergab, war deren Effekt jedoch im Vergleich zur Meiderate merklich geringer.

Die modellierte Anzahl Kollisionen lag aufgrund der höheren Anzahl Turbinen in der Nordsee deutlich höher als in der Ostsee. Das Kollisionsrisiko pro Turbine lag hingegen in der Ostsee um etwa 50 % höher als in der Nordsee. Die Modelle ergaben zudem eine Konzentration der Kollisionen im Oktober, in welchem den Ergebnissen zufolge etwa 36 % aller Kollisionen in den Zugzeiten zu erwarten sind. Im Verhältnis zur geschätzten Gesamtzahl der die Nord- und Ostsee querenden Nachtzieher kollidieren nach den Modellierungen pro Jahr etwa 0,03 % (Nordsee) bzw. 0,002 % (Ostsee) der Individuen an Offshore-Windturbinen. Dies ist jedoch als grober Schätzwert anzusehen, da sowohl die Gesamtzahl der nachts ziehenden Vögel im Untersuchungsraum als auch die geschätzte Anzahl Kollisionen mit einer großen Unsicherheit behaftet sind.

Aufgrund der Konzentration der Zugaktivität auf begrenzte Zeiträume lag auch eine zeitliche Aggregation des modellierten Vogelschlags vor. Zur Abschätzung der potenziellen Wirksamkeit von Vermeidungsmaßnahmen wurde die Anzahl theoretischer Kollisionen für die Zeiträume berechnet, in denen die Zugintensität eine Reihe von Schwellenwerten überstieg. So ergaben die Berechnungen, dass bei Turbinenabschaltungen ab einer Zugintensität von 500 MTR etwa 27 % aller Kollisionen von Nachtziehern vermieden werden könnten, wobei sich die Abschaltzeiten auf etwa 40 Stunden pro Jahr beliefen. Maßnahmen ab einer Zugintensität von 250 MTR würden nach den Modellierungen zu einer mittleren Abschaltzeit von etwa 90 Stunden führen und knapp die Hälfte aller Kollisionen in den Zugzeiten vermeiden.

Diese Überlegungen setzen voraus, dass sich die Zahl der Kollisionen streng proportional zur Anzahl der Zugvögel auf Rotorhöhe verhält. Es wird jedoch häufig angenommen, dass das Kollisionsrisiko

unter bestimmten Wetterbedingungen wie schlechte Sicht, Niederschlag oder Gegenwind durch Veränderungen des Meideverhaltens bzw. der Anlockung durch die Beleuchtung der Anlagen erhöht ist. Die Zahl und Verteilung der Kollisionsereignisse könnte demnach stark von den Zeiträumen beeinflusst werden, in denen hohe Zugintensität auf Rotorhöhe und ungünstige Wetterbedingungen zusammenfallen. Die dieser Studie vorliegenden Daten zeigen, dass dies nur selten der Fall ist (0,5-8 Stunden pro Jahr je nach Definition von hoher Zugintensität und ungünstigem Wetter). Eine starke Konzentration der Kollisionen in diesen Phasen würde eine weitere Reduzierung der Abschaltzeiten ermöglichen, um eine gegebene Anzahl Kollisionen zu vermeiden. Für eine bessere Einschätzung der Validität dieser Rückschlüsse ist jedoch neben einer Validierung der Kollisionsmodelle eine bessere Kenntnis des Verhaltens nachts ziehender Vögel an Offshore-Windenergieanlagen dringend notwendig.

2 HINTERGUND UND AUFGABENSTELLUNG

2.1 Anlass und Hintergrund

Die Weiterentwicklung der Offshore-Windenergie gilt als ein wichtiger Baustein zum Erreichen der Klimaziele der Bundesregierung. Kollisionen von Vögeln mit Windenergieanlagen (WEA) werden dabei häufig als ein wesentlicher Konflikt zwischen Naturschutz und dem Ausbau der Erneuerbaren Energien angesehen. Die Seeanlagenverordnung bzw. das Windenergie-auf-See-Gesetz benennen die Gefährdung des Vogelzugs als einen Versagensgrund für die Genehmigung von Offshore-Windenergieanlagen, und in der Nebenbestimmung 21 der BSH-Genehmigungen werden Auflagen zur Überwachung formuliert. Das BSH behält sich als Genehmigungsbehörde für Offshore-Windparks in der deutschen AWZ von Nord- und Ostsee ausdrücklich Maßnahmen zur Regulierung des Betriebs vor. Ob und in welchem Maße ziehende Vögel auf See mit Offshore-Windenergieanlagen kollidieren, ist jedoch bisher unklar.

Dies ist vornehmlich auf technische und logistische Schwierigkeiten zurückzuführen, direkte Daten zum Vogelschlag an Offshore-Windturbinen zu erhalten. Bisher sind keine technischen Systeme wie Radar-, kamerabasierte oder akustische Systeme erhältlich, die in der Lage sind, direkt Vogelkollisionen an Offshore-WEA zu detektieren, insbesondere in der Nacht (DIRKSEN 2017). Zudem ist es unmöglich, eine systematische Kollisionsopfersuche auf See und darauf basierende Hochrechnungen durchzuführen.

Es wird bislang häufig davon ausgegangen, dass insbesondere der nächtliche Vogelzug einem erhöhten Kollisionsrisiko an Offshore-WEA ausgesetzt ist. Diese Überlegungen gehen davon aus, dass Vögel bei Nacht die Anlagen nur eingeschränkt wahrnehmen können. Darüber hinaus werden mit den Offshore-Windparks in einen bislang natürlich dunklen Raum isolierte Lichtquellen gebracht, die eine anziehende Wirkung auf Vögel ausüben können (EVANS OGDEN 1996; GEHRING et al. 2009; VAN DOREN et al. 2017). Das Kollisionsrisiko kann zusätzlich durch ungünstige Wetterbedingungen, wie Nebel, Regen und Gegenwind, verstärkt werden (AVERY et al. 1977; AUMÜLLER et al. 2011). Da nachts ziehende Landvögel den Zug auf See nicht unterbrechen können, müssen sie ihn auch bei einer Wetterverschlechterung fortsetzen.

Untersuchungen an Onshore-Windenergieanlagen haben bisher keine Hinweise darauf ergeben, dass es im nächtlichen Vogelzug tatsächlich zu einem hohen Vogelschlagrisiko kommt. Studien in Küstennähe zeigten, dass primär tagaktive Vögel, die im Bereich der Windparks selbst vorkommen, mit den Turbinen kollidieren, Nachtzieher hingegen nur einen geringen Anteil der Schlagopfer ausmachen (KRIJGSVELD et al. 2009; GRÜNKORN et al. 2016; WELCKER et al. 2017; aber siehe auch ASCHWANDEN et al. 2018). Für den Offshore-Bereich ist jedoch unbestritten, dass nachtziehende Vögel häufig an beleuchteten Strukturen wie beispielsweise Plattformen kollidieren, wobei es in einzelnen Nächten zu stark gehäuften Kollisionen kommen kann (MÜLLER 1981; HÜPPPOP et al. 2009, 2016; AUMÜLLER et al. 2011; SCHULZ et al. 2013). Ob das Kollisionsrisiko von Nachtziehern an Offshore-WEA eher vergleichbar ist mit der Situation an Onshore-Turbinen (eher geringes Kollisionsrisiko) oder an anderen Offshore-Strukturen (eher hohes Risiko) ist nach derzeitigem Kenntnisstand unklar. Da direkte Erfassungen von Kollisionen an Offshore-WEA bislang nicht durchführbar sind, ist eine Abschätzung des Kollisionsrisikos nur durch Modellierungen möglich. Für deutsche Offshore-Windparks (OWP) liegen bislang nur wenige Modellberechnungen vor (BELLEBAUM et al. 2010; SCHULZ et al. 2014), eine projektübergreifende, kumulative Betrachtung des Kollisionsrisikos fehlt bislang gänzlich.

Ein Großteil des Vogelzugs findet nachts statt. Während sich tagziehende Arten häufig an topographischen Strukturen orientieren und das Überqueren größerer Wasserflächen vermeiden, findet der Nachtzug weitgehend unabhängig der Küstenlinie oder anderer landschaftlicher Gegebenheiten im sogenannten Breitfrontenzug statt (EASTWOOD 1967; BERTHOLD 2000; ZEHNDER et al. 2001). Dabei werden regelmäßig Meeresbereiche wie die deutsche Nord- und Ostsee überquert. Die Anzahl der diese Bereiche überfliegenden Nachtzieher wurde für die Nordsee auf etwa 100 Millionen (OREJAS et al. 2005; BSH 2015), für die westliche Ostsee auf ca. 500 Millionen (Herbst) bzw. ca. 300 Millionen (Frühjahr) geschätzt (BERTHOLD 2000; BELLEBAUM et al. 2010; BSH 2014).

Der Zug findet dabei auch in den Hauptzugperioden im Frühjahr und Herbst stark unregelmäßig statt. Einzelnen Perioden oder Nächten mit hohem Zugaufkommen folgen häufig Zeitabschnitte mit geringem Vogelzug. In einzelnen Nächten können sehr hohe Zugintensitäten auftreten, ein Phänomen, das häufig als „Massenzug“ bezeichnet wird. Eine Definition bzw. einen Schwellenwert für „Massenzug“ gibt es derzeit jedoch nicht.

Eine Ursache dieses diskontinuierlichen Musters ist die starke Wetterabhängigkeit des Vogelzugs (ZEHNDER et al. 2001; ERNI et al. 2002, 2005; KEMP 2012; SHAMOUN-BARANES et al. 2017; VAN DOREN & HORTON 2018). Die Zugaktivität konzentriert sich in Phasen günstiger Wetterbedingungen, die in der Regel durch gute Sicht, Rückenwind und fehlenden Niederschlag charakterisiert sind. Unter ungünstigen Wetterbedingungen kommt der Vogelzug hingegen häufig zum Erliegen. Die starke Wetterabhängigkeit des Vogelzugs ermöglicht die Modellierung, und damit eine Prognose, der Zugaktivität anhand von Wetterparametern (VAN BELLE et al. 2007; VAN DOREN & HORTON 2018). Solche Modellprognosen kommen bereits im Bereich der Flugsicherheit zum Einsatz (VAN BELLE et al. 2007) und sind prinzipiell auch im Bereich der Offshore-Windenergienutzung denkbar. Für den Bereich der deutschen AWZ lagen solche Modelle jedoch bislang nicht vor.

Eine direkte Erfassung des nächtlichen Vogelzugs ist schwierig. Es werden daher in der Regel indirekte, technische Methoden wie Infrarot- oder Radarerfassungen verwendet, um den Vogelzug in der Nacht zu quantifizieren (EASTWOOD 1967; BRUDERER 1997; ZEHNDER et al. 2001; SHAMOUN-BARANES et al. 2014). Diese Methoden erlauben eine Erfassung des Vogelzugs bis in große Höhe und unabhängig von den Lichtbedingungen. Ein wesentlicher Nachteil dieser Methoden ist jedoch die fehlende Möglichkeit einer Artbestimmung der erfassten Vögel. Auch mit spezialisierten Radargeräten, die in der Lage sind, die Flügelschlagfrequenz aufzunehmen, kann lediglich eine Unterscheidung weniger grober Artgruppen erfolgen (ZAUGG et al. 2008).

Eine komplementäre Methode zur Erfassung des Artspektrums des Nachtzugs ist die Erfassung der Flugrufe (FARNSWORTH 2005). Viele nachziehende Vogelarten emittieren Zugrufe, deren eigentliche Funktion noch nicht vollständig geklärt ist (MUNDINGER 1970; FARNSWORTH et al. 2004; FARNSWORTH 2007). Diese Rufe können genutzt werden, um artspezifische Informationen zur Zugaktivität zu erhalten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine Reihe von Nachtziehern keine oder nur selten Flugrufe emittieren; und somit mit dieser Methode nur ein Teil der nachziehenden Arten erfasst werden kann. Darüber hinaus ist die Anzahl der Rufe nicht notwendigerweise proportional zur Zugaktivität, da auch weitere Faktoren wie Wetterverhältnisse, die Zughöhe und die Tageszeit eine wesentliche Rolle spielen können. So wurde vermutet, dass erhöhte Zugrufaktivität im Offshore-Bereich als Indikator für Situationen erhöhten Kollisionsrisikos für Nachtzieher dienen könnte, wenn Zugrufe vermehrt bei ungünstigen Wetterbedingungen registriert werden (HÜPPOP & HILGERLOH 2012).

2.2 Ziele von ProBIRD

Die Betreiber aller deutschen Offshore-Windparks sind dazu verpflichtet, für die Genehmigungsunterlagen sowie während der Bauphase und den ersten Jahren des Betriebs, in den jeweiligen Projektgebieten Daten zum Vogelzug zu erheben. Die Datenaufnahme ist dabei durch die Vorgaben des Standarduntersuchungskonzepts des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) standardisiert (StUK; BSH 2007, 2013). Als Erfassungsmethoden kommen u.a. Radarerfassungen und das Verhören von Zugrufen zum Einsatz. Im Rahmen des Forschungsprojekts ProBIRD wurden diese Daten von bis zu 13 verschiedenen Standorten in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) erstmals zusammengeführt und projektübergreifend ausgewertet.

Die übergeordneten Ziele von ProBIRD waren dabei:

- Die Beschreibung räumlicher und zeitlicher Muster des nächtlichen Vogelzugs in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee.
- Modellierung der Vogelzugintensität anhand von Wetterdaten, sowie die Entwicklung eines Vorhersagemodells des Vogelzugs auf Rotorhöhe der Offshore-WEA auf Basis von Wetterparametern.
- Modellierung des kumulativen Vogelschlagrisikos an OWPs in der deutschen AWZ auf Grundlage der anhand der Radardaten festgestellten Zugintensität.
- Erarbeitung von Kriterien für potenzielle Vermeidungs- bzw. Minderungsmaßnahmen.

Die Ergebnisse des Projekts wurden in drei detaillierten Teilberichten dargelegt, die im Anhang zu finden sind.

Der erste Teilbericht mit dem Titel „Analysis of bird flight calls from the German North and Baltic Seas“ (Anhang A.1, WELCKER & VILELA 2018) gibt dabei die Ergebnisse der Analyse der Zugrufe von 13 Standorten in der Nord- und Ostsee in einem Zeitraum von acht Jahren wieder. Es wurden die Rufintensitäten der zehn häufigsten bzw. stetigsten Arten ausgewertet. Es werden die Ergebnisse zur Phänologie und tageszeitlicher Muster, zur räumlichen Korrelation und bestehenden Gradienten, sowie zur Wetterabhängigkeit der Rufaktivität dargestellt.

Der zweite Teilbericht mit dem Titel „Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas“ (Anhang A.2, WELCKER 2019) bezieht sich auf die Auswertung der Radardaten. Für diese lagen Daten von 12 Standorten aus neun Jahren vor. Dieser Bericht gibt die Ergebnisse hinsichtlich zeitlicher und räumlicher Muster der Zugintensität sowie der Flughöhe in der deutschen AWZ wieder. Zudem wird eine Abschätzung der Anzahl der Flugbewegungen von Zugvögeln in deutschen OWPs vorgenommen.

Im dritten Teilbericht mit dem Titel „Weather-dependence of nocturnal bird migration and cumulative collision risk at offshore wind farms in the German North and Baltic Seas“ (Anhang A.3, WELCKER & VILELA 2019) werden die Ergebnisse der Modellierung der nächtlichen Zugintensität (und Flughöhe) anhand von Wetterparametern, sowie ein Vorhersagemodell der Zugintensität im Rotorenbereich präsentiert. Zudem wird das kumulative Kollisionsrisiko an deutschen OWPs modelliert, sowie die Häufigkeit des Zusammentreffens von hohen Zugintensitäten und ungünstigen Wetterverhältnissen, die potenziell zu erhöhtem Kollisionsrisiko führen, ermittelt. Darüber hinaus

erfolgt eine Abschätzung der Effektivität von potenziellen Schwellenwerten für Turbinen-Abschaltungen auf Basis rechnerisch vermiedener Kollisionen.

Der vorliegende Bericht stellt eine Zusammenfassung dieser drei Ergebnisberichte dar. Details zur Methodik, den Ergebnissen sowie der Interpretation der Daten sind den einzelnen Berichten zu entnehmen.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Zugruferfassungen

3.1.1 Datenaufnahme

Die Datengrundlage der Auswertungen bildeten die gemäß StUK (BSH 2007, 2013) durchgeführten Zugruferfassungen, die an 13 Standorten (11 in der AWZ der Nordsee und 2 in der AWZ der Ostsee) in den Jahren 2008-2015 durchgeführt wurden (Abb. 3-1). An der Datenaufnahme waren mehrere verschiedene Planungsbüros beteiligt; sie war jedoch durch die Vorgaben des StUK standardisiert. Die Erfassungen wurden im Frühjahr in der Zeit vom 01.03. bis zum 31.05. und im Herbst vom 15.07. bis zum 30.11. vorgenommen. In der Regel erfolgte die Datenaufnahme in etwa 50 Nächten pro Jahr. Die Erfassungen wurden entweder von Beobachtern vom ankernden Schiff oder durch automatisierte Mikrofonsysteme von Plattformen (Abb. 3-2) aus durchgeführt. Eine Übersicht über die Erfassungsmethodik sowie den Erfassungsaufwand an den verschiedenen Standorten befindet sich in Tab. 3-1.

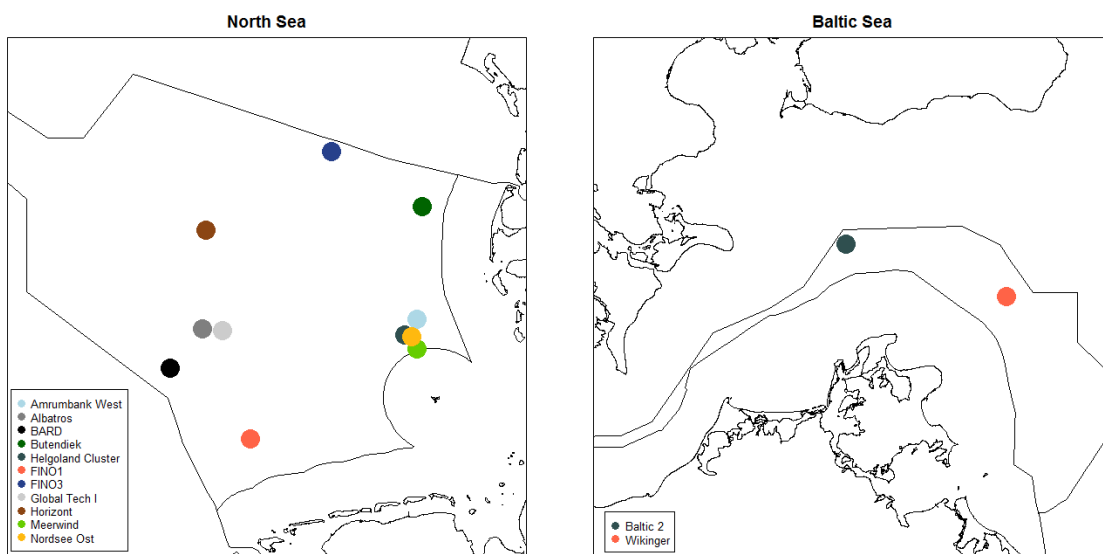


Abb. 3-1 Standorte der Zugruferfassungen in der AWZ der Nord- (links) und Ostsee (rechts).

Tab. 3-1 Erfassungsstandorte, Aufnahmemethodik und Stichprobengröße der Zugruferfassungen. Zudem ist der Erfassungszeitraum sowie die Phase der Windparkentwicklung während der Datenaufnahme angegeben (B – Baseline, C – Bauphase (construction), O – Betriebsphase (operation)).

Standort	Aufnahmemethodik	N Jahre	N Nächte	Erfassungszeitraum (Jahre)	Phase (Jahre)
Albatros	Erfasser	2	122	2008 - 2009	B (2)
Amrumbank West	Erfasser	3	107	2011 - 2012, 2014	B (2); C (1)
Baltic 2	Erfasser	3	104	2013 - 2015	C (3)
BARD	Erfasser	6	306	2010 - 2015	C (3); O (3)
Butendiek	Erfasser	3	143	2011, 2014 - 2015	B (1), C (2)
Butendiek	Mikrofon (2)	1	23	2015	O (1)
Cluster Helgoland	Mikrofon (2)	1	31	2015	O (1)
FINO1	Mikrofon (1)	8	1.258	2008 - 2015	B (1), C (1), O (6)
FINO3	Erfasser	4	111	2011, 2013 - 2015	B (1), C (2), O (1)
Global Tech I	Erfasser	5	247	2009, 2012 - 2015	B (1), C (3), O (1)
Horizont	Erfasser	2	119	2009 - 2010	B (2)
Meerwind	Erfasser	4	139	2010 – 2011, 2013 - 2014	B (2), C (2)
Nordsee Ost	Erfasser	4	203	2010, 2012 - 2014	B (1), C (3)
Wikinger	Erfasser	2	121	2014 - 2015	B (2)
SUMME		48	3034	2008 - 2015	B (16), C (19), O (13)

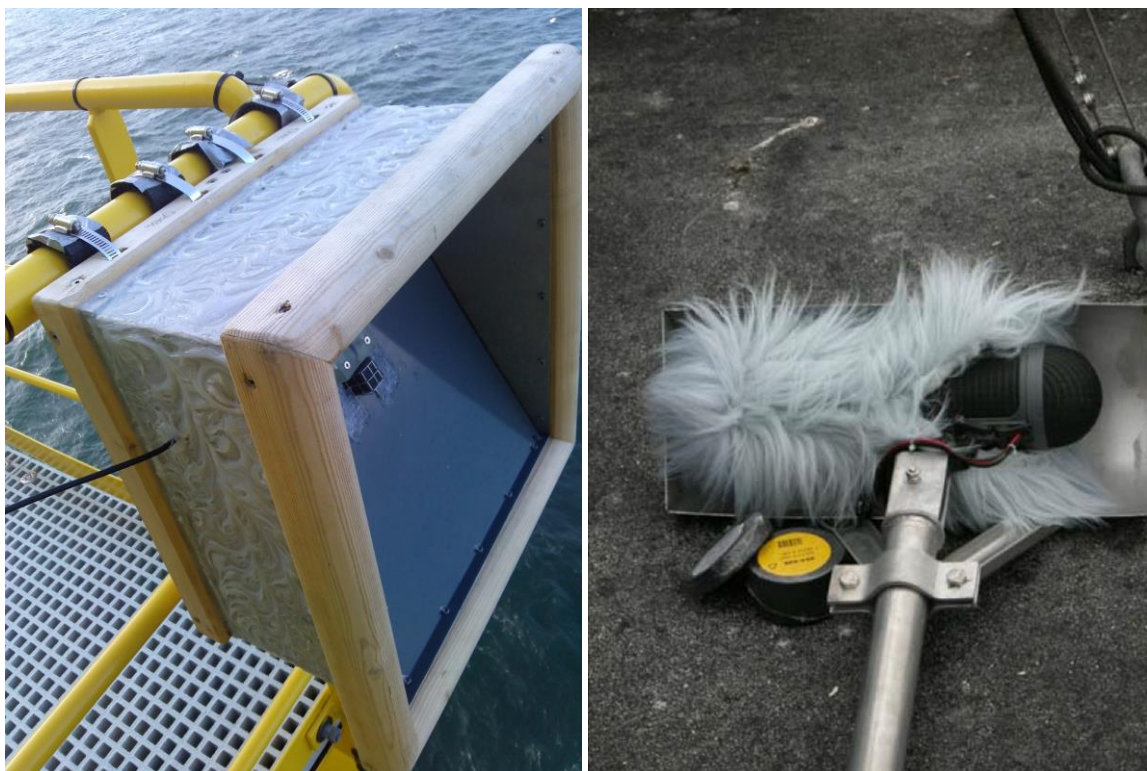


Abb. 3-2 Zugruf-Aufnahmesysteme am Standort OSS „Butendiek“ und OSS „Nordsee Ost“ (links) sowie auf FINO1 (rechts, entnommen aus OREJAS et al. (2005)).

3.1.2 Datenanalyse

Von den insgesamt 127 im Datensatz enthaltenen Arten wurden die zehn häufigsten bzw. am konstantesten vorkommenden Arten für die weitere Datenanalyse ausgewählt. Dies waren vier Drosselarten (Amsel *Turdus merula*, Rotdrossel *Turdus iliacus*, Singdrossel *Turdus philomelos* und Wacholderdrossel *Turdus pilaris*), vier weitere Singvogelarten (Feldlerche *Alauda arvensis*, Wiesenpieper *Anthus pratensis*, Rotkehlchen *Erithacus rubecula* und Star *Sturnus vulgaris*), sowie zwei Limikolenarten (Alpenstrandläufer *Calidris alpina* und Flusssuferläufer *Actitis hypoleucos*).

Für jeden Standort und jede Erfassungsstunde wurde für diese zehn Arten die Rufintensität (Rufe/h) berechnet. Aus diesen wurde dann die mittlere nächtliche Rufintensität ermittelt, sofern für mindestens 75 % der Nachtdauer stündliche Daten vorlagen. Nächte mit geringerem Erfassungsaufwand wurden von der Analyse ausgeschlossen.

Anhand der nächtlichen Rufintensität wurde die Phänologie des Frühjahrs- und Herbstzugs der ausgewählten Arten dargestellt und die jeweilige Hauptzugzeit bestimmt. Die Hauptzugzeit wurde definiert als die Zeitspanne, in der 90 % der Rufe der Art festgestellt wurden (HÜPPOP & HILGERLOH 2012), d.h. 5 % der Rufe am Beginn und Ende der Zugperioden wurden verworfen. Für alle weiteren Analysen wurden ausschließlich die Daten der Hauptzugperiode verwendet.

Zur Bestimmung der räumlichen Korrelation der Rufintensitäten wurden die Korrelationskoeffizienten ρ (Spearman's Rank Correlation) für jedes Standortpaar und Untersuchungsjahr berechnet, für das mindestens 5 Nächte zeitgleicher Erfassungen vorlagen. Zudem wurde die räumliche Korrelation von „Massenzugereignissen“ bzw. „Starkzugereignissen“ bestimmt.

Da eine Definition von „Massenzug“ bisher nicht vorlag, wurde zunächst die Möglichkeit geprüft, eine Definition auf Basis der empirischen Verteilung der Daten vorzunehmen (Abb. 3-3). Dies wäre beispielsweise bei Vorliegen einer bimodalen Verteilung möglich. Es zeigte sich jedoch, dass die Verteilung der Rufintensitäten stark rechtsschief aber kontinuierlich abnehmend war und somit keine Möglichkeit der Bestimmung eines empirischen Schwellenwerts gegeben war, der „Massenzug“ von „gewöhnlichen“ Rufintensitäten trennt.

Es wurde daher für die weitere Analyse der 25-fache Wert des globalen Medians der Rufintensitäten als Schwellenwert für „Starkzug“ und der 100-fache Wert des Medians als Schwellenwert für „Massenzug“ herangezogen (Abb. 3-4). Diese Werte wurden in 4,8 % der Nächte (Massenzug) bzw. in 14,3 % der Nächte (Starkzug) überschritten.

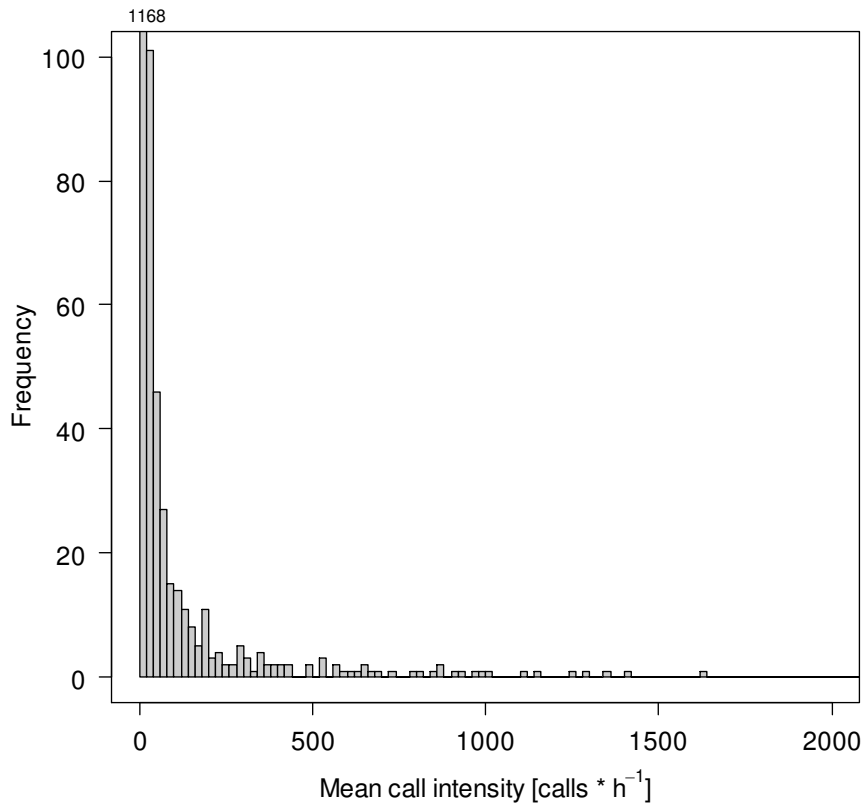


Abb. 3-3 Histogramm der nächtlichen Rufintensität [Rufe/h].

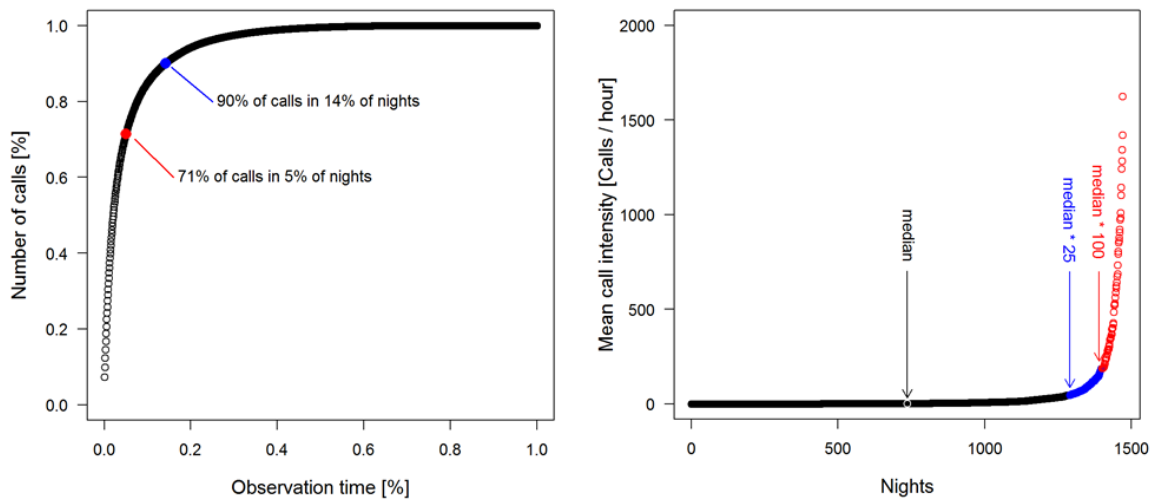


Abb. 3-4 Linke Seite: Kumulative Darstellung der Anzahl der Rufe [%] pro Erfassungszeit [%]. Zwei Werte werden veranschaulicht: 71% der Rufe wurden in 5% der Nächte, und 90% der Rufe in 14% der Nächte festgestellt. Rechte Seite: Mittlere Rufintensität pro Nacht in aufsteigender Reihenfolge und Darstellung der gewählten Schwellenwerte.

Um einen räumlichen Gradienten zwischen Nord- und Ostsee zu prüfen, wurden mit Hilfe gepaarter Wilcoxon-Tests gleichzeitig erfasste Rufintensitäten beider Regionen verglichen. Zur Bestimmung des Einflusses der Distanz zur Küste in der Nordsee auf die Rufintensität wurden lineare Regressionen zwischen der Differenz der Rufraten zweier Standorte mit der Differenz der Entfernung zur Küste dieser Standorte durchgeführt.

Für die Modellierung der Abhängigkeit der Rufintensität von Wetterparametern wurden *in-situ* Wetterbeobachtungen verwendet, die von den Erfassern zeitgleich mit den Ruferfassungen aufgenommen wurden. Diese umfassten die Lufttemperatur [°C], die Windstärke [m/s] und -richtung [8 Hauptwindrichtungen], den Bedeckungsgrad [8/8], die Sichtweite [km] sowie den Niederschlag [ja/nein]. Auf Grundlage der Windstärke und -richtung sowie der angenommenen Zugrichtung der Vögel (Frühjahr: 45°, Herbst: 225°) wurde nach ZEHNDER et al. (2001) die Rückenwind-Komponente (TWC – tailwind component) und die Seitenwind-Komponente (CWC – crosswind component) berechnet, sowie die Variable δ TWC, die Differenz der TWC zwischen aktueller und vorangegangener Nacht. Zusätzlich zu den meteorologischen Variablen wurden die Zeitvariablen „Julianischer Tag“ und „Stunde der Nacht“ und somit die saisonalen und nächtlichen Zeitmuster in der Analyse berücksichtigt. Darüber hinaus wurden die Faktoren Untersuchungsjahr („year“), Standort („project“), das für die Datenerhebung verantwortliche Büro („lab“) sowie die Entwicklungsphase des Windparks („phase“) in die Modelle aufgenommen.

Die Auswertung erfolgte über Random Forest-Regressionsmodelle (BREIMAN 2001). Es wurden für jede Art und für die Zugsaisons (Frühjahr, Herbst) getrennte Modelle berechnet. Die wurzeltransformierte stündliche Rufintensität diente als abhängige Variable. Alle Analysen wurden in R 3.4.2 (R CORE TEAM 2016) mit den Packages „rfUtilities“ (EVANS & MURPHY 2018) und „randomForest“ (LIAW & WIENER 2002) durchgeführt. Eine detailliertere Beschreibung der Methoden der Datenaufnahme und -analyse der Zugrufdaten befindet sich in WELCKER & VILELA (2018; siehe Anhang A.1).

3.2 Radarerfassungen

3.2.1 Datenaufnahme

Die im Projekt ProBIRD verwendeten Radardaten wurden ebenfalls während der in Kap. 3.1.1 beschriebenen Vogelzugerfassungen nach StUK erhoben. Dabei standen hier die Daten von insgesamt 12 Standorten (10 in der Nordsee und 2 in der Ostsee) aus den Jahren 2008-2016 zur Verfügung (Tab. 3-2). Für die Radarerhebungen wurden handelstypische Schiffsradargeräte verschiedener Hersteller verwendet, deren Antennen in vertikal drehender Position montiert wurden.

Die Radareinstellungen wurden über das StUK weitgehend vereinheitlicht, der Erfassungsbereich betrug im Radius 1,5 km. Als Datengrundlage dienten die in regelmäßigen Abständen (3-5 min an verschiedenen Standorten) aufgenommenen Screenshots des Radarbildschirms.

Tab. 3-2 Erfassungsstandorte und Stichprobengröße der Radarerfassungen. Zudem ist der Erfassungszeitraum sowie die Phase der Windparkentwicklung während der Datenaufnahme angegeben (B – Baseline, C – Bauphase (construction), O – Betriebsphase (operation)).

Standort	Radar (output power)	N Frühjahr, N Herbst	N Nächte	Erfassungszeitraum (Jahre)	Phase (Jahre)
Albatros	25 kW	2, 2	124	2008 - 2009	B (2)
Amrumbank West	25 kW	2, 2	112	2011 - 2012, 2014	B (2); C (1)
Baltic 2	25 kW	4, 5	244	2010, 2013 - 2016	B (1); C (3); O (2)
Butendiek	25 kW	3, 3	276	2011, 2014 - 2016	B (1), C (2), O (1)
Cluster Helgoland	25 kW	2, 2	424	2015 - 2016	O (2)
FINO1	12 kW	9, 9	1772	2008 - 2016	B (1), C (1), O (7)
FINO3	25 kW	4, 5	788	2011, 2013 - 2016	B (1), C (2), O (2)
Global Tech I	25 kW	5, 6	301	2009, 2012 - 2016	B (1), C (3), O (2)
Cluster 12	25 kW	2, 2	118	2009 - 2010	B (2)
Meerwind	25 kW	3, 5	181	2010 - 2014	B (2), C (3)
Nordsee Ost	25 kW	3, 4	211	2010, 2012 - 2014	B (1), C (3)
Wikinger	25 kW	2, 3	154	2014 - 2016	B (2), C (1)
SUMME		41, 48	4705	2008 - 2016	B (16), C (19), O (16)

3.2.2 Datenanalyse

Auf den Screenshots wurden Vogelsignale auf Basis der typischen Nachleucht-Signatur identifiziert und die Koordinaten der Signale (horizontale, vertikale und absolute Distanz vom Radar) digitalisiert. Die Detektionswahrscheinlichkeit eines Vogels hängt wesentlich von seiner Entfernung zum Radargerät ab. Wir verwendeten einen „distance-sampling“-Ansatz, um für die distanzabhängige Erfassungswahrscheinlichkeit zu korrigieren (HÜPPOP et al. 2006; WELCKER et al. 2017). Dafür wurden alle Signale im Höhenbereich zwischen 50-150 m ausgewählt (Abb. 3-5) und auf deren Basis nach BUCKLAND et al. (2001) eine Detektionsfunktion angepasst (Abb. 3-6). Eine solche Distanzkorrektur wurde für alle eingesetzten Radargeräte und unterschiedlichen Zeiträume durchgeführt.

Auf Grundlage der distanzkorrigierten Signale wurden stündliche Zugintensitäten [Migration Traffic Rate – MTR, Signale * km⁻¹ * h⁻¹] für alle Standorte berechnet. Die Zugintensität wurde dabei für den gesamten erfassten Höhenbereich (bis 1.000 m), für den Höhenbereich bis 200 m und für den Höhenbereich der Rotoren der einzelnen Windparks berechnet. Die stündlichen Zugintensitäten wurden zu nächtlichen Zugintensitäten zusammengefasst, sofern mindestens 75 % der Nachtdauer abgedeckt waren.

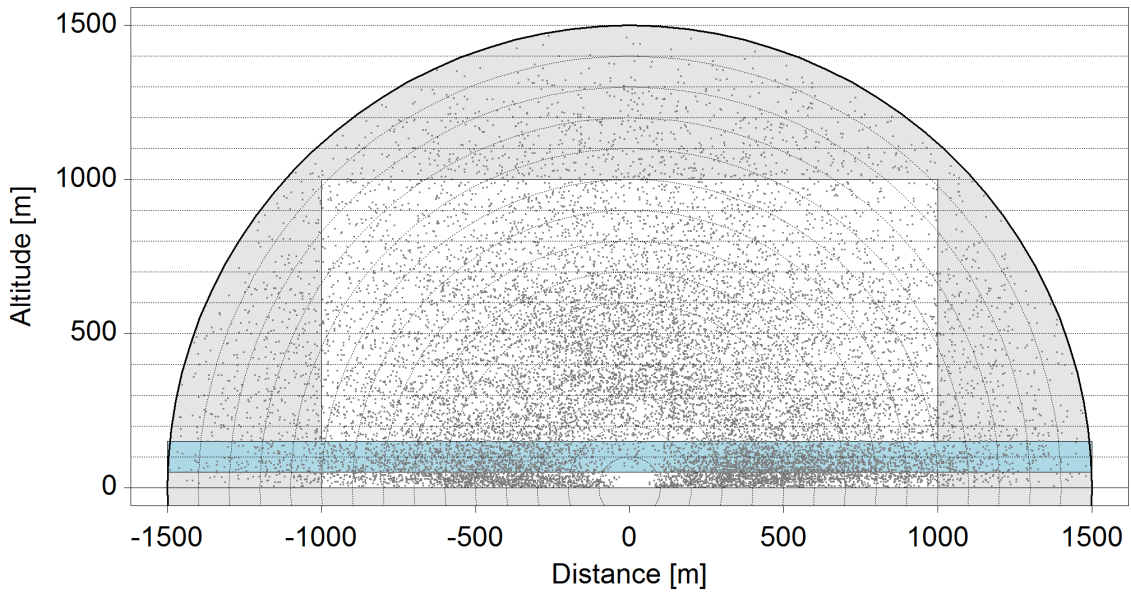


Abb. 3-5 Darstellung der Radar-Rohsignale eines Untersuchungsjahrs eines Radarstandorts. Der graue Halbkreis zeigt den Erfassungsraum von 1,5 km Radius, die Radarsignale in der weißen Fläche wurden für die Berechnung der Zugintensitäten verwendet. Die blaue Fläche stellt den Bereich der für die Distanzkorrektur verwendeten Signale dar.

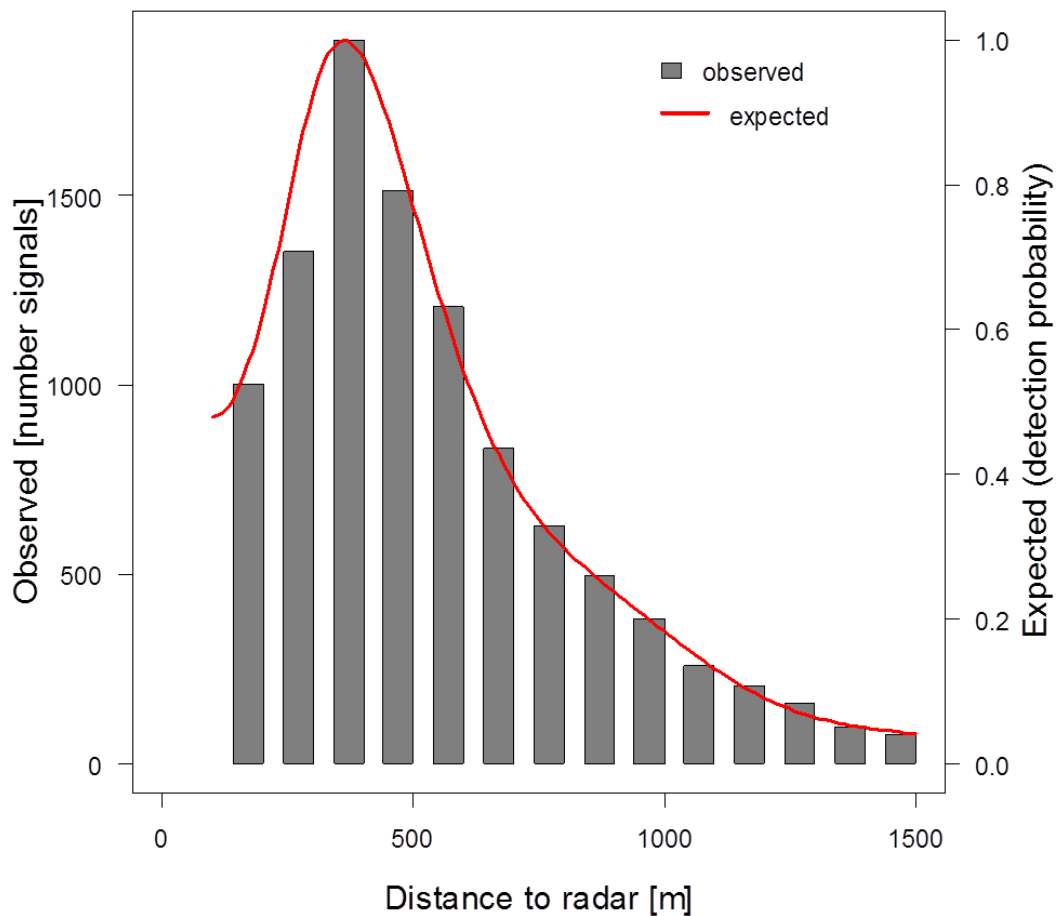


Abb. 3-6 Beispielhafte Darstellung einer Detektionsfunktion (rot), die an die Daten eines Radargeräts über zwei Untersuchungsjahre angepasst wurde.

Für die Analyse der zeitlichen und räumlichen Muster der Zugintensitäten und der Flughöhe sowie der Definition von Massenzug wurden die gleichen Auswertungsmethoden angewendet wie in Kap. 3.1.2 zur Auswertung der Zugrufe beschrieben (siehe auch Anhang A.2).

Auf Grundlage der berechneten Zugintensitäten wurde die Gesamtzahl der Flugbewegungen durch deutsche OWPs (OWPs, die sich im Jahr 2019 im Betrieb oder Bau befanden, siehe Tab. 3-3) auf dem Frühjahrs- und Herbstzug geschätzt. Dies wurde für die Höhenbereiche bis 1.000 m, bis 200 m und für die spezifische Rotorhöhe durchgeführt. Da nicht für alle Windparks Radardaten von vor Ort zur Verfügung standen, wurden jeweils die Daten der nächstgelegenen Radarstandorte verwendet (Tab. 3-3).

Für die Analyse der Wetterabhängigkeit der Zugintensität sowie der Flughöhe wurden meteorologische Parameter der NCEP Reanalysis 2-Datenbank der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) bezogen (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>). Die verwendeten Variablen waren Luftdruck auf Meereshöhe [mbar], die relative Luftfeuchtigkeit [%, bei 1.000 mbar], die Lufttemperatur [°C, in 2 m Höhe] sowie die Windstärke [m/s] und -richtung [°, auf 10 m Höhe].

Die Rückenwind- und Seitenwind-Komponenten (TWC und CWC) wurden wie in Kap. 3.1.2 beschrieben berechnet. Von allen Wettervariablen wurde zudem die Änderung während der letzten 24 h berechnet. Darüber hinaus wurde eine Akkumulations-Variable ermittelt, die die potenzielle Ansammlung von Zugvögeln in Stopover-Gebieten aufgrund von ungünstigen, die Vögel am Weiterzug hindernden Windverhältnissen repräsentieren soll. Diese Variable wurde nach ERNI et al. (2002) und VAN BELLE et al. (2007) berechnet.

Analog zur Analyse der Flugrufe wurden der Julianische Tag und der Zeitpunkt innerhalb der Nacht in die Analyse aufgenommen. Für die Zugintensitäten wurden generell zwei Sets von Modellen berechnet. Zum einen Modelle, die ausschließlich die Wetter- und Zeitvariablen enthielten, zum anderen Modelle mit den zusätzlichen Faktoren Untersuchungsjahr („year“), Standort („project“), datenerhebendes Büro („lab“) und der Ausbauphase des Windparks („phase“). Die Modellierungen wurden mit Hilfe von Random Forest-Regressionen vorgenommen (siehe auch Kap. 3.1.2). Als abhängige Variablen wurden die stündliche Zugintensität (wurzeltransformiert) sowie die mittlere Flughöhe verwendet.

Ähnliche Random Forest-Modelle wurden verwendet, um eine Vorhersage der Zugintensität im Höhenbereich bis 200 m zu ermöglichen. Die Vorhersagemodelle wurden hierbei auf Basis der mittleren Zugintensität pro Nacht konstruiert, da das Ziel war, eine Prognose für ganze zukünftige Nächte und nicht für einzelne Stunden zu erreichen. In diese Modelle wurden alle atmosphärischen sowie die Zeitvariablen integriert, zudem die geographische Länge und Breite, um die räumliche Variation zu berücksichtigen.

In einem weiteren Schritt wurde geprüft, inwieweit die Modelle Nächte korrekt voraussagten, in denen ein Schwellenwert von 250 MTR (im Höhenbereich bis 200 m) überschritten wurde. Dazu wurden Konfusionsmatrizen auf Basis der Modellergebnisse erstellt. Da die Modelle Nächte mit hohen Zugintensitäten häufig unterschätzten, wurde der für die Vorhersage angewendete Schwellenwert durch eine Minimierung von Cohen's Kappa (COHEN 1960) optimiert.

Da häufig vermutet wird, dass das Kollisionsrisiko von Nachtziehern in Situationen besonders hoch ist, in denen hohe Zugintensitäten und ungünstige Wetterverhältnisse zusammentreffen, wurde die

Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens anhand der vorliegenden Daten bestimmt. Zu diesem Zweck wurden drei unterschiedliche Stufen von „ungünstigen“ Wetterbedingungen sowie drei Stufen von „hoher“ Zugintensität definiert. Für jede paarweise Kombination der Stufen wurde dann der Anteil Stunden berechnet, in denen beide Bedingungen erfüllt waren. Diese Analyse wurde zuerst für den gesamten Datensatz aus schiffs- und plattformbasierten Erfassungen durchgeführt. Da schiffsgebundene Erfassungen jedoch nicht unabhängig von den Wetterbedingungen durchgeführt werden und daher eine Verzerrung der Datengrundlage nicht ausgeschlossen werden konnte, wurde die Auswertung ausschließlich für plattformbasierte Erfassungen wiederholt.

Zur Schätzung des Kollisionsrisikos von Nachtziehern und des kumulativen Vogelschlags an OWP in der deutschen AWZ verwendeten wir die erweiterte Version des SOSS Band-Modells (BAND 2012). Grundlage dafür bildeten die auf Basis der Radarerfassungen für alle OWPs berechneten nächtlichen Zugintensitäten sowie die monatliche Flughöhenverteilung im Höhenbereich bis 250 m (Abb. 3-7). Dabei wurden nur die Nachtstunden, d.h. die Zeit zwischen bürgerlicher Abend- und Morgendämmerung, berücksichtigt. Da nicht für alle Windparks Radardaten vorlagen, wurden jeweils die Daten der nächstgelegenen Radarstandorte verwendet (Tab. 3-3).

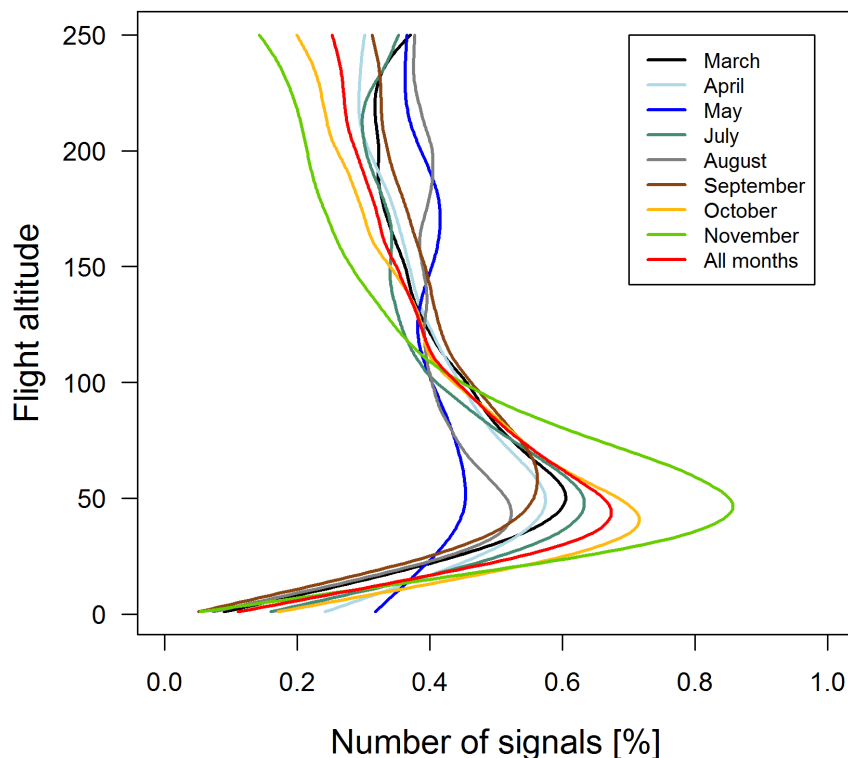


Abb. 3-7 *Monatliche Flughöhenverteilung des Nachtzugs auf Grundlage der Radardaten aller Erfassungsstandorte in der deutschen AWZ. Die Rohdaten wurden mit Hilfe einer kubischen Splinefunktion geglättet.*

Tab. 3-3 *Liste der Offshore-Windparks in der deutschen AWZ, die bei den Berechnungen der Flugbewegungen und Kollisionsopferzahlen berücksichtigt wurden. Zusätzlich ist angegeben, von welchen Standorten die Radardaten für diese Berechnungen verwendet wurden.*

FEP-Fläche	Windpark	Betriebszustand (2019)	Datengrundlage
N-2	alpha ventus	Betrieb	Albatros, Cluster Helgoland, Global Tech I, Meerwind Süd/Ost, Nordsee Ost
	Borkum Riffgrund 1	Betrieb	
	Borkum Riffgrund 2	Betrieb	
	Trianel Windpark Borkum I	Betrieb	
	Merkur	Bau	
	Trianel Windpark Borkum II	Bau	
N-3	Gode Wind 1 und 2	Betrieb	Albatros, Cluster Helgoland, Global Tech I, Meerwind Süd/Ost, Nordsee Ost
	Nordsee One	Betrieb	
N-4	Amrumbank West	Betrieb	Amrumbank West, Cluster Helgoland
	Nordsee Ost	Betrieb	Cluster Helgoland, Nordsee Ost
	Meerwind Süd/Ost	Betrieb	Cluster Helgoland, Meerwind Süd/Ost
N-5	Butendiek	Betrieb	Butendiek
	DanTysk	Betrieb	
	Sandbank	Betrieb	
N-6	BARD	Betrieb	Global Tech I
	Deutsche Bucht	Bau	
	Veja Mate	Betrieb	
N-8	Global Tech I	Betrieb	Global Tech I
	Hohe See	Bau	Global Tech I
	Albatros	Bau	Albatros
O-1	Arkona	Betrieb	Wikinger
	Wikinger	Betrieb	
O-3	Baltic 2	Betrieb	Baltic 2

Kollisionsmodelle wurden jeweils für jeden Windpark, jeden Monat der Zugsaison und für zwei verschiedene Artgruppen (Singvögel und Nicht-Singvögel) berechnet. Vogelbezogene Eingangsparameter wurden BRUDERER & BOLDT (2001), ALERSTAM et al.(2007) und den „Bird Facts“ des British Trust for Ornithology (BTO) (<https://www.bto.org/understanding-birds/birdfacts>) entnommen (Tab. 3-4). Hinsichtlich turbinenbezogener Eingangsparameter lagen nur teilweise windparkspezifische Werte vor. Angaben zur Turbinenanzahl, Gondelhöhe, Rotorradius und maximaler Rotorblattbreite

wurden vom BSH und Windparkbetreibern bereitgestellt. Angaben zur mittleren Rotationsgeschwindigkeit, dem mittleren Rotorblatt-Anstellwinkel und zu mittleren monatlichen Turbinenlaufzeiten lagen nur von wenigen Windparks vor. Es wurden daher die Mittelwerte der uns zugänglichen Daten für alle Windparks verwendet (Tab. 3-5).

Tab. 3-4 *Verwendete Werte vogelbezogener Eingangsparameter der Kollisionsmodelle.*

Artgruppe	Vogellänge [m]	Flügelspannweite [m]	Fluggeschwindigkeit [m/s]
Nicht-Singvögel	0,375	0,700	17,9
Singvögel	0,175	0,290	11,8

Tab. 3-5 *Turbinenbezogene Eingangsparameter der Kollisionsmodelle. Für Gondelhöhe, Rotorradius und maximale Rotorblattbreite ist die Spannweite der windparkspezifischen Werte angegeben, die in den Modellen verwendet wurden. Angaben zu Rotationsgeschwindigkeit, Anstellwinkel und monatlicher Betriebszeit beruhen auf Informationen einer geringen Anzahl von Windparks. Diese Werte wurden daher in allen Modellen verwendet.*

Gondelhöhe [Range, m]	Rotorradius [Range, m]	Max. Rotorblattbreite [Range, m]	Mittlere Rotationsgeschwindigkeit [rpm]	Mittlerer Anstellwinkel [°]	Mittlere Monatliche Betriebszeit
78 - 110	58 - 82	4,2 - 6	10,3	7	92,5%

Die Kollisionsmodelle wurden für jeweils drei verschiedene Meidungsraten berechnet (0,956; 0,980; 0,990). Zur Abschätzung des Anteils des Vogelschlags in Stunden mit hohem Zugaufkommen, wurden zusätzlich Kollisionsmodelle berechnet für die Zeitabschnitte, in welchen die Zugintensität 100, 250, 500 und 750 MTR überschritt.

Um den potenziellen Einfluss der verschiedenen Annahmen einzuschätzen, die hinsichtlich der verschiedenen Eingangsparameter gemacht werden mussten, führten wir zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse durch. Hierbei wurde der Einfluss der Parameter mittlere Rotationsgeschwindigkeit, mittlerer Anstellwinkel, Fluggeschwindigkeit der Vögel, Flügelspannweite, Vogellänge, Flughöhenverteilung, Anteil der Gegenwind-Flüge sowie der Meiderate geprüft.

Für eine detaillierte Beschreibung der Methoden der Radarerfassungen und -auswertungen sowie der Kollisionsmodelle sei nochmals auf die Ergebnisberichte WELCKER (2019) und WELCKER & VILELA (2019) verwiesen.

4 ERGEBNISSE

4.1 Beschreibung des nächtlichen Vogelzugs in der deutschen AWZ

4.1.1 Zeitliche Muster

Nach den Ergebnissen der Radaruntersuchungen zeigte der nächtliche Vogelzug sowohl im Frühjahr als auch im Herbst ein systematisches zeitliches Muster (Abb. 4-1). Im Frühjahr traten die höchsten Zugintensitäten im Zeitraum zwischen Ende März und Mitte April, im Herbst zwischen Ende September und Anfang November auf. Im Herbst unterschied sich dabei der zeitliche Verlauf zwischen der Nord- und Ostsee (Abb. 4-2). Während an den Radarstandorten in der Nordsee die Zugaktivität bis in den September auf relativ niedrigem Niveau verblieb und im Oktober ein deutlicher Peak verzeichnet wurde, war in der Ostsee das Zugaufkommen im August und September am stärksten ausgeprägt (Abb. 4-2).

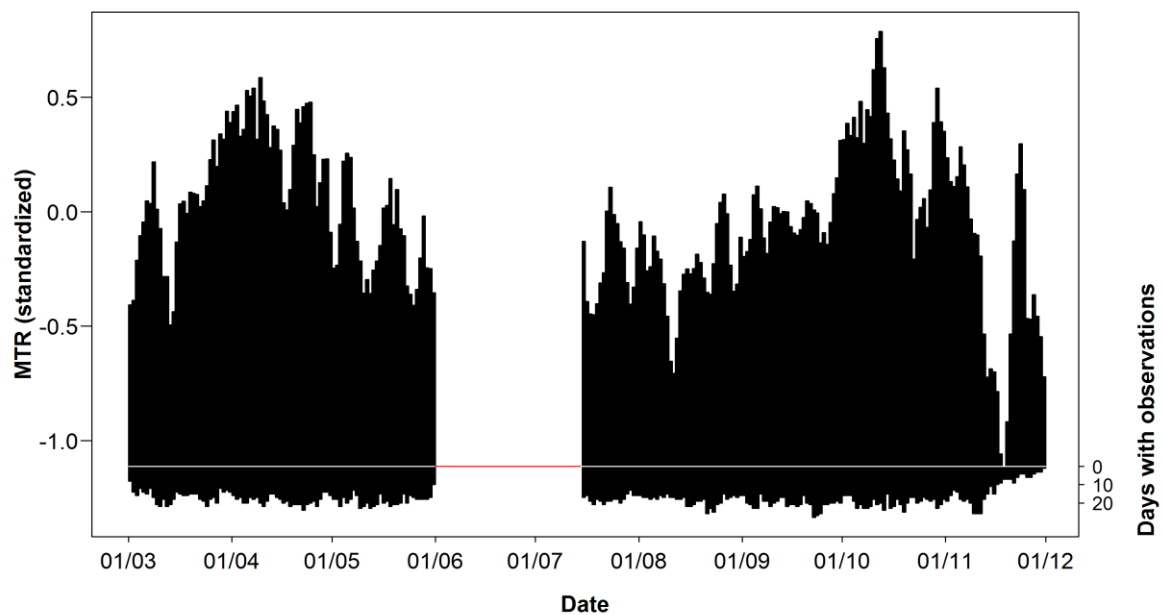


Abb. 4-1 Saisonales Muster der nächtlichen Zugintensität in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee. Die Zugintensitäten wurden standardisiert und als 3-tages gleitender Durchschnitt dargestellt.

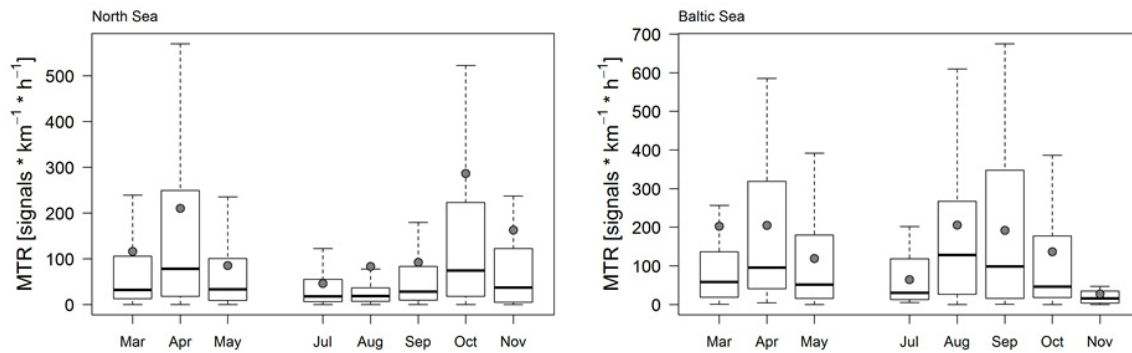


Abb. 4-2 Vergleich der monatlichen nächtlichen Zugintensität [MTR] zwischen der Nordsee (links) und der Ostsee (rechts). Boxplots zeigen den Median (schwarze Linie), die Box stellt den Interquartilsabstand dar und die Whisker repräsentieren die Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands.

Die Analyse der Zugrufe zeigte artspezifische Unterschiede der phänologischen Muster (Abb. 4-3). Die höchsten Rufintensitäten erreichten die verschiedenen Drosselarten sowie die übrigen Singvogelarten im Frühjahr zwischen Mitte März und Mitte April, im Herbst zwischen Anfang Oktober und Anfang November. Die Rufintensität des Flussuferläufers gipfelte Mitte Mai und Anfang August, beim Alpenstrandläufer war kein deutliches zeitliches Muster zu erkennen (Abb. 4-3).

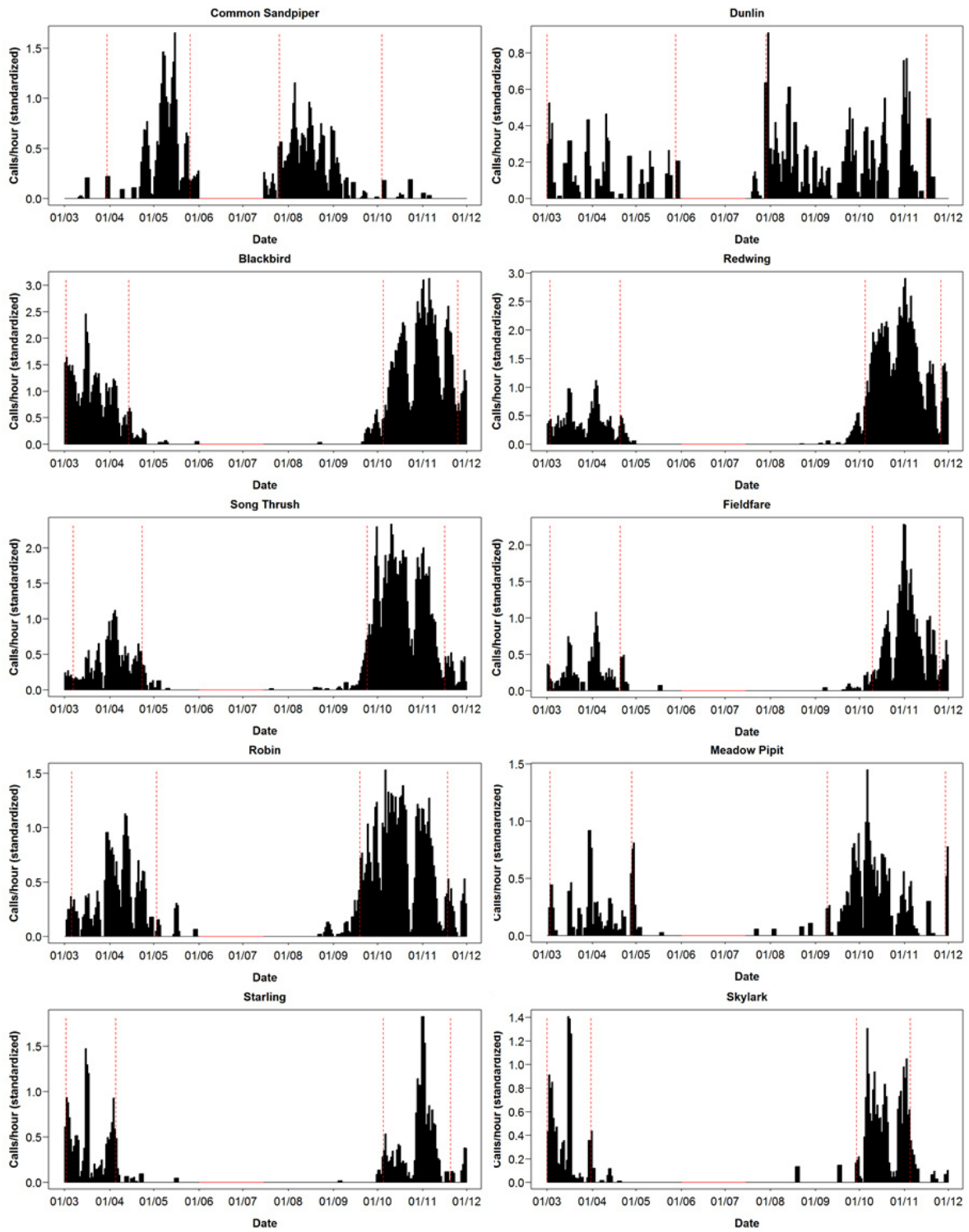


Abb. 4-3 Saisonale Muster der Rufintensitäten [Rufe/h] von zwei Limikolen-, vier Drossel- und 4 weiteren Singvogelarten in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee. Die Rufintensitäten wurden standardisiert und sind als 3-tages-gleitender Durchschnitt dargestellt. Zusätzlich werden die saisonale Hauptzugzeiten (begrenzt durch rote unterbrochene Linien) angezeigt.

Die Zugintensität zeigte zudem ein starkes tageszeitliches Muster. Generell nahm die Zugintensität in den ersten Stunden nach Sonnenuntergang stark zu und im Verlauf der zweiten Nachthälfte kontinuierlich ab (Abb. 4-4). Die Intensität des Tagzugs war im Vergleich zum Nachtzug insgesamt deutlich niedriger. Die höchsten Zugintensitäten wurden hier kurz nach Sonnenaufgang festgestellt.

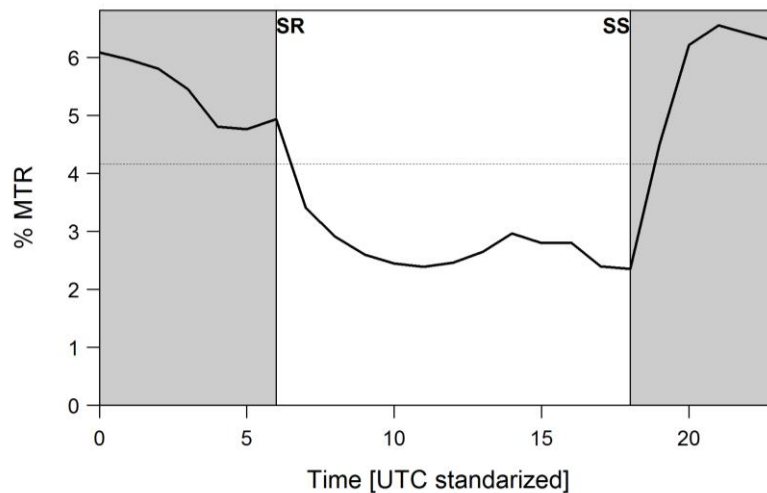


Abb. 4-4 Tageszeitlicher Verlauf der Zugintensität [%] in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee. Die Tageszeit wurde standardisiert, mit Sonnenaufgang um 06:00 und Sonnenuntergang um 18:00 unabhängig der Jahreszeit.

Das tageszeitliche Muster des Nachtzugs unterschied sich in Abhängigkeit der geographischen Lage innerhalb der AWZ (Abb. 4-5). So lag der Zughöhepunkt in der nördlichen Deutschen Bucht im Herbst 2-3 h früher als im Frühjahr, während in der südlichen Deutschen Bucht der umgekehrte Fall zu verzeichnen war. An den Standorten in der Ostsee hingegen war kein saisonaler Unterschied im tageszeitlichen Verlauf der Zugaktivität festzustellen.

Der Verlauf der Rufintensitäten der verschiedenen Arten innerhalb der Nacht wurde im Rahmen der Wettermodelle analysiert, deren Ergebnisse in Kap. 4.2.2 dargestellt sind.

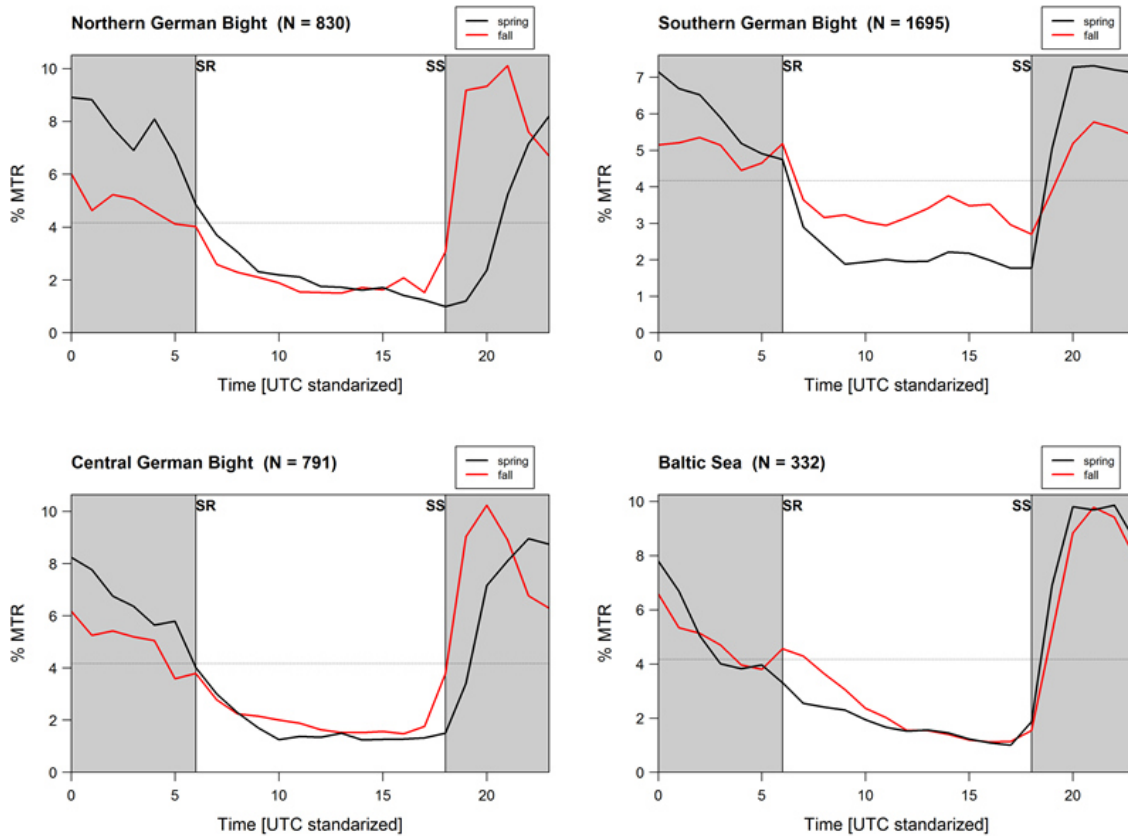


Abb. 4-5 Tageszeitlicher Verlauf der Zugintensität [%] im Frühjahr (rot) und Herbst (schwarz) in verschiedenen Bereichen der deutschen AWZ. Die Tageszeit wurde standardisiert, mit Sonnenaufgang um 06:00 und Sonnenuntergang um 18:00 unabhängig der Jahreszeit. N gibt die Anzahl der Tage an, auf der die jeweilige Abbildung basiert.

4.1.2 Räumliche Muster

Räumliche Korrelation der Zugintensitäten

Die räumliche Korrelation der nächtlichen Zugintensitäten innerhalb der deutschen AWZ war mit einem mittleren Korrelationskoeffizienten von $0,48 \pm 0,02$ SE (N = 199 paarweise Korrelationen) insgesamt relativ hoch (Tab. 4-1). Innerhalb der Nordsee war die Stärke der Korrelation dabei deutlich höher als zwischen Nord- und Ostsee (Tab. 4-1). Eine Auswertung innerhalb der Ostsee war aufgrund zu geringer Stichprobengröße nicht möglich. Die Korrelation der Zugintensität nahm dabei im Herbst mit zunehmender Entfernung zwischen den Erfassungsstandorten leicht ab, im Frühjahr war ein solcher Zusammenhang nicht festzustellen (Abb. 4-6).

Tab. 4-1 Mittlere Korrelationskoeffizienten (Spearman's Rangkorrelationskoeffizient rho) für Korrelationen der nächtlichen Zug- bzw. Rufintensität zwischen Standorten in der Nordsee und zwischen Standorten in der Nord- und Ostsee. Fett gedruckte Werte kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede nach nicht-parametrischen Wilcoxon-Rangsummentests.

Art	Saison	Mittelwert rho Nordsee	N Nordsee	Mittelwert rho Ost-/Nordsee	N Ostsee
Zugintensitäten					
MTR, 1.000 m Höhenbereich	Frühjahr	0,61	59	0,21	25
	Herbst	0,54	72	0,31	43
	insgesamt	0,57	131	0,27	68
MTR, 200 m Höhenbereich	Frühjahr	0,48	59	0,21	25
	Herbst	0,51	72	0,24	43
	insgesamt	0,50	131	0,23	68
Flugrufe					
Limikolen	Frühjahr	0,29	15	0,79	1
	Herbst	0,30	25	0,05	3
Flussuferläufer	Frühjahr	0,27	11	0,79	1
	Herbst	0,33	15	0,13	2
Alpenstrandläufer	Frühjahr	0,35	4	-	0
	Herbst	0,22	10	-0,09	1
Drosseln	Frühjahr	0,44	44	0,50	2
	Herbst	0,61	90	0,19	29
Amsel	Frühjahr	0,51	12	-	0
	Herbst	0,65	25	0,18	7
Rotdrossel	Frühjahr	0,37	16	0,50	2
	Herbst	0,65	25	0,15	8
Singdrossel	Frühjahr	0,45	10	-	0
	Herbst	0,57	25	0,04	8
Wacholderdrossel	Frühjahr	0,53	6	-	0
	Herbst	0,57	15	0,44	6
Übrige Singvögel	Frühjahr	0,38	28	0,64	1
	Herbst	0,44	61	0,05	15
Wiesenpieper	Frühjahr	-0,13	1	-	0
	Herbst	0,22	16	0,07	3
Feldlerche	Frühjahr	0,64	4	-	0
	Herbst	0,70	9	-	0
Rotkehlchen	Frühjahr	0,35	16	0,64	1
	Herbst	0,49	23	0,17	9
Star	Frühjahr	0,39	7	-	0
	Herbst	0,46	13	-0,30	3
Alle Arten	insgesamt	0,47	263	0,17	51
	Frühjahr	0,40	87	0,61	4
	Herbst	0,51	176	0,14	47

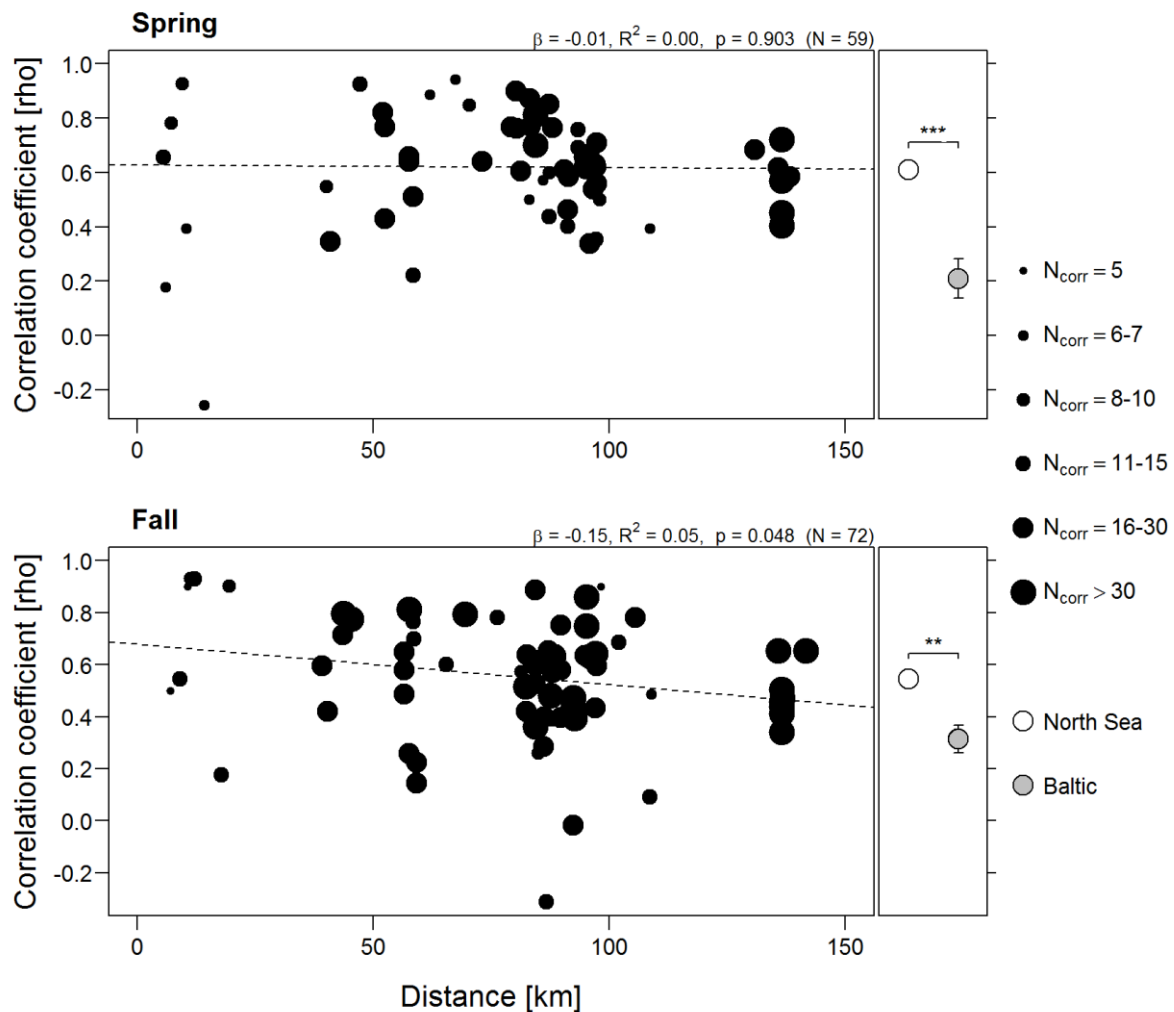


Abb. 4-6 Zusammenhang zwischen der Korrelation der nächtlichen Vogelzugintensität zweier Standorte (Spearman's Rangkorrelationskoeffizient rho) und der Entfernung dieser Standorte für die Frühjahrs- (oben) und Herbstsaison (unten). Die Korrelationskoeffizienten wurden auf Grundlage von Nächten mit gleichzeitigen Erfassungen für jedes Projekt und Jahr berechnet. Die Anzahl der Nächte pro Vergleichspaar wird durch die Symbolgröße angezeigt (Minimum: 5 Nächte). Linke Abbildung: Lineare Regression für die Daten aus der Nordsee; rechte Abbildung: mittlerer Korrelationskoeffizient $[\pm SE]$ für Nordsee-Standorte (offene Symbole) im Vergleich zum mittleren Korrelationskoeffizient zwischen Nord- und Ostsee (gefüllte Symbole).

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Zugintensität an zwei Standorten gleichzeitig den gewählten Schwellenwert von 250 MTR (Starkzugeignis) überschritt war im Herbst von der Entfernung zwischen den Standorten abhängig (Abb. 4-7). Während die Wahrscheinlichkeit im Nahbereich (Abstand von wenigen Kilometern) bei etwa 0,8 lag, sank sie bei einem Abstand von 100 km auf etwa 0,2. Im Frühjahr lag die Wahrscheinlichkeit des zeitgleichen Überschreitens des Schwellenwerts niedriger und zeigte keinen statistisch signifikanten Zusammenhang mit der Entfernung zwischen den Standorten (Abb. 4-7).

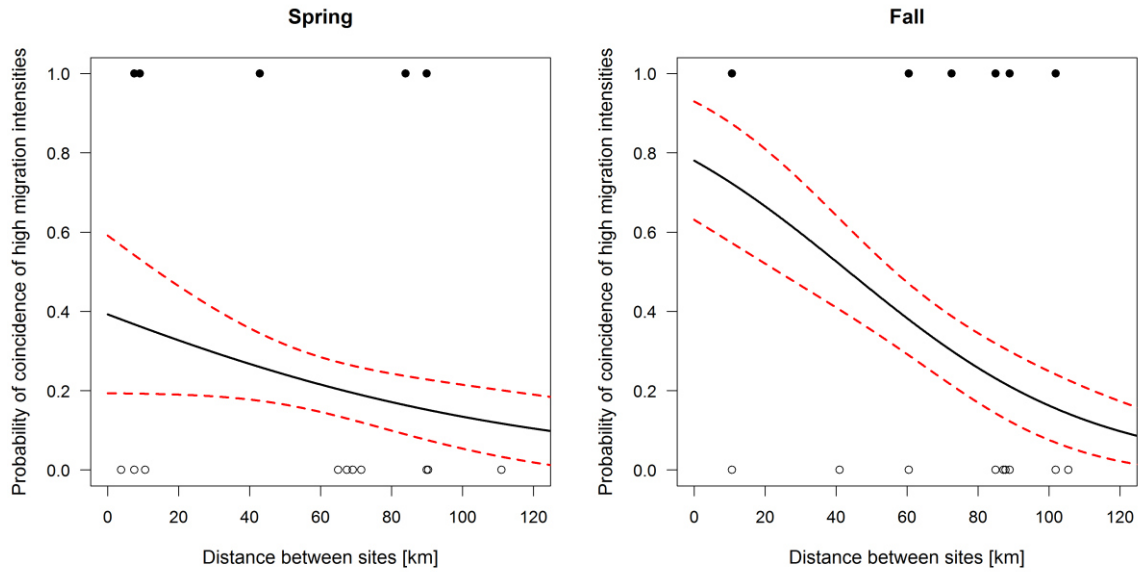


Abb. 4-7 Wahrscheinlichkeit $[\pm SE]$ des gleichzeitigen Auftretens eines Starkzugeignisses ($MTR > 250$) an zwei Standorten in der Nordsee in Abhängigkeit der Entfernung der Standorte zueinander für Frühjahr (rechts) und Herbst (links). Die dargestellte Wahrscheinlichkeit beruht auf einem binomialen generalisierten linearen Modell.

Die räumliche Korrelation der nächtlichen Zugrufraten war mit einem über alle Arten und Standorte gemittelten Korrelationskoeffizienten ρ von $0,42 \pm 0,02$ SE ($N = 314$) ebenfalls relativ hoch (Tab. 4-1). Die Stärke der Korrelation variierte jedoch stark zwischen den einzelnen Arten, den Zugsaisons und den Regionen (Tab. 4-1). Bei den untersuchten Limikolen- und Drosselarten war zudem eine teils deutliche Abnahme der Korrelation mit der Entfernung zwischen den Standorten festzustellen (Abb. 4-8).

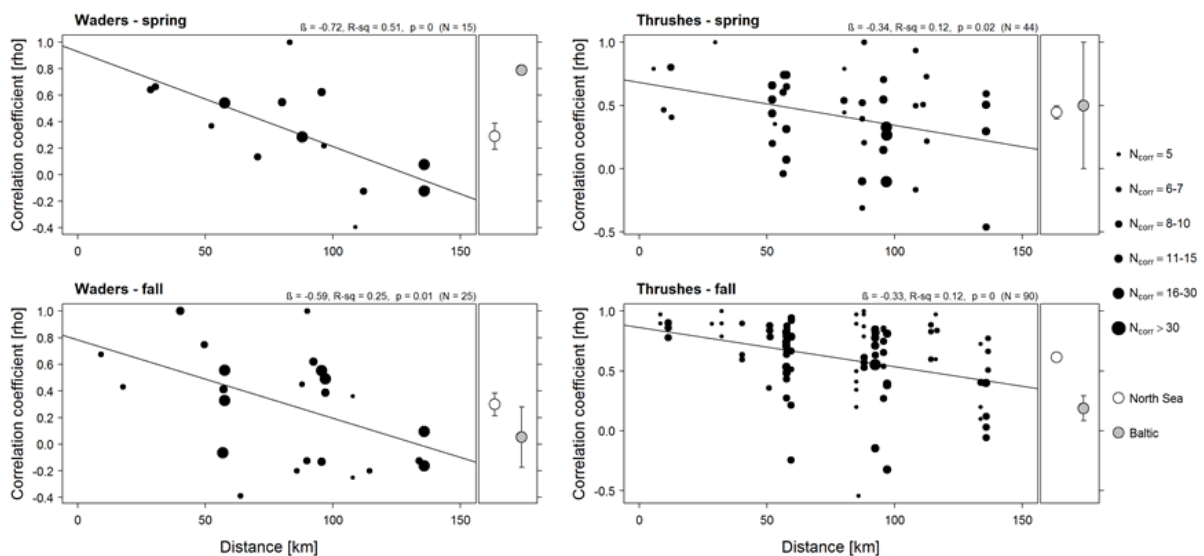


Abb. 4-8 Zusammenhang zwischen der Korrelation der nächtlichen Zugrufrate zweier Standorte (Spearman's Rangkorrelationskoeffizient ρ) und der Entfernung dieser Standorte für Frühjahrs- und Herbstzug von Limikolen (links) und Drosseln (rechts). Weitere Details siehe Abb. 4-6.

Räumliche Gradienten in der deutschen AWZ

Hinsichtlich eines systematischen Unterschieds der nächtlichen Zugintensität zwischen der AWZ der Nord- und Ostsee zeigten die Daten unterschiedliche Ergebnisse. Insgesamt lag die Zugintensität in Nächten gleichzeitiger Erfassung in beiden Regionen in der Ostsee etwa 10 % höher als in der Nordsee (Abb. 4-9; gepaarter Wilcoxon Test: $p = 0,013$, $N = 280$). Eine monatliche Betrachtung zeigte jedoch, dass – vermutlich aufgrund der Unterschiede im saisonalen Muster – dieser Unterschied im Jahresverlauf nicht konstant war (Tab. 4-2). So war die mittlere Zugintensität im März, Oktober und November in der Nordsee höher als in der Ostsee.

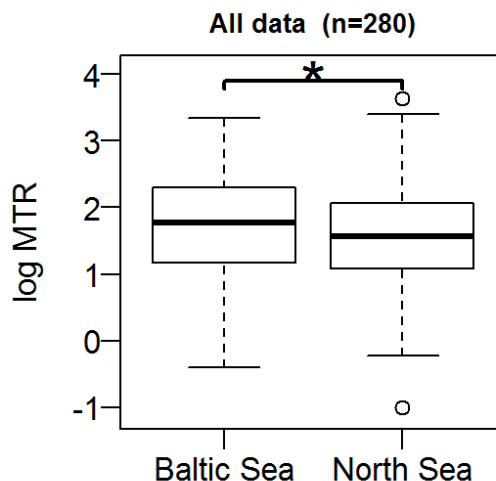


Abb. 4-9 Vergleich der Zugintensität [MTR, log-transformiert] in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee in Nächten gleichzeitiger Erfassung. Boxplots zeigen den Median (schwarze Linie), die Box stellt den Interquartilsabstand dar und die Whisker repräsentieren die Werte innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands. Offene Punktsymbole kennzeichnen Werte außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands. Zusätzlich ist das Ergebnis eines gepaarten Wilcoxon Rangsummentests angezeigt (** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; - $p > 0,05$).

Tab. 4-2 Monatliche Differenz der nächtlichen mittleren Zugintensität [MTR, log-transformiert] zwischen Standorten in der Ost- und Nordsee in Nächten gleichzeitiger Erfassung. Negative Werte zeigen höhere Zugintensitäten in der Nordsee. Die Stichprobengröße sowie die Ergebnisse von Wilcoxon-Rangsummentests werden angegeben.

Monat	N Nächte	$\delta \log MTR$ zwischen Ost- und Nordsee	p Wilcoxon Test
März	31	-0,35	0,004
April	51	0,43	0,014
Mai	27	0,38	0,016
Juli	17	0,39	0,174
August	30	0,49	0,003
September	54	0,50	<0,001
Oktober	35	-0,35	0,014
November	30	-0,28	0,032

Die nächtliche Flugrufrate lag in der Regel an den Standorten der Ostsee höher als in der Nordsee (Abb. 4-10). Ausnahme waren hierbei die Limikolen. Bei den Drosseln (31 %) und den übrigen Singvogelarten (71 %) lag die Rufrate in der Ostsee signifikant höher. Dies war sowohl im Frühjahr als auch im Herbst der Fall.

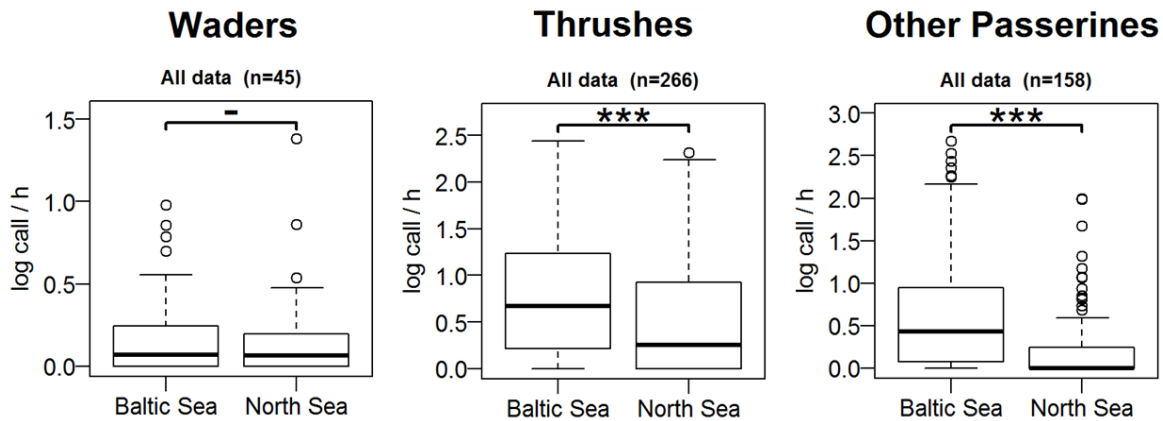


Abb. 4-10 Vergleich der Rufintensität [Rufe/h, log-transformiert] in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee in Nächten gleichzeitiger Erfassung für Limikolen (links), Drosseln (Mitte) und die übrigen Singvogelarten (rechts). Details siehe Abb. 4-9.

Innerhalb der Nordsee wiesen die Radardaten auf einen Gradienten der nächtlichen Zugintensität mit Distanz zur Küste hin. So lag die Zugintensität bei paarweisem Vergleich gleichzeitiger Erfassungen am Standort näher der Küste im Mittel signifikant höher als am weiter entfernten Standort (Abb. 4-11). Zudem zeigte sich ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Differenz der Zugintensität und der Differenz der Entfernung zur Küste für Nächte gleichzeitiger Erfassungen (Abb. 4-12). Dies war während der Frühjahrs- und Herbstsaison der Fall.

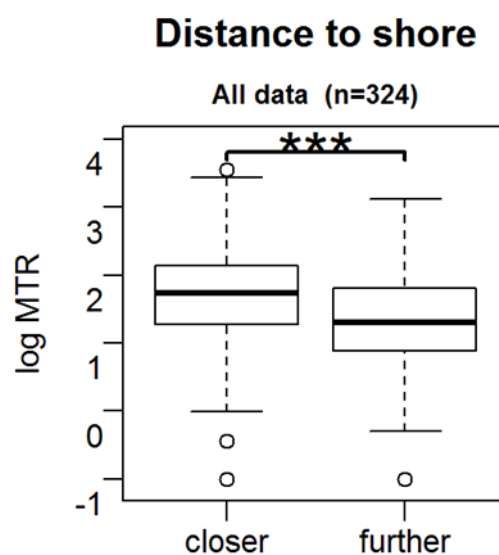


Abb. 4-11 Vergleich der Zugintensität [MTR, log-transformiert] an Standorten in der Nordsee mit unterschiedlicher Distanz zur Küste. Es wurden nur Nächte mit gleichzeitiger Erfassung an zwei Standorten einbezogen. Details siehe Abb. 4-9.

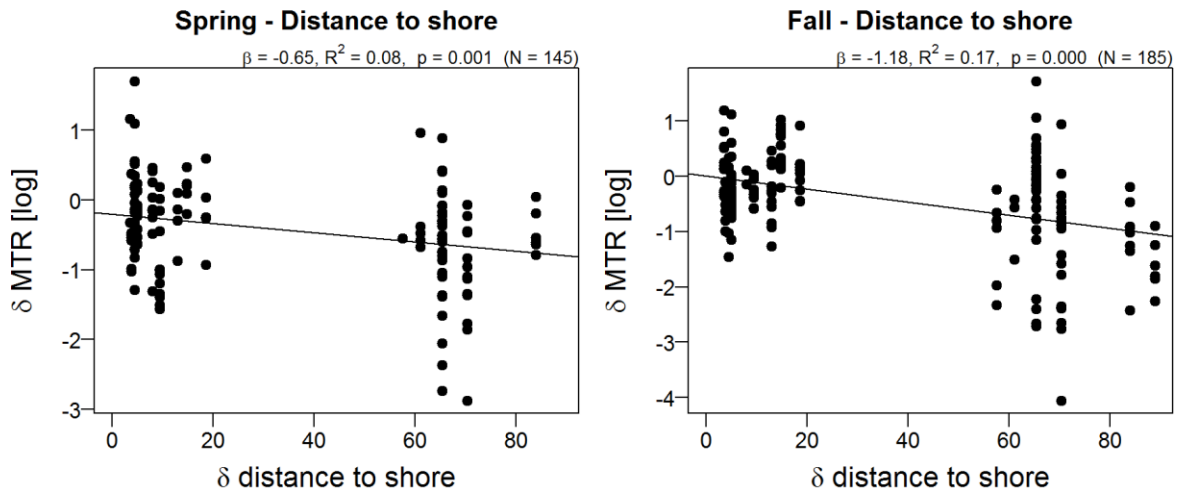


Abb. 4-12 Differenz der Zugintensität zwischen zwei Standorten in der Nordsee in Abhängigkeit zu deren Differenz der Entfernung zur Küste für die Frühjahrs- (links) und Herbstsaison (rechts).

Die Rufintensitäten zeigten nur teilweise ein ähnliches Muster. Während des Herbstzugs nahmen die Rufintensitäten bei allen untersuchten Artgruppen mit zunehmender Entfernung zur Küste signifikant ab (Abb. 4-13). Auf dem Frühjahrszug war dies jedoch nur bei den übrigen Singvogelarten der Fall. Bei den Drosseln deuteten die Ergebnisse hingegen auf eine Zunahme der Rufintensitäten mit der Entfernung zur Küste hin; bei den Limikolen konnte während des Frühjahrszugs kein Zusammenhang zwischen Rufrate und Distanz zur Küste festgestellt werden.

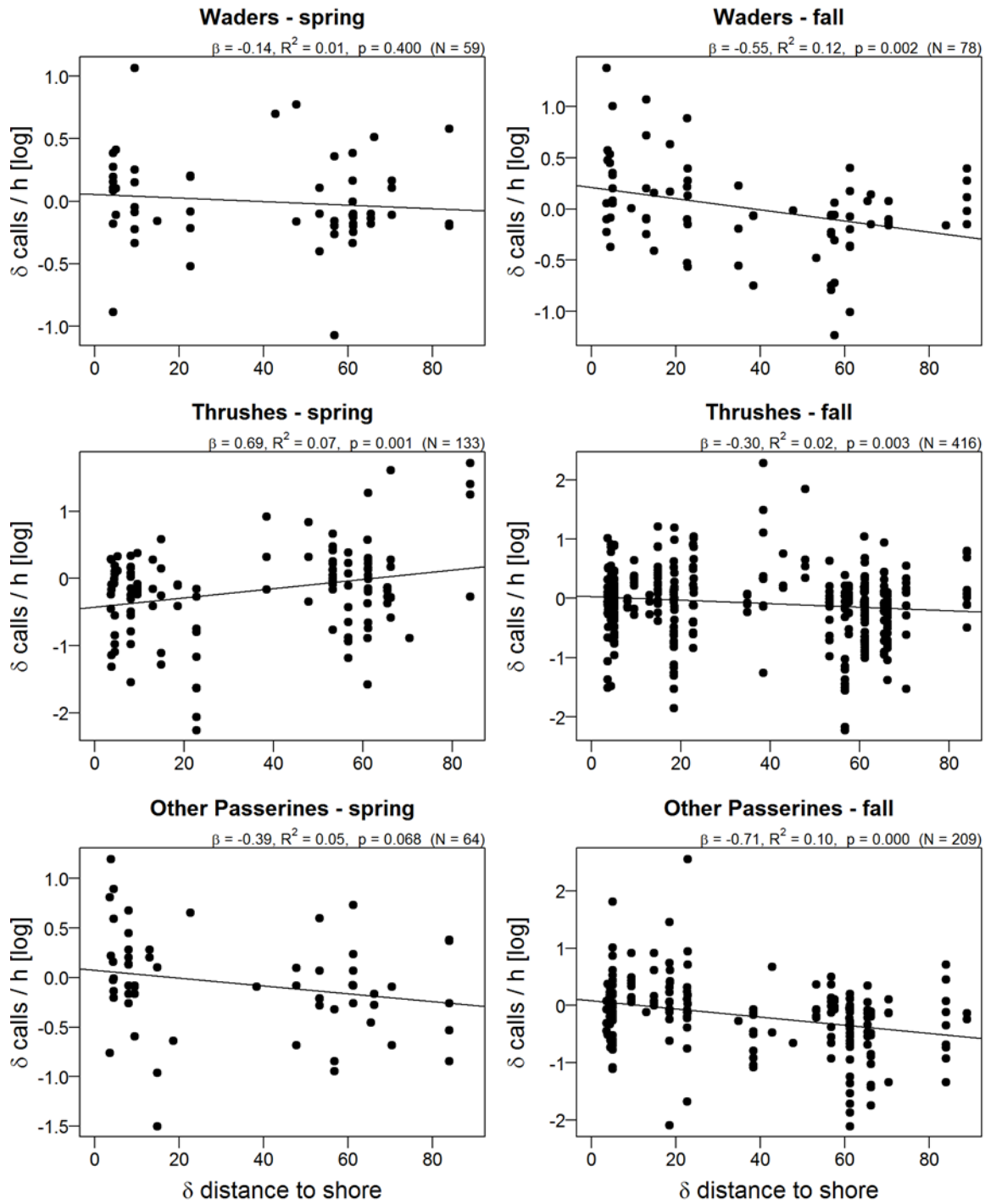


Abb. 4-13 Differenz der Rufintensität zwischen zwei Standorten in der Nordsee in Abhängigkeit zu deren Differenz der Entfernung zur Küste für die Frühjahrs- (links) und Herbstsaison (rechts) und für drei verschiedenen Artgruppen (oben: Limikolen, Mitte: Drosseln, unten: übrige Singvogelarten).

4.1.3 Zughöhe

Die Flughöhen des Nachtzugs wurden per Radar bis in 1.000 m Höhe erfasst. Dabei wurden die höchsten Anteile in den unteren Höhenschichten festgestellt (Abb. 4-14). Im Bereich unter 200 m Höhe wurden etwa ein Drittel der Signale registriert, unterhalb von 500 m belief sich der Anteil auf etwa 60 % (Tab. 4-3).

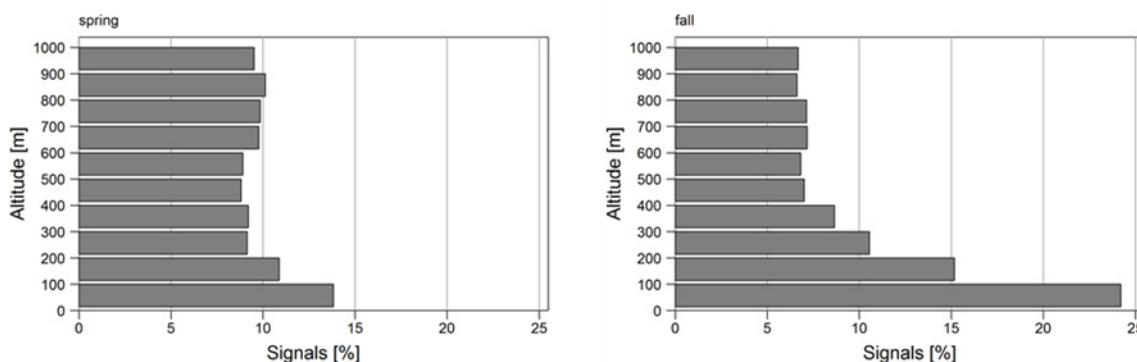


Abb. 4-14 Prozentuale Flughöhenverteilung des Nachtzugs bis 1.000 m Höhe nach Radarerfassungen in der AWZ der Nord- und Ostsee im Frühjahr (links) und Herbst (rechts).

Tab. 4-3 Anteile der Radarsignale unterhalb von 200 m bzw. 500 m Höhe nach Radarerfassungen in der AWZ der Nord- und Ostsee im Frühjahr und Herbst.

	Frühjahr		Herbst		Insgesamt	
	< 200 m	< 500 m	< 200 m	< 500 m	< 200 m	< 500 m
Nordsee	23,4	50,7	40,7	66,1	34,7	60,8
Ostsee	31,8	58,0	31,2	62,3	31,4	60,7
Insgesamt	24,7	51,9	39,4	65,6	34,2	60,8

Systematische Unterschiede der Flughöhe traten zwischen der Frühjahrs- und Herbstzugsaison sowie zwischen Nord- und Ostsee auf (Tab. 4-3 und Abb. 4-15). An den Standorten in der Nordsee war die mittlere Flughöhe während des Frühjahrszugs signifikant höher (>100 m) als während des Herbstzugs. Die vorliegenden Daten aus der Ostsee zeigten hingegen keinen Unterschied zwischen den Saisons in dieser Region (Abb. 4-15). Ein Gradient der Flughöhe mit der Entfernung zur Küste in der Nordsee konnte auf dem Frühjahrszug nicht festgestellt werden. Während des Herbstzugs zeigte sich eine leichte Abnahme der Flughöhe mit zunehmender Distanz zur Küste (siehe Anhang A.2).

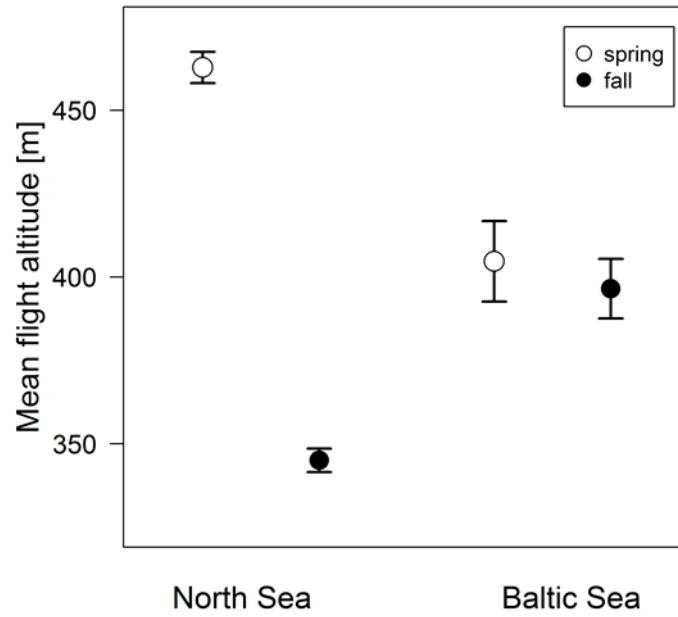


Abb. 4-15 Vergleich der mittleren Flughöhe [\pm SE] zwischen Standorten in der Nord- und Ostsee und zwischen Frühjahr und Herbst.

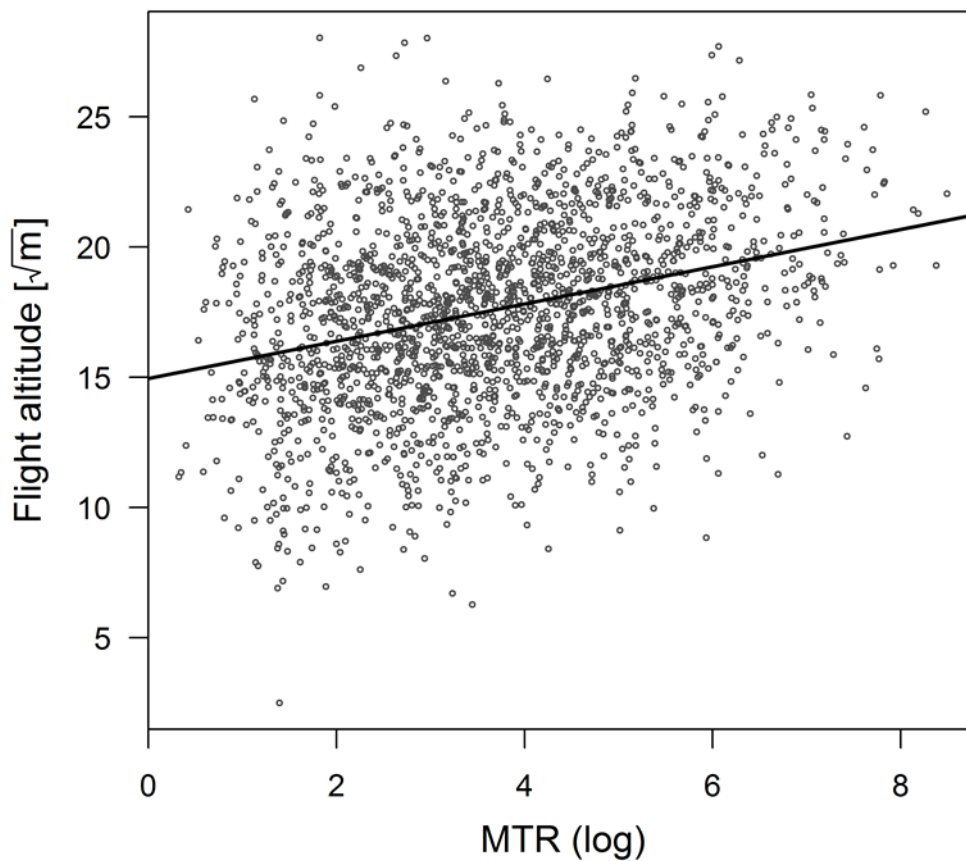


Abb. 4-16 Abhängigkeit der Flughöhe [m, wurzeltransformiert] von der Zugintensität [MTR, log-transformiert].

Weiterhin zeigten die Daten einen deutlichen positiven Zusammenhang zwischen der mittleren Flughöhe und der Zugintensität (Abb. 4-16). Die Flughöhe nahm mit der Zugintensität signifikant zu. Dieser Effekt war im Frühjahr stärker ausgeprägt als im Herbst (Anhang A.2). Darüber hinaus nahm die mittlere Flughöhe im Verlauf der Nacht kontinuierlich ab (Abb. 4-17). So lag die Flughöhe im letzten Viertel der Nacht im Mittel etwa 75 m niedriger als zu Beginn der Nacht.

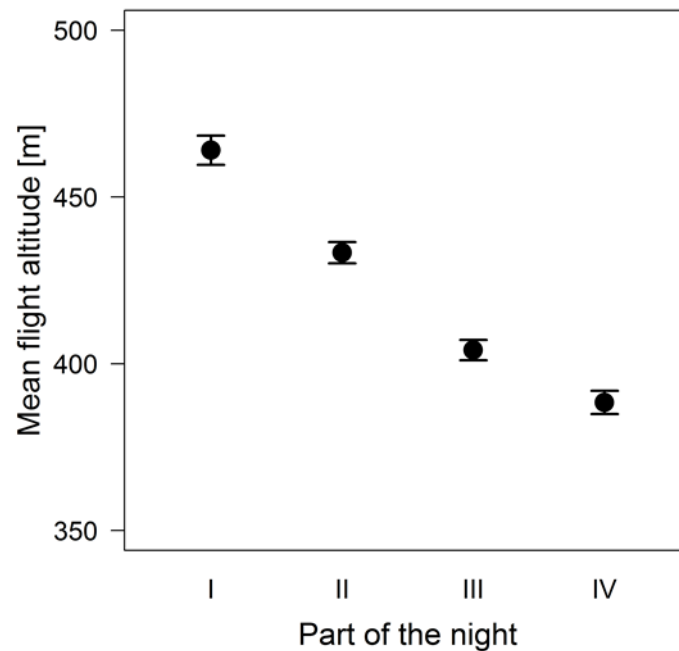


Abb. 4-17 Mittlere Flughöhe [$m \pm SE$] im Verlauf der Nacht.

4.1.4 Gesamtzahl Flugbewegungen in OWPs

Die jährliche Anzahl Flugbewegungen (Radarsignale) in den derzeitigen deutschen OWPs (siehe Tab. 3-3) während der Zugperioden wurde auf etwa 98 Millionen im Höhenbereich bis 1.000 m geschätzt (Tab. 4-4). Im Höhenbereich bis 200 m wurde die Anzahl auf 34 Millionen, in Rotorhöhe auf etwa 24 Millionen geschätzt. Die Anzahl Flugbewegungen lag dabei in der Nacht höher als am Tag und im Herbst höher als im Frühjahr (Tab. 4-4). Aufgrund der hohen zeitlichen Variabilität der Zugintensitäten war der jeweilige Unsicherheitsbereich (CI) der Schätzungen groß.

Tab. 4-4 Anzahl der geschätzten Radarsignale [$\pm 95\%$ CI] in Offshore-Windparks in der deutschen AWZ im Frühjahr (01.03. – 31.05.) und Herbst (15.07. – 30.11.) im Höhenbereich bis 1.000 m, bis 200 m und auf Rotorhöhe.

Saison	Tag/ Nacht	Anzahl Signale 0 – 1.000 m [$\pm 95\%$ CI]	Anzahl Signale 0 - 200 m [$\pm 95\%$ CI]	Anzahl Signale Rotorhöhe [$\pm 95\%$ CI]
Frühjahr	Tag	20.646.347 [9.232.496 – 52.330.990]	5.644.512 [3.967.058 – 7.965.277]	3.821.754 [2.692.345 – 5.539.734]
	Nacht	23.565.445 [14.551.191 – 35.104.276]	5.642.674 [3.875.095 – 7.715.610]	4.167.725 [2.835.123 – 5.761.216]
	Insgesamt	44.211.792 [23.783.688 – 87.435.266]	11.287.187 [7.842.153 – 15.680.886]	7.989.479 [5.527.468 – 11.300.950]
Herbst	Tag	18.153.255 [13.617.692 – 23.637.509]	7.601.567 [5.864.082 – 9.765.790]	5.330.372 [4.103.307 – 6.864.830]
	Nacht	35.431.012 [22.516.695 – 51.668.773]	14.780.264 [9.357.216 – 21.538.625]	10.960.915 [6.893.278 – 16.148.536]
	Insgesamt	53.584.267 [36.134.387 – 75.306.281]	22.381.830 [15.221.298 – 31.304.415]	16.291.287 [10.996.585 – 23.013.366]
Insgesamt	Tag und Nacht	97.796.059 [59.918.074 – 162.741.547]	33.669.017 [23.063.451 – 46.985.301]	24.280.766 [16.524.053 – 34.314.316]

4.2 Modellierung des nächtlichen Vogelzugs anhand von Wetterdaten

Insgesamt erklärten die Random Forest-Modelle einen hohen Prozentsatz der Varianz der Zugintensitäten. Modelle, die ausschließlich Wetter- und Zeitparameter enthielten, erklärten 73% (Frühjahr) bzw. 74% (Herbst) der Varianz. Bei Modellen mit den zusätzlichen faktoriellen Parametern „Untersuchungsjahr“, „Standort“, „Phase“ und „Lab“ betrug der Anteil bis zu etwa 80 % (Tab. 4-5). Die Variabilität der Zugintensität im Höhenbereich bis 200 m wurde durch die RF-Modelle geringfügig weniger gut erklärt. Dies galt insbesondere auch für Modelle zur mittleren Flughöhe, deren Varianz zu etwa 47 % bis 62 % erklärt wurde (Tab. 4-5, siehe auch Anhang A.3).

Hinsichtlich der nächtlichen Rufintensität variierte das Verhalten der Modelle stark zwischen den einzelnen Arten und den Zugsaisons. Während die Modelle zu den Drosseln sowie zum Rotkehlchen mit bis über 60 % einen Großteil der Varianz erklären konnten, war dies bei den Limikolen und den übrigen Singvogelarten mit teilweise einstelligen Anteilen nicht der Fall (Tab. 4-5). Insgesamt war die Modell-Performance für den Herbstzug höher als für den Frühjahrszug.

Tab. 4-5 Übersicht über die Random Forest-Modelle (volle Modelle) zu Zugintensitäten und Flugrufen. Angegeben ist das N (Stunden) sowie der Prozentsatz erklärter Varianz.

Response-Variable		Frühjahr		Herbst	
Zugintensität		N Stunden	% Var erklärt	N Stunden	% Var erklärt
MTR, 1.000 m Höhenbereich		5.990	79,3	10.644	80,5
MTR, 200 m Höhenbereich		5.990	73,2	10.644	78,9
Flughöhe		2.263	61,7	3.721	51,2
Flugrufe		N Stunden	% Var erklärt	N Stunden	% Var erklärt
Limikolen	Flussuferläufer	2.821	1,2	3.863	14,7
	Alpenstrandläufer	4.523	6,2	7.419	7,0
Drosseln	Amsel	2.296	60,2	4.067	65,3
	Rotdrossel	2.632	57,3	4.075	64,4
	Singdrossel	2.540	47,3	4.140	64,4
	Wacholderdrossel	2.629	30,9	3.654	57,2
Übrige Singvögel	Wiesenpieper	3.047	3,1	6.000	17,2
	Feldlerche	1.627	31,6	2.808	45,4
	Rotkehlchen	2.967	42,1	4.902	66,8
	Star	1.812	32,9	3.820	36,9

Die Wichtigkeit der einzelnen erklärenden Variablen variierte zwischen den einzelnen Modellen (siehe Anhang A.1 und A.3). Es waren jedoch einige generelle Muster zu erkennen. Von den untersuchten meteorologischen Parametern waren die Windkomponenten, und hier insbesondere die Rückenwind-Komponente, in der Regel die wichtigsten Variablen. Hinsichtlich der Zeitvariablen war der „Julianische Tag“, der das generelle phänologische Muster innerhalb einer Zugsaison berücksichtigt, insgesamt am wichtigsten (Anhang A.1 und A.3). Auch das zeitliche Muster innerhalb der Nacht spielte in vielen Modellen eine wichtige Rolle. Die Wichtigkeit der zusätzlichen faktoriellen Variablen unterschied sich teilweise deutlich zwischen den Modellen. Während sich das Untersuchungs-jahr und der Erfassungsstandort in einigen Modellen als wichtig herausstellte, spielten die Faktoren „Phase“ und „Lab“ generell eine untergeordnete Rolle. Dies war sowohl bei den Modellen zur Zugintensität als auch bei den Flugrufen der Fall. Bei den Modellen zur Flughöhe war hingegen die Zugintensität die weitaus wichtigste erklärende Variable.

4.2.1 Wetterparameter

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die wichtigsten Wetter- und Zeitparameter dargestellt. Eine vollständige Übersicht über die Ergebnisse der Modelle finden sich im Anhang A.3 (Zugintensität/Flughöhe) und im Anhang A.1 (Rufintensitäten).

TWC (Rückenwind-Komponente)

Die Zugintensität nahm mit zunehmender Rückenwind-Komponente deutlich zu (Abb. 4-18). Dies traf sowohl auf den Frühjahrs- als auch auf den Herbstzug zu. Auch die Rufintensitäten zeigten in der Regel einen starken und oftmals abrupten Anstieg mit zunehmendem Rückenwind. Übereinstimmend zeigten die Modelle zudem einen saisonalen Unterschied. Die Zunahme der Zugintensität setzte im Herbst in höherem Maße bereits bei moderatem Gegenwind (negative TWC-Werte) ein. Bei den Rufintensitäten war dieser Unterschied teilweise noch deutlicher ausgeprägt. Hier nahm die Häufigkeit der Rufe im Herbst ab einer TWC von etwa -5 m/s merklich zu, im Frühjahr war dies erst bei einer TWC von +10 m/s der Fall (Abb. 4-19).

Die Flughöhe zeigte hingegen einen gegensätzlichen Zusammenhang zur Rückenwind-Komponente. Sie nahm mit abnehmendem TWC-Wert stetig zu (Abb. 4-18).

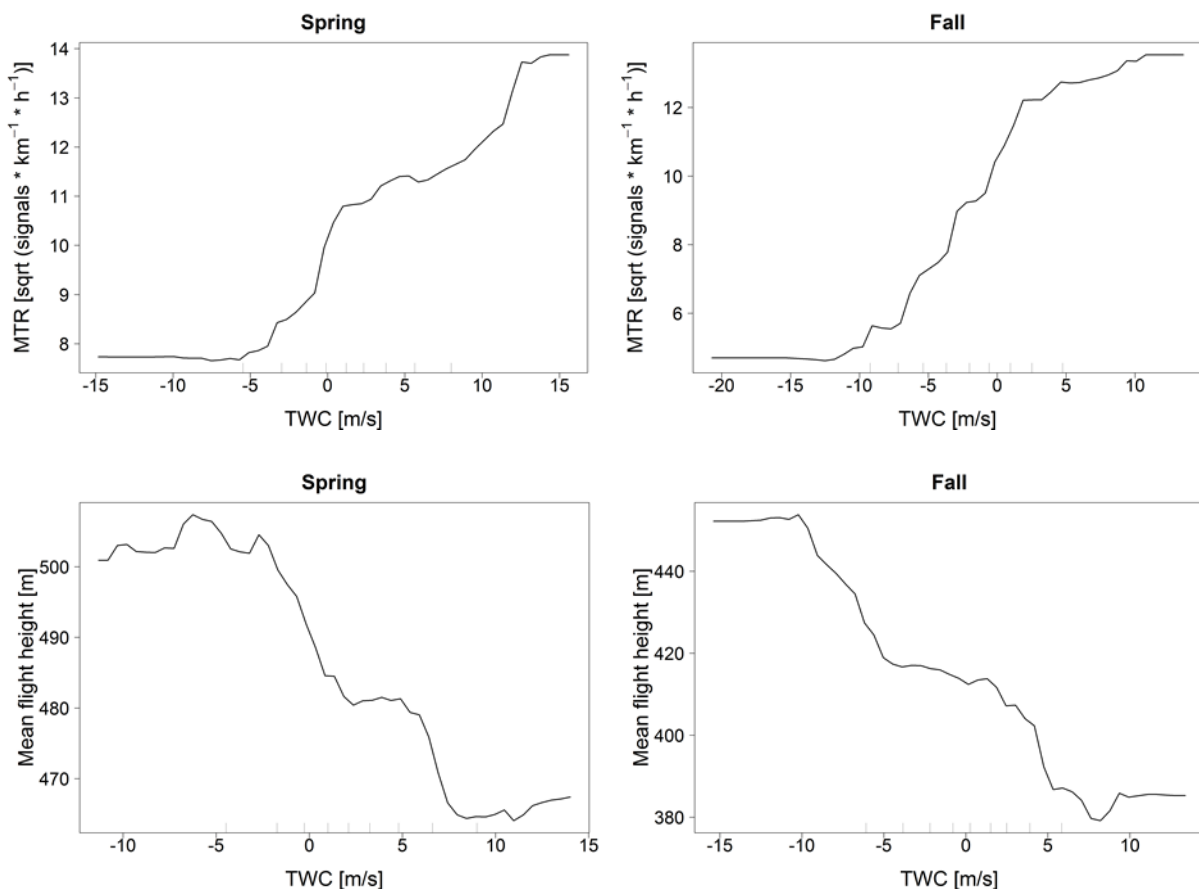


Abb. 4-18 Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert, obere Abbildungen] und der mittleren Flughöhe [m, untere Abbildungen] von der Rückenwind-Komponente (TWC, [m/s]) auf dem Frühjahrs- (links) und Herbstzug (rechts).

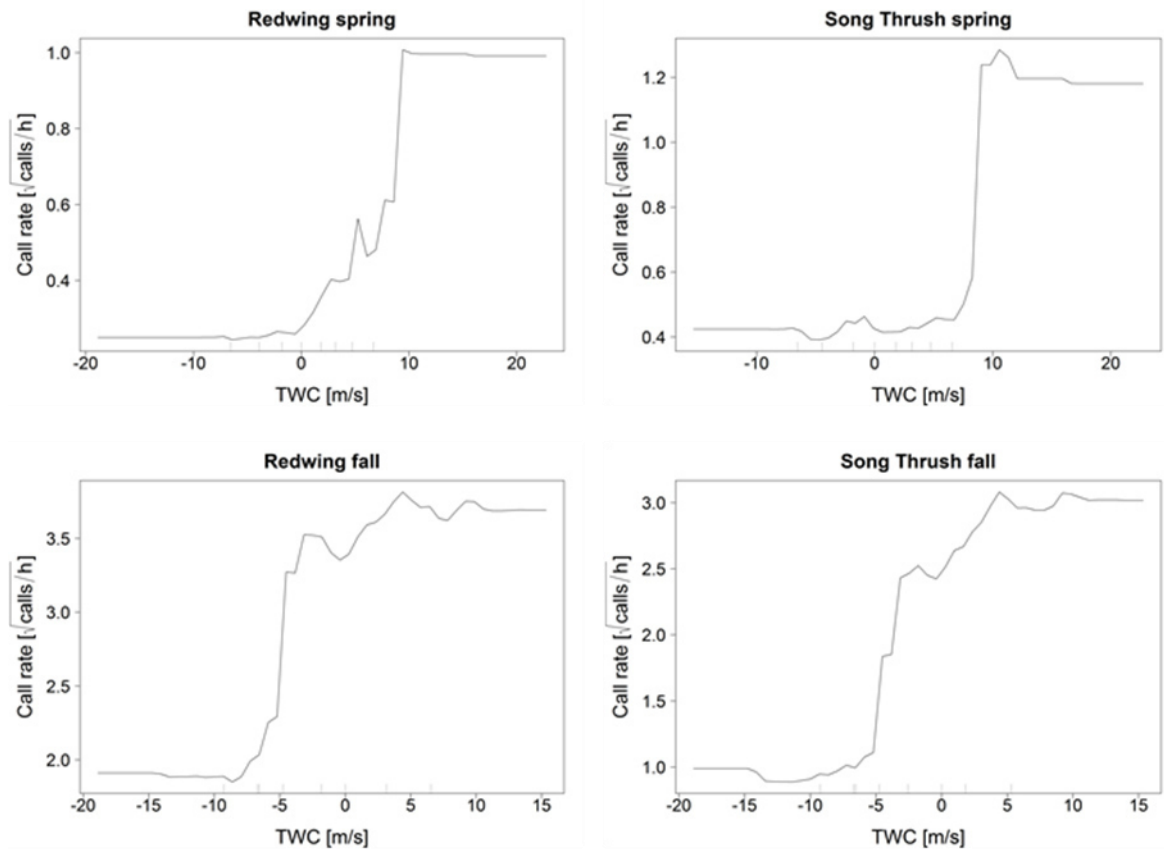


Abb. 4-19 Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Rufintensität [Rufe/h, wurzel-transformiert] von der Rückenwind-Komponente (TWC, [m/s]) auf dem Frühjahrs- (oben) und Herbstzug (unten). Dargestellt sind die Ergebnisse für die Rotdrossel (links) und die Singdrossel (rechts).

CWC (Seitenwind-Komponente)

Der Effekt der Seitenwind-Komponente auf Zugintensität und Flughöhe war deutlich saisonabhängig. Im Frühjahr nahm die Zugintensität mit abnehmenden CWC-Werten stark zu. Ebenso war der Zusammenhang zwischen der Flughöhe und der Seitenwind-Komponente während des Frühjahrszugs deutlich negativ (Abb. 4-20). Für den Herbstzug spielte die Seitenwind-Komponente hingegen nur eine untergeordnete Rolle und ein klares Muster war nicht zu erkennen (Abb. 4-20).

Die Rufintensitäten zeigten bei den meisten Arten sowohl auf dem Frühjahrs- als auch auf dem Herbstzug eine deutliche Abhängigkeit von der Seitenwind-Komponente (Abb. 4-21). Während des Frühjahrszugs nahm die Rufrate – vergleichbar mit der Zugintensität – mit abnehmenden CWC-Werten merklich zu (Abb. 4-20). Im Herbst lag überwiegend ein positiver Zusammenhang mit zunehmenden Rufraten bei steigender Seitenwind-Komponente vor. Negative CWC-Werte im Frühjahr und positive CWC-Werte im Herbst spiegeln südöstliche, d.h. in der Deutschen Bucht ablandige, Winde wider.

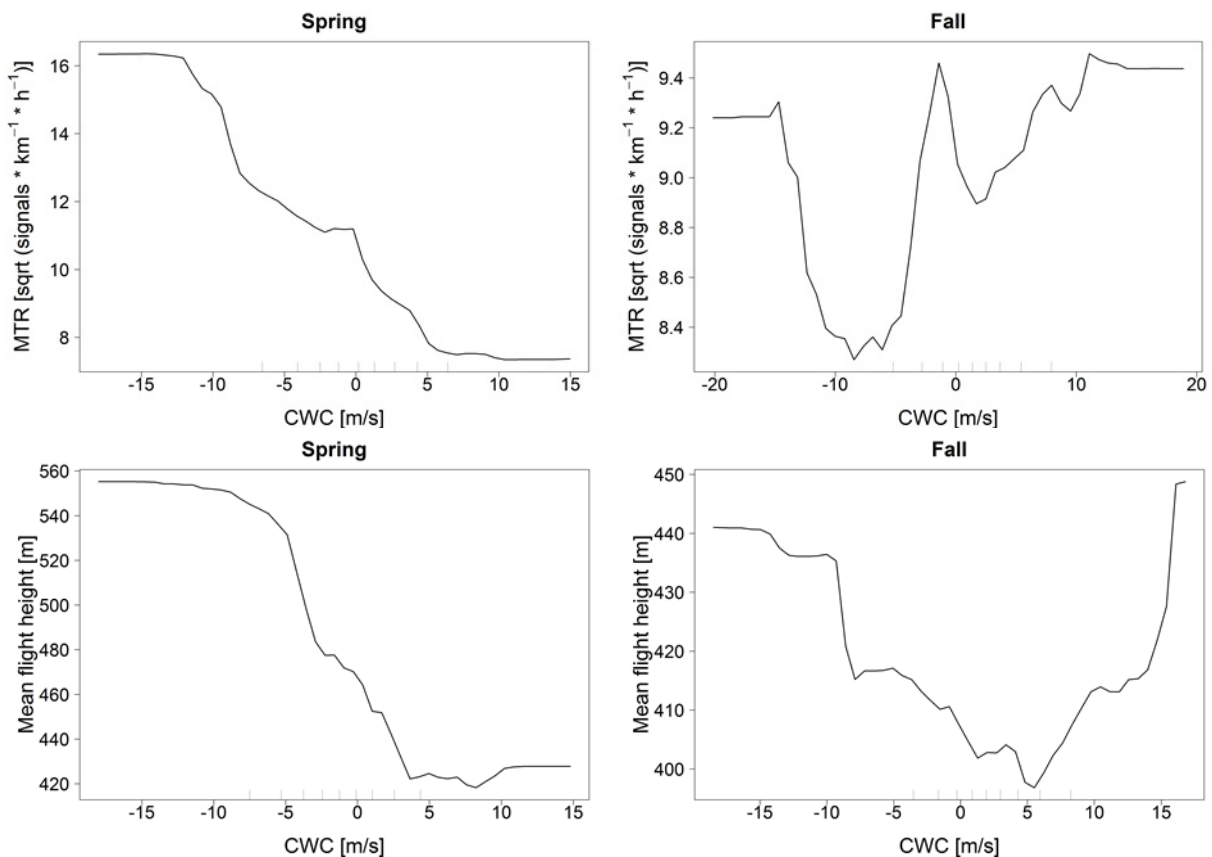


Abb. 4-20 Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert, obere Abbildungen] und der mittleren Flughöhe [m, untere Abbildungen] von der Seitenwind-Komponente (CWC, [m/s]) auf dem Frühjahrs- (links) und Herbstzug (rechts).

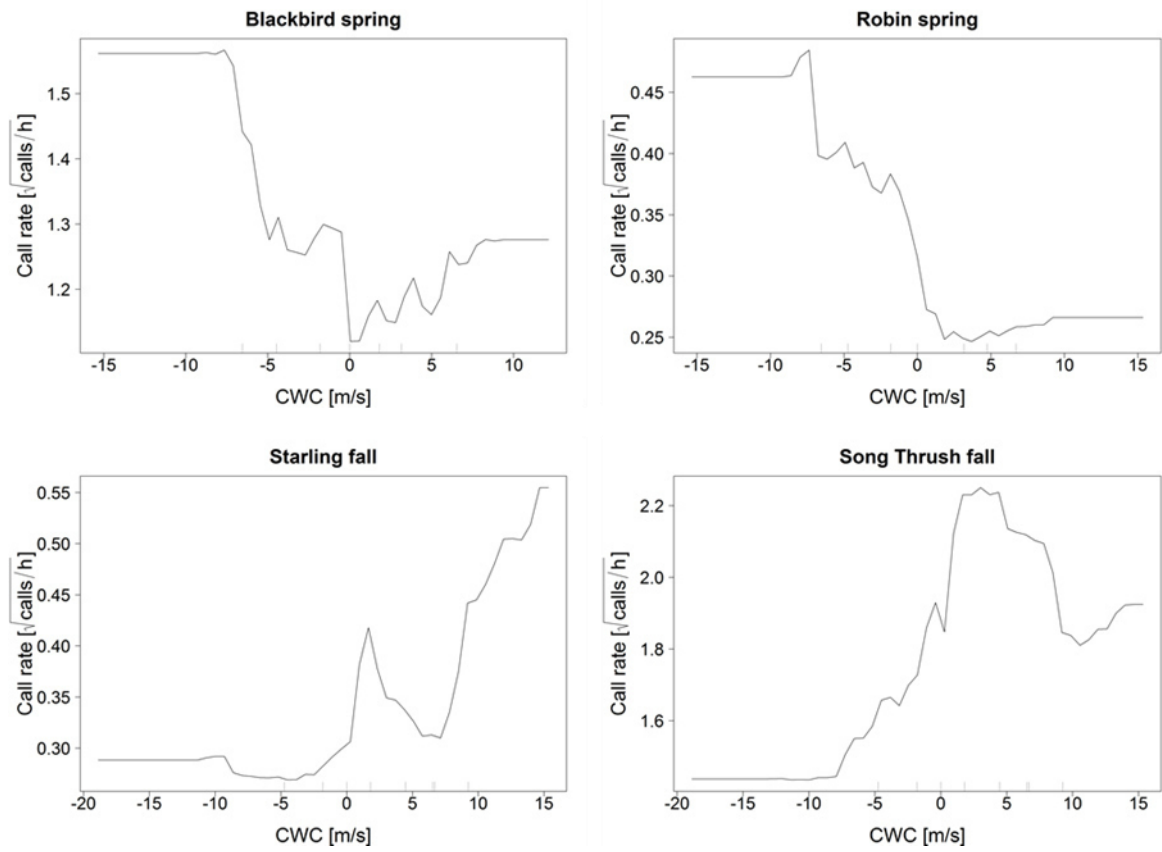


Abb. 4-21 Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Rufintensität [Rufe/h, wurzel-transformiert] von der Seitenwind-Komponente (CWC, [m/s]) auf dem Frühjahrs- (Amsel und Rotkehlchen, oben) und Herbstzug (Star und Singdrossel, unten).

Relative Luftfeuchtigkeit/Bedeckungsgrad

Die relative Luftfeuchtigkeit war als erklärende Variable in den RF-Modellen zur Zugintensität und zur Flughöhe enthalten. Die Modelle zur Rufintensität enthielten stattdessen die Variable „Bedeckungsgrad“. Beide Parameter können auch als Proxy für die Sichtverhältnisse angesehen werden.

Auf dem Frühjahrszug wurde hinsichtlich der Zugintensität und der mittleren Flughöhe generell ein negativer Zusammenhang mit der relativen Luftfeuchtigkeit festgestellt (Abb. 4-22). Die Zugintensität nahm bei einer Luftfeuchtigkeit von unter 70 % deutlich zu; die Flughöhe stieg bei Werten von >95 %. Auf dem Herbstzug nahm die Zugintensität ebenfalls mit abnehmender Luftfeuchtigkeit zu. Hier war jedoch zudem ein Anstieg der Zugintensität bei Werten >90 % festzustellen.

Der Effekt des Bedeckungsgrads auf die Rufintensitäten war stark saisonabhängig. Während die Rufaktivität auf dem Frühjahrszug bei starker Bedeckung deutlich höher war als bei klarem Himmel, war der Zusammenhang im Herbst bei den meisten Arten U-förmig (Abb. 4-23). Hier waren erhöhte Rufraten sowohl bei starker Bedeckung als auch bei geringem Bedeckungsgrad zu verzeichnen.

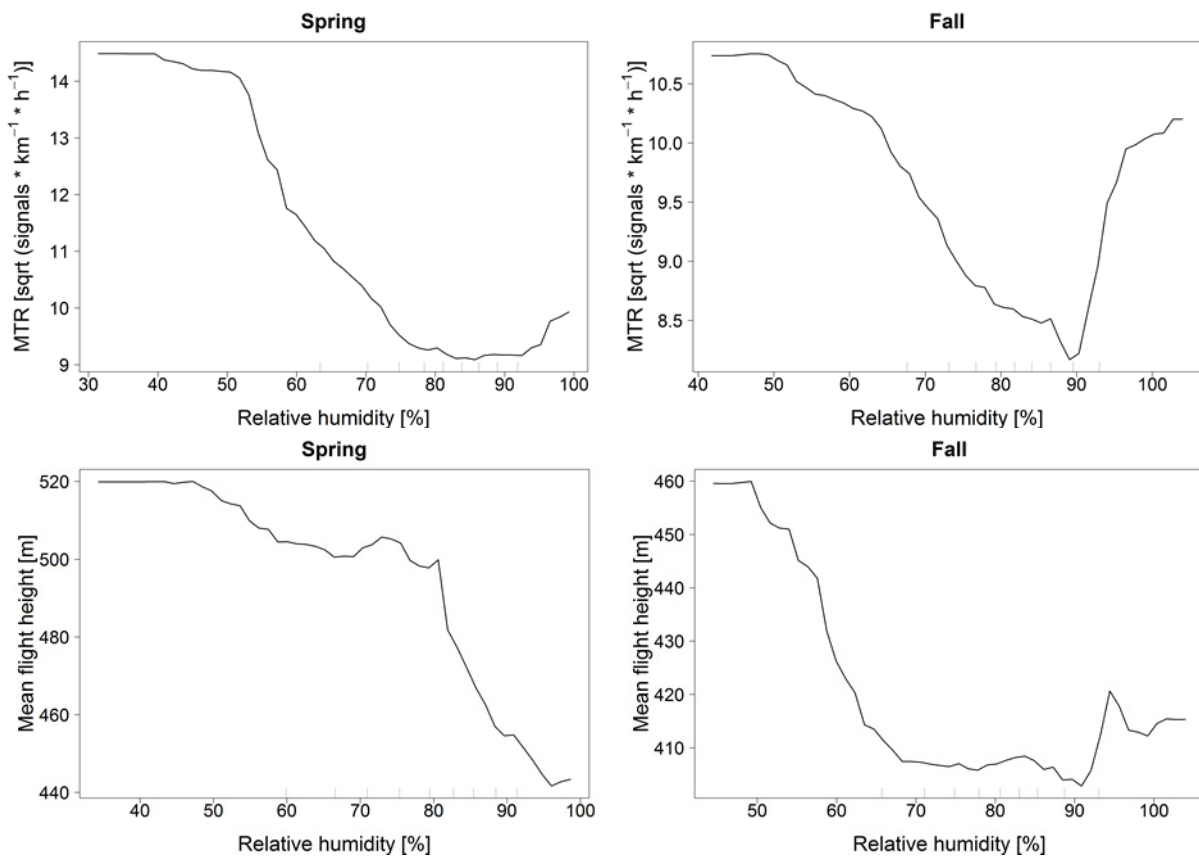


Abb. 4-22 Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert, obere Abbildungen] und der mittleren Flughöhe [m, untere Abbildungen] von der relativen Luftfeuchtigkeit [%] auf dem Frühjahrs- (links) und Herbstzug (rechts).

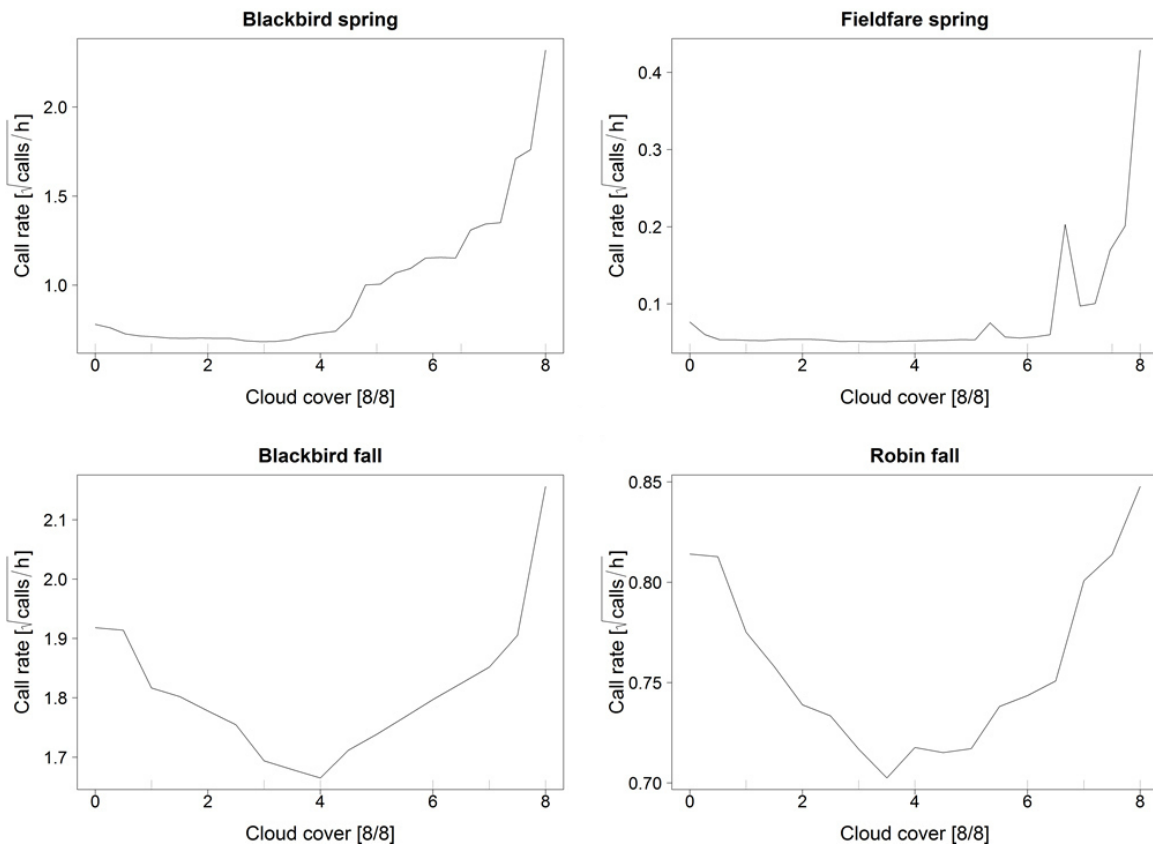


Abb. 4-23 Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Rufintensität [Rufe/h, wurzel-transformiert] vom Bedeckungsgrad [8/8] auf dem Frühjahrs- (Amsel und Wacholderdrossel, oben) und Herbstzug (Amsel und Rotkehlchen, unten).

Zugintensität

Die Zugintensität war die wichtigste erklärende Variable der mittleren Flughöhe. Sowohl während des Frühjahrs- als auch des Herbstzugs nahm die Flughöhe mit steigender Zugintensität deutlich zu (Abb. 4-24).

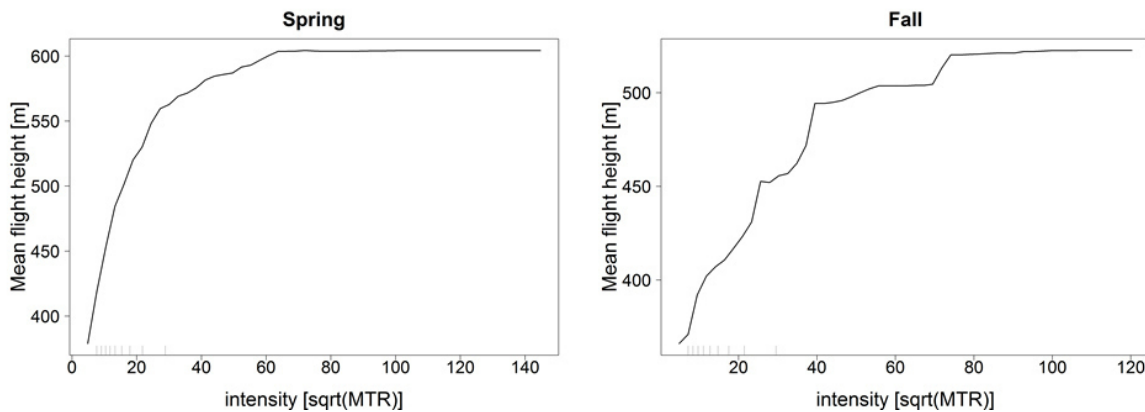


Abb. 4-24 Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der mittleren Flughöhe [m] von der Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert] auf dem Frühjahrs- (links) und Herbstzug (rechts).

4.2.2 Zeitparameter

Die Zeitvariable „Julianischer Tag“ spiegelt den zeitlichen Verlauf der Zugintensität innerhalb der Zugsaisons wider. Die Modelle bestätigten weitgehend die oben beschriebenen Auswertungen zum saisonalen Verlauf der Zugaktivität. Im Frühjahr wurden die höchsten Zugintensitäten zwischen Mitte März und Ende April registriert (Abb. 4-25). Im Herbst war dies zwischen Ende September und Anfang November der Fall.

Auch die mittlere Flughöhe zeigte ein deutliches saisonales Muster, insbesondere während des Frühjahrszugs (Abb. 4-25). Hier nahm die mittlere Flughöhe im Verlauf der Saison kontinuierlich zu. Auf dem Herbstzug nahm die Flughöhe hingegen bis November ab und zeigte hohe Variabilität am Ende der Saison. Der saisonale Verlauf der Rufintensitäten war stark artspezifisch (siehe Anhang A.3).

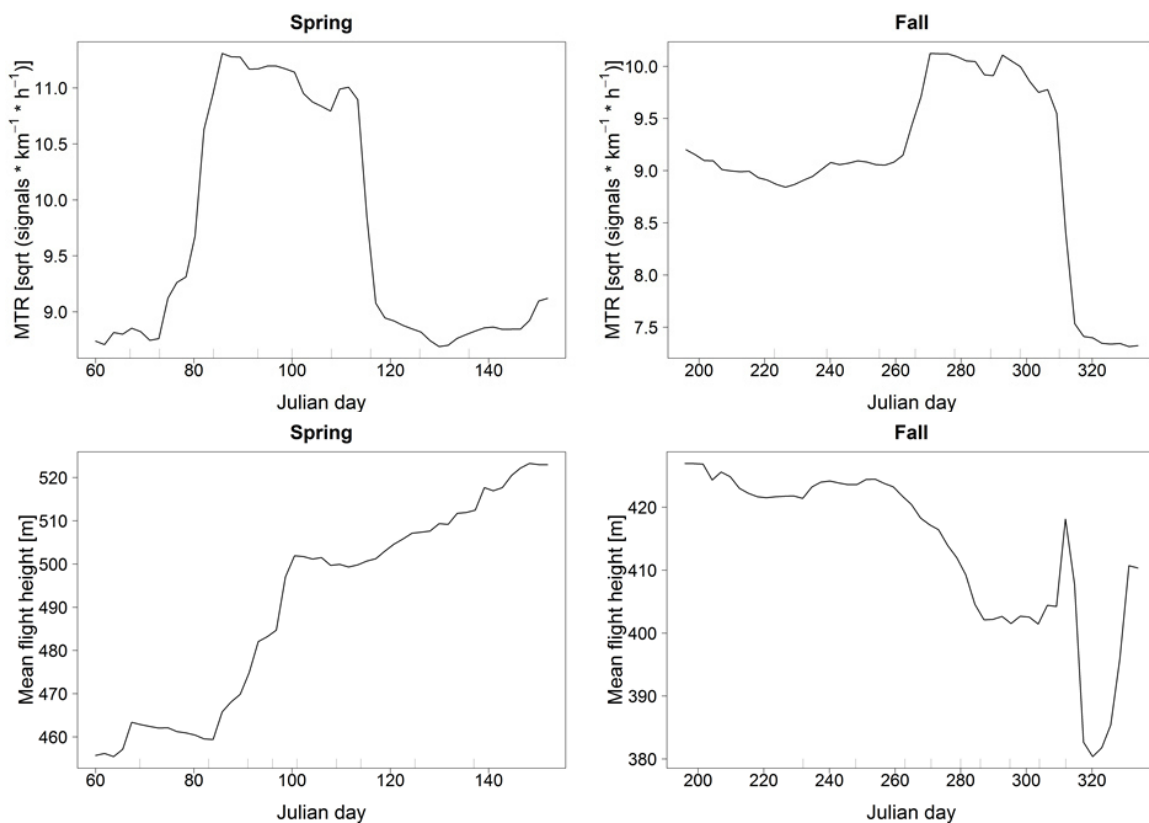


Abb. 4-25 Partial dependence plots der RF-Modelle: Abhängigkeit der Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert, obere Abbildungen] und der mittleren Flughöhe [m, untere Abbildungen] vom Julianischen Tag auf dem Frühjahrs- (links) und Herbstzug (rechts).

Darüber hinaus zeigten Zugintensität, Flughöhe und Rufaktivität ausgeprägte zeitliche Muster im Verlauf der Nacht (Abb. 4-26). Die Zugintensität nahm im Frühjahr und Herbst zu Beginn der Nacht deutlich zu und erreichte insbesondere im Herbst ein Maximum im ersten Drittel der Nacht. Im weiteren Verlauf nahm die Zugintensität leicht ab (Herbst) bzw. verblieb auf hohem Niveau (Frühjahr). Die Flughöhe nahm dagegen primär in der ersten Nachthälfte deutlich ab und zeigte einen leichten Anstieg kurz vor Sonnenaufgang (Abb. 4-26).

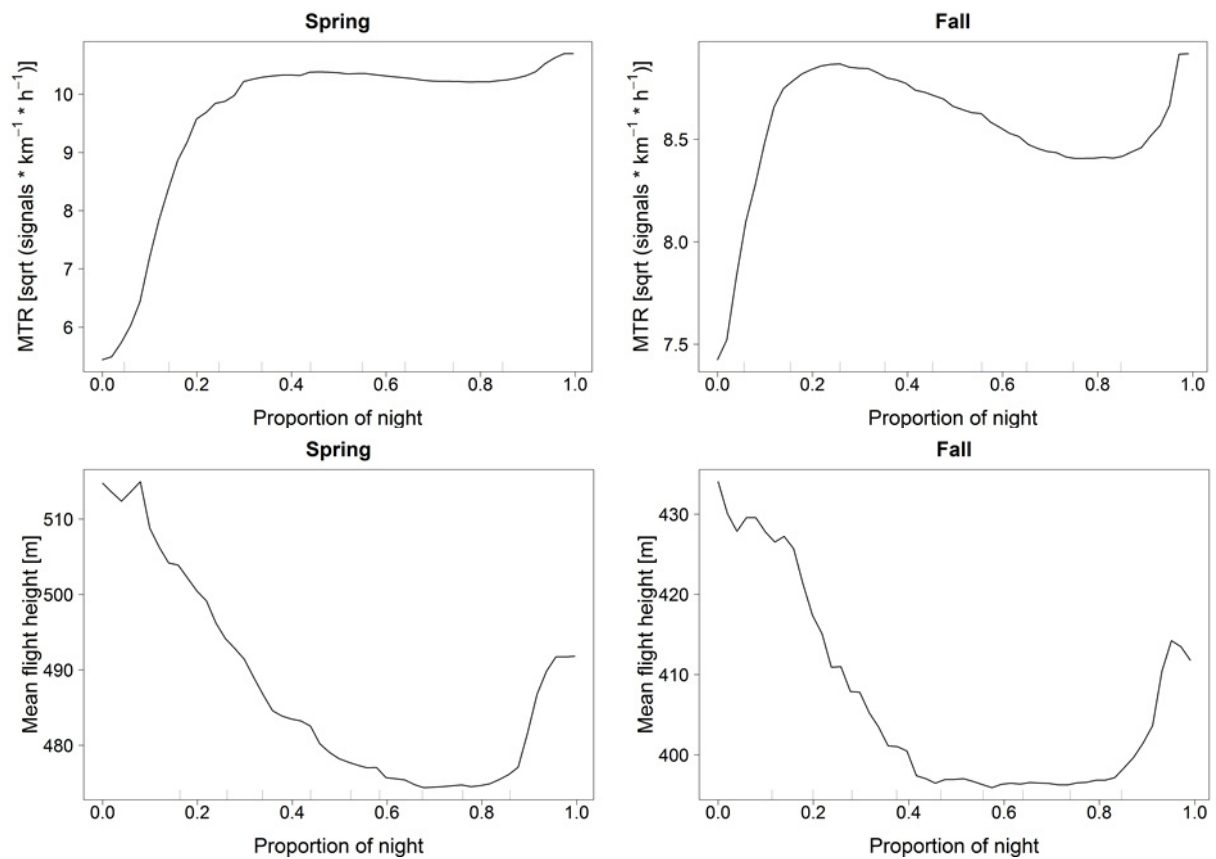


Abb. 4-26 Partial dependence plots der RF-Modelle: Zugintensität [MTR, wurzel-transformiert, obere Abbildungen] und mittlere Flughöhe [m, untere Abbildungen] im Verlauf der Nacht auf dem Frühjahrs- (links) und Herbstzug (rechts).

Der nächtliche Verlauf der Rufintensitäten war wiederum artspezifisch. Generell war bei den meisten Arten eine starke Zunahme der Rufintensität im Verlauf der Nacht festzustellen. Der Beginn der Zunahme variierte deutlich zwischen den Arten (Abb. 4-27, siehe auch Anhang A.1). Bei manchen Arten war hingegen ein U-förmiger Verlauf der Rufaktivität zu verzeichnen (z.B. Wiesenpieper, Abb. 4-27).

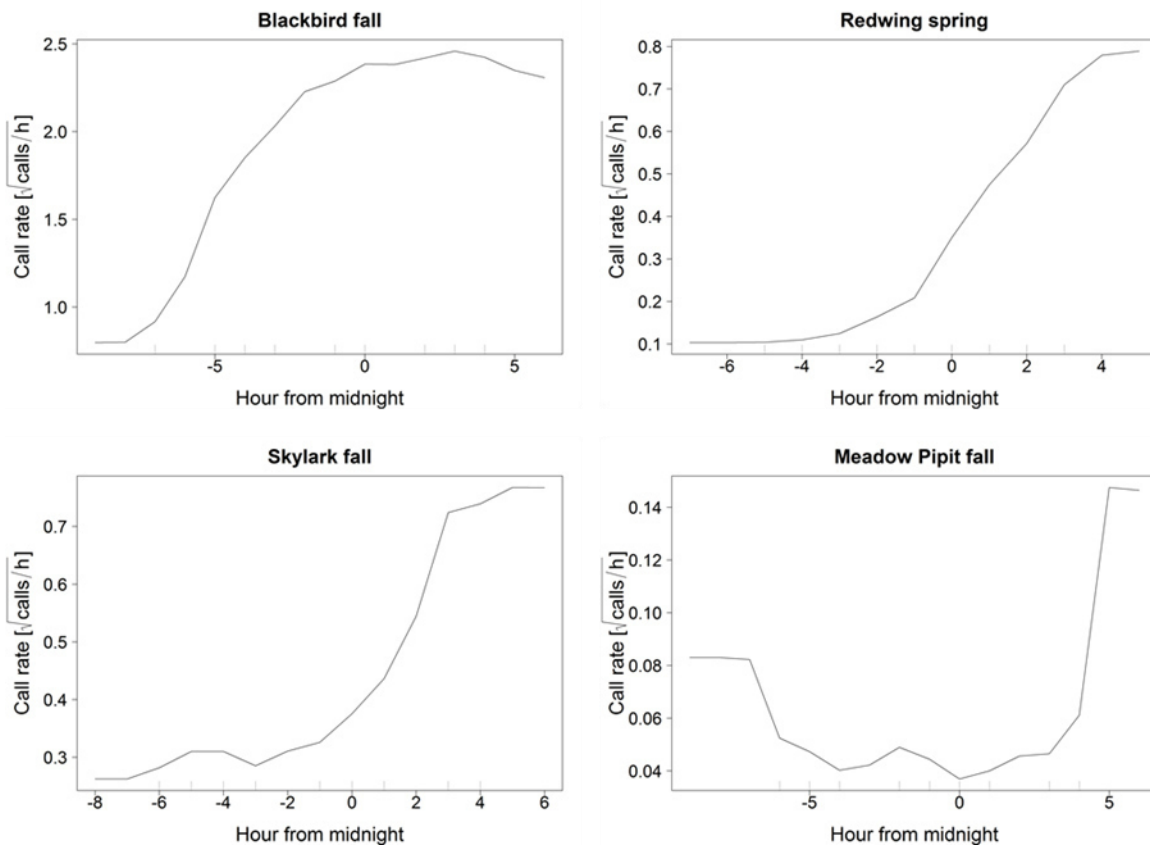


Abb. 4-27 Partial dependence plots der RF-Modelle: Rufintensität [Rufe/h, wurzel-transformiert] im Verlauf der Nacht am Beispiel der Amsel (oben links, Herbst), der Rotdrossel (Frühjahr, oben rechts), der Feldlerche (unten links, Herbst) und des Wiesenpiepers (unten rechts, Herbst).

4.3 Prognose der Vogelzugintensität

Die Kreuzvalidierungen zeigten eine gute Performance der Vorhersagemodelle der Zugintensität im relevanten Höhenbereich bis 200 m. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß (unbiased R^2) der Modelle belief sich auf 0,38 (Frühjahr) bzw. 0,40 (Herbst); somit erklärten die Modelle, die auf Basis der Trainings-Daten gebildet wurden, etwa 40 % der Varianz der Validierungsdatensätze. Ebenso zeigte sich eine hohe Korrelation zwischen der Modellvorhersage und den tatsächlich gemessenen Zugintensitäten (Abb. 4-28). Dies war in allen Untersuchungsjahren und in beiden Zugsaisons der Fall (Abb. 4-29 und Abb. 4-30).

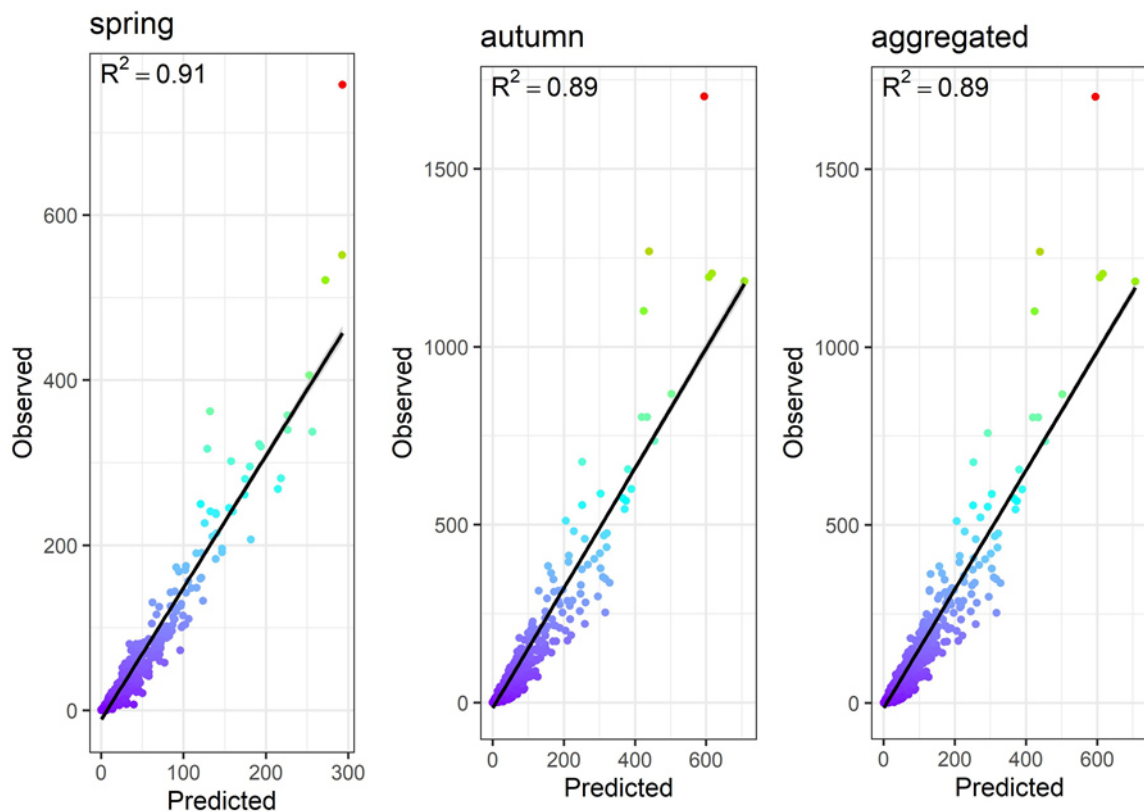


Abb. 4-28 Vom Modell vorhergesagte und tatsächlich gemessene Zugintensitäten [MTR] für den Frühjahrs- und Herbstzug, sowie zusammengefasst. Es wurden die Daten von allen Untersuchungsjahren und Standorten verwendet.

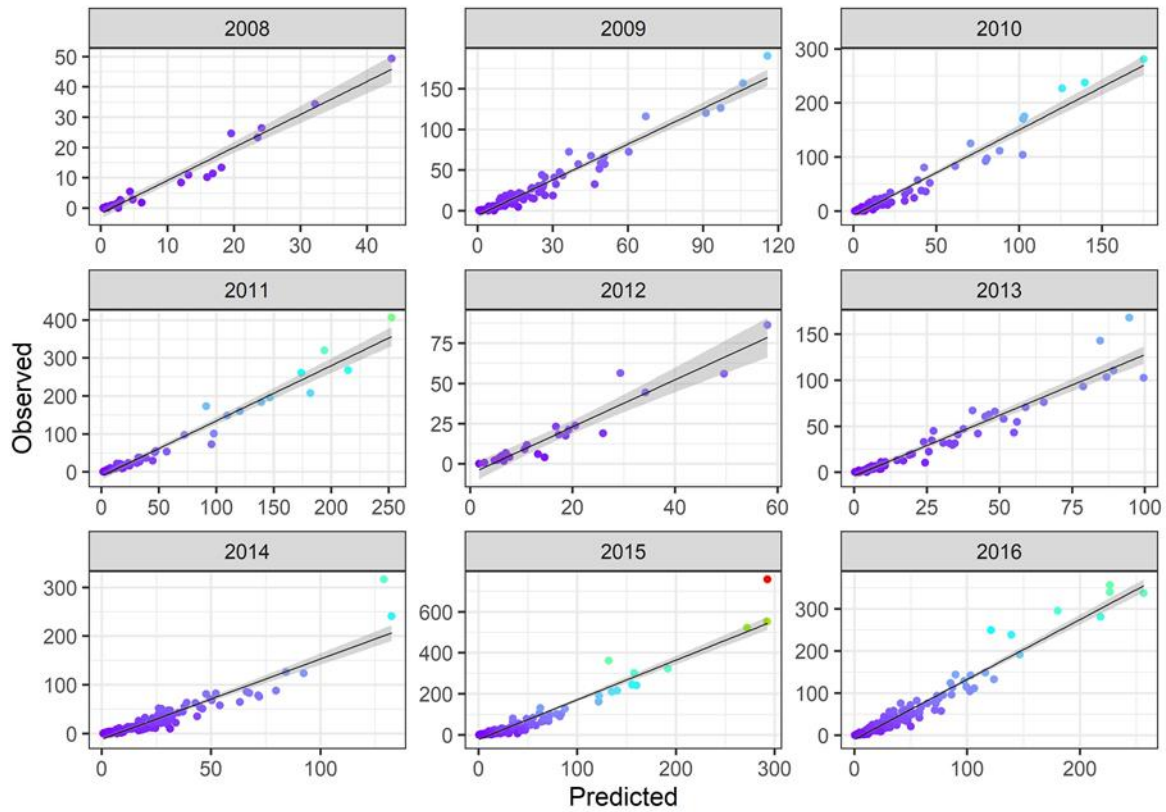


Abb. 4-29 Punktdiagramme der Modellvorhersagen und der tatsächlich gemessenen Zugintensitäten [MTR] während des Frühjahrszugs in allen Untersuchungsjahren.

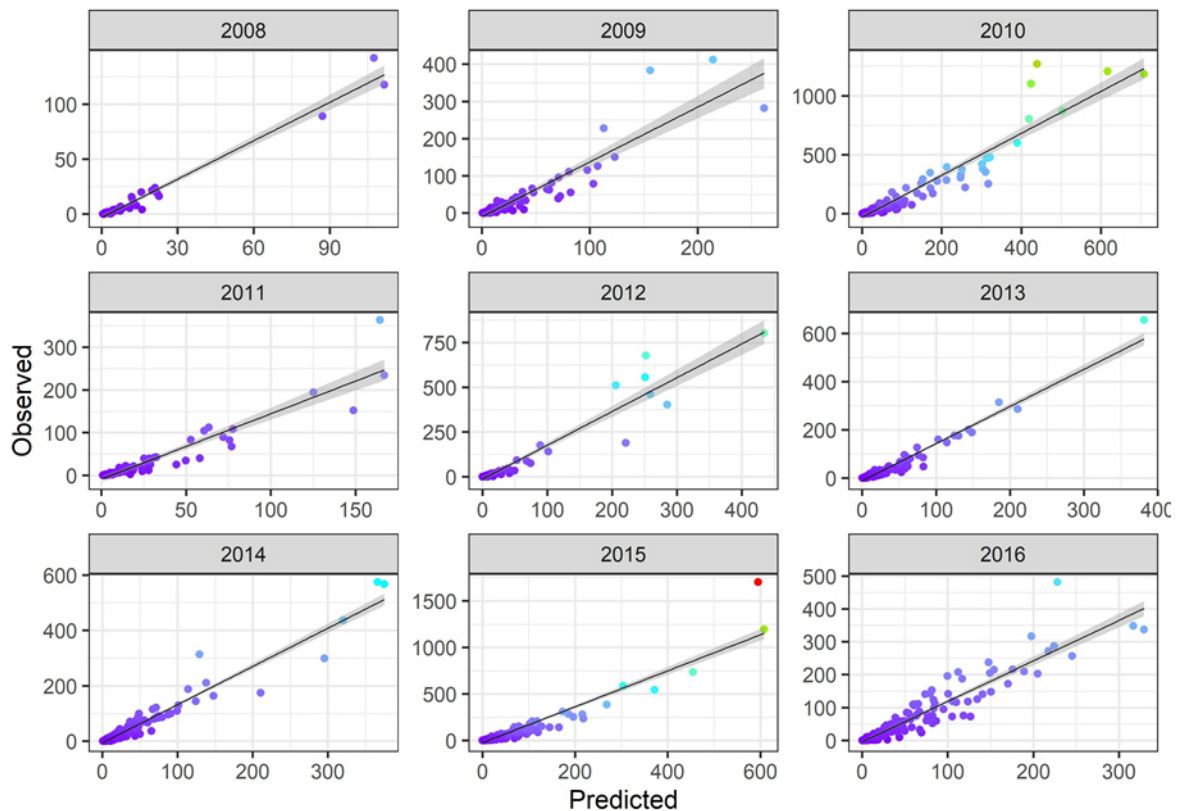


Abb. 4-30 Punktdiagramme der Modellvorhersagen und der tatsächlich gemessenen Zugintensitäten [MTR] während des Herbstzugs in allen Untersuchungsjahren.

Die Genauigkeit der Modelle, Starkzugnächte (>250 MTR) vorherzusagen, war jedoch relativ gering (Tab. 4-6). Nur 29 % (Frühjahr) bzw. 58 % (Herbst) der Zugereignisse mit Intensitäten über 250 MTR wurden korrekt vorhergesagt. Dies lag daran, dass die Vorhersagemodelle die Tendenz hatten, insbesondere Nächte mit hohen Zugintensitäten zu unterschätzen, was eine hohe Rate an „false negatives“ zur Folge hatte (Tab. 4-6).

Tab. 4-6 Konfusionsmatrix der vorhergesagten und tatsächlichen Klassifizierung von Zugereignissen, deren Intensität den Schwellenwert von 250 MTR überschritt für den Frühjahrs- (links) und Herbstzug (rechts). Die Zellen der Tabelle zeigen die Anzahl der „true negatives“ (oben links), der „false negatives“ (unten links), der „false positives“ (oben rechts) sowie der „true positives“ (unten rechts).

Frühjahr		
Vorhergesagt \ Beobachtet	0	1
0	759	0
1	12	5

Herbst		
Vorhergesagt \ Beobachtet	0	1
0	1179	1
1	24	33

Tab. 4-7 Konfusionsmatrix der vorhergesagten und tatsächlichen Klassifizierung von Starkzugereignissen (>250 MTR) nach Optimierung von Cohen's Kappa für den Frühjahrs- (links) und Herbstzug (rechts). Die Zellen der Tabelle zeigen die Anzahl der „true negatives“ (oben links), der „false negatives“ (unten links), der „false positives“ (oben rechts) sowie der „true positives“ (unten rechts).

Frühjahr		
Vorhergesagt \ Beobachtet	0	1
0	757	2
1	3	14

Herbst		
Vorhergesagt \ Beobachtet	0	1
0	1174	6
1	8	49

Die daraufhin durchgeführte Optimierung des Schwellenwertes für die Modellvorhersagen nach Cohen's Kappa (COHEN 1960) hatte eine wesentlichen Verbesserung der Klassifizierung von Starkzugereignissen zur Folge (Tab. 4-7). Die Quote der korrekt prognostizierten Zugnächten mit Intensitäten >250 MTR stieg auf 82 % (Frühjahr) bzw. 86 % (Herbst).

4.4 Kumulatives Kollisionsrisiko von Nachtziehern an Offshore-WEA

In Abhängigkeit der angenommenen Meiderate variierten die Schätzwerte des kumulativen Vogelschlags von Nachtziehern in den Zugperioden zwischen etwa 8.000 und 35.000 Vögeln (Tab. 4-8). Das entspricht zwischen 5,6 und 24,4 Kollisionen pro Jahr und Anlage in der gesamten deutschen AWZ. Davon entfielen 11,2 % auf Nicht-Singvögel. Da in den Modellen ein Anteil von 90 % Singvögeln angenommen wurde, deutet dies auf ein leicht erhöhtes Kollisionsrisiko von Nicht-Singvögeln hin.

Tab. 4-8 Schätzwerte des kumulativen Vogelschlags von Nachtziehern an allen Offshore-Windparks, die sich derzeit in der deutschen AWZ in Betrieb oder Bau befinden (siehe Tab. 3-3). Die Werte beziehen sich auf die geschätzten Kollisionen während der Dunkelphase der Frühjahrs- und Herbstzugperiode pro Jahr.

Meiderate	Anzahl Kollisionen			Kollisionen pro Turbine		
	Singvögel	Nicht-Singvögel	Insgesamt	Singvögel	Nicht-Singvögel	Insgesamt
0,956	30.964	3.931	34.895	21,66 ±1,9 [8,5 - 45,1]	2,75 ±0,3 [1,1 - 5,7]	24,41 ±2,14 [2,1 - 50,8]
0,980	14.075	1.787	15.862	9,85 ±0,9 [3,9 - 20,5]	1,25 ±0,1 [0,5 - 2,6]	11,10 ±1,0 [1,0 - 23,1]
0,990	7.037	893	7.930	4,92 ±0,4 [1,9 - 10,3]	0,62 ±0,1 [0,3 - 1,3]	5,55 ±0,5 [2,2 - 11,5]

Aufgrund der weitaus höheren Anzahl an Turbinen in der Nordsee belief sich der Anteil der geschätzten Kollisionen in dieser Region auf etwa 80 % (Tab. 4-9). Das Kollisionsrisiko pro Turbine war hingegen in der Ostsee um etwa 50 % höher als in der Nordsee (Tab. 4-9).

Auch innerhalb der Zugperioden war das Kollisionsrisiko ungleich verteilt. Während des Frühjahrszugs lag die geschätzte Anzahl Kollisionen im März und April deutlich höher als im Mai (Tab. 4-10). Im Herbst konzentrierte sich der Vogelschlag auf den Monat Oktober, in dem mehr als die Hälfte (52 %) aller Kollisionen in dieser Zugperiode prognostiziert wurden (Tab. 4-10).

Tab. 4-9 Schätzwerte des kumulativen Vogelschlags von Nachtziehern getrennt nach Nord- und Ostsee für verschiedene Meideraten (weitere Details siehe Tab. 4-8).

Meiderate	Anzahl Kollisionen			Kollisionen pro Turbine		
	Nordsee	Singvögel	Nicht-Singvögel	Insgesamt	Singvögel	Nicht-Singvögel
0,956	24.873	3.158	28.032	20,34	2,58	22,92
0,980	11.306	1.436	12.742	9,25	1,17	10,42
0,990	5.653	718	6.371	4,62	0,59	5,21
Ostsee						
0,956	6.091	773	6.863	30,46	3,86	34,32
0,980	2.768	351	3.120	13,85	1,76	15,60
0,990	1.384	176	1.560	6,92	0,88	7,80

Tab. 4-10 Schätzwerte des kumulativen Vogelschlags von Nachtziehern getrennt nach Monaten und angenommener Meideraten (weitere Details siehe Tab. 4-8).

Monat	Anzahl Kollisionen			Kollisionen pro Turbine		
	0,956	0,980	0,990	0,956	0,980	0,990
März	5.001	2.273	1.137	3,45	1,57	0,79
April	4.460	2.027	1.014	3,11	1,42	0,71
Mai	1.230	559	280	0,85	0,39	0,19
Juli	513	233	117	0,36	0,16	0,08
August	1.591	723	362	1,16	0,50	0,25
September	4.194	1.906	953	2,88	1,31	0,65
Oktober	12.649	5.749	2.875	8,84	4,02	2,01
November	5.258	2.390	1.195	3,81	1,73	0,87

Da bei dem verwendeten Kollisionsmodell (Band-Modell) die geschätzte Anzahl Kollisionen in linearem Zusammenhang zur Zugintensität steht, konzentrierten sich die prognostizierten Kollisionsopfer in Nächten oder Stunden mit hoher Zugintensität in den relevanten Höhenbereichen (Tab. 4-11). So zeigten die Modelle, dass in den Stunden mit den höchsten Zugintensitäten (>750 MTR) etwa 17,8 % des Vogelschlags stattfindet, obwohl solch hohe Zugraten nur in 0,7 % der Nachtstunden oder in etwa 15 Stunden pro Jahr erreicht werden. Dementsprechend könnten theoretisch zwischen 1.400 und 6.200 Kollisionen vermieden werden, wenn in dieser Zeit die Turbinen abgeschaltet würden (Tab. 4-11). Die Berechnungen deuten auch darauf hin, dass knapp die Hälfte aller Kollisionen in Stunden stattfinden, in welchen die Zugintensität 250 MTR übersteigt. Dieser Schwellenwert wurde im Mittel etwa 90 Stunden pro Jahr überschritten. Weitere Beispiele sind in Tab. 4-11 gegeben (siehe auch Anhang A.3).

Tab. 4-11 Anzahl der geschätzten Kollisionen für verschiedene Schwellenwerte der Zugintensität. Zusätzlich angegeben ist der Prozentsatz der Zeit und die Anzahl Stunden pro Jahr, in welchen die Schwellenwerte überschritten werden, sowie der Anteil Kollisionen, die in dieser Zeit stattfinden. Es ist der Mittelwert \pm SE [Range] der Windparks angegeben.

MTR Schwellenwert	Meiderate	Anzahl Kollisionen	Kollisionen pro Turbine	% Kollisionen	% Zeit über Schwellenwert	Stunden pro Jahr über Schwellenwert
>100	0,956	25.137	17,5 \pm 1,9 [3,4 - 38,8]	72,0 \pm 2,1 [35,6 - 81,5]	11,2 \pm 0,9 [2,9 - 21,3]	251,6 \pm 21,1 [65,9 - 477,7]
	0,980	11.426	8,0 \pm 0,9 [1,6 - 17,6]			
	0,990	5.713	4,0 \pm 0,4 [0,8 - 8,8]			
>250	0,956	16.571	11,6 \pm 1,4 [1,1 - 23,6]	47,5 \pm 2,6 [11,9 - 62,3]	4,0 \pm 0,4 [0,5 - 7,5]	90,5 \pm 9,0 [10,8 - 167,8]
	0,980	7.532	5,3 \pm 0,6 [0,5 - 10,7]			
	0,990	3.766	2,6 \pm 0,3 [0,3 - 5,4]			
>500	0,956	9.457	6,6 \pm 1,0 [0,0 - 14,8]	27,1 \pm 2,6 [0,0 - 43,9]	1,4 \pm 0,2 [0,0 - 3,2]	30,9 \pm 3,9 [0,0 - 72,5]
	0,980	4.299	3,0 \pm 0,4 [0,0 - 6,7]			
	0,990	2.149	1,5 \pm 0,2 [0,0 - 3,4]			
>750	0,956	6.199	4,4 \pm 0,7 [0,0 - 11,1]	17,8 \pm 2,3 [0,0 - 32,9]	0,7 \pm 0,1 [0,0 - 1,8]	14,7 \pm 2,3 [0,0 - 40,9]
	0,980	2.818	2,0 \pm 0,3 [0,0 - 5,0]			
	0,990	1.409	1,0 \pm 0,2 [0,0 - 2,5]			

Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass von allen Eingangsparametern des Band-Modells die Meiderate den mit Abstand größten Einfluss auf die geschätzte Anzahl Kollisionen hatte (Tab. 4-12). So lag die modellierte Anzahl Kollisionen bei einer angenommenen Meiderate von 0,980 (dem oberen von SCHULZ et al. (2014) für Nachtzieher an Offshore-Turbinen geschätzten Wert) um 54 % niedriger als bei einer Meiderate von 0,956 (dem unteren von SCHULZ et al. angegebenen Wert). Eine Meiderate von 0,990 (KRIJGSVELD et al. 2015) reduzierte die Schlagopferzahl um 77 % bzw. 50 % im Vergleich zu den von SCHULZ et al. (2014) angegebenen Meideraten. Nimmt man für Nachtzieher eine Meiderate von 0,999 an, wie sie für einige tagaktive Seevogelarten beschrieben wurde (SKOV et al. 2018), so beläuft sich die geschätzte Anzahl Kollisionen nur auf 2,3 % im Vergleich zu einer Meiderate von 0,956.

Die übrigen vogel- und turbinenbezogenen Eingangsparameter des Modells hatten geringere Auswirkungen auf das Modellergebnis. Die Annahme verschiedener Werte im Unsicherheitsbereich der Modellparameter führten zu Abweichungen der geschätzten Kollisionen von maximal etwa 10 % (Tab. 4-12). Weitere Details sind Anhang A.3 zu entnehmen.

Tab. 4-12 Analyse der Sensitivität des Band-Modells auf Variation verschiedener Eingangsparameter. Angegeben sind die Werte der Parameter, die in der Modellierung verwendet wurden sowie alternative Werte und die Abweichung der geschätzten Kollisionen [%] zu der die Annahme der alternativen Werte führt. Zudem ist die Variationsbreite der Abweichung für einzelne Monate und Windparks angegeben.

Parameter	Verwendeter Wert	Alternative Wert(e)	Abweichung	Variationsbreite der Abweichung
Turbinen-bezogen				
Rotationsgeschwindigkeit [rpm]	10,3	13	+1,4%	+1,2% - 2,9%
Anstellwinkel [°]	7	20	-8,7%	- 8% - -11%
Vogel-bezogen				
Fluggeschwindigkeit [m/s]	11,8 / 17,9	10,0 / 15,2	+1,0%	+0,8% - 2,0%
Länge [m]	0,175 / 0,375	0,201 / 0,431	+2,4%	+2,2 - 2,5%
Flügelspannweite [m]	0,290 / 0,700	0,334 / 0,805	+0,5%	+0,4 - 0,6%
Flughöhenverteilung	monatlich	Mittelwert	-0,7%	±8%
Anteil windwärts gerichteter Flüge [%]	30	7,9 / 50	-14% - +10%	-15% - +11%
Meiderate	0,956	0,98/0,99/0,999	-54,5% - -97,7%	-54,5% - -97,7%

5 DISKUSSION

In dieser Studie konnten erstmals Daten zum nächtlichen Vogelzug von einer großen Anzahl Standorten in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee zusammengefasst und projektübergreifend ausgewertet werden. Da zudem die Daten von insgesamt neun Untersuchungsjahren vorlagen, ergab sich die Möglichkeit, räumliche und zeitliche Muster des Nachtzugs für einen großen Teil der AWZ zu ermitteln. Darüber hinaus bildete dieser Datensatz eine sehr gute Grundlage, die Wetterabhängigkeit des nächtlichen Zuges im Offshore-Bereich zu bestimmen sowie das kumulative Kollisionsrisiko von nachts ziehenden Vögeln an den deutschen Offshore-Windparks abzuschätzen. Ein besseres Verständnis des nächtlichen Vogelzugs sowie des Vogelschlagrisikos ist von großer Bedeutung für eine bessere Einschätzung der potenziellen Auswirkungen des weiteren Ausbaus der Offshore-Windenergienutzung in Deutschland und darüber hinaus.

Die nachfolgende Diskussion stellt eine Zusammenfassung der Diskussionskapitel der einzelnen Teilberichte dar. Für weitere Details wird auf die Anhänge A.1 bis A.3 verwiesen.

5.1 Datengrundlage

Für die vorliegende Studie wurden die Daten von Zugruferfassungen und Vertikalradaruntersuchungen ausgewertet. Die Datenaufnahme wurde durch die Vorgaben des Untersuchungskonzepts des BSH (StUK; BSH 2007, 2013) in einem hohen Maße standardisiert. Nichtsdestotrotz sind bei der Interpretation der Ergebnisse mehrere Punkte zu beachten, die die Heterogenität der Daten erhöhen und deren Aussagekraft beeinträchtigen.

Zum einen waren an der Datenaufnahme eine Reihe Planungsbüros sowie eine große Anzahl von Personen beteiligt. Trotz der generellen Standardisierung durch das StUK sind hier einzelne Abweichungen zu erwarten. Geringe Unterschiede der Erfassungsmethodik zwischen den Büros waren beispielsweise beim Nachtzugverhör bekannt (siehe Anhang A.1). Bei den Radarerfassungen kommt hinzu, dass hier Radargeräte verschiedener Hersteller und Typs verwendet wurden, die trotz generell gleicher technischer Spezifikationen und Einstellungen Unterschiede in der Detektion von Vögeln aufweisen können. Dies wird durch die unterschiedlichen Detektionsfunktionen bei der Distanzkorrektur verdeutlicht. Eine Validierung der mit Schiffsradargeräten gewonnenen Daten zum nächtlichen Vogelzug bzw. eine umfassende Kalibrierung mit anderen (Radar-)geräten zur Erfassung des Vogelzugs ist bisher noch nicht erfolgt (WENDELN et al. 2007; FEBI 2013; URMY & WARREN 2017; LIECHTI et al. 2018; NILSSON et al. 2018). Die in dieser Studie ermittelten absoluten Werte der Zugintensität sind daher mit Vorsicht zu interpretieren.

Zum anderen wurden die Daten unter Verantwortung verschiedener Büros und in räumlicher Nähe zu Standorten von Offshore-Windparks erhoben, die sich in verschiedenen Phasen der Entwicklung befanden (Basis, Bau und Betrieb). Zwar deuteten die Ergebnisse der Random Forest-Modelle darauf hin, dass sowohl die Entwicklungsphase als auch das beteiligte Büro nur geringen Einfluss hatten. Es ist jedoch zu beachten, dass ein relativ hoher Grad an Konfundierung dieser Faktoren bestand, so dass ihr tatsächlicher Einfluss auf die berechneten Zug- und Rufintensitäten höher sein könnte, als die Modelle erkennen lassen.

Weiterhin ist zu beachten, dass mit den in dieser Studie verwendeten Radargeräten und Einstellungen der Vogelzug nur bis in eine Höhe von 1.000 m analysiert wurde. Dieser Höhenbereich ist durch das StUK vorgegeben und spiegelt die limitierte Detektion von Vögeln in größerer Entfernung durch

die Geräte wider. Mehrere Studien haben jedoch gezeigt, dass Vogelzug auch im Offshore-Bereich regelmäßig auch in Höhen über 1.000 m stattfindet. Der Anteil des Zuggeschehens über dieser Höhe hängt von mehreren Faktoren ab und variiert stark (KEMP et al. 2013), dürfte bisherigen Informationen zufolge jedoch im Mittel bei etwa 30 % liegen (FEBI 2013; KEMP et al. 2013; SCHULZ et al. 2013, 2014; BRUDERER et al. 2018). Da die Flughöhe einer hohen täglichen Variation unterliegt, ist die Abweichung der ermittelten Zugintensität (bis 1.000 m Höhe) von der tatsächlichen Zugintensität (ohne Höhenbeschränkung) vermutlich stark variabel. Dies hat entsprechende Einschränkungen bei der Modellierung von Zugintensitäten und Flughöhen zur Folge (Kap. 4.2 und 4.3).

5.2 Muster des nächtlichen Vogelzugs offshore

Das generelle saisonale Muster der Zugintensität entsprach mit Maxima in der ersten Aprilhälfte sowie Mitte Oktober den Ergebnissen früherer Studien (OREJAS et al. 2005; VAN BELLE et al. 2007; FEBI 2013; SCHULZ et al. 2013; FIJN et al. 2015; KRIJGSVELD et al. 2015). Während der zeitliche Verlauf der Frühjahrssaison in Nord- und Ostsee ähnlich war, ergaben sich für den Herbstzug mit einem deutlich früheren Peak (August/September) in der Ostsee regionale Unterschiede. Dies könnte auf eine unterschiedliche Artzusammensetzung in beiden Regionen zurückzuführen sein. So ist möglicherweise der Anteil Langstreckenzieher wie beispielsweise verschiedene Grasmücken (Sylviidae), Rohrsänger (Acrocephalidae) oder Laubsänger (Phylloscopidae), deren Durchzug im August/September seinen Höhenpunkt erreicht, im Bereich der Ostsee höher. So stellte der Fitis (*Phylloscopus trochilus*), die vermutlich häufigste Vogelart Skandinaviens (SCHULZ et al. 2013; BIRDLIFE INTERNATIONAL 2018), einen Anteil von etwa 35 % an den an einem Standort in der Ostsee festgestellten Totfunde, an einem vergleichbaren Standort in der Nordsee jedoch nur 0,9 % (HÜPPOP et al. 2009; SCHULZ et al. 2013).

Die artspezifischen Ergebnisse der Ruferfassungen zeigten in der Regel eine zeitliche Begrenzung der saisonalen Hauptdurchzugszeit auf etwa 6-8 Wochen. Dabei kam es zu zeitlichen Verschiebungen des Zugzeitraums zwischen den einzelnen Arten, der weitgehend früheren Studien entsprach (DIERSCHKE et al. 2011; HÜPPOP & HILGERLOH 2012). Für einige Arten (z.B. Amsel, Rotdrossel) zeigten die Ergebnisse auch, dass der Erfassungszeitraum des StUK im Frühjahr und Herbst den Hauptdurchzug dieser Arten nur unvollständig abdeckt.

Auch das festgestellte tageszeitliche Muster der Zugintensität entsprach weitgehend den Ergebnissen früherer Studien in der Region (JELLMANN 1977; ZEHNDER et al. 2001; FIJN et al. 2015). Der deutliche Anstieg der Zugintensität in den ersten zwei Stunden nach Sonnenuntergang sowie der Peak in der ersten Nachthälfte deuten darauf hin, dass die Mehrzahl der Nachtzieher um Sonnenuntergang von küstennahen Gebieten aus die Nord- und Ostsee überqueren. Diese Vermutung wird zudem durch die saisonalen und regionalen Unterschiede im nächtlichen Verlauf des Vogelzugs unterstützt (siehe Anhang A.2). Die Abnahme der Zugintensität im weiteren Verlauf der Nacht spricht zudem dafür, dass mit Fortschreiten der Nacht ein zunehmender Anteil der Vögel eine Querung der Meeresbereiche vermeidet. Ähnliches konnte auch an Küstenabschnitten des Mittelmeers festgestellt werden, an welchen der Anteil landwärts gerichteten Zugs im Verlauf der Nacht zunahm (FORTIN et al. 1999).

Der nächtliche Verlauf der Rufintensitäten wies artspezifisch z.T. deutliche Unterschiede zu diesem Muster auf. Im Gegensatz zur Zugintensität wies die Rufintensität der meisten Arten eine Zunahme im Verlauf der Nacht mit einem Maximum kurz vor Sonnenaufgang auf. Die Zugrufe nahmen dabei häufig erst nach Mitternacht deutlich zu (GRABER 1968; FARNSWORTH et al. 2004; HÜPPOP & HILGERLOH

2012). Es wurde vermutet, dass dieses Muster eine Abnahme der Flughöhe und die damit einhergehende zunehmende Detektionswahrscheinlichkeit der Rufe widerspiegelt. Ebenso könnte die Zunahme der Rufraten mit einer erhöhten Rufaktivität gegen Ende der Nacht im Zusammenhang stehen, wenn die Vögel auf der Suche nach einem geeigneten Rastplatz sind (HÜPPOP & HILGERLOH 2012).

Die relativ hohe räumliche Korrelation des nächtlichen Vogelzugs in der deutschen AWZ entsprach den Erwartungen eines Breitfrontenzugs. Die tatsächliche Korrelation des Nachtzugs lag dabei vermutlich höher als die Ergebnisse zeigen, da die oben diskutierten Faktoren wie Unterschiede zwischen den verwendeten Radargeräten, der beteiligten Büros oder des Entwicklungsstands der Windparks zusätzliche Varianz in den Daten verursachten. Die Stärke der Korrelation nahm in der Nordsee nur geringfügig und nur während des Herbstzugs mit zunehmender Distanz zwischen den Erfassungsstandorten ab. Das Zugmuster wies damit innerhalb der Deutschen Bucht eine hohe räumliche Konstanz auf. Die deutlich geringere Korrelation des Zugeschehens zwischen Nord- und Ostsee weist jedoch auf regionale Unterschiede und eine räumliche Begrenzung der Zugmuster hin.

Im Gegensatz dazu zeigten die Rufintensitäten höhere räumliche Variation. Die meisten Arten wiesen eine teils deutliche Abnahme der Stärke der Korrelation mit zunehmender Entfernung zwischen den Erfassungsstandorten auf. Die lokalen Verhältnisse z.B. bezüglich der Sichtweite, des Bedeckungsgrads oder des Niederschlags spielen bei den Flugrufen vermutlich eine größere Rolle (FARNSWORTH 2005; HÜPPOP & HILGERLOH 2012; HORTON et al. 2015). Diese Faktoren haben Auswirkungen auf die Rufaktivität der Vögel sowie auf die Flughöhe und tragen somit zu einer höheren räumlichen Variation der Rufintensitäten bei. Dies erklärt vermutlich auch die insgesamt höhere räumliche Korrelation der Zugintensitäten im Vergleich zu den Rufraten (siehe auch Anhang A.1).

Eine Definition von Massenzug oder Starkzugereignissen anhand der Verteilung der Daten gelang weder für die Zugintensitäten noch für die Flugrufraten. In beiden Fällen gab es keine Anzeichen von bimodaler oder multimodaler Verteilung, so dass kein empirischer Schwellenwert für eine Definition der Begriffe festgelegt werden konnte. Für eine Definition von Massenzug, wie beispielsweise in der Nebenbestimmung 21 der Genehmigungen deutscher Offshore-Windparks, müssen daher andere Erwägungen als die reine Verteilung der Daten herangezogen werden. Die für diese Studie verwendeten Schwellenwerte wurden primär auf Basis der Eignung für die weiteren Analysen gewählt und sind nicht als Vorschläge für eine generelle Definition dieser Begriffe zu sehen.

Abweichend von den Ergebnissen zur räumlichen Korrelation der Zugintensität nahm die Wahrscheinlichkeit, ein Starkzugereignis an zwei Standorten gleichzeitig zu erfassen, mit zunehmender Entfernung der Standorte ab. Dies würde bedeuten, dass Stark- oder Massenzug trotz Breitfrontenzugs häufig nur lokal auftritt. Einschränkend muss hier jedoch beachtet werden, dass in der Nordsee ein Gradient der Zugintensität mit zunehmender Entfernung zur Küste vorliegt (siehe Kap. 4.1.2). Bei Verwendung eines konstanten Schwellenwerts kann somit die Entfernung zur Küste eine wichtige Rolle dabei spielen, ob dieser überschritten wird.

Die Gesamtzahl der Nachtzieher, die jährlich die westliche Ostsee queren, wurde deutlich höher geschätzt, als die Zahl der die Nordsee überfliegenden Vögel (OREJAS et al. 2005; BELLEBAUM et al. 2010; BSH 2014, 2015). Daher sollte die Zugintensität an den Standorten der Ostsee im Mittel höher liegen als in der Nordsee. Die zusammenfassende Analyse sowohl der Zugintensität als auch der Rufraten (mit Ausnahme der Limikolen) bestätigte dies. Eine detaillierte Betrachtung der Zugintensitäten zeigte jedoch saisonale Unterschiede, die den regionalen Unterschieden im zeitlichen Muster der Zugeschehens entsprachen. So lagen zu Beginn des Frühjahrs- und zum Ende des

Herbstzugs die Zugintensitäten entgegen des generellen Trends in der Nordsee höher als in der Ostsee. Trotz der insgesamt höheren Zugintensität in der Ostsee ist somit in einzelnen Zeitabschnitten mit höherer Zugaktivität in der Nordsee zu rechnen.

Die Analyse der Radardaten ergab eindeutige Hinweise auf einen Gradienten der Zugintensität in Abhängigkeit der Entfernung zur Küste in der Nordsee. Ein solcher Gradient abnehmender Zugintensität mit zunehmender Küstenentfernung wurde für verschiedene tagziehende Arten bereits gezeigt (HÜPPOP et al. 2009) und für den Nachtzug häufig postuliert. Die vorliegenden Daten dieser Studie zeigen einen solchen Gradienten für den inneren Teil der Deutschen Bucht. Die maximale Entfernung unserer Standorte zur Küste belief sich auf etwa 110 km. Ob der festgestellte Gradient auch im äußeren Teil der AWZ der Nordsee Bestand hat, bleibt weiterhin ungeklärt.

Auch die Ergebnisse der Flugrufe deuteten mehrheitlich auf einen Gradienten mit der Entfernung zur Küste hin. Hier gab es jedoch auch Ausnahmen. Vor allem die Rufintensitäten der Drosseln nahmen im Frühjahr mit zunehmender Küstenentfernung zu. Diese Daten deuten darauf hin, dass möglicherweise art- und seasonspezifische Unterschiede des Gradienten bestehen.

Die Flughöhe ist ein wesentlicher Faktor bei der Abschätzung des Kollisionsrisikos von Nachtzehlern auf See. Insgesamt lag der Anteil Flugbewegungen unter 200 m Höhe in unserem Datensatz bei etwa 35 %. Dieser Wert stellt einerseits eine Überschätzung dar, da der Vogelzug nur bis in 1.000 m Höhe erfasst wurde, und, wie oben dargelegt, ein Teil des Vogelzugs sich in größeren Höhen abspielt. Andererseits ist aufgrund von Seaclutter die Detektionswahrscheinlichkeit niedrig fliegender Vögel durch die Radargeräte vermindert; ein Faktor, der zur Unterschätzung des Anteils des Vogelzugs in geringen Höhen führt. Frühere Studien im Bereich der Nord- und Ostsee schätzten den Anteil der Flugbewegungen in Höhen bis 200 m zwischen 25-50 %, wobei hier auch teilweise der Vogelzug bis in großen Höhen erfasst wurde (ZEHNDER et al. 2001; OREJAS et al. 2005; HÜPPOP et al. 2006; BELLEBAUM et al. 2010; SCHULZ et al. 2013; BRUDERER et al. 2018). Nachtzieher scheinen demnach insbesondere über offener See niedrige Flughöhen zu präferieren. Dies trifft offenbar auch zu, wenn optimale Wetterbedingungen in größeren Höhen vorherrschen (KEMP et al. 2013). Der Zeit- und Energieaufwand zum Erreichen größerer Höhen (LIECHTI et al. 2000), höherer Wasserverlust (KLAASSEN 2004) sowie der geringere Partialdruck von Sauerstoff und eine Abnahme des Auftriebs (PENNYCUICK 2008) wurden als Gründe für dieses Flugverhalten herangezogen.

Die mittlere Flughöhe war stark positiv mit der mittleren Zugintensität korreliert. In Zeitabschnitten hoher Zugintensität flogen die Vögel demnach im Mittel höher. Grund hierfür ist vermutlich, dass Flughöhe und Zugintensität zumindest teilweise von den gleichen Faktoren beeinflusst werden und beide insbesondere bei günstigen Wetterbedingungen zunehmen. Trotz dieses positiven Zusammenhangs zwischen Flughöhe und Zugintensität verlief jedoch der insgesamt größte Anteil des Vogelzugs in den unteren Höhenbereichen.

Im Frühjahr verlief der Nachtzug über der Nordsee in Mittel in höheren Luftschichten als im Herbst (EASTWOOD & RIDER 1965; JELLMANN 1989; OREJAS et al. 2005). Hierfür könnten insbesondere die Windverhältnisse verantwortlich sein (DOKTER et al. 2013; SHAMOUN-BARANES et al. 2017; BRUDERER et al. 2018). Mit den häufig vorherrschenden südwestlichen bis westlichen Winden im Untersuchungsraum treten im Frühjahr häufiger Rückenwind Situationen für die Vögel auf als im Herbst. Bei Rückenwind findet der Vogelzug in der Regel in größeren Höhen statt als bei Gegenwind (BRUDERER et al. 2018). So konnten DOKTER et al. (2013) zeigen, dass für den Nachtzug optimale Windverhältnisse in größeren Höhen in Mitteleuropa fast ausschließlich im Frühjahr auftreten. In der Ostsee hingegen wurde kein vergleichbares Muster gefunden. Konkrete Hinweise auf größere Flughöhen

im Frühjahr im Offshore-Bereich der Ostsee finden sich auch in früheren Untersuchungen nicht (HÜPPOP et al. 2004; BELLEBAUM et al. 2010; IFAÖ 2010; FEBI 2013; SCHULZ et al. 2013). Eine Ursache für die möglichen regionalen Unterschiede ist bisher nicht bekannt.

Die Flughöhe variierte darüber hinaus systematisch im Verlauf der Nacht. In Übereinstimmung früherer Ergebnisse war die Flughöhe zu Beginn der Nacht am höchsten und nahm im Nachtverlauf deutlich ab (BRUDERER & LIECHTI 1998; FORTIN et al. 1999; ZEHNDER et al. 2001; HÜPPOP et al. 2004). Nachtzieher steigen in der Regel zu Beginn der Nacht in den bevorzugten Höhenbereich auf (BRUDERER et al. 1995; ZEHNDER et al. 2001). Die nachfolgende Abnahme der Flughöhe entspricht einer gleichzeitigen Abnahme der Zugintensität (FORTIN et al. 1999; ZEHNDER et al. 2001; HÜPPOP et al. 2004, 2009; KEMP 2012). Da die Mehrzahl der Nachtzieher kurz nach Sonnenuntergang von ihren Rastplätzen aufbrechen deutet dies darauf hin, dass die Vögel häufig nur eine begrenzte Zeit pro Nacht ziehen. Die Abnahme der mittleren Flughöhe könnte demnach Folge eines zunehmenden Anteils Vögel auf der Suche nach einem geeigneten Rastplatz sein.

Auf Grundlage der berechneten Zugintensitäten sowie der räumlichen Ausdehnung der einzelnen Windparks in der deutschen AWZ schätzten wir die Gesamtzahl der Flugbewegungen, die jährlich zu den Zugzeiten in den Projektgebieten der Windparks auftraten. Dies ist vermutlich ein konservativer Schätzwert, da davon ausgegangen werden muss, dass auch im Entfernungsbereich der höchsten Detektionswahrscheinlichkeit nicht alle Vögel von den Schiffsradargeräten erfasst wurden und weitere Faktoren bei der Detektion eine Rolle spielen (BRUDERER 1997; SCHMALJOHANN et al. 2008). Beim Tagzug kommt hinzu, dass die entsprechenden Arten häufiger als Nachtzieher in Trupps fliegen, die das Radargerät in Abhängigkeit des Abstands der Einzelvögel nur als ein Signal darstellt. Zudem ist tagsüber mit einem höheren Anteil Flugbewegungen von lokalen Nahrungsgästen zu rechnen, so dass die Zahlen hier nicht ausschließlich den Vogelzug widerspiegeln.

Vor dem Hintergrund dieser Unsicherheiten sind die geschätzten 24,3 Millionen Flugbewegungen auf Rotorhöhe in den jährlichen Zugzeiten in den Windparks der deutschen AWZ als grober Schätzwert einzuordnen. Weitere Schätzwerte für den Offshore-Bereich liegen bislang nur von FIJN et al. (2015) von einem niederländischen Windpark vor. Für ein ganzes Kalenderjahr und einen einzelnen Windpark wurden hier 1,6 Millionen Flugbewegungen auf Rotorhöhe geschätzt. Aufgrund zahlreicher methodischer Unterschiede ist diese Zahl nicht direkt mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie vergleichbar. Nichtsdestotrotz zeigen die Daten beider Untersuchungen, dass die Anzahl Flugbewegungen in Offshore-Windparks im Bereich der Nord- und Ostsee in der Größenordnung von Millionen liegt.

5.3 Wettereinfluss und Prognose von Starkzugereignissen

Wir verwendeten Random Forest-Modelle zur Ermittlung des Zusammenhangs von meteorologischen Parametern und der Zug- bzw. Rufintensität. Diese Modellfamilie war hierfür besonders geeignet, da sie im Gegensatz zu GLM- oder GAM-Modellen keine Bedingungen an die Verteilung und Varianz der Daten stellt und sehr gut nicht-lineare Zusammenhänge erfassen kann. Zudem sind RF-Modelle in der Regel weniger empfindlich hinsichtlich miteinander korrelierter Variablen und neigen weniger zu Überanpassungen (BREIMAN 2001; ARCHER & KIMES 2008). Aufgrund des großen uns zur Verfügung stehenden Datensatzes zeigten die Modelle häufig klare Zusammenhänge zwischen den einzelnen Wetter- und Zeitparametern und der Zugintensität und in vielen Fällen auch der Flughöhe und Rufintensität.

Wetter- und Zeitvariablen erklärten so mehr als 70 % der Varianz der nächtlichen Zugintensitäten, zusammen mit weiteren faktoriellen Variablen stieg dieser Prozentsatz auf etwa 80 %. Vergleichbar hohe Werte wurden auch in anderen Studien erreicht (ZEHNDER et al. 2001; ERNI et al. 2002; VAN BELLE et al. 2007; VAN DOREN & HORTON 2018), was den großen Einfluss des Wetters auf das Zugverhalten unterstreicht. Die Performance der RF-Modelle hinsichtlich der Rufintensitäten war artspezifisch stark unterschiedlich. Während für einige Arten ein hoher Anteil der Varianz der Rufraten durch die Modelle erklärt werden konnte (z.B. Drosseln, Rotkehlchen), blieb bei anderen Arten der Großteil der Varianz unerklärt (z.B. Limikolen, Wiesenpieper). Bei diesen Arten blieben offensichtlich wichtige Faktoren in den Modellen unberücksichtigt. Hierbei könnte insbesondere die Flughöhe eine wichtige Rolle spielen.

Auch die Varianz der Flughöhe konnte durch die Wetter- und Zeitparameter weniger gut erklärt werden als die der Zugintensität. Die von uns verwendeten Wetterdaten lagen nur für den bodennahen Höhenbereich vor. Insbesondere die Windrichtung und -stärke kann jedoch in verschiedenen Höhenbereichen teils deutlich von den Windbedingungen in Bodennähe abweichen. Die Integration höhenpezifischer Wetterinformationen könnte demnach zu einer verbesserten Performance der Flughöhenmodelle führen. Zudem wurden zur Gewährleistung stabiler Mittelwerte nur Projektstunden in der Analyse berücksichtigt, in welchen mindestens 10 Radarrohre signale aufgezeichnet wurden. Dadurch wurden Stunden mit geringen Zugintensitäten ausgeschlossen, was zu einer gewissen Verzerrung der Datengrundlage führte. Ferner wurden, wie bereits diskutiert, die Flughöhen nur bis in 1.000 m Höhe registriert. Somit blieb ein variabler Teil des Vogelzugs unberücksichtigt mit entsprechenden Auswirkungen auf die berechneten mittleren Flughöhen und die darauf basierenden Modelle.

Von den untersuchten Wetterparametern war die Rückenwind-Komponente insgesamt die Variable mit dem größten Einfluss auf die Zugintensität (siehe auch ALERSTAM 1979; RICHARDSON 1990; LIECHTI & BRUDERER 1998; ERNI et al. 2002; VAN BELLE et al. 2007). Sowohl im Frühjahr als auch im Herbst war eine deutliche Zunahme der Zugintensität mit zunehmendem Rückenwind festzustellen. Auch die Häufigkeit der Zugrufe zeigte in den meisten Fällen ein ähnliches Muster. Der Vergleich zwischen Frühjahr und Herbst zeigte, dass die Vögel im Herbst vermehrt auch moderaten Gegenwind akzeptieren; im Frühjahr lag eine noch deutlichere Priorisierung von Rückenwindssituationen vor. Aufgrund der Dominanz südwestlicher Winde im Untersuchungsraum herrschen für Zugvögel im Frühjahr häufiger Rückenwindverhältnisse vor als im Herbst. Die zusätzlichen Kosten für die Vögel, im Herbst auf günstige Windverhältnisse zu warten, könnten die Kosten, bei moderaten Gegenwind den Zug fortzusetzen, übersteigen, und somit den festgestellten saisonalen Unterschied hervorrufen (KARLSSON et al. 2011; HÜPPOP & HILGERLOH 2012).

Die Seitenwind-Komponente hatte insgesamt einen geringeren Effekt auf die Zug- und Rufintensität als die Rückenwind-Komponente. Vor allem im Frühjahr nahmen die Zugintensitäten bei ablandigem Wind deutlich zu. Dies deutet auf einen Verdriftungseffekt hin, der vermutlich beim Nachtzug eine größere Rolle spielt als beim Tagzug (LIECHTI 2006). Einen ähnlichen Effekt zeigten die Modelle der Rufintensität auch für den Herbstzug; für die Zugintensität war im Herbst kein deutliches Muster hinsichtlich der Seitenwind-Komponente zu verzeichnen. Darüber hinaus zeigten die Frühjahrsmodelle eine deutliche Wechselwirkung zwischen der Rücken- und Seitenwind-Komponente. So traten die höchsten Zugintensitäten bei gleichzeitigem Auftreten hoher TWC- und ablandiger CWC-Werte auf. Dies entspricht südlichen Winden. Hohe TWC-Werte bei landwärts gerichteter CWC-Komponente resultierten hingegen in wesentlich geringeren Zugintensitäten. Somit scheint im Frühjahr eine Kombination aus Windunterstützung und Verdriftung zu den höchsten Zugintensitäten im Offshore-Bereich zu führen.

Eine korrekte Berechnung der Windkomponenten hängt wesentlich von der Annahme der Flugrichtung der Vögel ab. Wir sind hier sowohl bei der Analyse der Zugintensitäten als auch der Rufraten von nordöstlich (45°; Frühjahr) bzw. südwestlich (225°; Herbst) gerichtetem Zug ausgegangen. Genauere Informationen zur tatsächlichen Flugrichtung des Vogelzugs bzw. der einzelnen Arten, die von diesen angenommenen Werten abweichen können, könnte zu einer weiteren Verbesserung der Modelle führen.

Die weiteren Modellergebnisse zeigten, dass Nachtzieher im Untersuchungsgebiet in der Regel hohen Luftdruck und geringe Luftfeuchtigkeit bevorzugten, d.h. Bedingungen, die meist mit guter Sicht, moderatem Wind und fehlendem Niederschlag verbunden sind. Diese Ergebnisse sind weitgehend im Einklang mit früheren Studien (ZEHNDER et al. 2001; ERNI et al. 2002; VAN BELLE et al. 2007; VAN DOREN & HORTON 2018). Der Bedeckungsgrad spielte bei den Rufintensitäten artübergreifend eine wichtige Rolle. Dabei traten saisonale Unterschiede auf. Der U-förmige Zusammenhang im Herbst deutete auf erhöhte Rufintensitäten bei starker Bewölkung sowie bei sehr geringer Bedeckung hin. Ein wolkenfreier Himmel verbessert die Orientierungsmöglichkeiten der Nachtzieher und erhöht somit die Zugaktivität (BERTHOLD 2000). Eingeschränkte Sichtverhältnisse führen hingegen häufig zu einer Abnahme der Flughöhe und damit zu einer erhöhten Erfassungswahrscheinlichkeit der Rufe. Zudem kann schlechte Sicht zu einem erhöhten Anlockungseffekt durch die Beleuchtung der Schiffe und Plattformen bzw. Windturbinen führen, so dass die Vögel überproportional häufig von diesen aus registriert werden können (EVANS OGDEN 1996; KERLINGER et al. 2010; VAN DOREN et al. 2017). Auf dem Frühjahrszug waren hingegen die höchsten Rufintensitäten bei hohem Bedeckungsgrad zu verzeichnen, wolkenarme Bedingungen führten nicht zu einer Zunahme der Rufraten. Hier spielt möglicherweise die höhere Flughöhe im Frühjahr eine Rolle, die dazu führen kann, dass der Vogelzug weitgehend außerhalb der Hörweite der Erfasser stattfindet.

Die Lufttemperatur hatte nur einen eingeschränkten Effekt auf die Zugintensitäten. Im Frühjahr nahm die Zugintensität v.a. ab Temperaturen von etwa 6°C zu, im Herbst wurde eine Zunahme mit fallenden Temperaturen verzeichnet. Der insgesamt relativ geringe Einfluss der Temperatur auf die Zugintensität könnte damit zusammenhängen, dass die Temperatur zwar einen wichtigen Faktor hinsichtlich der generellen Zugdisposition der Vögel darstellt, aber möglicherweise nur einen geringen Effekt auf die Entscheidung hat, den Zug in einer gegebenen Nacht forstzusetzen (BERTHOLD 2000). Auch in anderen lokalen Studien wurde ein nur geringer Effekt der Lufttemperatur festgestellt (ZEHNDER et al. 2001; VAN BELLE et al. 2007).

Eine weitere Ursache hierfür könnte sein, dass artspezifische Effekte vorliegen und somit bei einer Gesamtbetrachtung des Vogelzugs durch Radaruntersuchungen nicht festgestellt werden können. So zeigte die Lufttemperatur bei den Modellen zur Rufintensität in vielen Fällen einen größeren Effekt, der zudem artspezifische Unterschiede aufwies. Des Weiteren zeigte sich oftmals, dass der Effekt der Temperatur in Abhängigkeit zum Julianischen Tag stand. So waren häufig hohe Temperaturen zu Beginn der Frühjahrssaison mit hohen Zugintensitäten verbunden, nicht jedoch am Ende der Saison. Im Herbst lösten tiefe Temperaturen in der ersten Hälfte der Saison höhere Zugintensitäten aus, während gegen Ende der Saison hohe Zugintensitäten primär bei hohen Temperaturen auftraten. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit einer Reihe von Studien, die einen Effekt der Lufttemperatur auf die Phänologie vieler Zugvogelarten insbesondere im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung festgestellt haben (HÜPPPOP & HÜPPPOP 2003; LEHIKONEN et al. 2004; JONZÉN et al. 2006).

Mit etwa 40 % erklärter Varianz war die Performance der Vorhersagemodelle der nächtlichen Zugintensität auf Basis von Wetter- und Zeitvariablen geringer als die der Modelle zur stündlichen

Zugintensität. Nichtsdestotrotz konnte eine hohe Korrelation zwischen prognostizierten und tatsächlich gemessenen Zugintensitäten erreicht werden. Eine höhere Standardisierung insbesondere der Erfassungsmethodik könnte hier vermutlich noch zu verbesserten Ergebnissen führen. Zudem wurden hier die Zugraten bis in 200 m Höhe betrachtet, was eine weitere Einschränkung der Modelle bedeutete.

In Übereinstimmung mit vorherigen Studien tendierten unsere Vorhersagemodelle dazu, hohe Zugintensitäten zu unterschätzen (VAN BELLE et al. 2007; VAN DOREN & HORTON 2018). Dieses wiederkehrende Muster weist darauf hin, dass ein wichtiger Faktor, der besonders hohe Zugintensitäten auslöst, bisher nicht oder unzureichend berücksichtigt wurde.

Die Unterschätzung hoher Zugraten verursachte ohne weitere Korrekturen eine relativ geringe Genauigkeit bei der Vorhersage von Starkzugereignissen. Das Optimieren des Schwellenwerts für die Vorhersagen (Maximierung von Cohen's Kappa (COHEN 1960)) führte jedoch zu einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von etwa 30-60 % auf etwa 85 %. Dies bedeutet, dass ausschließlich auf Basis von Wetter- und Zeitparametern in 85 % der Fälle korrekt vorhergesagt wurde, wenn die Zugintensität 250 MTR überschritt. Gleichzeitig betrug die Rate der „false positives“, also der Fälle, in denen das Modell ein Starkzugereignis prognostiziert, die gemessene Zugintensität den Schwellenwert jedoch nicht überschritt, nur 11-13 %. Bei einer Anwendung des Vorhersagemodells müsste jedoch berücksichtigt werden, dass die Genauigkeit der Vorhersage durch die Ungenauigkeit der Wettervorhersage beeinflusst werden würde.

5.4 Kollisionsmodelle und kumulatives Kollisionsrisiko

Im Rahmen dieser Studie wurde erstmals der Versuch unternommen, die kumulative Anzahl an Kollisionen von Nachtziehern an deutschen Offshore-Windparks abzuschätzen. Obwohl die Gefährdung des Vogelzugs ein möglicher Versagensgrund für die Genehmigung eines Windparks in der deutschen AWZ darstellt, ist über das direkte Kollisionsrisiko sowie mögliche Auswirkungen auf Populationsebene von nachts ziehenden Vögeln wenig bekannt. Dieser Umstand liegt primär darin begründet, dass es im Offshore-Bereich logistisch und technisch bisher nicht möglich ist, entweder systematische Kollisionsopfersuchen durchzuführen oder Kollisionen direkt zu erfassen. Die Modellierung des Kollisionsrisikos ist somit die einzige Möglichkeit, Abschätzungen von Kollisionszahlen vorzunehmen.

Das SOSS Band-Modell ist dabei das am häufigsten angewendete, mechanistische Kollisionsmodell (BAND 2000, 2012; MASDEN & COOK 2016). Trotz der weitverbreitenden Anwendung des Modells ist jedoch zu beachten, dass eine Validierung der Modellergebnisse im Offshore-Bereich bislang nicht erfolgen kann. Auch die Versuche, das Modell im Onshore-Bereich zu validieren, haben unterschiedliche Ergebnisse erbracht (DE LUCAS et al. 2008; FERRER et al. 2012; EVERAERT 2014; GRÜNKORN et al. 2016; KLEYHEEG-HARTMAN et al. 2018). Hinzu kommt, dass die Modellergebnisse in hohem Maße von den Eingangsparametern abhängig sind und in der Regel eine hohe Unsicherheit hinsichtlich dieser Parameter besteht.

Frühere Sensitivitätsanalysen haben die Variablen Rotordurchmesser und Rotationsgeschwindigkeit sowie die Fluggeschwindigkeit der Vögel als Schlüsselparameter für die Bestimmung des Kollisionsrisikos unabhängig vom Meideverhalten identifiziert (CHAMBERLAIN et al. 2006; MASDEN 2015). In Übereinstimmung mit den Ergebnissen unserer Studie jedoch führten Änderungen dieser Parameter von $\pm 10\%$ in der Regel zu Änderungen der geschätzten Kollisionszahl von weit unter 10 %

(MASDEN 2015). Unsere Sensitivitätsanalyse zeigte, dass der Anteil Gegenwind-Flüge, ein Parameter mit einem hohen Grad der Unsicherheit, einen größeren Einfluss als 10 % auf die Modellergebnisse haben könnte. Im Fall von lokalen Flugbewegungen von Vögeln wird in der Regel von einem Anteil von 50 % Gegenwind-Flügen ausgegangen. Für Zugvögel hingegen, die vornehmlich gerichtet fliegen und zudem Rückenwindverhältnisse präferieren, ist wahrscheinlich ein geringerer Anteil Gegenwind-Flugbewegungen zutreffend. Dementsprechend verwendeten wir einen Anteil von 30 % in unseren Modellen. Da der einzige bislang publizierte Schätzwert für den Offshore-Bereich bei nur 7,9 % liegt (SCHULZ et al. 2014), war dies ein konservativer Ansatz. Die Wahl eines Anteils von 7,9 % hätte im Vergleich zu den verwendeten 30 % zu etwa 15 % geringeren Kollisionsopferzahlen geführt.

Alle von uns gewählten Werte der Eingangsparameter unterlagen einem gewissen Maß an Unsicherheit. Hinzu kommt, dass alle Parameter zudem eine natürliche Variationsspanne aufweisen, über die jedoch wenige Daten vorliegen. Die stochastische Version des Band-Modells (MCGREGOR et al. 2018) erlaubt die Inkorporation der Unsicherheit bzw. Variationsbreite der Eingangsparameter, die dann bei der Modellierung berücksichtigt werden kann und die Angabe eines Konfidenzintervalls der geschätzten Kollisionen ermöglicht. Um ein aussagekräftiges Konfidenzintervall zu erhalten ist es jedoch erforderlich, dass konkrete Werte für den Unsicherheitsbereich bzw. eine Standardabweichung der natürlichen Variationsbreite der Eingangsparameter vorliegen. Dies war in der vorliegenden Studie nicht der Fall. Daher wurde hier die ursprüngliche, deterministische Version des Modells angewendet und über die Sensitivitätsanalyse eine Abschätzung der möglichen Variationsbreite der Modellergebnisse vorgenommen.

Die in den Modellen verwendeten vogelbezogenen Eingangsparameter beruhten auf vorliegenden Informationen zu Arten bzw. Artgruppen, die als häufige Nachtzieher im Untersuchungsraum bekannt sind. Unberücksichtigt blieb jedoch die Tatsache, dass sich die Artzusammensetzung im Laufe einer Zugsaison systematisch ändert. Da die Sensitivitätsanalyse jedoch ergab, dass Variation dieser Parameter nur geringen Einfluss auf die Modellergebnisse hat, ist dieser Effekt als gering einzustufen. Hinsichtlich der turbinenbezogenen Parameter zeigte die Sensitivitätsanalyse bei Rotationsgeschwindigkeit und Anstellwinkel nur geringe Auswirkungen. Die angenommene monatliche Laufzeit der Turbinen hat hingegen einen potenziell großen, streng proportionalen Einfluss auf die geschätzten Kollisionszahlen. Wir verwendeten auf Grundlage der uns vorliegenden Informationen für alle Monate gleichbleibend eine Betriebszeit von 92,5 %. Es ist jedoch offensichtlich, dass die Laufzeit sowohl jährlich als auch saisonal Schwankungen unterworfen ist und zudem von geplanten Wartungsarbeiten abhängt, die zwischen den einzelnen Windparks variiert. So ist die Laufzeit in den windärmeren Monaten Mai, Juli und August wahrscheinlich im Mittel geringer, in den Monaten März, Oktober und November vermutlich durchschnittlich höher als in der Modellierung angenommen. Insgesamt erscheint es jedoch unwahrscheinlich, dass der Effekt auf die geschätzten Kollisionen ein Ausmaß von 10 % übersteigt.

Der Eingangsparameter mit dem bei Weitem höchsten Einfluss auf die Modellergebnisse war die angenommene Meiderate (CHAMBERLAIN et al. 2006; MASDEN 2015; COOK et al. 2018; KLEYHEEGHARTMAN et al. 2018). Informationen zum Meideverhalten von Nachtziehern an Offshore-Windparks liegen jedoch nur sehr wenige vor. Auf Grundlage von radar- und kameragestützten Daten schätzten SCHULZ et al. (2014) eine Meiderate innerhalb des Windparks von 0,956 – 0,980. Dieser Schätzwert beinhaltet keine großräumigen Ausweichbewegungen (Macro-Avoidance). Da die Autoren in ihrer Studie Hinweise auf eine Attraktionswirkung des Windparks auf Nachtzieher feststellten, hätte die Inkorporation der Macro-Avoidance insgesamt zu geringeren Meideraten geführt. KRIJGSVELD et al. (2011) schätzten auf Basis von Radaruntersuchungen in einem niederländischen

Windpark eine Meiderate von 0,976 für Tag- und Nachtzieher. Unter Berücksichtigung ihrer festgestellten Macro-Avoidance-Rate von 0,28 würde dies insgesamt zu einer Meiderate von über 0,98 führen. Im Vergleich zu aktuellen Schätzungen der Meidereaktion von Seevögeln, die zwischen 0,989 und 0,999 variieren (COOK et al. 2018; SKOV et al. 2018), deutet dies darauf hin, dass die Meidereaktion von nachts ziehenden Vögeln geringer sein könnte.

Aufgrund der hohen Unsicherheit des tatsächlichen Meideverhaltens der Nachtzieher sowie des großen Effekts der angenommenen Meiderate auf die Modellergebnisse, wurden alle Modelle mit drei unterschiedlichen Meideraten (0,956; 0,980; 0,990) berechnet und die entsprechenden Ergebnisse dargestellt. Eine angenommene Meiderate von 0,980 reduziert die geschätzte Kollisionszahl um 55 % im Vergleich zu einer Meiderate von 0,956. Die Annahme einer Meiderate von 0,990 halbiert die modellierten Kollisionen noch einmal. Dieser starke Effekt der Meiderate auf das Ergebnis verdeutlicht die Notwendigkeit eines besseren Verständnisses des Meideverhaltens von nachts ziehenden Vögeln an Windturbinen, um eine realistische Abschätzung des Kollisionsrisikos vornehmen zu können. Es verdeutlicht darüber hinaus, dass die in dieser Studie angegebenen Kollisionszahlen ohne weitere Validierung lediglich Richtwerte darstellen.

Ein potenziell wichtiger Faktor, der bei der Modellierung des Kollisionsrisikos nicht berücksichtigt werden kann, ist der Einfluss des Wetters auf das Verhalten der Vögel. Es wird allgemein angenommen, dass insbesondere unter ungünstigen Wetterbedingungen wie Nebel, Niederschlag oder starkem Gegenwind das Kollisionsrisiko auf See erhöht ist. Dies hängt damit zusammen, dass die Vögel unter diesen Bedingungen häufig in niedrige Höhenbereiche ausweichen und von der Beleuchtung der Anlagen angezogen werden können (AVERY et al. 1977; EVANS OGDEN 1996; HÜPPOP et al. 2006; AUMÜLLER et al. 2011). Hinzu kommt, dass die Vögel auf See den Zug bei schlechtem Wetter nicht unterbrechen können. Unter solchen Bedingungen kann das Meideverhalten und damit das Kollisionsrisiko erheblich von „Normalsituationen“ abweichen.

Da die Zugvögel ungünstige Wetterbedingungen generell meiden, ist zu vermuten, dass starker Vogelzug und schlechtes Wetter nur selten zeitlich zusammenfallen. Solche Situationen treten vermutlich v.a. dann auf, wenn die Vögel ihren Zug bei günstigen Wetterbedingungen beginnen, auf See aber unerwartet ungünstige Bedingungen antreffen und dabei gezwungen sind, den Zug fortzusetzen. Unser umfangreicher Datensatz bestätigte, dass hohe Zugintensitäten nur selten bei ungünstigen Wetterbedingungen im Untersuchungsraum auftraten (siehe Anhang A.3). Moderate Schwellenwerte für hohe Zugintensität und ungünstiges Wetter ergaben eine Überlappung in etwa 0,3 % der Zeit, was etwa 8 Stunden pro Jahr entspricht.

Inwieweit diese kurzen Zeiträume einen wesentlichen Einfluss auf die jährliche Anzahl Kollisionen haben, hängt im Wesentlichen vom Verhalten der Vögel in diesen Perioden ab. Für einen starken Effekt wäre jedoch eine starke Anlockwirkung bzw. eine sehr niedrige Meidereaktion der Vögel notwendig. Da diese Situationen gerade in Bezug auf mögliche Vermeidungsmaßnahmen eine wichtige Rolle spielen könnten, wäre es wichtig, detaillierte Informationen zum Verhalten der Vögel in dieser Hinsicht zu bekommen.

Unter Voraussetzung einer Meiderate von 0,956 ergaben unsere Modelle eine kumulative Kollisionszahl von Nachtziehern an Windparks in der deutschen AWZ von etwa 35.000. Im Verhältnis zur geschätzten Gesamtzahl der die Nord- und Ostsee querenden Zugvögel ergäbe dies einen jährlichen Anteil von etwa 0,03 % (Nordsee) bzw. 0,002 % (Ostsee). Bei Annahme einer höheren Meiderate ist dieser Anteil entsprechend geringer. Es ist jedoch ausdrücklich zu beachten, dass sowohl die Gesamtzahl der den Untersuchungsraum querenden Nachtzieher als auch die Anzahl Kollisionen

Schätzwerte mit großem Unsicherheitsbereich darstellen. Nichtsdestotrotz legen die Zahlen nahe, dass ein negativer Effekt der Kollisionen an deutschen Offshore-Windparks auf die Population der meisten Nachtzieher unwahrscheinlich ist. Neben verbesserten Schätzwerten zur Gesamtzahl der Nachtzieher und der Kollisionsanzahl sind Populationsmodelle zum Effekt der zusätzlichen Mortalität an Offshore-Turbinen notwendig, um diesen vorläufigen Rückschluss zu erhärten.

Die Konzentration des Großteils des Vogelzugs auf relativ kurze Zeiträume in einer Saison bedingt auch eine zeitliche Konzentration der prognostizierten Kollisionen. In dieser Studie wurde der Anteil Kollisionen berechnet, die in Zeiträumen stattfinden, in welchen die Zugintensität eine Reihe von Schwellenwerten überschreitet. Diese Zahlen ermöglichen die Abschätzung der Effektivität potenzieller Vermeidungs- bzw. Minderungsmaßnahmen, wie z.B. Turbinenabschaltungen.

Anhand der Modellierungen findet die Hälfte aller Kollisionen statt, wenn die Zugintensität im Höhenbereich bis 200 m den Wert von 250 MTR übersteigt. Dies ist im Mittel in etwa 4 % der Nachtstunden bzw. etwa 90 Stunden pro Jahr der Fall. Unter der Voraussetzung der zahlreichen Annahmen der Modellrechnungen bedeutet dies, dass bei einer zielgenauen Abschaltung der Turbinen in 90 Stunden etwa die Hälfte der Kollisionen vermieden werden könnten. Bei einem Schwellenwert von 500 MTR würde diese Abschaltzeit auf im Mittel etwa 40 h pro Jahr reduziert, in welchen theoretisch etwa 26,7 % der Kollisionen stattfinden.

Neben den oben erwähnten Annahmen der Modelle, setzen diese Berechnungen voraus, dass sich die Anzahl Kollisionen proportional zur Zahl der die Windparks querenden Zugvögel verhält. Wie oben beschrieben bleiben dabei potenzielle Änderungen des Meideverhaltens, z.B. in Reaktion auf die Wetterverhältnisse, unberücksichtigt. Sollten sich die Kollisionen hauptsächlich auf Zeiträume konzentrieren, in welchen hohe Zugintensitäten und ungünstiges Wetter zusammentreffen, könnten die potenziellen Abschaltzeiten zur Vermeidung eines gegebenen Anteils Kollisionen weiter reduziert werden.

6 LITERATUR

- ALERSTAM, T. (1979): Wind as selective agent in bird migration. *Ornis Scandinavica*, S: 76–93.
- ALERSTAM, T., ROSÉN, M., BÄCKMAN, J., ERICSON, P. G. & HELLGREN, O. (2007): Flight speeds among bird species: allometric and phylogenetic effects. *PLoS Biol* 5/8, S: e197.
- ARCHER, K. J. & KIMES, R. V. (2008): Empirical characterization of random forest variable importance measures. *Computational Statistics & Data Analysis* 52/4, S: 2249–2260.
- ASCHWANDEN, J., STARK, H., PETER, D., STEURI, T., SCHMID, B. & LIECHTI, F. (2018): Bird collisions at wind turbines in a mountainous area related to bird movement intensities measured by radar. *Biological Conservation* 220, S: 228–236.
- AUMÜLLER, R., BOOS, K., FREIENSTEIN, S., HILL, K. & HILL, R. (2011): Beschreibung eines Vogelschlagereignisses und seiner Ursachen an einer Forschungsplattform in der Deutschen Bucht. *Vogelwarte* 49, S: 9–16.
- AVERY, M., SPRINGER, P. F. & CASSEL, J. F. (1977): Weather influences on nocturnal bird mortality at a North Dakota tower. *The Wilson Bulletin* 89/2, S: 291–299.
- BAND, W. (2000): Windfarms and Birds: Calculating a theoretical collision risk assuming no avoiding action. *Guidance Notes Series. Scottish Natural Heritage*.
- BAND, B. (2012): Using a collision risk model to assess bird collision risks for offshore wind farms, Final Report. British Trust for Ornithology (BTO), Bureau Waardenburg bv, and University of St Andrews/The Nunnery, Thetford (GBR), S: 62.
- BELLEBAUM, J., GRIEGER, C., KLEIN, R., KÖPPEN, U., KUBE, J., NEUMANN, R., SCHULZ, A., SORDYL, H. & WENDELN, H. (2010): Ermittlung artbezogener Erheblichkeitsschwellen von Zugvögeln für das Seegebiet der südwestlichen Ostsee bezüglich der Gefährdung des Vogelzuges im Zusammenhang mit dem Kollisionsrisiko an Windenergieanlagen. Abschlussbericht, Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 0329948). IfAÖ, LUNG MV/Neu Broderstorf (DEU), S: 333.
- BERTHOLD, P. (2000): Vogelzug. Eine aktuelle Gesamtübersicht. (4., stark überarb. und erw. Aufl. Auflage). Wissenschaftliche Buchgesellschaft/Darmstadt, 280 Seiten. ISBN: 978-3-534-13656-8.
- BIRDLIFE INTERNATIONAL (2018): Species factsheet: *Phylloscopus trochilus*.
- BREIMAN, L. (2001): Random Forests. *Machine Learning* 45/1, S: 5–32.
- BRUDERER, B. (1997): The study of bird migration by radar. Part 1: The technical basis. *Naturwissenschaften* 84/1, S: 1–8.
- BRUDERER, B. & BOLDT, A. (2001): Flight characteristics of birds: I. Radar measurements of speeds. *ibis* 143, S: 178–204.
- BRUDERER, B. & LIECHTI, F. (1998): Intensität, Höhe und Richtung von Tag- und Nachtzug im Herbst über Südwestdeutschland. *Der Ornithologische Beobachter* 95, S: 113–128.
- BRUDERER, B., PETER, D. & KORNER-NIEVERGELT, F. (2018): Vertical distribution of bird migration between the Baltic Sea and the Sahara. *Journal of Ornithology* 159/2, S: 315–336.
- BRUDERER, B., UNDERHILL, L. & LIECHTI, F. (1995): Altitude choice by night migrants in a desert area predicted by meteorological factors. *Ibis* 137/1, S: 44–55.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (Hrsg.) - **BSH** (2007): Standard - Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK 3). Hamburg & Rostock (DEU), 58 Seiten.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (Hrsg.) - **BSH** (2013): Standard - Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK 4), (Hrsg. BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE). Hamburg & Rostock (DEU).
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (Hrsg.) - **BSH** (2014): Bundesfachplan Offshore für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone der Ostsee 2013 und Umweltbericht, (Hrsg. BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE). Nr. 7602, Hamburg & Rostock (DEU), S: 225.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (Hrsg.) - **BSH** (2015): Bundesfachplan Offshore für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone der Nordsee 2013/2014 und Umweltbericht,

- (Hrsg. BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE). Nr. 7603, Hamburg & Rostock (DEU), S: 195.
- BUCKLAND, S. T., ANDERSON, D. R., BURNHAM, K. P., LAAKE, J. L., BORCHERS, D. L. & THOMAS, L. (2001): Introduction to distance sampling estimating abundance of biological populations. (1. Auflage). Oxford University Press/Oxford (UK), 452 Seiten.
- CHAMBERLAIN, D. E., REHFISCH, M. R., FOX, A. D., DESHOLM, M. & ANTHONY, S. J. (2006): The effect of avoidance rates on bird mortality predictions made by wind turbine collision risk models. *Ibis* 148/s1, S: 198–202.
- COHEN, J. (1960): A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement* 20/1, S: 37–46.
- COOK, A. S. C. P., HUMPHREYS, E. M., BENNET, F., MASDEN, E. A. & BURTON, N. H. K. (2018): Quantifying avian avoidance of offshore wind turbines: Current evidence and key knowledge gaps. *Marine Environmental Research*.
- DE LUCAS, M., JANSSE, G. F. E., WHITFIELD, D. P. & FERRER, M. (2008): Collision fatality of raptors in wind farms does not depend on raptor abundance. *Journal of Applied Ecology* 45/6, S: 1695–1703.
- DIERSCHKE, J., DIERSCHKE, V., HÜPPOP, K., HÜPPOP, O. & JACHMANN, K. F. (2011): Die Vogelwelt der Insel Helgoland. (1. Auflage). Druckwerkstatt Schmittstraße/Helgoland (DEU), 632 Seiten.
- DIRKSEN, S. (2017): Review of methods and techniques for field validation of collision rates and avoidance amongst birds and bats at offshore wind turbines, Final Report. Nr. Sjde 17-01, Sjoerd Dirksen Ecology/Utrecht (NLD), S: 47.
- DOKTER, A. M., SHAMOUN-BARANES, J., KEMP, M. U., TIJM, S. & HOLLEMAN, I. (2013): High altitude bird migration at temperate latitudes: a synoptic perspective on wind assistance. *PloS one* 8/1, S: e52300.
- EASTWOOD, E. (1967): Radar ornithology. Methuen & Co Ltd./London (GBR), 278 Seiten.
- EASTWOOD, E. & RIDER, G. (1965): Some radar measurements of the altitude of bird flight. *British Birds* 58/10.
- ERNI, B., LIECHTI, F. & BRUDERER, B. (2005): The role of wind in passerine autumn migration between Europe and Africa. *Behavioral Ecology* 16/4, S: 732–740.
- ERNI, B., LIECHTI, F., UNDERHILL, L. G. & BRUDERER, B. (2002): Wind and rain govern the intensity of nocturnal bird migration in central Europe - a log-linear regression analysis. *Ardea* 90/1, S: 155–166.
- EVANS, J. S. & MURPHY, M. A. (2018): rfUtilities, R package version 2.1-3.
- EVANS OGDEN, L. J. (1996): Collision course: the hazards of lighted structures and windows to migrating birds. World Wildlife Fund Canada & Fatal Light Awareness Programm/Ontario (CAN).
- EVERAERT, J. (2014): Collision risk and micro-avoidance rates of birds with wind turbines in Flanders. *Bird Study* 61/2, S: 220–230.
- FARNSWORTH, A. (2005): Flight calls and their value for future ornithological studies and conservation research. *The Auk* 122/3, S: 733–746.
- FARNSWORTH, A. (2007): Flight calls of wood-warblers are not exclusively associated with migratory behaviors. *Wilson Journal of Ornithology* 119/3, S: 334–341.
- FARNSWORTH, A., GAUTHREAU, JR., S. A. & VAN BLARICOM, D. (2004): A comparison of nocturnal call counts of migrating birds and reflectivity measurements on Doppler radar. *Journal of Avian Biology* 35/4, S: 365–369.
- FEBI (2013): Fehmarnbelt Fixed Link EIA. Bird Investigations in Fehmarnbelt – Baseline. Volume II. Waterbirds in Fehmarnbelt. Nr. E3TR0011.
- FERRER, M., DE LUCAS, M., JANSSE, G. F., CASADO, E., MUNOZ, A. R., BECHARD, M. J. & CALABUIG, C. P. (2012): Weak relationship between risk assessment studies and recorded mortality in wind farms. *Journal of Applied Ecology* 49/1, S: 38–46.
- FIJN, R. C., KRIJGSVELD, K. L., POOT, M. J. & DIRKSEN, S. (2015): Bird movements at rotor heights measured continuously with vertical radar at a Dutch offshore wind farm. *Ibis* 157/3, S: 558–566.
- FORTIN, D., LIECHTI, F. & BRUDERER, B. (1999): Variation in the nocturnal flight behaviour of migratory birds along the northwest coast of the Mediterranean Sea. *Ibis* 141/3, S: 480–488.

- GEHRING, J., KERLINGER, P. & MANVILLE, A. M. (2009): Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions. *Ecological Applications* 19/2, S: 505–514.
- GRABER, R. R. (1968): Nocturnal migration in Illinois: different points of view. *The Wilson Bulletin* 80/1, S: 36–71.
- GRÜNKORN, T., BLEW, J., COPPACK, T., KRÜGER, O., NEHLS, G., POTIEK, A., REICHENBACH, M., VON RÖNN, J., TIMMERMANN, H. & WEITEKAMP, S. (2016): Ermittlung der Kollisionsraten von (Greif-)Vögeln und Schaffung planungsbezogener Grundlagen für die Prognose und Bewertung des Kollisionsrisikos durch Windenergieanlagen (PROGRESS). Schlussbericht zum durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des 6. Energieforschungsprogrammes der Bundesregierung geförderten Verbundvorhaben PROGRESS, FKZ 0325300A-D. S: 332.
- HORTON, K. G., STEPANIAN, P. M., WAINWRIGHT, C. E. & TEGELER, A. K. (2015): Influence of atmospheric properties on detection of wood-warbler nocturnal flight calls. *International Journal of Biometeorology* 59/10, S: 1385–1394.
- HÜPPOP, O., DIERSCHKE, J., EXO, K. M., FREDRICH, E. & HILL, R. (2006): Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis* 148, S: 90–109.
- HÜPPOP, O., DIERSCHKE, J. & WENDELN, H. (2004): Zugvögel und Offshore-Windkraftanlagen: Konflikte und Lösungen. *Berichte zum Vogelschutz* 41, S: 127–217.
- HÜPPOP, O. & HILGERLOH, G. (2012): Flight call rates of migrating thrushes: effects of wind conditions, humidity and time of day at an illuminated offshore platform. *Journal of Avian Biology* 43/1, S: 85–90.
- HÜPPOP, O., HILL, R., HÜPPOP, K. & JACHMANN, F. (2009): Auswirkungen auf den Vogelzug - Begleitforschung im Offshore-Bereich auf Forschungsplattformen in der Nordsee (FINOBIRD), Abschlussbericht. Institut für Vogelforschung „Vogelwarte Helgoland“/Helgoland (DEU), S: 278.
- HÜPPOP, O. & HÜPPOP, K. (2003): North Atlantic Oscillation and timing of spring migration in birds. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 270/1512, S: 233–240.
- HÜPPOP, O., HÜPPOP, K., DIERSCHKE, J. & HILL, R. (2016): Bird collisions at an offshore platform in the North Sea. *Bird Study* 63/1, S: 1–10.
- COPPACK, T., WENDELN, H., BELLEBAUM, J., KUBE, J., NEUMANN, R. & SCHULZ, A. - IFAÖ (2010): Fachgutachten Vogelzug zum Offshore-Windpark „Arcadis Ost 1“. Betrachtungszeitraum Juli 2005 bis November 2008, (Hrsg. INSTITUT FÜR ANGEWANDTE ÖKOSYSTEMFORSCHUNG). Neu Broderstor (DEU), Im Auftrag der KNK Wind GmbH, S: 197.
- JELLMANN, J. (1977): Radarbeobachtungen zum Frühjahrszug über Nordwestdeutschland und die südliche Nordsee im April und Mai 1971. *Vogelwarte* 29, S: 135–149.
- JELLMANN, J. (1989): Radarmessungen zur Höhe des nächtlichen Vogelzuges über Nordwestdeutschland im Frühjahr und im Hochsommer. *Vogelwarte* 35/1989, S: 59–63.
- JONZÉN, N., LINDÉN, A., ERGON, T., KNUDSEN, E., VIK, J. O., RUBOLINI, D., PIACENTINI, D., BRINCH, C., SPINA, F. & KARLSSON, L. (2006): Rapid advance of spring arrival dates in long-distance migratory birds. *Science* 312/5782, S: 1959–1961.
- KARLSSON, H., NILSSON, C., BÄCKMAN, J. & ALERSTAM, T. (2011): Nocturnal passerine migration without tailwind assistance. *Ibis* 153/3, S: 485–493.
- KEMP, M. U. (2012): How birds weather the weather: avian migration in the mid-latitudes (*Dissertation*). Universiteit van Amsterdam / Amsterdam (NLD), 207 S.
- KEMP, M. U., SHAMOUN-BARANES, J., DOKTER, A. M., LOON, E. & BOUTEN, W. (2013): The influence of weather on the flight altitude of nocturnal migrants in mid-latitudes. *Ibis* 155/4, S: 734–749.
- KERLINGER, P., GEHRING, J. L., ERICKSON, W. P., CURRY, R., JAIN, A. & GUARNACCIA, J. (2010): Night migrant fatalities and obstruction lighting at wind turbines in North America. *The Wilson Journal of Ornithology* 122/4, S: 744–754.
- KLAASSEN, M. (2004): May dehydration risk govern long-distance migratory behaviour? *Journal of Avian Biology* 35/1, S: 4–6.

- KLEYHEEG-HARTMAN, J. C., KRIJGSVELD, K. L., COLLIER, M. P., POOT, M. J. M., BOON, A. R., TROOST, T. A. & DIRKSEN, S. (2018): Predicting bird collisions with wind turbines: Comparison of the new empirical Flux Collision Model with the SOSS Band model. *Ecological Modelling* 387, S: 144–153.
- KRIJGSVELD, K. L., AKERSHOEK, K., SCHENK, F., DIJK, F. & DIRKSEN, S. (2009): Collision risk of birds with modern large wind turbines. *Ardea* 97/3, S: 357–366.
- KRIJGSVELD, K. L., FIJN, R. C., JANPINK, M., VAN HORSSEN, P. W., HEUNKS, C., COLLIER, M., POOT, M. J. M., BEUKER, D. & DIRKSEN, S. (2011): Effect studies Offshore Wind Farm Egmond aan Zee. Final report on fluxes, flight altitudes and behaviour of flying birds., Bureau Waardenburg report. Nr. 10–219, Culemborg, The Netherlands, S: 330.
- KRIJGSVELD, K. L., FIJN, R. C. & LENSINK, R. (2015): Occurrence of peaks in songbird migration at rotor heights of offshore wind farms in the southern North Sea, Final Report. Bureau Waardenburg bv/Culemborg (NDL), S: 28.
- LEHIKONEN, E., SPARKS, T. H. & ZALAKEVICIUS, M. (2004): Arrival and departure dates. *Advances in ecological research* 35, S: 1–31.
- LIAW, A. & WIENER, M. (2002): Classification and regression by randomForest. *R news* 2/3, S: 18–22.
- LIECHTI, F. (2006): Birds: blowin' by the wind? *Journal of Ornithology* 147/2, S: 202–211.
- LIECHTI, F., ASCHWANDEN, J., BLEW, J., BOOS, M., BRABANT, R., DOKTER, A. M., KOSAREV, V., LUKACH, M., MARURI, M., REYNIERS, M. & OTHERS (2018): Cross-calibration of different radar systems for monitoring nocturnal bird migration across Europe and the Near East. *Ecography* 42, S: 1–12.
- LIECHTI, F. & BRUDERER, B. (1998): The relevance of wind for optimal migration theory. *Journal of Avian Biology* 29, S: 561–568.
- LIECHTI, F., KLAASSEN, M. & BRUDERER, B. (2000): Predicting migratory flight altitudes by physiological migration models. *The Auk* 117/1, S: 205–214.
- MASDEN, E. (2015): Developing an avian collision risk model to incorporate variability and uncertainty. Environmental Research Institute, North Highland College – UHI University of the Highlands and Islands/Thurso (GBR), S: 26.
- MASDEN, E. A. & COOK, A. S. C. P. (2016): Avian collision risk models for wind energy impact assessments. *Environmental Impact Assessment Review* 56, S: 43–49.
- MCGREGOR, R. M., KING, S., DONOVAN, C. R., CANECO, B. & WEBB, A. (2018): A stochastic collision risk model for seabirds in flight, (Hrsg. HiDEF AERIAL SURVEYING LIMITED & BIOCONSULT SH). Cleator Moor (GBR), prepared for Marine Scotland.
- MÜLLER, H. (1981): Vogelschlag in einer starken Zugsnacht auf der Offshore-Forschungsplattform „Nordsee“ im Oktober 1979. *Seevögel* 2, S: 33–37.
- MUNDINGER, P. C. (1970): Vocal imitation and individual recognition of finch calls. *Science* 168/3930, S: 480–482.
- NILSSON, C., DOKTER, A. M., SCHMID, B., SCACCO, M., VERLINDEN, L., BÄCKMAN, J., HAASE, G., DELL'OMO, G., CHAPMAN, J. W., LEIJNSE, H. & LIECHTI, F. (2018): Field validation of radar systems for monitoring bird migration. *Journal of Applied Ecology*.
- OREJAS, C., SCHROEDER, A., JOSCHKO, T., DIERSCHKE, J., EXO, K. M., FRIEDRICH, E., HILL, R., HÜPPOP, O., POLLEHNE, F., ZETTLER, M. L. & BOCHERT, R. (2005): Ökologische Begleitforschung zur Windenergienutzung im Offshore-Bereich auf Forschungsplattformen in der Nord- und Ostsee (BeoFINO), BMU 0327526-Abschlußbericht. Alfred Wegener Institut für Polar und Meeresforschung/Bremerhaven (DEU), S: 354.
- PENNYCUICK, C. J. (2008): Modelling the flying bird. (5), Academic Press/Elsevier/Amsterdam (NLD).
- R CORE TEAM (2016): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing/Vienna, Austria.
- RICHARDSON, W. (1990): Timing of bird migration in relation to weather: updated review. In: *Bird migration* Springer, S. 78–101.
- SCHMALJOHANN, H., LIECHTI, F., BÄCHLER, E., STEURI, T. & BRUDERER, B. (2008): Quantification of bird migration by radar – a detection probability problem. *Ibis* 150/2, S: 342–355.
- SCHULZ, A., DITTMAN, T. & COPPACK, T. (2014): Erfassung von Ausweichbewegungen von Zugvögeln mittels Pencil Beam Radar und Erfassung von Vogelkollisionen mit Hilfe des Systems VARS.

- StUKplus Schlussbericht. Rostock, Im Auftrag des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), S: 89.
- SCHULZ, A., DITTMANN, T., WEIDAUER, A., KILIAN, M., LÖFFLER, T., RÖHRBEIN, V. & SCHLEICHER, K. (2013): Weiterentwicklung der Technik für Langzeituntersuchungen der Vögel mittels Radar und automatischer Kamerabeobachtung am Standort FINO 2 und Durchführung von Langzeitmessungen am Standort für den Zeitraum 2010 bis 2012, Abschlussbericht. Institut für Angewandte Ökologie/Neu Brodersdorf (DEU), Teilprojekt Vogelzug. Bestandteil des Forschungsvorhabens „Betrieb für Forschungsplattform FINO 2“ (BMU; FKZ 0329905D), S: 103.
- SHAMOUN-BARANES, J., ALVES, J. A., BAUER, S., DOKTER, A. M., HÜPPOP, O., KOISTINEN, J., LEIJNSE, H., LIECHTI, F., VAN GASTEREN, H. & CHAPMAN, J. W. (2014): Continental-scale radar monitoring of the aerial movements of animals. *Movement Ecology* 2/1, S: 9.
- SHAMOUN-BARANES, J., LIECHTI, F. & VANSTEELENT, W. M. (2017): Atmospheric conditions create free-ways, detours and tailbacks for migrating birds. *Journal of Comparative Physiology A* 203/6–7, S: 509–529. DOI: 10.1007/s00359-017-1181-9.
- SKOV, H., HEINÄNEN, S., NORMAN, T., WARD, R., MÉNDEZ-ROLDÁN, S. & ELLIS, I. (2018): ORJIP Bird Collision and Avoidance Study, Final Report. The Carbon Trust/London (GBR), S: 247.
- URMY, S. S. & WARREN, J. D. (2017): Quantitative ornithology with a commercial marine radar: standard-target calibration, target detection and tracking, and measurement of echoes from individuals and flocks. *Methods in Ecology and Evolution* 8/7, S: 860–869.
- VAN BELLE, J., SHAMOUN-BARANES, J., VAN LOON, E. & BOUTEN, W. (2007): An operational model predicting autumn bird migration intensities for flight safety. *Journal of Applied Ecology* 44/4, S: 864–874.
- VAN DOREN, B. M. & HORTON, K. G. (2018): A continental system for forecasting bird migration. *Science* 361/6407, S: 1115–1118.
- VAN DOREN, B. M., HORTON, K. G., DOKTER, A. M., KLINCK, H., ELBIN, S. B. & FARNSWORTH, A. (2017): High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114/42, S: 11175–11180.
- WELCKER, J. (2019): Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas. ProBIRD report 2. BioConsult SH/Husum (DEU), S: 70.
- WELCKER, J., LIESENJOHANN, M., BLEW, J., NEHLS, G. & GRÜNKORN, T. (2017): Nocturnal migrants do not incur higher collision risk at wind turbines than diurnally active species. *Ibis* 159/2, S: 366–373.
- WELCKER, J. & VILELA, R. (2018): Analysis of bird flight calls from the German North and Baltic Seas. Report from the ProBIRD project, Final Report. BioConsult SH/Husum (DEU), S: 128.
- WELCKER, J. & VILELA, R. (2019): Weather-dependence of nocturnal bird migration and cumulative collision risk at offshore wind farms in the German North and Baltic Seas., Final Report. BioConsult SH/Husum (DEU), S: 82.
- WENDELN, H., LIECHTI, F., HILL, R., HÜPPOP, O. & KUBE, J. (2007): Sind Schiffsradargeräte für quantitative Vogelzugmessungen geeignet? - Ein Vergleich mit dem Zielfolgeradar „Superfledermaus“. *Vogelwarte* 45, S: 336–337.
- ZAUGG, S., SAPORTA, G., VAN LOON, E., SCHMALJOHANN, H. & LIECHTI, F. (2008): Automatic identification of bird targets with radar via patterns produced by wing flapping. *Journal of The Royal Society Interface* 5/26, S: 1041–1053.
- ZEHNDER, S., ÅKESSON, S., LIECHTI, F. & BRUDERER, B. (2001): Nocturnal autumn bird migration at Falsterbo, South Sweden. *Journal of Avian Biology* 32/3, S: 239–248.

A ANHANG

A.1 Ergebnisbericht 1: Analysis of bird flight calls from the German North and Baltic Seas

https://bioconsult-sh.de/site/assets/files/1753/final_report_bird_calls_20180810.pdf

A.2 Ergebnisbericht 2: Patterns of nocturnal bird migration in the German North and Baltic Seas

https://bioconsult-sh.de/site/assets/files/1833/patterns_of_bird_migration_in_the_german_north_and_baltic_seas_20190923_ohne_anhangstabellen.pdf

A.3 Ergebnisbericht 3: Weather-dependence of nocturnal bird migration and cumulative collision risk at offshore wind farms in the German North and Baltic Seas

https://bioconsult-sh.de/site/assets/files/1834/weather_and_collision_risk_20200515_bsh-1.pdf