

TEXTE

150/2021

Untersuchung des Einflusses von Drohnen auf Kaiserpinguine

Abschlussbericht

TEXTE 150/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3719 18 202 0
FB000615

Untersuchung des Einflusses von Drohnen auf Kaiserpinguine

Abschlussbericht

von

Osama Mustafa, Christian Pfeifer, Marie-Charlott
Rümmeler
ThINK – Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und
Klimaschutz, Jena

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ThINK – Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz
Leutragraben 1
07743 Jena

Abschlussdatum:

Juli 2021

Redaktion:

Fachgebiet II 2.2 "Schutz der Polargebiete"
Fritz Hertel

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, November 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Untersuchung des Einflusses von Drohnen auf Kaiserpinguine

Um die sensible antarktische Tierwelt vor möglichen Auswirkungen vermehrter Drohnenüberflüge zu schützen, verabschiedeten die Antarktis-Vertragsstaaten im Mai 2018 eine erste Version von Umweltrichtlinien zum Betrieb von Drohnen in der Antarktis. Da bis dato nur wenige wissenschaftliche Studien zu diesem Thema vorlagen, waren die Richtlinien mit einem Aufruf an die Wissenschaftsgemeinde verbunden, weiter Forschung zu den Auswirkungen von Drohneneinsätzen in der Antarktis zu betreiben.

Die vorliegende Studie untersuchte mithilfe verhaltensbiologischer Störungsexperimente die Auswirkungen von Drohnen sowie sich annähernder Menschen auf Kaiserpinguine. Zudem wurden die seit Erstellung der Richtlinien neu gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss von Drohnen auf die antarktische Tierwelt zusammengefasst. Gleichzeitig wurde die Möglichkeit getestet, die lokale Population einer Kaiserpinguinkolonie durch Drohnenbefliegung zu erfassen und ihre Brutpaarzahl daraus abzuleiten. Die Untersuchungen fanden an der Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht/Atka Iceport (Dronning Maud Land, Ostantarktis) statt.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass nur weniger als 20 % der Individuen eine Reaktion zeigten, die zudem vergleichsweise kurz war. Somit ist davon auszugehen, dass die Drohne keine massiven Störungen verursachte. Im Vergleich waren die Reaktionen auf horizontale Überflüge im Allgemeinen weniger deutlich als auf die Annäherung einer Person und auf vertikale Überflüge. Küken reagierten mit vermehrter Vigilanz auf horizontale Drohnenüberflüge. Während vertikaler Drohnenaktivitäten und menschlicher Annäherung traf dies sowohl auf Adulte als auch auf Küken zu. Küken reagierten am stärksten bei vertikaler Annäherung einer Drohne, Adulten dagegen auf die Annäherung einer Person. Adulte zeigten mittlere Reaktionen bei vertikaler Drohnen-Annäherung, aber nur sehr wenige Reaktionen bei horizontalen Überflügen.

Für Adulte wurden während Quadropterflügen ab Flughöhen von 95 m keine Unterschiede zur Kontrollsituation festgestellt. Eine solche Flughöhe ohne signifikante Verhaltensänderung konnte für Küken und für Starrflüglerüberflüge (Adulte und Küken) nicht nachgewiesen werden. Allgemein war die Reaktion auf den Quadropter stärker als auf den Starrflügler. Der Vergleich verschiedener Saisonzeitpunkte zeigte eine stärkere Reaktion zu einem späteren Zeitpunkt in der Brutsaison (Ende Dezember) als zu einem früheren Brutstadium (Mitte November).

Neben den Untersuchungen an Kaiserpinguinen konnten wir beobachten, dass Schneesturmvögel häufig deutliche Reaktionen auf den Quadropter zeigten.

Unsere Recherche ergab, dass seit 2018 nur wenige Untersuchungen zum Einfluss von Drohnen auf die Antarktische Tierwelt veröffentlicht wurden. Lediglich für Zügelpinguine, Antarktische Seebären und Seeleoparden liegen neue Erkenntnisse vor.

Bei der Kartierung und Bestandserfassung der Kolonie durch Drohnen-Befliegung wurden 10.024 Kaiserpinguinküken detektiert.

Abstract: Investigation of the influence of drones on emperor penguins

Protecting Antarctica's sensitive wildlife from potential impacts of drone overflights is particularly important. In May 2018, the Antarctic Treaty Parties adopted a first version of environmental guidelines for drone operations in Antarctica. However, few studies on this topic were then available. Therefore, the aforementioned resolution explicitly calls for further investigation.

The goal of the present study was to use disturbance experiments to determine the effects of drones and individuals approaching on the ground on emperor penguins. Furthermore, we note responses to drones that we observed in other bird species in the area and summarise the knowledge gained since the guidelines were written on the impact of drones on Antarctic wildlife. At the same time, we tested the feasibility of using drone surveys to assess the population of the emperor penguin colony in Atka Bay/Atka Iceport (East Antarctica).

Overall it can be concluded that with less than 20 % of individuals showing a response, and on the observed brevity of the response, the drone was not causing a massive disturbance. In comparison of the different disturbance sources, responses to horizontal overflights were generally less severe than to the human approach and to vertical overflights. Chicks increased vigilance behaviour during horizontal drone overflights but both adults and chicks did so during vertical drone activity and human approach. We saw the greatest reaction in chicks during vertical drone approach but in adults during human approach. Adults showed intermediate reactions to vertical drone approach but only very few reactions to horizontal flights.

For adult penguins we found no differences between flight heights of 95 m or higher and control situations when flying with the quadcopter. Such a flight height without significant change in reactions in comparison to control could not be found for neither chicks (with both drone models tested) nor adults during fixed-wing flights. In general, the behavioural reaction to the quadcopter was higher than to the fixed-wing drone regarding proportions of individuals. The comparison of two times revealed a stronger reaction on the later time (end of December) than on the earlier (mid of November).

In addition to the studies on emperor penguins, we observed that snow petrels frequently showed significant reactions to the quadcopter.

Literature search showed that very little work has been published since 2018 on the impact of drones on Antarctic species. Only for chinstrap penguins, Antarctic fur seals and leopard seals new information is available.

Mapping the emperor penguin colony by drone aerial surveys detected a total of 10,024 emperor penguin chicks.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	12
Zusammenfassung.....	13
Summary	20
1 Einleitung.....	27
2 Untersuchungsgebiet	29
3 Einfluss von Drohnen auf Vögel in der Antarktis.....	31
3.1 Einfluss von Drohnenüberflügen auf Kaiserpinguine.....	31
3.1.1 Methodik.....	31
3.1.1.1 Eingesetzte Technik	31
3.1.1.2 Versuchsaufbau	34
3.1.1.3 Kategorien der Verhaltensweisen	36
3.1.1.4 Auswertung der Videoaufnahmen.....	37
3.1.1.5 Fragestellungsbezogene Methodik.....	38
3.1.2 Ergebnisse	40
3.1.2.1 Einfluss verschiedener Störungsarten	40
3.1.2.2 Einfluss der Flughöhe.....	50
3.1.2.3 Einfluss des Drohnentyps.....	53
3.1.2.4 Einfluss des Saisonzeitpunkts	54
3.1.2.5 Übergreifende Betrachtungen.....	56
3.2 Reaktionen anderer Vögel auf Drohnenüberflüge.....	57
3.2.1 Schneesturmvögel.....	57
3.2.2 Weitere Arten	57
3.3 Aktualisierter Stand des Wissens zum Einfluss von Drohnen auf die antarktische Tierwelt	58
3.3.1 Pinguine	58
3.3.2 Säugetiere an Land (Robben).....	59
3.3.3 Andere Vogelarten.....	60
4 Kartierung der Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht.....	63
4.1 Methodik.....	63
4.2 Ergebnisse	64
5 Erfahrungen zum wissenschaftlichen Arbeiten mit Drohnen in der kontinentalen Antarktis.....	68

6	Schlussfolgerungen und Ausblick	70
7	Quellenverzeichnis	72
A	Anhang.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Lage der Atka-Bucht in der Antarktis.....	29
Abbildung 2	Das Untersuchungsgebiet mit den Elementen Pinguinhauptkolonie auf dem Meereis (A), Pinguinsubkolonie auf dem Schelfeis (B) und der Station Neumayer III (C)	30
Abbildung 3	Die verwendeten Drohnenmodelle: Starrflügler Mapir Magpy (A) und Multikopter DJI Phantom 4 Pro (B).....	32
Abbildung 4	Anwerfen der Mapir Magpy (links) und Landung der DJI Phantom 4 Pro "in der Hand" (rechts).....	32
Abbildung 5	Versuchsaufbau an der Kolonie Atka-Bucht. Die Videokameras zur Beobachtung der ausgewählten Pinguine sind gegen Kälte und Wind isoliert. Die Stromversorgung wurde über eine Powerbank in Isolierboxen (im Stoffbeutel) mit Thermoelement gewährleistet. Die Positionen der untersuchten Gruppen wurden mit Kompass (auf dem Bild zu sehen) und Laserentfernungsmesser ermittelt.	34
Abbildung 6	Schematische Darstellung der drei Versuchsanordnungen: Vertikalflüge (oben), Horizontalflüge (unten) und Personenannäherung (unten)	36
Abbildung 7	Screenshot der Auswerteoberfläche des Programmes ,ClickPoints‘ (Gerum et al. 2017). Zu sehen ist ein Kameraausschnitt der Kolonie während der Auszählung der Verhaltensweisen. Jedem deutlich erkennbaren Individuum wurde sein Verhalten entsprechend der oben links definierten Klassen zugeordnet.....	38
Abbildung 8	Anteile der Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während der Kontrollbeobachtungen zeigten; grau: GAM- Anpassung siehe Rümmler et al. (2021a) mit Konfidenzintervall 0,95	40
Abbildung 9	Anteile der Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während horizontaler Überflüge in 20 m Höhe zeigten in Abhängigkeit von der absoluten Distanz; p-Werte entsprechen den GLME-Ergebnissen (siehe Rümmler et al. 2021a); signifikante Werte sind fett gedruckt; grau: GAM-Anpassung mit Konfidenzintervall 0,95	41
Abbildung 10	Boxplot der gruppierten Distanzen zur Drohne während horizontaler Überflüge in 20 m Höhe; Graue Zahlen = n (Anzahl der analysierten Frames); Horizontale Linien stellen signifikante Unterschiede zwischen Gruppen dar.....	42
Abbildung 11	Anteile der Individuen die eine bestimmte Verhaltensweise während horizontaler Überflüge in 20 m Höhe zeigten in zeitlicher Relation zum Zeitpunkt des direkten Überflugs; p-	

	Werte entsprechen den GLME-Ergebnissen; signifikante Werte sind fett gedruckt; grau: GAM-Anpassung mit Konfidenzintervall 0,95.....	43
Abbildung 12	Boxplot der gruppierten Zeiten vor und nach dem direkten Überflug während horizontaler Überflüge in 20 m Höhe; Graue Zahlen = n (Anzahl der analysierten Frames); Horizontale Linien stellen signifikante Unterschiede zwischen Gruppen dar. Jede Box zeigt Median (Mittellinie), unteres und oberes Quartil (unteres und oberes Ende der Box), Minimum und Maximum (Whisker) sowie Ausreißer (schwarze Punkte).....	44
Abbildung 13	Anteile der Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während vertikaler Überflüge zeigen; p-Werte entsprechen den GLME-Ergebnissen; signifikante Werte sind fett gedruckt; grau: GAM-Anpassung mit Konfidenzintervall 0,95	45
Abbildung 14	Boxplot der gruppierten Flughöhen während vertikaler Überflüge; graue Zahlen = n (Anzahl der analysierten Frames); horizontale Linien stellen signifikante Unterschiede zwischen Gruppen dar.	46
Abbildung 15	Anteile der Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während der Annäherung durch eine Person zeigen; p-Werte entsprechen den GLME-Ergebnissen; signifikante Werte sind fett gedruckt; grau: GAM-Anpassung mit Konfidenzintervall 0,95	47
Abbildung 16	Boxplot der gruppierten Distanzen während der Annäherung einer Person; Graue Zahlen = n (Anzahl der analysierten Frames); horizontale Linien stellen signifikante Unterschiede zwischen Gruppen dar.	48
Abbildung 17	Vergleich der beobachteten störungsanzeigenden Verhaltensreaktionen (prozentualer Anteil der Individuen mit Vigilanz oder Flügelschlagen) auf verschiedene Störungsquellen. Angezeigt werden der Mittelwert und der Standardfehler während des Auftretens der Klasse der höchsten Störung (11 – 20s nach TDO bei Horizontalflügen, 15 – 20 m bei Vertikalflügen, <5 m bei Annäherung einer Person).	49
Abbildung 18	Anteile der Küken, die eine bestimmte Verhaltensweise während Überflügen von zwei Drohnenmodellen in unterschiedlichen Flughöhen an zwei verschiedenen Untersuchungstagen zeigen. Tag 1: 14.11.2019, Tag 2: 29.12.2019.....	50
Abbildung 19	Anteile der adulten Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während Überflügen von zwei Drohnenmodellen in unterschiedlichen Flughöhen an zwei	

	verschiedenen Untersuchungstagen zeigen. Tag 1: 14.11.2019, Tag 2: 29.12.2019.	51
Abbildung 20	Vergleich des Anteils der Pinguine, die bestimmte Verhaltensweisen während der Flüge mit zwei verschiedenen Drohrentypen bzw. während der Kontrollaufnahmen zeigen.....	53
Abbildung 21	Vergleich des Quotienten aus dem Anteil der beobachteten Verhaltensweisen während der Kontrollaufnahmen und dem Anteil der beobachteten Verhaltensweisen während der Flüge an beiden Beobachtungstagen. Ein Verhältnis von 1 bedeutet gleiche Anteile, Verhältnisse kleiner als 1 deuten auf höhere Anteile während der Phantom-Überflüge hin.....	55
Abbildung 22	Screenshot der Auswertungsoberfläche im Programm ArcGIS (ESRI Inc.) für die Auszählung der Pinguinkolonie mit differenzierten Symbolen (rot – Adulte, blau – Küken, schwarz – Skua)	64
Abbildung 23	Die Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht mit den beiden Teilkolonien auf dem Meereis und am Winterlager. Im Hintergrund ein Satellitenbild (Sentinel-2) vom 21. November 2019. Im Vordergrund die Orthofotomosaik der Drohnenbefliegungen am 16. November 2019. Die Kolonie ist erkennbar durch bräunliche (Guano) und schwarze (Pinguine) Färbungen. Auch im Satellitenbild sind ältere Guanoablagerungen zu erkennen.	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Technische Parameter der eingesetzten Drohnen Mapir Magpy und DJI Phantom 4 Pro	33
Tabelle 2	Technische Parameter des Camcorder Modells „Panasonic HC- V380.....	33
Tabelle 3	Flughöhen an den beiden Untersuchungstagen	39
Tabelle 4	Prozessierungsparameter für die aus den Befliegungen vom 16. November 2019 stammenden Orthofotomosaiken	65
Tabelle 5	Die für den 16. November ermittelten Individuenzahlen im den Teilkolonien der Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht	65

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of variance / Varianzanalyse
ATCM	Antarctic Treaty Consultative Meeting
CEP	Committee for Environmental Protection
GAM	Generalized Additive Model
GLME	Generalized Linear Mixed-Effects Model
GSD	Ground Sampling Distance / Bodenauflösung
IMU	Inertial Measurement Unit
SD	Standard deviation / Standardabweichung
SPOT	Single Penguin Observation and Tracking
TDO	Time of direct overflight / Zeit des direkten Überflugs

Zusammenfassung

Einleitung

Die weltweite Zunahme der Nutzung von Drohnen lässt sich auch in der Antarktis beobachten. Diese Technologie bietet ein hohes Potential für wissenschaftliche Anwendungen, wird aber auch für kommerzielle, journalistische oder private Zwecke eingesetzt. Aufgrund der besonderen Sensibilität der antarktischen Tierwelt erscheint deren Schutz vor möglichen Auswirkungen von Drohnenflügen besonders wichtig. Im Mai 2018 verabschiedeten die Antarktis-Vertragsstaaten eine erste Version von Umweltrichtlinien zum Betrieb von Drohnen in der Antarktis (ATCM 2018). Da bis dato nur wenige Studien zu diesem Thema vorlagen, beruhen diese Richtlinien jedoch teilweise auf vorläufigen oder unvollständigen Informationen zum Störungspotenzial der verschiedenen Drohnentypen gegenüber den betrachteten Tierarten (Übersicht in Mustafa et al. 2018). Die genannte Resolution fordert daher ausdrücklich zu weiteren Untersuchungen auf. Besonderer Bedarf besteht bei bisher nicht untersuchten Arten, wie den in der Hochantarktis lebenden Kaiserpinguinen (*Aptenodytes forsteri*).

Kaiserpinguine sind eine Charakterart der Antarktis. Sie leben in einem der extremsten Lebensräume der Erde und haben ihren Brutzyklus an die eigentlich lebensfeindlichen Bedingungen der Polarnacht angepasst. Ihr Brutgebiet ist das Meereis, meist in der Nähe der Klippen des Schelfeises. Im Zuge des Klimawandels ist mit erheblichen Veränderungen des Ökosystems Südozean zu rechnen. Unter den rauen klimatischen Bedingungen des antarktischen Kontinents kann jeder störungsbedingte Energieverlust kritisch sein.

Aufgrund der abgeschiedenen Lage der Kaiserpinguinkolonien sind deren Populationen bisher nur lückenhaft quantifiziert. Die umfassendsten Studien hierzu lieferten Fretwell et al. (2012) und Fretwell und Trathan (2020), die auf der Basis von Satellitendaten 61 Kolonien identifizierten und Populationsgrößen schätzten. Da in Drohnenaufnahmen auch Einzeltiere abgebildet werden können, stellen diese eine hochqualitative Alternative und Ergänzung zu Satellitenaufnahmen dar.

Untersuchungen zur Sensibilität von Kaiserpinguinen gegenüber Drohnen fehlen bisher. Einige Hinweise lassen sich Studien zum Einfluss von Hubschrauberüberflügen auf Kaiserpinguinküken (Giese und Riddle 1999) und zur Reaktion von Kaiserpinguinen auf menschliche Störung (Burger and Gochfeld 2007) entnehmen.

Der primäre Zweck der Untersuchungen zur vorliegenden Studie war es, mithilfe gezielter Störungsexperimente die Auswirkungen von Drohnen auf Kaiserpinguine zu ermitteln. Sekundäres Ziel war der Vergleich dieser Störungen mit denen durch sich am Boden nähernde Personen. Des Weiteren wurden Reaktionen anderer im Gebiet vorkommender Vögel auf Drohnen registriert und die seit der Erstellung der Richtlinien (ATCM 2018) neu gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss von Drohnen auf die antarktische Tierwelt zusammengefasst. Gleichzeitig wurde die Möglichkeit getestet, die Population einer Kaiserpinguinkolonie durch Drohnenbefliegung zu erfassen.

Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden in der als Important Bird Area (Harris et al. 2015) Nr. 109 ausgewiesenen Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht/Atka Iceport (Dronning Maud Land, Ostantarktis) durchgeführt. Die ca. 20 x 30 km ausgedehnte Atka-Bucht ist Teil des Weddellmeeres und von März/April bis ca. Januar/Februar mit Meereis bedeckt (Mustafa et al. 2016). Die Kaiserpinguinkolonie befindet sich auf dem am Ekström Schelfeis verankerten

Meereis und umfasste 2009 9.657 Brutpaare (Fretwell et al. 2012). Satellitenbilder (Mustafa et al. 2016) zeigen, dass sich in manchen Brutsaisons auch eine kleinere Subkolonie auf dem Schelfeis bildet. Während der Untersuchungen im Jahr 2019 befand sich diese Subkolonie in der Nähe des sogenannten „Winterlagers“ etwa 3 km westlich der auf dem Meereis befindlichen Hauptkolonie.

Die Untersuchungen zur Störanfälligkeit von Pinguinen fanden ausschließlich an der Hauptkolonie auf dem Meereis statt. Dabei wurden alle Aktivitäten während der Experimente vom Schelfeis aus durchgeführt. Lediglich für die Experimente zur Annäherung einer Person wurde das Meereis im Bereich der Pinguinkolonie von einer Person betreten. An der Subkolonie wurden nur Flüge zur Populationserfassung durchgeführt.

Kaiserpinguine bauen keine Nester. Daher sind sie auch während des Brütens mobil. Das führt dazu, dass sich die Kolonie sowohl bezüglich des genauen Standorts als auch in ihrer Ausdehnung ständig verändert. Die Bewegungsmuster hängen stark von der Witterung, insbesondere den Windverhältnissen ab (Richter et al. 2018b).

Einfluss von Drohnenüberflügen auf Kaiserpinguine

Aufbauend auf den Erfahrungen aus vorangegangenen, methodisch ähnlichen Studien (Mustafa et al. 2017, 2020; Rümmler et al. 2016, 2018) wurden die Untersuchungen zum Einfluss von Drohnenüberflügen auf Kaiserpinguine verhaltensbiologisch angelegt. Dabei kamen zwei verschiedene elektrisch betriebene Drohnentypen zum Einsatz – ein Quadrocopter (1,39 kg, im Folgenden als „Phantom“ bezeichnet; Lautstärke: 74 dB (A) auf 5 m Entfernung) und ein Starrflügler (0,65 kg, im Folgenden als „Magpy“ bezeichnet; Lautstärke: 64 dB (A) auf 5 m Entfernung). Zur Aufzeichnung des Verhaltens der Pinguine kamen parallel bis zu drei Videokameras zum Einsatz. Damit konnten die Reaktionen von bis zu drei Kolonieausschnitten gleichzeitig aufgenommen werden.

Um die Beobachtungen nicht durch zusätzliche Störfaktoren zu beeinflussen, wurde ein Arbeitsstandort auf dem Schelfeis gewählt. Dieser befand sich am Schelfeisrand in etwa 10 – 12 m Höhe über der Teilkolonie auf dem Meereis. Von hier aus war der Hauptteil der Kaiserpinguinkolonie gut beobachtbar, während die Schelfeiskante dem Personal Deckung bot. Die Geokoordinaten der einzelnen Kameraausschnitte wurden aus gleichem Grunde ebenfalls aus der Ferne vom Arbeitsstandort aus ermittelt. Lediglich für die Experimente zur Annäherung einer Person wurde das Meereis im Bereich der Pinguinkolonie von einer Person betreten.

Grundsätzlich wurden drei verschiedene Versuchsanordnungen angewendet: Horizontalflüge mit linearer Flugbewegung bei gleichbleibender Geschwindigkeit und Höhe, Vertikalflüge mit senkrechter Annäherung an die Pinguine aus großer Höhe und Annäherung einer Person zu Fuß. Zusätzlich wurden vor den jeweiligen Experimenten Aufnahmen für die Gewinnung von Kontrolldaten gemacht.

Die aufgezeichneten Verhaltensweisen wurden in die Kategorien „Flügelschlagen“, „Vigilanz“, „Schlafen“, „Bewegung“ und „Undefiniert“ unterschieden. Dabei können Flügelschlagen und Vigilanz als direkte Störungssignale gewertet werden. „Flügelschlagen“ gilt als Alarmsignal (Giese und Riddle 1999), während Vigilanz vor allem beim Beobachten eines externen Stimulus auftritt. Schlafen und Bewegung werden als indirekte Störungssignale gewertet, da sie auch ohne Stimulus regelmäßig auftreten. Der Anteil der schlafenden Individuen deutet auf eine Störung hin, wenn er während der Drohnenaktivität deutlich abnimmt. Bewegung hingegen kann, bei deutlich vermehrtem Auftreten im Vergleich zur Kontrollsituation, auf Fluchtverhalten hindeuten. Die Verhaltensweisen wurden für die in den Einzelbildern (Videoframes)

erkennbaren Individuen getrennt nach Küken und Adulten gekennzeichnet und ausgezählt. Für Horizontalflüge zeigten die Analysen (Rümmler et al. 2021a), dass die Pinguine zeitverzögert am stärksten reagiert haben (10 - 30 s nach dem Zeitpunkt, an dem sich die Drohne in minimaler Entfernung von den Pinguinen im Zentrum des Bildausschnittes befand (TDO)). Die weitere Analyse von Horizontalflügen wurde daher auf dieses Zeitfenster begrenzt. Für Vertikalflüge und die Annäherung einer Person wurde der gesamte Zeitraum des Störungsvorganges analysiert.

Die Auswertung der Untersuchungen wurde in zwei Fragestellungskomplexe geordnet und jeweils in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift publiziert. Für den Vergleich (Rümmler 2021a) der unterschiedlichen Störungsarten wurden Horizontalflüge in 20 m Höhe über den Pinguinen, Vertikalflüge von 100 m bis 5 m sowie die Annäherung einer Person zu Fuß von mindestens 200 m auf weniger als 5 m Entfernung betrachtet. In Rümmler et al. (2021b) wurde der Einfluss verschiedener Flughöhen für Horizontalflüge, die unterschiedliche Wirkung verschiedener Drohnenmodelle (Quadroptor vs. Starrflügler) sowie die Reaktion der Pinguine zu zwei verschiedenen Saisonzeitpunkten untersucht.

Die horizontalen Überflüge führten zu einer Erhöhung der störungsanzeigenden Reaktionen. Diese Erhöhung dauerte etwa 40 s nachdem die Drohne direkt über den Tieren war. Da die Reaktion nicht so deutlich mit der Entfernung assoziiert war wie mit der Zeit, nehmen wir an, dass Kaiserpinguine sofort auf das Auftauchen einer Drohne reagieren, diese aber als nicht bedrohlich wahrnehmen und sich daher schnell wieder beruhigen.

Unter dem Einfluss der vertikalen Überflüge gab es eine allmähliche Zunahme des Anteils der Individuen, die vigilantes Verhalten oder Flügelschlagen zeigten, und zwar in zunehmendem Maße, wenn die Drohne unter 30 m abstieg. Insbesondere bei Küken wurden starke Reaktionen beobachtet, wenn die Drohne nach Erreichen der niedrigsten Flughöhe wieder aufzusteigen begann. In einigen Fällen beinhalteten die Reaktionen Lauf- und Gruppenbewegungen. Vermutlich treten diese Reaktionen auf, da die Drohne beim Aufstieg aufgrund der höheren Rotordrehzahl lauter ist.

Während der Annäherung einer Person war der Anteil der vigilanten Individuen bei einer Distanz unter ca. 30 m am höchsten und das Flügelschlagen nahm ab ca. 20 m zu. Diese Bewegungen hörten bei den meisten Individuen auf, sobald sich die Person nicht mehr näherte. Die Vögel kehrten dann zu ihren vorherigen Verhaltensweisen zurück.

Im Vergleich waren die Reaktionen auf horizontale Überflüge im Allgemeinen weniger deutlich als auf die Annäherung einer Person und auf vertikale Überflüge. Bei Adulten lag der mittlere Prozentsatz der Individuen, die während der Überflüge reagierten, nicht deutlich über dem während der Kontrollaufnahmen ermittelten Wert. Bei Küken hingegen traten das Flügelschlagen häufiger und die Vigilanz deutlich häufiger auf. Küken reagierten stark auf eine sich vertikal nähernde Drohne in Höhen unter 20 m, sowohl durch starke Vigilanz als auch durch mehr als 10 % der Individuen, die mit den Flügeln schlugen. Adulte Tiere blieben unter den gleichen Umständen relativ ruhig, weniger als 5 % zeigten Vigilanz oder Flügelschlagen. Vigilanz trat als Reaktion auf die Annäherung einer Person zu Fuß auf weniger als 5 m, sowohl bei Adulten als auch bei Küken, häufig auf. Flügelschlagen war dagegen bei Küken gering (durchschnittlich weniger als 5 % der Individuen) wenn auch höher als in den Kontrolldaten, bei Adulten jedoch hoch. Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit weniger als 20 % der Individuen, die eine Reaktion zeigten, und aufgrund der beobachteten Kürze der Reaktion, die Drohne keine massive Störung verursachte.

Die Analysen verschiedener Flughöhen der Phantom ergaben für vigilante Küken keine Unterschiede zwischen den Höhen, während vigilante Adulte bei Flughöhen von 45 m oder

höher nicht signifikant häufiger registriert wurden als in den Kontrollaufnahmen. Die Daten der flügelschlagenden Adulten zeigen eine signifikante Erhöhung in Flughöhen von 70 m und darunter. Daraus schließen wir, dass Flüge ab der nächsten untersuchten Höhe von 95 m über den Adulten während dieser Brutphase anscheinend keine messbare Störung verursachen. Unsere Daten stützen eine solche Aussage für Küken jedoch nicht. Zwischen den einzelnen Flughöhen wurden weder bei Küken noch bei Adulten Unterschiede in den verschiedenen Verhaltensweisen gefunden.

Für die Magpy konnte weder für Küken noch für Adulte eine störungsfreie Flughöhe ermittelt werden, denn auch bei großen Höhen unterschied sich das Vigilanzverhalten signifikant von den Kontrolldaten. Interessanterweise unterschied sich die Vigilanz der Küken bei Überflügen in der niedrigsten getesteten Höhe von 35 m nicht von den Kontrolldaten. Dieser Effekt wurde noch stärker bei Adulten beobachtet, wo sich lediglich die höchste getestete Flughöhe signifikant von den Kontrollaufnahmen unterschied. Wir können nicht sagen, warum die Individuen bei niedrigen Flughöhen nicht mehr auf das Starrflügelmodell reagieren. Eine mögliche Erklärung wäre, dass das Profil des Starrflüglers umso geringer wahrnehmbar ist, je niedriger er fliegt. Beim Anflug in großer Höhe ist seine flugzeugähnliche Form sichtbar. In geringer Höhe hingegen erscheint er kaum mehr als eine horizontale Linie. Es ist auch möglich, dass die Pinguine, wenn sich die Drohne in dieser Höhe befindet, ein Verhalten zeigen, dass wir nicht gemessen haben. Abgesehen von dieser nicht sicher erklärbaren Beobachtung gab es keine Unterschiede zwischen den Flughöhen und wir konnten keine Flughöhe definieren, in der die Drohne nicht mehr wahrgenommen wird.

Im Allgemeinen war die Flughöhe nicht mit dem Anteil an schlafenden Individuen assoziiert. Daraus schließen wir, dass Drohnenüberflüge Kaiserpinguine nicht genug stören, um sie in größerer Anzahl aufzuwecken. Obwohl es auch keinen signifikanten Zusammenhang zwischen sich bewegendem Individuen und der Flughöhe gab, fanden wir ein wiederkehrendes Muster in den Daten. Bei Adulten und Küken nimmt während der Phantom-Flüge der Anteil der sich bewegendem Individuen tendenziell in niedrigeren Flughöhen ab. Auch wenn dieser Effekt nicht stark genug ist, um signifikant zu sein, nehmen wir an, dass es eine Tendenz gibt, dass die Individuen ihre vorangegangene Bewegung während niedriger Überflüge einstellen. Dies ist wahrscheinlich nicht mit einem höheren Stresslevel verbunden, kann jedoch die Zeit verlängern, bis die adulten Tiere ihre Nachkommen zur Fütterung erreichen. Da die Dauer der Reaktion nachweislich eher kurz ist (Rümmler et al. 2021a.), gehen wir davon aus, dass dies bei einer kurzzeitigen Störung, wie beispielsweise einem kurzen Überflug zur Kartierung, keine langfristigen Folgen hat.

Im Vergleich der beiden Drohnenmodelle war die Reaktion auf die Phantom sowohl bei Adulten als auch bei Küken insgesamt stärker als die Reaktion auf die Magpy. Aufgrund des geringen Sehvermögens von Kaiserpinguinen, halten wir es für unwahrscheinlich, dass Kaiserpinguine die Drohnen zumindest in größeren Flughöhen visuell erkennen. Es ist daher wahrscheinlicher, dass die Pinguine die Drohnen akustisch wahrnehmen. Dies könnte erklären, warum die leisere Magpy weniger Störungen hervorruft. Wir gehen nicht davon aus, dass dieser Starrflügler, wie bei anderen Arten, mehr Störungen verursacht, weil er in seiner Form räuberischen Vögeln wie Skuas ähnelt (Rümmler et al. 2018). Erstens fanden wir eine geringere Störungswirkung bei diesem Modell. Zweitens sind Kaiserpinguine an Land nur geringer Prädation ausgesetzt.

Beim Vergleich der verschiedenen Saisonzeitpunkte lässt sich feststellen, dass es bereits bei den Kontrollsituationen Unterschiede zwischen den Untersuchungstagen gab. Es scheint, dass am zweiten Untersuchungstag deutlich weniger Individuen während der Kontrollaufnahmen schliefen. Ebenso waren mehr Individuen bereits während der Kontrollaufnahmen am zweiten

Tag vigilant. Diese Unterschiede im Ausgangsverhalten sind neben jahreszeitlichen Entwicklungen auf verschiedene Faktoren zurückführbar, die nicht gemessen wurden oder die nicht kontrolliert werden können. Hierzu gehört die möglicherweise höhere Mobilität älterer Küken und ein mögliches tageszeitliches Muster in der Aktivität. Informationen über die tageszeitliche Variabilität des Verhaltens von Kaiserpinguinen sind derzeit jedoch nicht verfügbar. Das Wetter und damit die Koloniedichte ist ein weiterer möglicher Einfluss. Um diese Unterschiede in den Kontrollsituationen zu berücksichtigen, wandten wir Quotienten an, die die Veränderung im Vergleich zum Kontrollniveau am jeweiligen Tag darstellen. Diese Vergleiche ergaben im Allgemeinen einen höheren Einfluss der Drohne (Phantom) am zweiten Untersuchungstag. Möglicherweise spielt hier der unterschiedlich hohe Anteil an schlafenden Individuen eine Rolle, da diese die Drohne, zumindest in großen Höhen, oftmals gar nicht wahrnehmen. Als Ursache für die von uns festgestellte Zunahme der Reaktion zwischen den zwei untersuchten Saisonzeitpunkten nehmen wir das Wachstum der Küken zwischen November und Dezember und den Übergang von der Crèche-Phase zur Phase des Flüggewerdens (vgl. Trathan et al. 2020) an.

Übergreifende Betrachtungen legen nahe, dass die Kaiserpinguine die Drohnen nicht besser sehen als menschliche Beobachtende, wahrscheinlich sogar schlechter. Vermutlich nehmen sie sie zumindest teilweise durch Geräusche wahr. Jedoch ist nicht bekannt, wie gut Kaiserpinguine an Land hören können. Der Vergleich mit Beobachtungen während horizontaler Hubschrauberüberflüge (Giese und Riddle 1999) zeigten, dass Drohnen selbst in sehr geringer Überflughöhe eindeutig weniger Störungen verursachen als Hubschrauber in großer Höhe. Da die vorliegende Untersuchung eine reine Verhaltensstudie ist, lässt sich daraus nicht abschätzen, ob und wenn ja, wie stark Verhaltensänderungen physiologische Konsequenzen haben und damit einen höheren Energieaufwand verursachen. Untersuchungen zum Energieaufwand in Stresssituationen (Regel und Pütz 1997) stimmen jedoch mit unseren Ergebnissen zumindest darin überein, dass Küken empfindlicher auf Störungen aus der Luft reagieren als adulte Kaiserpinguine.

Reaktionen anderer Vögel auf Drohnenüberflüge

Neben den Experimenten an Kaiserpinguinen wurden auch Beobachtungen zur Reaktion anderer im Gebiet vorkommender Vögel auf Drohnen festgehalten. Hier zeigten vor allem Schneesturmvögel (*Pagodroma nivea*) häufig deutliche Reaktionen. Es gab eine Reihe von Annäherungen und Umkreisungen bis hin zu Scheinattacken, bei denen die Tiere der Phantom bis auf wenige Zentimeter nahe kamen. Gegenüber der Magpy wurde ein solches Verhalten nicht beobachtet.

Die vor allem im Bereich der Kaiserpinguinkolonie gesichteten Südpolar skuas (*Catharacta maccormicki*) zeigten keinerlei Reaktion auf die Phantom. Wir beobachteten jedoch einmalig eine längere Verfolgung der Magpy durch eine Südpolar skua. Die Verfolgung fand zwar überwiegend „beobachtend“ mit großem Abstand statt, jedoch gab es auch einige kurzzeitige sehr starke Annäherungen an die Drohne.

Wiederholt beobachteten wir, dass beide Drohnenmodelle von Buntfusssturmschwalben (*Oceanites oceanicus*) verfolgt und umflogen wurden. Aggression war dabei nicht erkennbar. Das Verhalten machte auf die Beobachtenden eher den Eindruck von Neugier.

Aktualisierter Stand des Wissens zum Einfluss von Drohnen auf die antarktische Tierwelt

In den aktuellen Umweltrichtlinien zum Betreiben unbemannter Fluggeräte in der Antarktis (ATCM 2018) wurde dazu aufgerufen, gezielte Studien zur Beantwortung zentraler Fragen in

Bezug auf Drohnennutzung durchzuführen und entsprechende Beobachtungen zu publizieren. Jedoch zeigte unsere Recherche, dass seither nur sehr wenige gezielte Arbeiten zum Einfluss von Drohnen auf antarktische Tierarten veröffentlicht wurden. Daher wurden auch Beobachtungen an vergleichbaren Arten außerhalb der Antarktis besprochen.

Für die Gruppe der Pinguine wurden neben den oben beschriebenen Untersuchungen an Kaiserpinguinen (Rümmler et al. 2021a, 2021b) lediglich Studien an Zügelpinguinen (*Pygoscelis antarcticus*) durchgeführt. Krause et al. (2021) untersuchten den Einfluss verschiedener Überflughöhen bzw. Saisonzeitpunkte und verglichen Drohnenüberflüge mit Kartierarbeiten am Boden. Sie stellten bei Flughöhen von 30 und 46 m keine Unterschiede im Verhalten im Vergleich zu den Kontrolldaten fest, während es signifikante Verhaltensänderungen bei Flughöhen von 15 und 8 m gab. Es wurde eine Erhöhung der Reaktion auf Drohnenflüge im Saisonverlauf festgestellt und eine deutlich stärkere Reaktion auf die Kartierarbeiten durch Personen am Boden.

Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe gemeinsam mit spanischen Kollegen (MNCN) verglichen methodisch die Möglichkeiten von Verhaltensstudien und Hormonuntersuchungen bei Überflügen einer Phantom in zwei verschiedenen Flughöhe. Im Verhalten der Zügelpinguine zeigte sich eine deutliche Reaktion bei Flughöhen von 5 m während bei 50 m Flughöhe kein Unterschied zur Kontrollsituation festgestellt wurde. Die Hormonuntersuchungen zeigten vor allem die Grenzen der methodischen Eignung auf, da der Effekt des Handlings (Fangen, Blutabnahme) sich nicht vom Einfluss der Drohne unterscheiden ließ.

Die Studie von Krause et al. (2021) umfasste auch Untersuchungen an Robben. Antarktische Seebären (*Arctocephalus gazellus*) zeigten ab 30 m und niedriger eine Reaktion. Die Reaktion von Seeleoparden (*Hydrurga leptonyx*) nahm in den in dieser Studie getesteten Höhen nach unten hin kontinuierlich zu, war jedoch bei 46 m nicht höher als während der Kontrollaufnahmen. Physiologische Untersuchungen anhand der Respirationsrate bestätigten diesen Verlauf grundsätzlich, erreichten jedoch die höchsten Werte während der Kontrollmessungen.

Zu anderen antarktischen Vogelarten gab es keine Untersuchungen seit Mustafa et al. (2018) mit Ausnahme der in der vorliegenden Studie notierten Beobachtungen zu Schneesturmvögeln, Südpolarskuas und Buntfusssturmschwalben.

Rexer-Huber et al. (2020) führten Beobachtungen an den subantarktischen Arten Nördlicher Riesensturmvogel (*Macronectes halli*), Graukopfalbatros (*Thalassarche chrysostoma*), Campbell-Albatrosse (*Thalassarche impavida*) und Königsalbatros (*Diomedea epomophora*) durch. Bei einer minimalen horizontalen Entfernung der Drohne von 150 m wurden keine störungsbedingten Reaktionen festgestellt.

Der aktuelle Erkenntnisstand wurde für antarktische Arten aufbauend auf (Mustafa et al. 2018) tabellarisch zusammengefasst.

Kartierung der Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht

Zusätzlich zu den Störungsexperimenten wurde die Kolonie durch Drohnen-Befliegung kartiert und in ihrem Bestand erfasst. Direkte Quantifizierungen von Kaiserpinguinkolonien sind gegenwärtig kaum verfügbar. Bei anderen Pinguinarten konnte Drohnen bereits effektiv für eine Bestandserfassung eingesetzt werden (z.B. Pfeifer et al. 2019). Berücksichtigt wurden hierbei sowohl die Hauptkolonie auf dem Meereis, als auch die Subkolonie auf dem Schelfeis („Winterlager“). Die Kartierflüge wurden am 16. November 2019 mit einem Quadropter DJI Phantom 4 Pro in einer Flughöhe von ca. 60 m über den Pinguinen durchgeführt. Die mit

Überlappung aufgenommenen Einzelbilder wurden für beide Teilkolonien zu je einem Orthomosaik verarbeitet (Lowe 2004; Mustafa et al. 2020, 2019, 2017; Pfeifer et al. 2021; Snavely et al. 2008).

Für die Bildanalyse kam die manuelle Delineation (Nachzeichnung) von Objekten (hier: Pinguinen) zum Einsatz. Dabei wurde zwischen Kaiserpinguinküken, adulten Kaiserpinguinen und anderen Vogelarten unterschieden. Diese Klassen waren in der Regel an Habitus und Größe unterscheidbar. Insgesamt wurden 10.024 Kaiserpinguinküken detektiert (Winterlager: 2.228; Meereis: 7.796). Da Kaiserpinguinpaare nur ein Ei pro Saison legen, gehen wir davon aus, dass die Anzahl an Küken recht nah an der Brutpaarzahl liegt, zumal auch tote Küken aufgrund der niedrigen Temperaturen und der geringen Anzahl an Prädatoren (Südpolarskua *Catharacta maccormicki* und Riesensturmvogel *Macronectes giganteus*), auch nach vielen Wochen noch gut sichtbar im Gelände vorzufinden waren. Eine Differenz zur realen Brutpaarzahl sollte allerdings durch den Verlust von Eiern bzw. sehr kleinen Küken entstehen. Die ermittelten Werte sind daher als Mindestwert für die Anzahl der Brutpaare zu verstehen.

Im Unterschied zu bisherigen Fernerkundungsverfahren (Flugzeug- oder Satellitenbilder) auf Basis von Flächenabschätzungen oder der – zeitlich variablen – Anzahl adulter Individuen, erlaubt die durch Drohnenaufnahmen mögliche Quantifizierung der Küken eine deutlich präzisere Erfassung der Brutpaarzahl.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Grundsätzlich wurde in der vorliegenden Studie festgestellt, dass es möglich ist, mit handelsüblichen Drohnen auch unter den Umweltbedingungen des antarktischen Kontinents wissenschaftlich zu arbeiten. Es wurde auch bestätigt, dass Kaiserpinguine Drohnenüberflüge wahrnehmen und dass diese Wahrnehmung durch verhaltensbiologische Methoden quantifizierbar ist.

Das Ausmaß der Reaktion hängt von verschiedenen Faktoren ab: der Höhe und dem Zeitpunkt des Überflugs, der Art des Fluggerätes und davon, ob es sich um Küken oder adulte Tiere handelt. Nicht alle erzielten Ergebnisse sind leicht interpretierbar. Das liegt vor allem an dem derzeit noch begrenzten Wissen zum Verhalten dieser Art. Trotzdem lässt sich bereits mit dem jetzigen Wissensstand erkennen, dass die Tiere besonders stark auf vertikale Überflüge reagieren. Deutlich sichtbar wird jedoch auch, dass die für wissenschaftliche Untersuchungen (z.B. Populationserfassungen) typischen Charakteristika von Drohnenflügen (horizontale Überflüge in mehr als 50 m Höhe) einen geringeren Einfluss auf die Reaktionen von Kaiserpinguinen haben als Methoden, bei denen sich Personen den Tieren zu Fuß nähern.

Die drohnenbasierte Erfassung einer Kaiserpinguinkolonie konnte erfolgreich demonstriert werden. Im Unterschied zu bisherigen Fernerkundungsverfahren ist es hiermit möglich, Küken zu quantifizieren und damit die Brutpaarzahl deutlich präziser zu erfassen.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass - unter Beachtung der naturräumlichen Herausforderungen der kontinentalen Antarktis - Drohnen ein vielversprechendes Werkzeug für wissenschaftliches Arbeiten auch in diesem Teil der Welt sind.

Summary

Introduction

The worldwide increase in the use of drones is also observed in Antarctica. This technology offers great potential for scientific applications but is also used for commercial, journalistic or private purposes. Protecting Antarctica's sensitive wildlife from potential impacts of drone overflights is particularly important. In May 2018, the Antarctic Treaty Parties adopted a first version of environmental guidelines for drone operations in Antarctica (ATCM 2018). However, few studies on this topic were then available. In consequence, these guidelines are based partly on preliminary or incomplete information about how disturbing different drone types might be to the species under consideration (overview in Mustafa et al. 2018). Therefore, the aforementioned resolution explicitly calls for further investigation. There is a particular need for the inclusion of previously unstudied species, such as the high Antarctic resident emperor penguins (*Aptenodytes forsteri*).

Emperor penguins are a flagship species of the continental Antarctic. They live in one of the most extreme habitats on earth and have adapted their breeding cycle to the hostile conditions of the polar night. Their breeding area is the sea ice, mostly near the cliffs of the ice shelf. In the course of climate change, considerable alterations in the Southern Ocean ecosystem are to be expected. Under the harsh climatic conditions of the Antarctic continent, any disturbance-related loss of energy can be critical.

Due to the remote location of emperor penguin colonies, their populations have been incompletely quantified. The most comprehensive studies in this regard were provided by Fretwell et al. (2012) and Fretwell and Trathan (2020), who identified 61 colonies and estimated population sizes based on satellite data. Because drone imagery also shows individuals, it provides a high-quality alternative and complement to satellite imagery.

There are so far no studies on the sensitivity of emperor penguins to drones. Evidence comes from studies on the impact of helicopter overflights on emperor penguin chicks (Giese and Riddle 1999) and on the response of emperor penguins to human disturbance (Burger and Gochfeld 2007).

The primary goal of the present study was to use disturbance experiments to determine the effects of drones on emperor penguins. The secondary purpose was to compare these disturbances to those caused by individuals approaching on the ground. Furthermore, we note responses to drones that we observed in other bird species in the area and summarise the knowledge gained since the guidelines were written (ATCM 2018) on the impact of drones on Antarctic wildlife. At the same time, we tested the feasibility of using drone surveys to assess the population of the emperor penguin colony in Atka Bay and infer their breeding pair numbers.

Study site

The study was conducted in the Atka Bay emperor penguin colony (Dronning Maud Land, East Antarctica), designated as Important Bird Area (Harris et al. 2015) No. 109. Atka Bay itself is approximately 20 x 30 km, is part of the Weddell Sea, and is covered with sea ice from March/April to approximately January/February (Mustafa et al. 2016). The emperor penguin colony is located on sea ice anchored to the Ekström Ice Shelf and, in 2009, contained 9657 breeding pairs (Fretwell et al. 2012). Satellite imagery (Mustafa et al. 2016) shows that a smaller subcolony also forms on the ice shelf in some breeding seasons. In 2019 a subcolony was located near infrastructure called "Winterlager" about 3 km west of the main colony. The experiments

on the vulnerability of penguins to disturbance took place exclusively at the colony on the sea ice. Thereby, almost all associated fieldwork was conducted on the ice shelf. At the subcolony, only flights for population mapping were conducted.

Emperor penguins do not build nests. Therefore, they are mobile even during breeding. As a result, the colony is constantly changing both in terms of exact location and extent. Movement patterns are highly dependent on weather, especially wind conditions (Richter et al. 2018b).

Influence of drone overflights on emperor penguins.

Based on experience from previous, methodologically similar studies (Mustafa et al. 2017, 2020; Rümmler et al. 2016, 2018), the studies on the influence of drone overflights on emperor penguins were designed from a behavioural perspective. Two different types of electrically powered drones were used - a quadcopter (1.39 kg, hereafter referred to as "Phantom"; sound level: 74 dB (A) at 5 m distance) and a fixed-wing aircraft (0.65 kg, hereafter referred to as "Magpy"; sound level: 64 dB (A) at 5 m distance). Up to three video cameras were used in parallel to record the behaviour of the penguins. This allowed the reactions of up to three colony sections to be recorded simultaneously.

In order not to influence the observations by additional disturbing factors, a working site on the ice shelf was chosen. This was located at the edge of the shelf ice at a height of about 10 - 12 m above the subcolony on the sea ice. From this point, the main part of the emperor penguin colony was easily observable and the shelf ice edge provided cover for the personnel. The geocoordinates of each camera section were also determined remotely from the work site for the same reason. Only for the experiments on human approach was the sea ice in the area of the penguin colony entered by a person.

Basically, three different experimental setups were used: horizontal flights with linear flight motion at constant speed and altitude, vertical flights with vertical approach to the penguins from a high altitude, and human approach on foot. In addition, recordings were made before each experiment to provide control data.

The behaviours recorded were categorized as flipper-flapping, vigilance, sleeping, movement, and undefined. Flipper-flapping and vigilance were labelled as direct disturbance signals as they mainly occur when penguins are directly confronted by a disturbance. "flipper-flapping" is considered an alarm signal (Giese and Riddle 1999), while vigilance occurs primarily when the penguins see an external stimulus. Sleeping and movement were scored as indirect disturbance signals because they occurred regularly even in the absence of a stimulus. The proportion of sleeping individuals indicates a disturbance if it decreases significantly during drone activity. Movement, on the other hand, if significantly increased compared to the control, may indicate escape behaviour. Behaviours were labelled and counted separately for chicks and adults for individuals visible in the frames (video frames). For horizontal flights, analysis (Rümmler et al. 2021a) showed that penguins responded most strongly with a time delay (10 - 30 s after the drone was at a minimum distance from the penguin in the centre of the frame (TDO)). Further analysis of horizontal flights was therefore limited to this time window. For vertical flights and the human approach, the entire period of the disturbance was analysed.

The analysis of the investigations was organized into two sets of questions and each was published in a scientific journal. The comparison of the different disturbance types (Rümmler 2021a), considered horizontal flights at 20 m above the penguins, vertical flights from 100 m to 5 m, and human approach on foot from at least 200 m to less than 5 m away. Rümmler et al. (2021b), investigated the influence of different flight altitudes for horizontal flights, the different

effects of different drone models (quadrocopter vs. fixed-wing aircraft), and the response of penguins at two different seasonal times.

The horizontal overflights resulted in an increase in disturbance-indicating responses. This increase lasted about 40 s after the drone was directly overhead. Because the response was not as clearly associated with distance as it was with time, we hypothesize that emperor penguins react immediately to the appearance of a drone but perceive it as nonthreatening and therefore calm down quickly.

Under the influence of vertical overflights, there was a gradual increase in the proportion of individuals exhibiting vigilance behaviour or flipper-flapping, increasing as the drone descended below 30 m. In particular, strong reactions were observed in chicks when the drone began to ascend after reaching its lowest altitude. In some cases, the responses included running and group movements. These reactions presumably occur because the drone is louder during ascent due to the greater rotor speed.

During human approach, the proportion of vigilant individuals was highest at distances less than about 30 m, and flipper-flapping increased starting at about 20 m. These movements ceased for most individuals as soon as the person stopped approaching. The birds then returned to their previous behaviours.

In comparison of the different disturbance sources, responses to horizontal overflights were generally less severe than to the human approach and to vertical overflights. In adults, the mean percentage of individuals that responded was not significantly higher than that of the controls. In chicks, however, flipper-flapping occurred more frequently and vigilance significantly more often. Chicks responded strongly to a vertically approaching drone at altitudes below 20 m, both by strong vigilance and by more than 10% of individuals flapping their wings. Adults remained relatively calm under the same circumstances, with less than 5% showing vigilance or flipper-flapping. Vigilance occurred frequently in response to human approach to less than 5 m, in both adults and chicks. Flipper-flapping, on the other hand, was low in chicks (less than 5% of individuals on average) although higher than in control data, but high in adults. Overall, however, it can be concluded that with less than 20% of individuals showing a response, and on the observed brevity of the response, the drone was not causing a massive disturbance.

Analysis of horizontal Phantom flights revealed no differences between altitudes for vigilant chicks, while vigilant adults were not recorded significantly more often at altitudes of 45 m or higher than in the control recordings. Data on flipper-flapping adults showed a significant increase at 70 m and below. Thus, we conclude that flights more than 70 m above adults do not appear to cause measurable disturbance during this breeding phase. However, our data do not support such a statement for chicks. No differences in the various behaviours were found between flight altitudes for either chicks or adults.

For Magpy, it was not possible to determine a disturbance-free flight altitude for either chicks or adults. This was because vigilance behaviours were significantly different from those of the controls even at high altitudes. Interestingly, the vigilance of chicks did not differ from controls during overflights at the lowest tested altitude (35 m). This effect was observed even more strongly in adults, where only the highest tested altitude was significantly different from the control. We cannot say why individuals stopped responding to the fixed-wing model at low altitudes. One possible explanation is that the lower the fixed-wing model flies, the less perceptible its profile becomes. When approaching at high altitudes, the birds are able to see its airplane-like shape. At low altitudes, however, it appears as little more than a horizontal line. It is also possible that when the drone is at such low altitudes, the penguins exhibit behaviour that

we did not measure. Apart from this observation, which cannot be explained with certainty, there were no differences between altitudes and we were unable to define an altitude at which the drone was no longer perceived.

In general, drone altitude was not associated with the proportion of individuals asleep. Thus, we conclude that drone overflights do not disturb emperor penguins enough to wake them up in large numbers. Although there was also no significant relationship between moving individuals and altitude, we nevertheless found a recurring pattern in the data. For adults and chicks, the proportion of moving individuals tends to be lower at lower altitudes during Phantom flights. Although this effect is not strong enough to be significant, we hypothesize that there is a tendency for individuals to stop their previous movement during low overflights. This is unlikely to be associated with higher stress levels, but may increase the time it takes for adults to reach their offspring for feeding. Because the duration of the response is rather short (Rümmeler et al. 2021a.), we do not expect this effect to have long-term consequences during a short-term disturbance, such as a short flyover for mapping.

Comparing the two drone models, the overall response to the Phantom was stronger than the response to the Magpy for both adults and chicks. Due to the poor vision of emperor penguins on land, we believe it is unlikely that emperor penguins visually detect the drones, at least when the drone is at high altitudes. Therefore, it is more likely that the penguins perceive the drones acoustically. It is possible that this explains why the quieter fixed-wing drone causes less disturbance. We rule out the possibility that the fixed-winged drone causes more disturbance because its shape resembles predatory birds such as skuas (Rümmeler et al. 2018). First, we found a lower disturbance effect with this model. Second, emperor penguins are exposed to low levels of predation on land.

When comparing the different times during the season, we can see that there were already differences between the study days in the control situations. It appears that on the second survey day, significantly fewer individuals were sleeping during the control surveys. Similarly, more individuals were already vigilant during the controls on the second day. In addition to seasonal trends, these differences in baseline behaviour are attributable to several factors that were not measured or that cannot be controlled for. These include the possibly higher mobility of older chicks and a possible diurnal pattern in activity. However, information on diurnal variability in emperor penguin behaviour is not currently available. Weather, and thus colony density, is another possible influence. To account for these differences in control situations, we applied ratios representing change relative to control levels on each day. These comparisons generally showed a higher influence of the drone (Phantom) on the second day of the study. The different proportion of sleeping individuals possibly plays a role here, because penguins often do not perceive the drone at all, at least not when it is at high altitudes. We hypothesize that the growth of chicks between November and December and the transition from the crèche phase to the fledging phase (cf. Trathan et al. 2020) is the cause of the increase in response we observed between the two days of investigation.

Overarching observations suggest that emperor penguins see drones no better than human observers do, and probably worse. They presumably perceive them at least in part through sound. However, it is not known how well emperor penguins are able to hear on land. Comparison with observations during horizontal helicopter overflights (Giese and Riddle 1999) shows that helicopters at high altitudes still cause more disturbance than drones at low, or even at very low, altitudes. Because our study is a purely behavioural, it is not possible to estimate whether, and if so, to what extent, behavioural changes have physiological consequences and thus cause higher energy expenditure. However, studies on energy expenditure in stressful

situations (Regel and Pütz 1997) at least agree with our results that chicks are more sensitive to aerial disturbances than adult emperor penguins.

Reactions of other birds to drone overflights

In addition to the experiments on emperor penguins, observations were also noted on the reaction of other birds occurring in the area to drones. Here, in particular snow petrels (*Pagodroma nivea*) frequently showed significant reactions. There were a number of approaches and circles up to mock attacks, in which the animals came as close as a few centimetres to the Phantom. No such behaviour was observed toward the Magpy.

The south polar skuas (*Catharacta maccormicki*) sighted mainly in the area of the emperor penguin colony did not show any reaction to the Phantom. However, on one occasion, we did observe a prolonged pursuit of the Magpy by a south polar skua. Although the pursuit was mostly "observational" from a great distance, there were also some brief close, and possibly aggressive, approaches to the drone.

We repeatedly observed that both drone models were followed and circled by Wilson's storm petrels (*Oceanites oceanicus*). Aggression was not evident. The behaviour rather gave the impression of curiosity to the observers.

Updated state of knowledge on the impact of drones on Antarctic wildlife

The current environmental guidelines for operation of remotely piloted aircraft systems (RPAS) in Antarctica (ATCM 2018) encouraged drone operators to further investigate the environmental impacts of drone use and to publish relevant observations. However, literature search showed that very little work has been published since then on the impact of drones on Antarctic species. Therefore, we also discuss observations on similar species outside Antarctica .

For penguin species, the only studies available other than those on emperor penguins described above (Rümmler et al. 2021a, 2021b) are on chinstrap penguins (*Pygoscelis antarcticus*). Krause et al. (2021) investigated the influence of different overflight altitudes or seasonal timing and compared drone overflights with ground-based mapping. They found no differences in behaviour at flight altitudes of 30 and 46 m compared to the control. There were, however, significant behavioural changes at altitudes of 15 and 8 m. There was also an increase in response to drone flights over the course of the season and a significantly greater response to mapping work by individuals on the ground.

Studies by our research group together with Spanish colleagues (MNCN) methodologically compared the possibilities of behavioural studies and hormonal studies during overflights of a Phantom at two different altitudes. The behaviour of chinstrap penguins showed a clear response at altitudes of 5 m while at 50 m there was no difference from the control situation. The hormone studies mainly showed the limits of methodological suitability, as the effect of handling (capture, blood sampling) could not be distinguished from the influence of the drone.

Krause et al. (2021) also included studies on seals. Antarctic fur seals (*Arctocephalus gazellus*) showed a response at 30 m and lower. The response of leopard seals (*Hydrurga leptonyx*) increased steadily as flight altitudes decreased but was not higher at 46 m than during the controls. Physiological studies based on respiration rate basically confirmed this trend but reached the highest values during the control measurements.

There have been no studies on other Antarctic bird species since Mustafa et al. (2018) with the exception of the observations noted in the present study on snow petrels, southern polar skuas, and Wilson's storm petrels.

In several subantarctic bird species, however, there was no disturbance-related response at a minimum horizontal drone distance of 150 m (Rexer-Huber et al. 2020). These species were the northern giant petrel (*Macronectes halli*), gray-headed albatross (*Thalassarche chrysostoma*), Campbell's albatross (*Thalassarche impavida*), and king albatross (*Diomedea epomophora*). Findings for Antarctic species were presented tabularly based on Mustafa et al. (2018).

Mapping the emperor penguin colony Atka Bay

In addition to the disturbance experiments, drone aerial surveys were used to map and assess the population of the colony. Direct quantification of emperor penguin colonies is currently rare. For other penguin species, however, drones were effectively used to survey populations (e.g., Pfeifer et al. 2019). Our study on emperor penguins his study included both the main colony on the sea ice and the subcolony on the ice shelf ("Winterlager"). Mapping flights were conducted on 16 November 2019 using the Phantom quadcopter at an altitude of approximately 60 m above the penguins. Individual images captured with overlap were processed into an orthomosaic for each of the two sub-colonies (Lowe 2004; Mustafa et al. 2020, 2019, 2017; Pfeifer et al. 2021; Snaveley et al. 2008).

Manual delineation (tracing) of objects (here, penguins) was used for image analysis. A distinction was made between emperor penguin chicks, adult emperor penguins, and other avian species. These classes were generally distinguishable by habitus and size. Shadow casting was a useful additional characteristic. Colour differences were not a distinguishing feature. In contrast, the rather "soft" texture of chick plumage was a clear distinguishing feature from the contrasting plumage of adult birds. A total of 10,024 emperor penguin chicks were detected (subcolony "Winterlager": 2,228; main colony: 7,796). Since emperor penguin pairs lay only one egg per season, we assume that the number of chicks is quite close to the breeding pair number. This assumption is particularly valid because dead chicks are easily seen in the field even after many weeks because temperatures are low and there are few predators (south polar skua: *Catharacta maccormicki* and giant petrel: *Macronectes giganteus*). However, it is difficult or impossible to determine the number of pairs that loose eggs or very small chicks. Therefore, the counts of breeding pairs must be understood as a minimum values.

In contrast to previous remote sensing methods (aircraft or satellite imagery) based on area estimates or the - temporally variable - number of adult individuals, the quantification of chicks made possible by drone imagery allows a much more precise recording of the number of breeding pairs.

Conclusions and outlook

Our study established that it is possible, in principle, to conduct scientific work with commercially available drones even under the environmental conditions of the Antarctic continent. It also confirmed that emperor penguins perceive drone overflights and that this perception is quantifiable by behavioural methods.

The magnitude of the response depends on several factors: the height and timing of the overflight, the model type of the drone, and whether the animals are chicks or adults. Not all the results are easy to interpret. This is mainly due to knowledge of the behaviour of this species still being limited. Nevertheless, it can already be seen with the current state of knowledge that the animals react particularly strongly to vertical overflights. However, it is also clear that the characteristics of drone flights typical for scientific studies, like population surveys (horizontal overflights at heights of more than 50 m), have less influence on the reactions of emperor penguins than methods in which people approach the animals on foot.

Drone-based detection of an emperor penguin colony was successfully demonstrated. In contrast to previous remote sensing methods, this makes it possible to quantify chicks and thus record breeding pair numbers much more accurately.

The results of this study show that - taking into account the natural challenges of continental Antarctica - drones are also a promising tool for scientific work in this part of the world.

1 Einleitung

Das Forschungsvorhaben fand vor dem Hintergrund der weltweit starken Zunahme des Einsatzes von Drohnen statt, von dem auch die Antarktis nicht ausgenommen ist. Die unbemannten Fluggeräte haben ein großes wissenschaftliches Potential z.B. zur effizienten Erkundung und Kartierung schwer zugänglicher Gebiete mit vergleichsweise geringer Invasivität. Sie werden jedoch nicht nur für wissenschaftliche, sondern auch für kommerzielle, journalistische oder private Zwecke eingesetzt. Die Auswirkungen von Drohnen auf die Umwelt sind derzeit ein viel diskutiertes Thema. Der Schutz der unberührten und sensiblen Tierwelt der Antarktis vor möglichen negativen Einflüssen dieser Technologie erscheint besonders wichtig. Dies veranlasste den Umweltausschuss der Antarktis-Konsultativstaaten (Committee of Environmental Protection - CEP), sich mit dem Thema zu befassen. Bedarf bestand sowohl in der Auswertung vorliegender Studien zu den Umweltauswirkungen von Drohneneinsätzen, als auch in der Entwicklung von Richtlinien für den Drohneneinsatz in der Antarktis. Im Mai 2018 verabschiedeten die Antarktis-Vertragsstaaten eine erste Version von Umweltrichtlinien zum Betrieb von Drohnen in der Antarktis (ATCM 2018). Diese beruhen jedoch teilweise auf vorläufigen oder unvollständigen Informationen zum Störungspotenzial der verschiedenen Drohnentypen gegenüber den verschiedenen Tierarten, da aufgrund der Neuartigkeit der Technologie bis dato nur wenige Studien zu diesem Thema vorlagen. Die wenigen vorliegenden Studien konzentrieren sich zudem auf Arten der Subantarktis oder der Antarktischen Halbinsel (Übersicht in Mustafa et al. 2018). Dies trifft auch auf die bisher am häufigsten untersuchte Gruppe Pinguine zu (Gardner et al. 2010; Korczak-Abshire et al. 2016; Mustafa et al. 2020, 2017; Ratcliffe et al. 2015; Rümmler et al. 2018, 2016; Weimerskirch et al. 2018). Die genannte Resolution fordert daher ausdrücklich zu weiteren Untersuchungen auf. Besonderer Bedarf besteht bei bisher nicht untersuchten Arten, wie den in der Hochantarktis lebenden Kaiserpinguinen.

Kaiserpinguine (*Aptenodytes forsteri*) sind eine Charakterart der Antarktis. Sie leben in einem der extremsten Lebensräume der Erde und haben ihren Brutzyklus an die eigentlich lebensfeindlichen Bedingungen der Polarnacht angepasst. Ihr Brutgebiet ist das Meereis, meist in der Nähe der Klippen des Schelfeises. Der Beginn der Brutzeit im Südwinter ist durch niedrige Temperaturen, starke Stürme und Dunkelheit gekennzeichnet. Gleichzeitig ist für die brütenden männlichen Altvögel in dieser Phase keine Nahrung verfügbar. Das Ende der Brutsaison wird wiederum durch den Aufbruch des Meereises eingeleitet. Im Zuge des Klimawandels ist mit erheblichen Veränderungen des Ökosystems Südozean zu rechnen. Unter den rauen klimatischen Bedingungen des antarktischen Kontinents ist der Energieaufwand ein extrem limitierender Faktor für Überleben und Fortpflanzung. Damit kann jede Störung, die mit physiologischen oder Verhaltensänderungen verbunden ist und auf diese Weise zu Energieverlust führen kann, kritisch für das Überleben oder den Reproduktionserfolg der betroffenen Tiere sein.

Aufgrund der abgeschiedenen Lage der Kaiserpinguinkolonien sind deren Populationen bisher nur lückenhaft quantitativ dokumentiert. Die umfassendsten Studien hierzu lieferten Fretwell et al. (2012) und Fretwell und Trathan (2020), die auf der Basis von Satellitendaten 61 Kolonien identifizierten und anhand der Guanoausdehnung Populationsgrößen schätzten. Sie diskutieren aber auch den notwendigen Bedarf an Vergleichsdaten durch andere Zählmethoden. Hier stellt der Einsatz von Drohnen eine hochqualitative Alternative und Ergänzung dar, vor allem aufgrund der Möglichkeit in Drohnenaufnahmen Einzeltiere unterscheiden zu können.

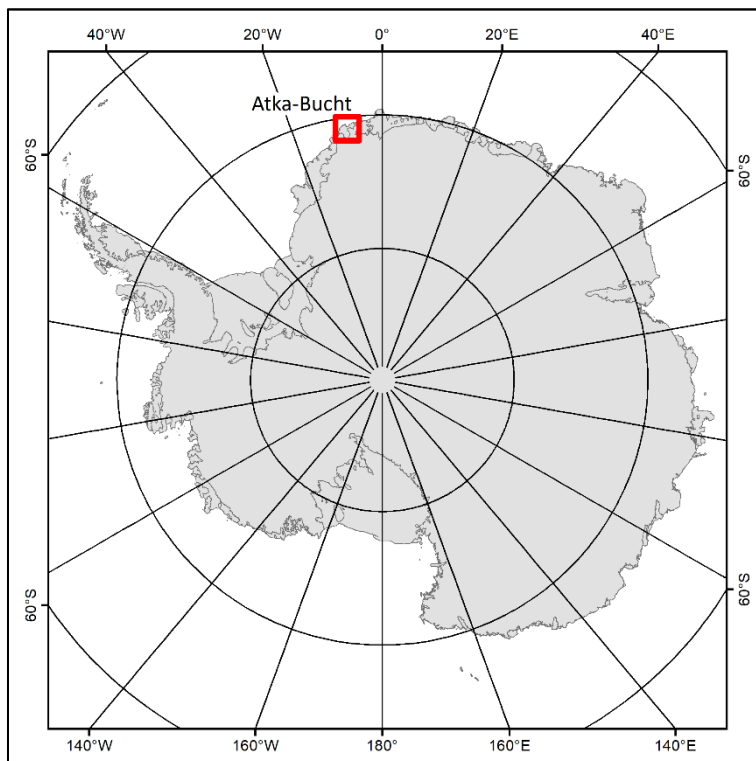
Nach unserem Wissensstand wurden bisher keine Untersuchungen zur Sensibilität von Kaiserpinguinen gegenüber Drohnen durchgeführt. Giese und Riddle (1999) untersuchten den Einfluss von Hubschrauberüberflügen auf Kaiserpinguinküken. Hier wurde eine relativ hohe Störanfälligkeit im Vergleich zu anderen Arten festgestellt, weshalb vorgeschlagen wurde, existierende Guidelines zu überarbeiten. Eine weitere Untersuchung zur Reaktion von Kaiserpinguinen auf menschliche Störung stammt von Burger und Gochfeld (2007). Hier wurden adulte Pinguine auf ihrem Weg zur bzw. von der Kolonie beobachtet, die auf Touristen trafen. Dabei konnten deutliche Veränderungen festgestellt werden, zum Beispiel Stehenbleiben, das Ändern des Laufweges, oder das vermehrte Rufen. Es wurden jedoch auch Unterschiede zwischen verschiedenen Tageszeitpunkten und unterschiedlichen Verhaltensweisen der Touristen beobachtet, was darauf hindeutet, dass die Reaktion von vielen Faktoren abhängen.

Der primäre Zweck der Untersuchungen zur vorliegenden Studie war es, mithilfe gezielter Störungsexperimente die Auswirkungen von Drohnen auf Kaiserpinguine zu ermitteln. Sekundäres Ziel ist es, diese Störungen mit denen durch sich am Boden nähernde Personen zu vergleichen. Beobachtete Reaktionen anderer im Gebiet vorkommender Vögel auf Drohnen wurden ebenfalls registriert und die seit der Erstellung der Richtlinien (ATCM 2018) neu gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss von Drohnen auf die antarktische Tierwelt zusammengefasst. Gleichzeitig wurde die Möglichkeit getestet, die Population einer Kaiserpinguinkolonie durch Drohnenbefliegung zu erfassen.

2 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden in der Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht/Atka Iceport (Dronning Maud Land, Ostantarktis) durchgeführt (Abbildung 1). Die Kolonie befindet sich auf dem am Ekström Ice Shelf verankerten Meereis etwa bei 8°08' W/70°37' S (Abbildung 2). Das ca. 8.700 km² große Ekström-Eisschelf ist durchschnittlich 850 m mächtig und fließt mit durchschnittlichen Geschwindigkeiten von ca. 144 m/a in Richtung Weddellmeer (Sandhäger und Blindow 2000). Die Station Neumayer III befindet sich im Nordosten des Schelfeises. Die ca. 20 x 30 km ausgedehnte Atka-Bucht ist Teil des Weddellmeeres und von März/April bis ca. Januar/Februar mit Meereis bedeckt (Mustafa et al. 2016).

Abbildung 1 Lage der Atka-Bucht in der Antarktis



Eigene Darstellung - ThINK

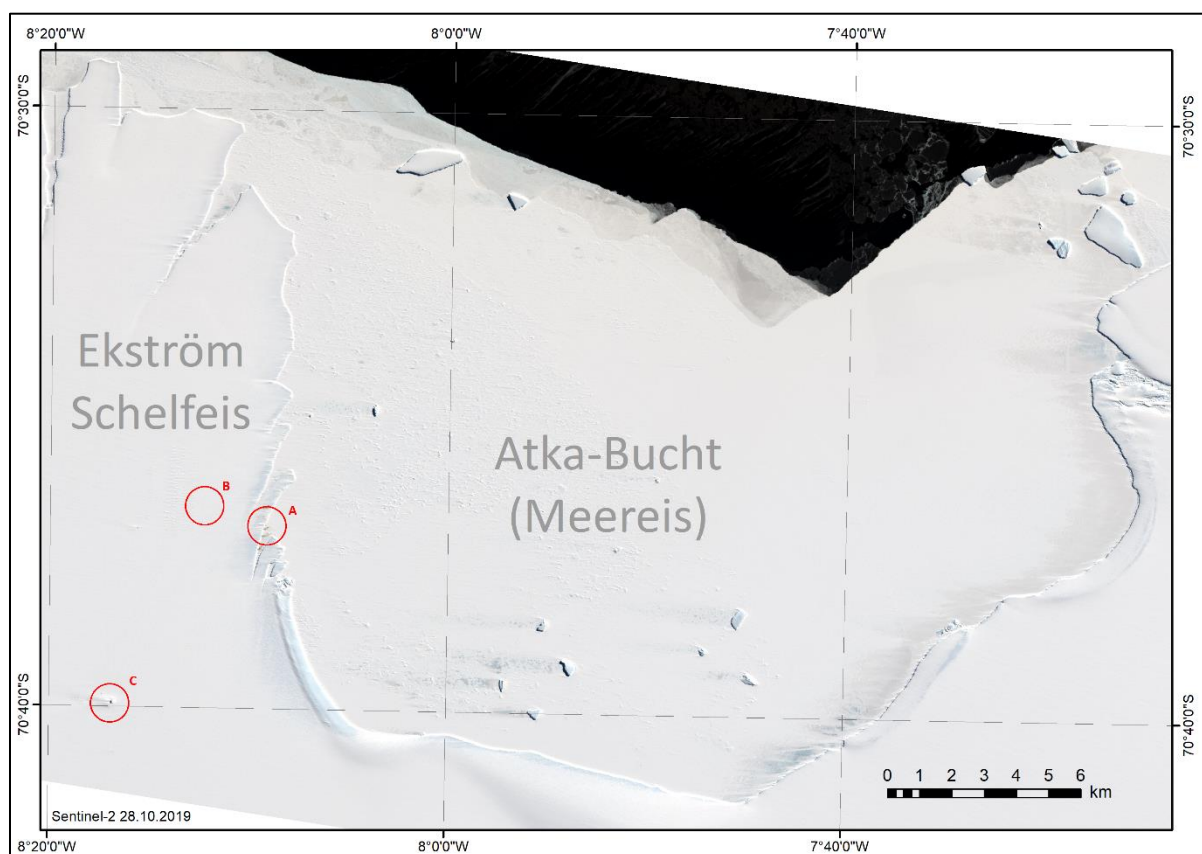
Die Kolonie Atka-Bucht ist als Important Bird Area (IBA ANT 109) ausgewiesen, da sie mehr als 1 % der globalen Population dieser Art enthält (Harris et al. 2015). In einer Analyse von hochauflösenden Satellitenbildern aus dem Jahr 2009 ermittelten Fretwell et al. (2012) eine Populationsgröße von 9.657 Brutpaaren. Da Kaiserpinguine in der Brut nicht an Nester gebunden sind, ist die Kolonie sowohl bezüglich des genauen Standorts als auch in ihrer Ausdehnung veränderlich. Die Kolonie wird seit 2013 mithilfe eines automatischen Kamerasystems (SPOT Observatorium) hinsichtlich ihrer räumlichen Dynamik ganzjährig vom höher gelegenen Schelfeis aus beobachtet (Richter et al. 2018a). Dabei zeigte sich, dass die Bewegungsmuster der Kolonie stark von der Witterung, insbesondere den Windverhältnissen abhängen (Richter et al. 2018b).

Die räumliche Ausdehnung in ihrer historischen Veränderlichkeit und Abhängigkeit von der Dynamik der Meereisausdehnung wurde von uns anhand von Satellitenbildern für den Zeitraum seit 1972 untersucht (Mustafa et al. 2016). Dabei zeigte sich, dass sich die Pinguinkolonie

bevorzugt in den stabilsten Bereichen des Meereises aufhält. Zur Expeditionszeit traten Temperaturen von bis zu -20°C auf. Mehrere mehrtägige Stürme erreichten Windgeschwindigkeiten von 20 bis 30 m/s (Fromm et al. 2020).

Die Geländearbeiten für die Untersuchungen der Störanfälligkeit von Pinguinen fanden ausschließlich am Schelfeisrand im Bereich des SPOT-Observatoriums (Richter et al. 2018a) statt (Markierung A in Abbildung 2). Dieses befindet sich etwa 100 m entfernt vom Rand der Kolonie in einer Höhe von ca. 10 - 12 m über dem Meeresspiegel, auf dessen Niveau sich das Meereis mit der Pinguinkolonie befindet. Von hier aus war der Hauptteil der Kaiserpinguinkolonie gut beobachtbar, während die Schelfeiskante dem Personal Deckung bot, so dass Anfahrt, Vorbereitungsarbeiten oder Start- und Landevorgänge keine zusätzliche Störung verursachten. Für einen Teil der Experimente (Menschliche Annäherung) wurde das Meereis im Bereich der Pinguinkolonie betreten. Die Entfernung zur Station Neumayer III beträgt ca. 7 - 8 km und wurde per Schneemobil zurückgelegt. Neben der Hauptkolonie bildete sich eine Subkolonie im östlichen Bereich des Winterlagers (B). An der Subkolonie wurden ausschließlich Flüge zur Populationserfassung durchgeführt.

Abbildung 2 Das Untersuchungsgebiet mit den Elementen Pinguinhauptkolonie auf dem Meereis (A), Pinguinsubkolonie auf dem Schelfeis (B) und der Station Neumayer III (C)



Eigene Darstellung - THINK (Datengrundlage ESA)

3 Einfluss von Drohnen auf Vögel in der Antarktis

Entsprechend der Beauftragung lag der Schwerpunkt dieser Untersuchung auf der Betrachtung der Wirkung von Drohnen auf Kaiserpinguinen. Vergleichbare Studien an anderen Arten verfolgten bisher fast ausschließlich einen verhaltensbiologischen Ansatz. Dem folgt auch die vorliegende Untersuchung. Eine Reihe von Überlegungen zur parallelen Anwendung physiologischer Methoden (z.B. Messung von Hormonen oder Herzschlagraten) wurden am Beginn des Projektes ausführlich recherchiert und diskutiert. Letztlich wurden jedoch sämtliche alternative Ansätze verworfen, da sie zu invasiv für die untersuchten Tiere, zu aufwändig für die Arbeit unter den extremen Umweltbedingungen oder zu unsicher bezüglich der Repräsentativität und Aussagekraft ihrer Ergebnisse sind. Stattdessen wurden bereits bewährte verhaltensbiologische Methoden weiterentwickelt, um sie an die Eigenheiten dieser Art anzupassen. Als besondere Herausforderung erwies sich dabei die hohe Mobilität der Kaiserpinguine, die, im Unterschied zu anderen Vögeln, keine Nester bauen. Sie tragen sowohl das Ei als auch den Nestling am Körper und sind daher nicht an feste Nestpositionen gebunden.

3.1 Einfluss von Drohnenüberflügen auf Kaiserpinguine

3.1.1 Methodik

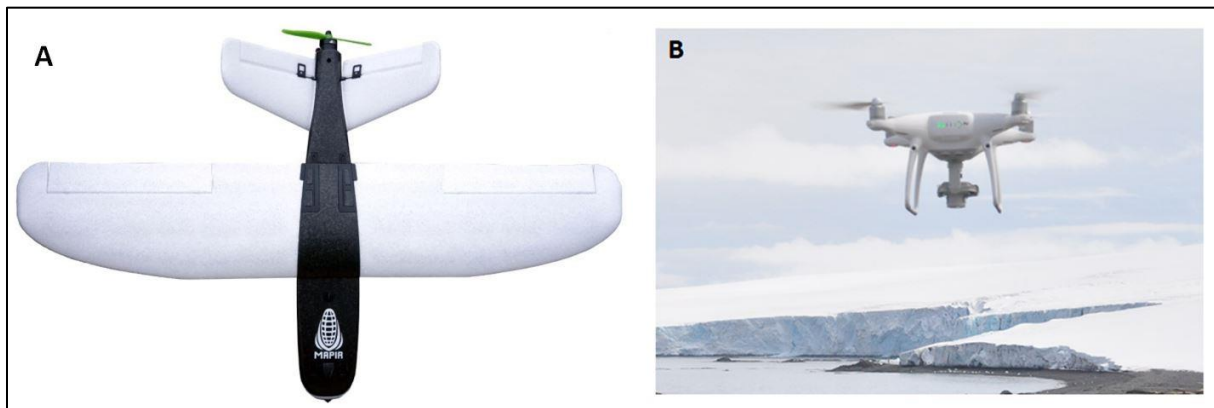
3.1.1.1 Eingesetzte Technik

3.1.1.1.1 Drohnen

Für diese Untersuchungen wurden Drohnen zweier grundsätzlich verschiedener Bautypen eingesetzt – ein Multikopter- und ein Starrflüglermodell (Abbildung 3).

Als Multikopter kam der in antarktischen Verhältnissen schon bewährte Quadrocopter „DJI Phantom 4 Pro“ zum Einsatz (vgl. Mustafa et al. 2019). Im Gegensatz zum Starrflügler kann dieser Drohnentyp senkrecht starten und landen, benötigt dementsprechend keine besonderen Start- und Landeflächen. Um die Gefahr eines „Umkippens“ durch Windböen in Bodennähe zu vermeiden, wurde jedoch oft manuell aus der Hand der Kopilotin gestartet bzw. gelandet. Auch diese Drohne ist mit einer Kamera ausgestattet, mit der Aufnahmen während des Fluges gemacht werden können. Mit der Software „MapPilot for DJI – Business“ v. 4.1.0 kann der Flug ebenfalls im Vorhinein programmiert werden. Allerdings ist die Programmierung hier nicht so präzise wie mit dem „MissionPlanner“ v. 1.3.68, da sie für die flächenhafte Abdeckung bei Kartiermissionen optimiert ist und nicht für das 3-dimensionale Ansteuern definierter Punkte.

Abbildung 3 Die verwendeten Drohnenmodelle: Starrflügler Mapir Magpy (A) und Multikopter DJI Phantom 4 Pro (B)



A Quelle: © 2021 MAPIR CAMERA; B Eigene Darstellung - ThINK

Um die Störung, welche von Starrflügeldrohnen ausgeht zu untersuchen, wurde das Modell „MAPIR Magpy“ eingesetzt. Diese ist eine relativ leichte Drohne (0,58 kg) mit einer Flügelspannweite von 86 cm (siehe Tabelle 1). Sie ist standardmäßig mit einer „MAPIR Survey 3“ Kamera ausgestattet, mit der während des Fluges Aufnahmen des Bodens gemacht werden können. Die Flugstecke für die Störungsflüge wurde im Vorhinein mit der Mission-Control Software „Mission Planner“ v.1.3.68 programmiert. Die Flüge fanden vollautonom statt und wurden vom Flugcomputer „Pixhawk“ gesteuert. Die Orientierung der Drohne im Raum erfolgt anhand von GNSS-Empfängern, IMU (Inertial Measurement Unit; u.a. Luftdrucksensor, Kompass, Beschleunigungssensor) und Airspeed-Sensor. Gestartet wurde die Drohne durch Anwurf aus der Hand der Kopilotin. Während des Fluges bestand permanente Funkverbindung zur Computerfernsteuerung des Piloten, der darüber die Flugvorbereitung, die Flugüberwachung und im Notfall auch die Eingabe von Steuerungsbefehlen übernahm. Die „MAPIR Magpy“ landet mittels Bauchlandung. Das relativ ebene Schelfeis bot hierfür gute Bedingungen. Start und Landung fanden somit außerhalb der Sicht- und Hörweite der Pinguine statt.

Abbildung 4 Anwerfen der Mapir Magpy (links) und Landung der DJI Phantom 4 Pro "in der Hand" (rechts)



Eigene Darstellung - ThINK

Um die Akkus beider Drohnen während der mehrstündigen Experimente nicht auskühlen zu lassen, wurden diese in isolierenden Behältern gelagert, in denen zusätzliche Wärme durch

Akku-Handwärmer geliefert wurde. Für den Transport wurde ein Holzaufbau für den Schneemobilanhänger angefertigt, welcher für zusätzliche Isolation und Windschutz sorgte.

Tabelle 1 Technische Parameter der eingesetzten Drohnen Mapir Magpy und DJI Phantom 4 Pro

Modell	Magpy	Phantom 4 Pro
Hersteller	MAPIR	DJI
Typ	Starrflügler	Multikopter (Drehflügler)
Anzahl der Rotoren	1	4
Gewicht [kg]	0,65	1,39
Größe [cm]	86 x 58	29 x 29
Max. Flugzeit [min]	30	20
Fluggeschwindigkeit [m/s]	13	15
Lautstärke (5 m Entfernung)	64 dB(A)	74 dB(A)

Im weiteren Text werden die beiden Drohnenmodelle verkürzt als „Magpy“ (Mapir Magpy) und „Phantom“ (DJI Phantom 4 Pro) bezeichnet.

3.1.1.1.2 Videokameras

Um das Verhalten der Pinguine während der verschiedenen Störungsexperimente aufzeichnen zu können, wurden drei Camcorder des Modells „Panasonic HC-V380“ eingesetzt (Tabelle 2). Als Auswahlkriterien standen eine möglichst lange Brennweite und Akkulaufzeit des Camcorders im Vordergrund. Die große Brennweite war erforderlich, um die Pinguine aus möglichst großer Entfernung (>50 m) ungestört aufnehmen zu können. Die lange Akku-Laufzeit wurde benötigt, um die mehrstündigen Experimente unterbrechungsfrei aufzeichnen zu können. Sie wurde durch die Verwendung einer externen Powerbank erreicht, (Abbildung 5) deren Kapazität (25 Ah) die des internen Akkus (2 Ah) um ein Vielfaches übersteigt.

Tabelle 2 Technische Parameter des Camcorder Modells „Panasonic HC-V380“

Bezeichnung	Eigenschaft
Sensor	1/5,8-Zoll BSI MOS
Videoauflösung	1920 x 1080 Pixel mit 50 Bilder pro Sekunde
Lichtstärke	F1.8 - F4.2
Brennweite [KB]	28 - 1740 mm
Mikrofon	2-Kanal Stereo
Abmessungen [BxHxT]	60 x 62 x 129 mm
Gewicht (ohne Akku)	252 g
Videoauflösung	1920 x 1080 Pixel mit 50 Bilder pro Sekunde

3.1.1.2 Versuchsaufbau

Während der Messreihen wurden ausgewählte Teilbereiche der Kolonie per Videokamera gefilmt. Um die Kamera vor Wind, driftendem Schnee und starker Auskühlung zu schützen, waren diese in isolierendem Material (Neopren) verpackt. Die Betriebstemperatur der Kamera hat hier für genügend Wärmeabgabe gesorgt. Um die Stromversorgung (externe Powerbank) gegen Auskühlung zu schützen wurde sie in einer mit einem Thermoelement (elektrischer, akkubetriebener Handwärmer) ausgestatteten Isolierbox untergebracht. Für eine höhere Standsicherheit wurde das Stativ mit einer Eisschraube am Untergrund fixiert. Im Unterschied zu unseren vorherigen Störungsexperimenten (Rümmler et al. 2018, 2016) wurden bei dieser Studie drei Camcorder parallel eingesetzt. Dadurch konnten während eines Überfluges gleichzeitig drei Bereiche der Kolonie beobachtet werden, was die Anzahl der benötigten Drohnenüberflüge und damit auch den Zeitaufwand und die Dauer der Störung erheblich verringerte.

Abbildung 5 Versuchsaufbau an der Kolonie Atka-Bucht. Die Videokameras zur Beobachtung der ausgewählten Pinguine sind gegen Kälte und Wind isoliert. Die Stromversorgung wurde über eine Powerbank in Isolierboxen (im Stoffbeutel) mit Thermoelement gewährleistet. Die Positionen der untersuchten Gruppen wurden mit Kompass (auf dem Bild zu sehen) und Laserentfernungsmesser ermittelt.



Eigene Darstellung - THINK

Die Anordnung im Gelände wurde so gewählt, dass sämtliche Koloniebereiche mit dem gleichen Flug nacheinander befliegen werden konnten. Dies ersparte nicht nur Zeit, sondern sorgte auch für vergleichbare äußere Bedingungen. Die Positionen der untersuchten Koloniebereiche wurden so gewählt, dass eine gegenseitige Beeinflussung vermieden werden kann. Außerdem sollten die Ausschnitte möglichst viele gut sichtbare Individuen beinhalten (erreicht wurden 94 - 288 Individuen, aus 31 - 96 Adulten und 60 - 206 Küken bestehend). Ihre Geokoordinaten

wurden vom Kamerastandort aus durch Triangulation unter Verwendung von Kompass und Laserentfernungsmesser ermittelt. Zur Positionsfeststellung war daher kein Betreten der Kolonie und damit zusätzliches Stören notwendig (Abbildung 5). Die hierfür notwendigen Werte der lokalen Missweisung des Erdmagnetfeldes (-14°) wurden durch aktuelle geophysikalische Messungen an der Station Neumayer III geliefert.

Eine Besonderheit der hier untersuchten Tierart ist die hohe Mobilität während des Brütens. Da Kaiserpinguine keine Nester bauen, wechseln sie während der gesamten Brutzeit täglich und auch innerhalb eines Tages häufig ihre Position. Daher mussten an jedem Untersuchungstag neue Standorte gewählt und eingemessen und die Flugplanung erneuert werden.

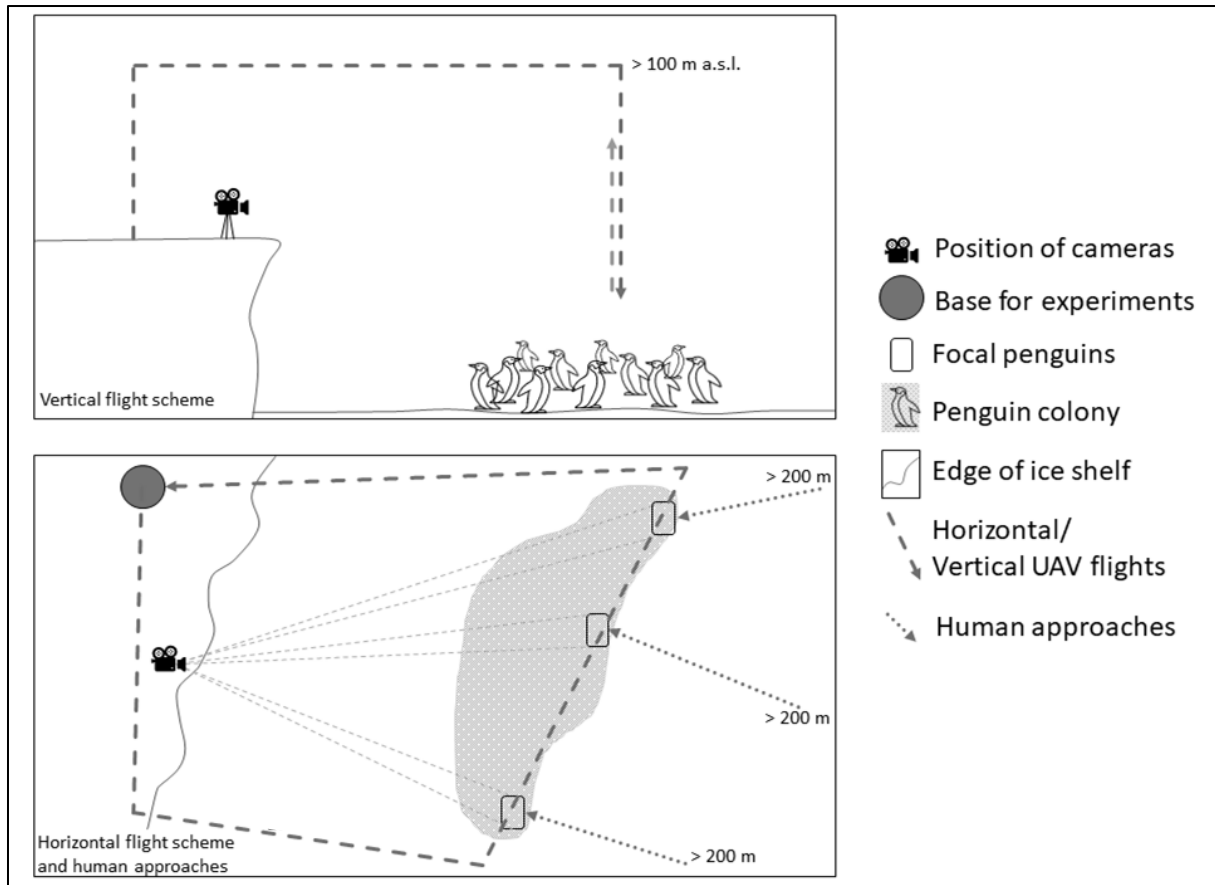
Grundsätzlich wurden die Experimente in drei verschiedenen Versuchsanordnungen (Abbildung 6) durchgeführt:

- ▶ *Horizontalflüge* wurden bei gleichbleibender Höhe und Geschwindigkeit (5 m/s) linear (ohne Richtungsänderung) über die bis zu drei beobachteten Kameraausschnitte geführt. Das Heranführen der Drohnen an die Ausgangsposition des Überflugs erfolgte hinter der Schelfeiskante und damit überwiegend außerhalb des Sicht- und Hörbereiches der beobachteten Pinguine. Es wurde jeweils mit der größten Höhe begonnen. Jede Höhe wurde dreimal wiederholt. Horizontalflüge wurden sowohl mit dem Modell Phantom als auch mit dem Modell Magpy durchgeführt. Die Phantom-Drohne wurde zwischen jedem Überflug kurz zwischengelandet, da immer nur ein Flug programmierbar war, der nach der Zwischenlandung jedoch direkt wiederholt werden konnte. Die Magpy flog zwischen jedem Überflug einen weiten Bogen über dem Schelfeis, um eine vergleichbare Pause zwischen den Überflügen zu gewährleisten.
- ▶ *Vertikalflüge* wurden jeweils für einzelne Gruppen durchgeführt. Dabei wurde die Drohne am Startplatz auf eine Höhe von 145 m über dem Meereis gebracht und dann über die Position der zu beobachtenden Gruppe manövriert. Hier wurde ein vertikales Sinken mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s eingeleitet. Nach Erreichen der geringsten Höhe (5 m) wurde die Drohne durch schnellen senkrechten Aufstieg wieder entfernt. Vertikalflüge wurden nur mit dem Modell Phantom durchgeführt. Die Drohne verblieb in 145 m Höhe über der Kolonie, bis die Wiederholung des Vertikalfluges gestartet wurde, um unnötigen Anflugverkehr über der Kolonie zu vermeiden.
- ▶ Zum Vergleich mit den drohneninduzierten Störungen führten wir auch Messreihen mit *einer sich nähernden Person (Fußgänger)* als Störstimulus durch. Dafür begab sich die „störende“ Person auf das Meereis und näherte sich den jeweils beobachteten Pinguinen kontinuierlich und mit möglichst gleichbleibender Geschwindigkeit zu Fuß. Eine weitere Person befand sich währenddessen an der Kamera auf dem Schelfeis, um die gerichtete Annäherung zu koordinieren. Die zurückgelegte Strecke wurde per GNSS Gerät (eTrex 20x, Garmin) aufgezeichnet, um später die Entfernungen exakt synchronisieren zu können.

Zur Vermeidung kumulativer Effekte wurde auf genügend zeitlichen Abstand zwischen allen Störvorgängen geachtet. Aufnahmen des Ruhezustandes (ohne Störung, Kontrolldaten) wurden an jedem Messtag vor Beginn der Experimente und ohne erkennbare sonstige Einflüsse (Flugzeugaktivität, andere Forschende) durchgeführt.

Alle Ereignisse eines Messtages wurden per Audioprotokoll festgehalten.

Abbildung 6 Schematische Darstellung der drei Versuchsanordnungen: Vertikalflüge (oben), Horizontalflüge (unten) und Personenannäherung (unten)



Verändert nach Rümmler et al. 2021a

3.1.1.3 Kategorien der Verhaltensweisen

Die Verhaltensweisen wurden in optisch möglichst deutlich voneinander unterscheidbare Kategorien unterteilt. Im Unterschied zu anderen antarktischen Pinguinarten (Rümmler et al. 2018, 2016) ließen sich bei Kaiserpinguinen keine ausgeprägten Drohgebärden feststellen. In Anlehnung an Kooyman und Mullins (1990) wurden folgende Kategorien verwendet:

► Flügelschlagen

Abspreizen der Flügel und aufgeregtes Schlagen, teilweise in Verbindung mit Vigilanz/Bewegung

► Vigilanz

Umhersehen/Beobachtung der Umgebung; erkennbar durch Bewegung des Kopfes, Strecken des Hals, Schnabelbewegung in nicht mehr horizontale Position

► Schlafen

Kopf nach hinten gedreht und der Schnabel unter die Flügel gesteckt

Anmerkung: Schlafen findet auch im Liegen oder im Stehen ohne unter die Flügel gesteckten Schnabel statt, allerdings lassen sich diese Schlafhaltungen nicht eindeutig von Stehen und Liegen im Wachzustand unterscheiden, daher wurde nur das oben beschriebene Verhalten in diese Kategorie aufgenommen.

► Bewegung

Gehen oder Rutschen, oder Wechsel der Position zwischen Liegen und Stehen bzw. umgekehrt.

► undefiniert

Alle Individuen, die nicht deutlich in eine der oben beschriebenen Kategorien passen.

Flügelschlagen und Vigilanz treten meist auf, wenn die Pinguine direkt mit einer Störung konfrontiert werden. Daher haben wir diese Verhaltensweisen als "direkt störungsinduzierte Verhaltensweisen" bezeichnet. Die anderen Verhaltensweisen treten auch in Abwesenheit einer Störung regelmäßig auf. Sie zeigen daher weniger direkt eine Reaktion auf eine Störung an. Von den direkten störungsinduzierten Verhaltensweisen ist das Flügelschlagen als Alarmsignal zu werten (Giese und Riddle 1999). Vigilanz hingegen tritt hauptsächlich bei der Beobachtung der Drohne oder anderer externer Reize auf.

Neben den direkten störungsinduzierten Verhaltensweisen ist es möglich, Schlafen als Signal für Störung oder Unruhe innerhalb der Kolonie zu verwenden. Das bezieht sich darauf, dass die Anzahl der schlafenden Individuen abnimmt, wenn die Vögel durch den Stimulus geweckt werden. Die Verhaltensweise Bewegung kommt in Kaiserpinguin-Kolonien regelmäßig vor, die Anwesenheit von Drohnen könnte sie jedoch sowohl verstärken als auch reduzieren.

3.1.1.4 Auswertung der Videoaufnahmen

Die in Kapitel 3.1.1.3 aufgeführten Kategorien der Verhaltensweisen sind in den Standbildern (Frames) deutlich erkennbar. Daher war es möglich, für die Auswertung der Videoaufnahmen das Programm ‚ClickPoints‘ (Gerum et al. 2017) zu verwenden (Abbildung 7), welches ursprünglich für Zählvorgänge in Fotos entwickelt wurde. Dieses Programm ermöglicht das Einladen und Bild-für-Bild wiedergeben von Videos, so dass die sichere Einschätzung der Verhaltensweisen auch in auf einzelnen Frames unsicheren Fällen gewährleistet war.

In Rümmler et al. (2021a) analysierten wir für Horizontalflüge in niedriger Höhe mit der Phantom (siehe 3.1.1.5.1) die Aufnahmen zwischen jeweils einer Minute vor und nach dem Moment, in dem sich die Drohne in minimaler Entfernung von den Pinguinen im Zentrum des Bildausschnitts befand (TDO - Time of direct overflight/Zeit des direkten Überflugs) (Abbildung 11). Für Horizontalflüge konnten wir so das Zeitfenster ermitteln, in dem die Reaktion stattfindet (siehe unten). Darauf aufbauend analysierten wir in der zweiten Studie (Rümmler et al. 2021b) konkret eine Zeitspanne 10 - 30 s nach dem Zeitpunkt, an dem sich die Drohne in minimaler Entfernung von den Pinguinen im Zentrum des Bildausschnitts befand (TDO). Für Vertikalflüge und die Annäherung einer Person wurde der gesamte Zeitraum des Störungsvorganges analysiert.

Analysiert wurde ein Frame alle 3 s für die Untersuchung nach Störungstyp bzw. ein Frame alle 2 s für die anderen Untersuchungen. Alle einzelnen Pinguine in den Videobildern, die deutlich sichtbar und nicht hinter anderen versteckt waren, wurden gezählt und einer entsprechenden Verhaltenskategorie zugeordnet.

Abbildung 7 Screenshot der Auswerteoberfläche des Programmes ‚ClickPoints‘ (Gerum et al. 2017). Zu sehen ist ein Kameraausschnitt der Kolonie während der Auszählung der Verhaltensweisen. Jedem deutlich erkennbaren Individuum wurde sein Verhalten entsprechend der oben links definierten Klassen zugeordnet.



Eigene Darstellung – THINK

3.1.1.5 Fragestellungsbezogene Methodik

Um die Erkenntnisse der Untersuchungen zum Einfluss von Drohnen auf Kaiserpinguine der internationalen Fachwelt zur Verfügung zu stellen, wurden zwei Publikationen angefertigt (Rümmler et al. 2021a, 2021b). Detaillierte Angaben z.B. zu den statistischen Werten und Verfahren sind dort nachzuschlagen.

3.1.1.5.1 Einfluss der Störungsart (Rümmler et al. 2021a)

Es wurde untersucht, wie sich verschiedene Arten der Störung, Horizontalflug, Vertikalflug und Personenannäherung auf das Verhalten der untersuchten Pinguingruppen auswirken. Für diesen Teil der Untersuchung wurde lediglich der Quadrocopter Phantom verwendet, da Vertikalflüge konstruktionsbedingt mit einem Starrflügler nicht möglich sind und somit die Vergleichsmöglichkeit entfällt.

- Die *Horizontalflüge* fanden mit drei Wiederholungen in einer Höhe von 20 m über dem Meereis statt. Dabei wurden jeweils drei verschiedene Koloniebereiche beobachtet. Bei der Analyse wurde besonderes Augenmerk auf die Ermittlung des zeit- und distanzabhängigen Musters des Reaktionsverlaufes gelegt.
- *Vertikalflüge* wurden beginnend mit einer Höhe von 100 m über den beobachteten Pinguingruppen in einem gleichmäßigen ununterbrochenen Sinkflug bis hinab auf 5 m durchgeführt. Nach dem Wiederaufstieg auf die Ausgangshöhe verharrte die Drohne für mindestens drei Minuten im Schwebflug bzw. bis keine offensichtlichen Reaktionen in der Pinguinkolonie mehr sichtbar waren. Erst dann begann die nächste Wiederholung. Zwei Gruppen wurden so im November beobachtet, wobei bei der zweiten aufgrund der starken

Reaktion auf den Aufstieg der Drohne nach Beendigung der Annäherung nur eine Wiederholung durchgeführt werden konnte.

- Für die Untersuchung der Wirkung einer sich *zu Fuß nähernden Person*, begab sich diese auf das Meereis. Die Annäherungsstrecke betrug mindestens 200 m und wurde geradlinig und mit gleichmäßiger Geschwindigkeit (ca. 3 km/h) durchgeführt. Die Annäherung erfolgte soweit, bis deutliche Bewegungen bei den angepeilten Pinguinen beobachtet wurden, in manchen Fällen bis auf wenige Meter. Dieses Experiment wurde an drei verschiedenen Gruppen wiederholt.
- Zur Gewinnung von *Kontrolldaten* wurden 30 zufällig ausgewählte Frames aus dem Zeitraum vor den Störungsexperimenten ausgewählt.

3.1.1.5.2 Einfluss von Flughöhe, Drohnentyp und Saisonzeitpunkt (Rümmler et al. 2021b)

Es wurden an zwei Untersuchungstagen Horizontalflüge auf sechs unterschiedlichen Höhen von 145 – 20 m über der Pinguinkolonie durchgeführt (Tabelle 3). Begonnen wurde stets mit den größten Höhen, bei dreimaliger Wiederholung jeder Flughöhe. Die Auswertung umfasst das Verhalten von jeweils drei beobachteten Koloniebereichen entlang der linearen Flugstrecke.

Tabelle 3 Flughöhen an den beiden Untersuchungstagen

Flughöhe	14.11.2020 Phantom	29.12.2020 Phantom	14.11.2020 Magpy
20 m	X	X	
35 m		X	X
45 m	X	X	X
70 m	X	X	X
95 m	X	X	X
145 m	X		

Verändert nach Rümmler et al. 2021b

Die untersuchten Zeitpunkte entsprechen unterschiedlichen Phasen im Brutzyklus: Der erste Untersuchungstag (Tag 1) liegt noch mitten in der Crèche-Phase während der zweite Untersuchungstag (Tag 2) nach Trathan et al. (2020) bereits in der Phase des Flüggewerdens liegt. Am zweiten Untersuchungstag wurden beide Drohnenmodelle eingesetzt. Auch für diese Untersuchungen stammen die Kontrolldaten aus 30 zufällig ausgewählten Frames, die an den verschiedenen Untersuchungstagen vor dem Beginn der Experimente aufgezeichnet wurden, um einen Einfluss der Experimente ausschließen zu können.

$$a_i = \frac{\text{Anzahl Adulter mit Verhalten } i}{\text{Anzahl im Frame sichtbarer Adulter}} \quad (1)$$

$$c_i = \frac{\text{Anzahl Küken mit Verhalten } i}{\text{Anzahl im Frame sichtbarer Küken}} \quad (2)$$

i ... Verhaltensweise (v – Vigilanz; f – Flügelschlagen; m – Bewegung; s – Schlafen)

Die Vergleiche wurden anhand der Anteile (Formeln 1 und 2) von Individuen, die ein bestimmtes Verhalten zeigen, an den insgesamt in einem Frame sichtbaren Individuen durchgeführt.

3.1.2 Ergebnisse

3.1.2.1 Einfluss verschiedener Störungsarten

3.1.2.1.1 Kontrollbeobachtungen

Die Kontrolldaten ergaben relativ konstante Anteile an Individuen, die verschiedene Verhaltensweisen zeigten (Abbildung 8). Die Kategorie Schlafen hatte die größte Spannweite und den deutlich größten Anteil mit bis zu ca. 50 % der Adulten und 10 - 45 % der Küken, die beobachtet wurden. Vigilanz wurde meist bei weniger als 10 % der Individuen beobachtet und Flügelschlagen bei noch weniger (<3 % in den meisten Frames). Vigilanz und Flügelschlagen sind somit gute Indikatoren für Störungen, da sie in ungestörten Situationen nur selten auftreten.

Abbildung 8 Anteile der Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während der Kontrollbeobachtungen zeigten; grau: GAM-Anpassung siehe Rümmler et al. (2021a) mit Konfidenzintervall 0,95

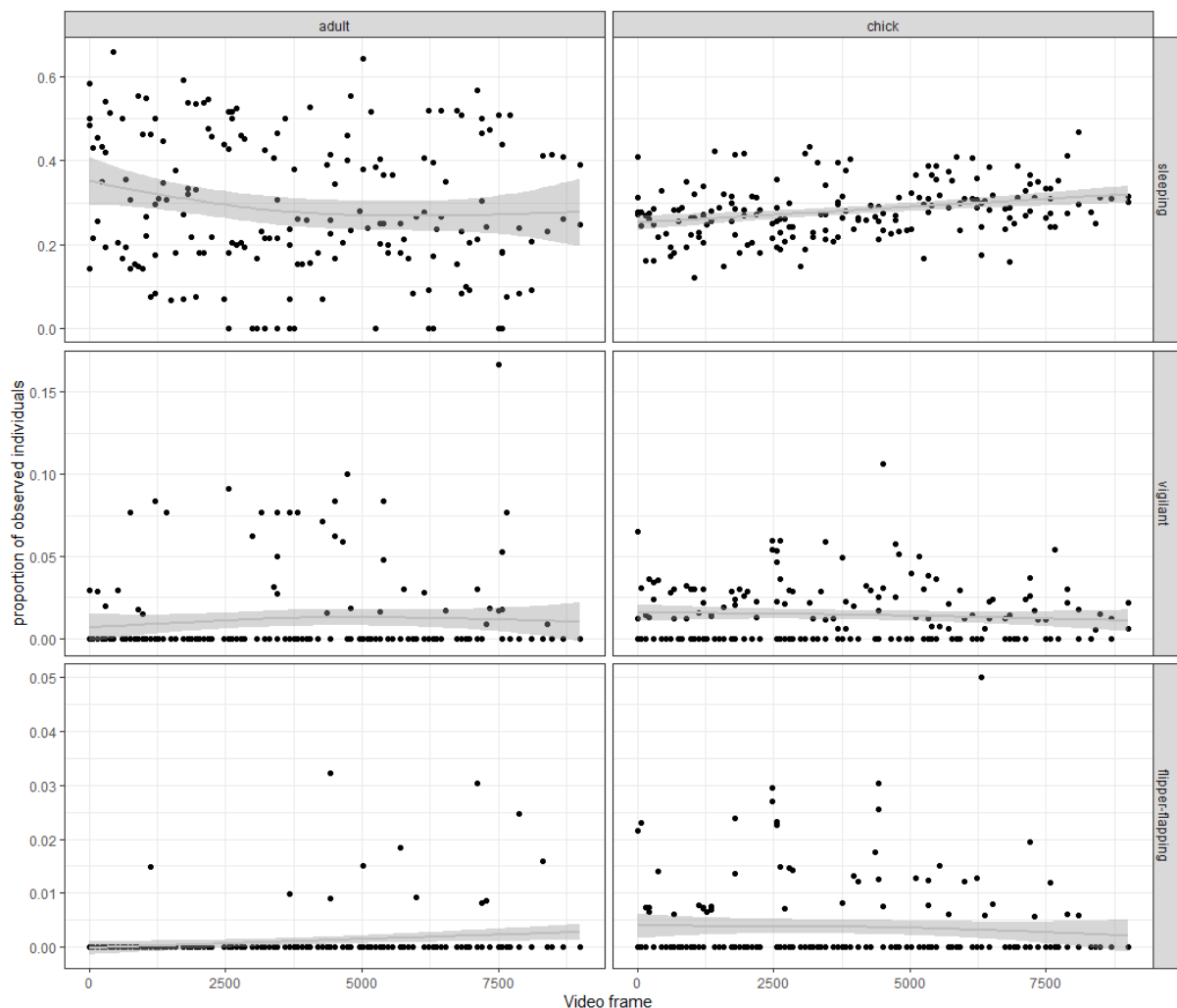


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

3.1.2.1.2 Horizontale Überflüge

Bei den Küken zeigten die Modelle einen signifikanten Zusammenhang zwischen der absoluten Distanz der Drohne und dem Anteil an Individuen, die verschiedene Verhaltensweisen zeigten. Für Adulte konnte jedoch kein signifikanter Zusammenhang gefunden werden (Abbildung 9).

Abbildung 9 Anteile der Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während horizontaler Überflüge in 20 m Höhe zeigten in Abhängigkeit von der absoluten Distanz; p-Werte entsprechen den GLME-Ergebnissen (siehe Rümmler et al. 2021a); signifikante Werte sind fett gedruckt; grau: GAM-Anpassung mit Konfidenzintervall 0,95

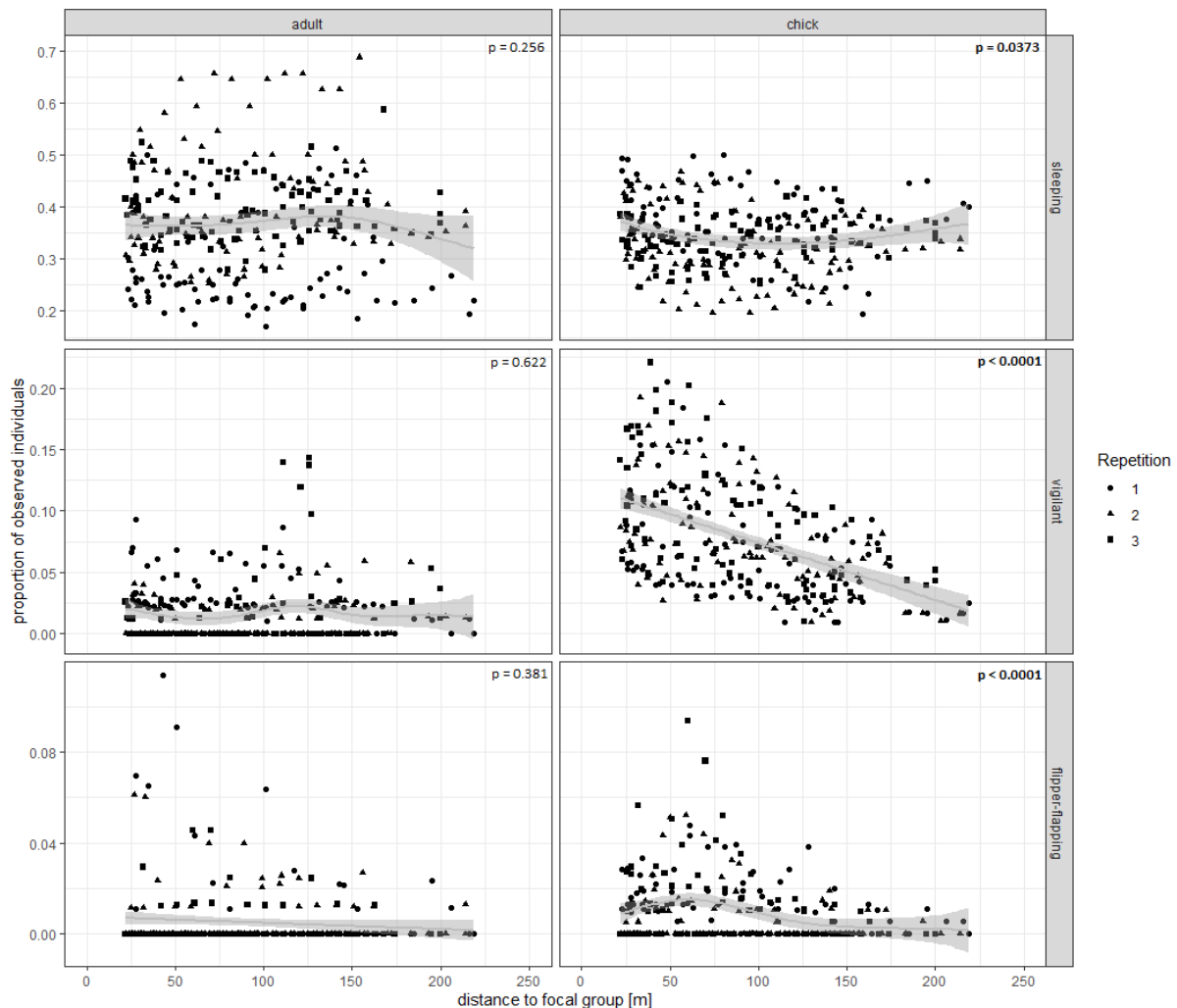


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Obwohl wir keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Distanz zur Drohne und dem Verhalten bei Adulten feststellen konnten, gab es in den paarweisen Vergleichen für schlafende und vigilante Adulte Unterschiede zwischen den Kontrollniveaus und fast allen Distanzklassen (Abbildung 9 links und Abbildung 10 links). Flügelschlagen scheint bei keiner Drohnenentfernung das Kontrollniveau signifikant zu überschreiten.

Bei Küken gab es signifikante Unterschiede zwischen Kontrolldaten und mehreren Distanzgruppen sowie zwischen den Distanzgruppen (Abbildung 9 rechts und Abbildung 10 rechts). Im Allgemeinen nahmen die Anteile störungsanzeigender Verhaltensweisen (Vigilanz, Flügelschlagen) mit abnehmender Drohnedistanz zu, außer in der Gruppe mit der geringsten

Distanz, und waren größer oder ähnlich wie bei den Kontrollmessungen. Interessanterweise waren die Anteile der schlafenden Individuen während der Überflüge signifikant höher als in der Kontrollphase, das gleiche galt für die Gruppe mit der geringsten Distanz, in der signifikant mehr Küken schliefen als in 51 - 150 m Entfernung.

Abbildung 10 Boxplot der gruppierten Distanzen zur Drohne während horizontaler Überflüge in 20 m Höhe; Graue Zahlen = n (Anzahl der analysierten Frames); Horizontale Linien stellen signifikante Unterschiede zwischen Gruppen dar.

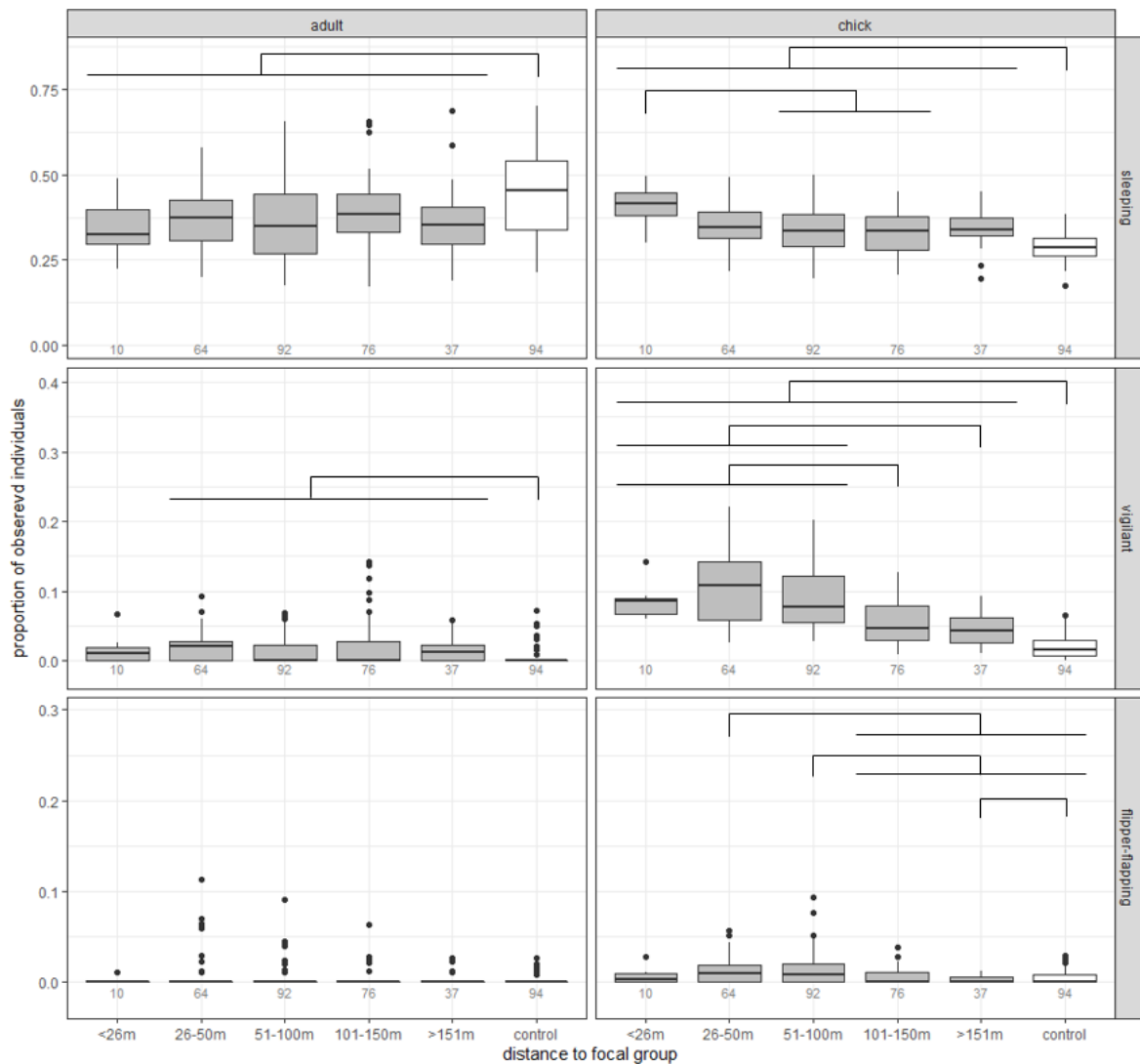


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Die Modelle für die zeitliche Reaktion auf Drohnenüberflüge zeigten einen signifikanten Zusammenhang zwischen der relativen Zeit und dem Anteil der Individuen, die ein bestimmtes Verhalten bei Adulten und Küken zeigen, mit Ausnahme der vigilanten Küken (Abbildung 11). Bei störungsanzeigenden Verhaltensweisen ist in allen Plots ein Anstieg des Anteils der beobachteten Individuen direkt nach dem Überflug der Individuen im Fokus durch die Drohne (TDO) zu erkennen, auch wenn er bei den Adulten nicht so deutlich ist wie bei den Küken. Nach etwa 50 s sinken die Anteile wieder auf das vorherige Niveau.

Abbildung 11 Anteile der Individuen die eine bestimmte Verhaltensweise während horizontaler Überflüge in 20 m Höhe zeigten in zeitlicher Relation zum Zeitpunkt des direkten Überflugs; p-Werte entsprechen den GLME-Ergebnissen; signifikante Werte sind fett gedruckt; grau: GAM-Anpassung mit Konfidenzintervall 0,95

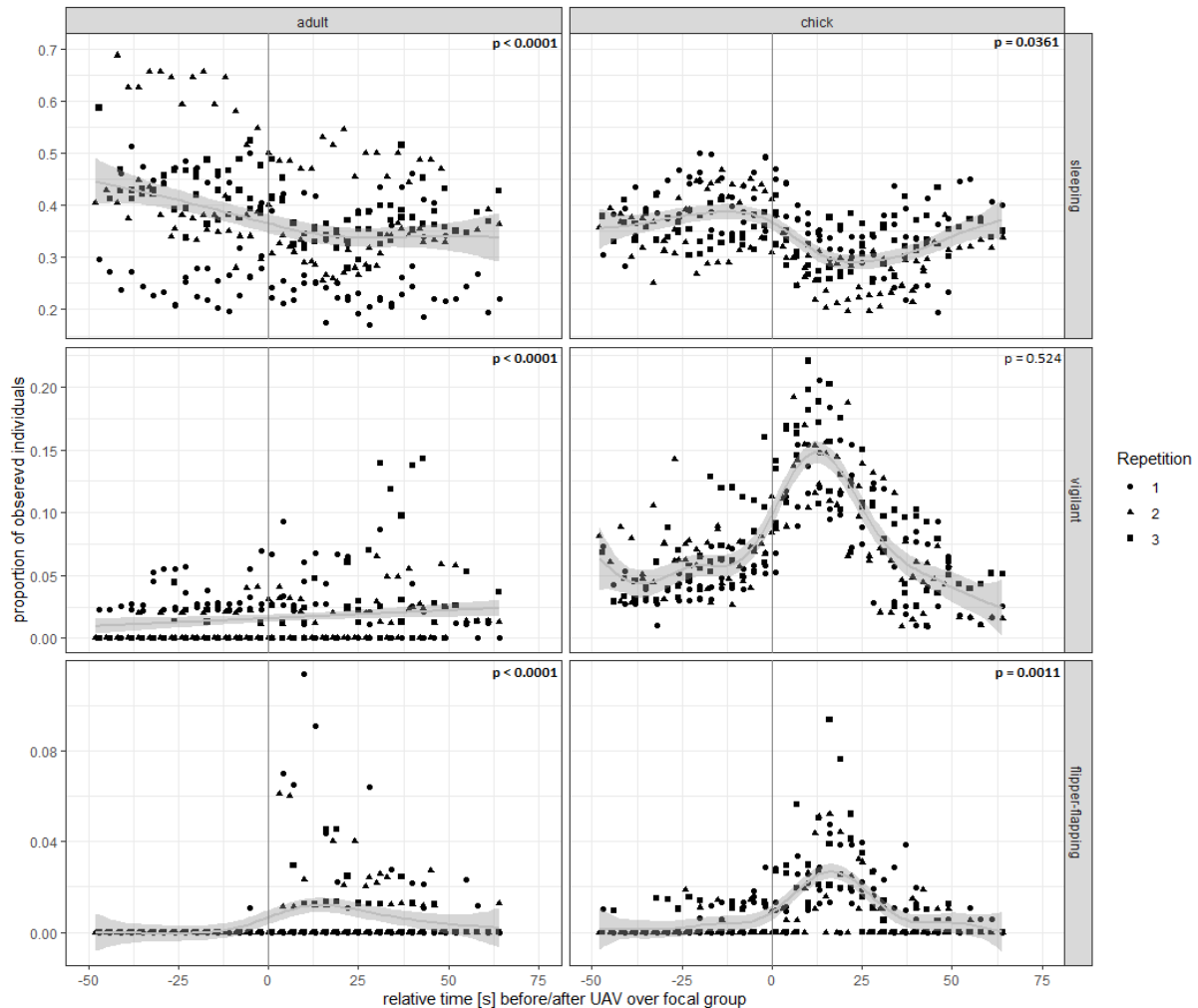


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Bei den adulten Pinguinen zeigten die paarweisen Vergleiche einen geringeren Anteil an schlafenden Individuen zu jedem Zeitpunkt nach TDO als in den Kontrolldaten oder mehr als 30 s vor TDO (siehe Abbildung 12 links). Den einzigen signifikanten Unterschied in der Vigilanz stellt ein erhöhtes Niveau direkt nach TDO im Vergleich zu den Kontrolldaten dar. Es wurde festgestellt, dass Flügelschlagen signifikant häufiger 31 - 40 s nach TDO auftrat als bis 9 s vor TDO.

Bei den Küken zeigten die paarweisen Vergleiche ein komplexes Muster (siehe Abbildung 12 links). Bei schlafenden Küken zeigten die Kontrolldaten einen geringeren Anteil an Individuen als alle Zeiträume außer 11 - 40 s nach TDO. Dementsprechend wies die Zeit von 11 - 40 s nach TDO einen geringeren Anteil an schlafenden Küken auf als der größte Teil der restlichen Flugzeit.

Die Vigilanz der Küken war während der Kontrollaufnahmen geringer als während des gesamten Drohnenüberfluges. Außerdem gab es eine klare Reaktion auf den Überflug, da die

Zeitklassen von TDO bis 30 s nach TDO höhere Vigilanzwerte als vor TDO und höhere Werte als während der Drohnenüberflüge später als 30 s nach TDO aufwiesen.

Der TDO war auch in den Daten zum Flügelschlagen der Küken deutlich zu erkennen. Die Zeitklassen von TDO bis 30 s nach TDO zeigten höhere Raten von Flügelschlagen als die meisten Zeitklassen vor TDO und später als 30 s nach TDO. Die Kontrollwerte waren niedriger als von TDO bis 30 s nach TDO, unterschieden sich aber nicht von den meisten anderen Zeitklassen.

Abbildung 12 Boxplot der gruppierten Zeiten vor und nach dem direkten Überflug während horizontaler Überflüge in 20 m Höhe; Graue Zahlen = n (Anzahl der analysierten Frames); Horizontale Linien stellen signifikante Unterschiede zwischen Gruppen dar. Jede Box zeigt Median (Mittellinie), unteres und oberes Quartil (unteres und oberes Ende der Box), Minimum und Maximum (Whisker) sowie Ausreißer (schwarze Punkte)

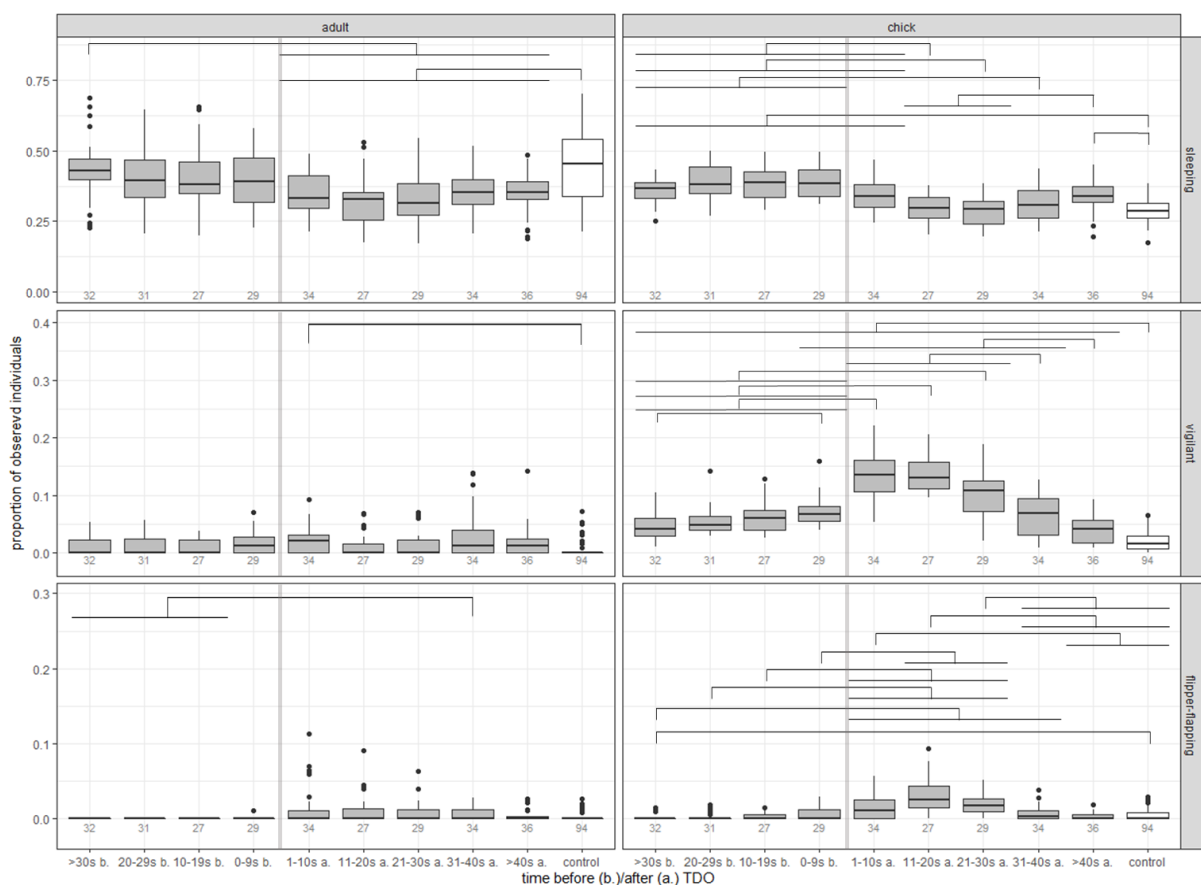


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Der maximale Anteil störungsanzeigender Reaktionen während dieser Überflüge wurde bei Küken etwa 14 s nach TDO erreicht (13,78 s; SD = 4,41 s; 6 - 22 s für Vigilanz; 14,44 s, SD = 5,17 s; 7 - 25 s für Flügelschlagen). Bei Adulten war die Reaktion weniger ausgeprägt und streute deutlich stärker mit einem Maximum bei etwa 25 s nach TDO (25,78 s; SD = 23,81 s; -5 - 55 s für Vigilanz; 24,78 s; SD = 17,82 s; 3 - 55 s für Flügelschlagen).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei horizontalen Überflügen eine Erhöhung der störungsanzeigenden Reaktionen, insbesondere von Vigilanz und Flügelschlagen bei Küken, nach dem Überflug, beobachtet wurde. Diese Erhöhung dauerte etwa 40 s. Da die Reaktion nicht so deutlich mit der Entfernung assoziiert war, wie mit der Zeit, nehmen wir an, dass

Kaiserpinguine scheinen sofort auf das Auftauchen einer eindringenden Drohne reagieren, diese aber als nicht bedrohlich einschätzen und sich daher schnell wieder beruhigen.

Interessant ist, dass der Anteil der schlafenden Küken während der Kontrollaufnahmen geringer war als während der Horizontalflüge. Wir gehen davon aus, dass dies auf den Tagesrhythmus der Aktivität zurückzuführen ist, da die Kontrolldaten an diesem Tag vor den Störungsversuchen aufgenommen werden mussten.

3.1.2.1.3 Vertikale Überflüge

Für vertikale Überflüge zeigen die Modelle signifikante Korrelationen zwischen der Flughöhe der Drohne und den Anteilen aller beobachteten Verhaltensweisen (Abbildung 13).

Abbildung 13 Anteile der Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während vertikaler Überflüge zeigen; p-Werte entsprechen den GLME-Ergebnissen; signifikante Werte sind fett gedruckt; grau: GAM-Anpassung mit Konfidenzintervall 0,95

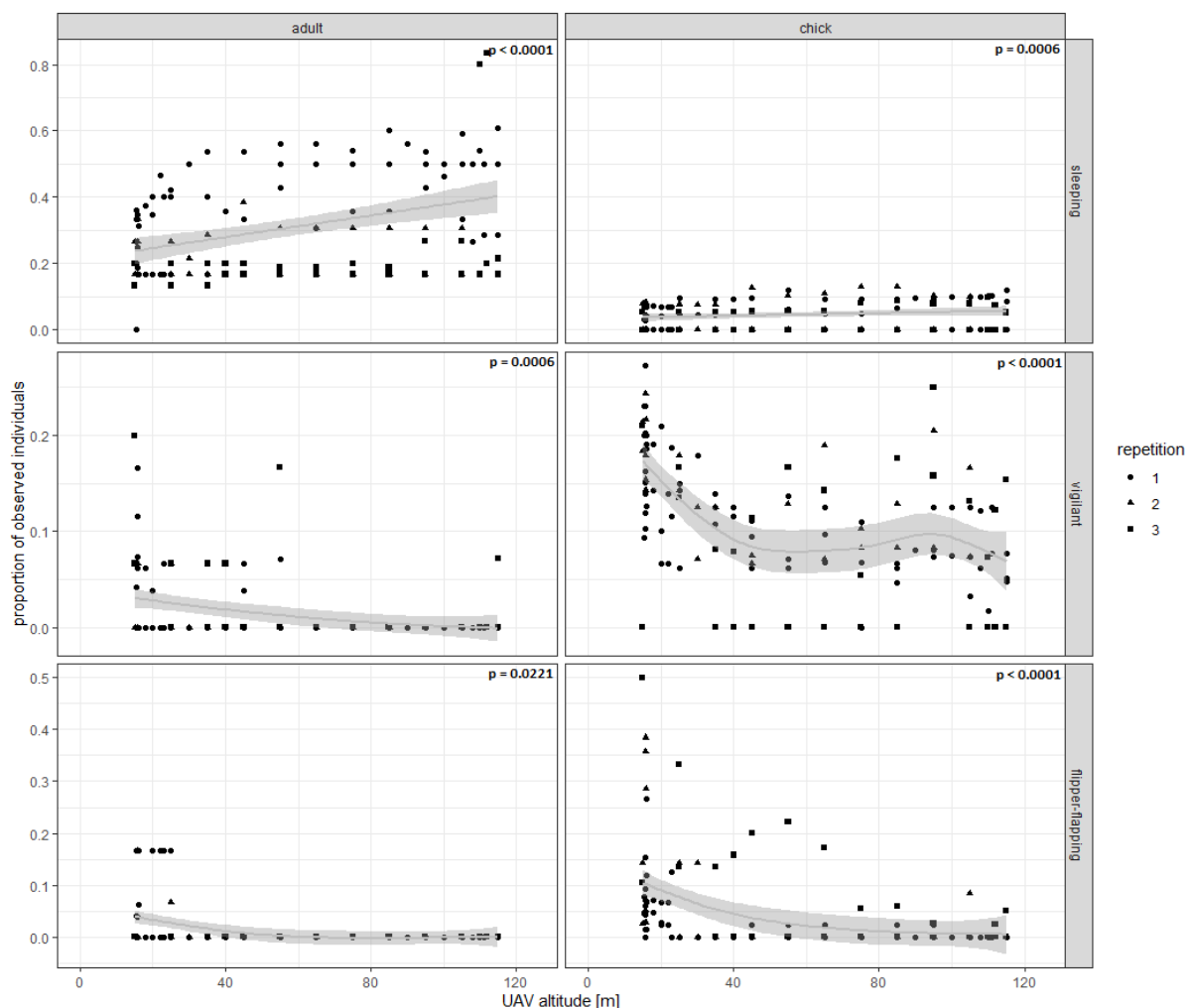


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Die paarweisen Vergleiche ergaben nur wenige signifikante Wechselwirkungen für Adulte (Abbildung 14 links). Schlafende Individuen wurden signifikant seltener beobachtet, wenn die Drohne niedriger als 75 m flog als während der Kontrollaufnahmen. Vigilanz wurde bei mehr Individuen beobachtet, wenn die Drohne unter 20 m flog, als wenn sie über 75 m war. Flügel schlagen war bei Flughöhen unter 20 m häufiger als bei denen über 30 m. Es ist nicht

geklärt, warum die höheren Flüge weniger Flügelschlägen induzierten als während der Kontrollaufnahmen beobachtet wurde.

Abbildung 14 Boxplot der gruppierten Flughöhen während vertikaler Überflüge; graue Zahlen = n (Anzahl der analysierten Frames); horizontale Linien stellen signifikante Unterschiede zwischen Gruppen dar.

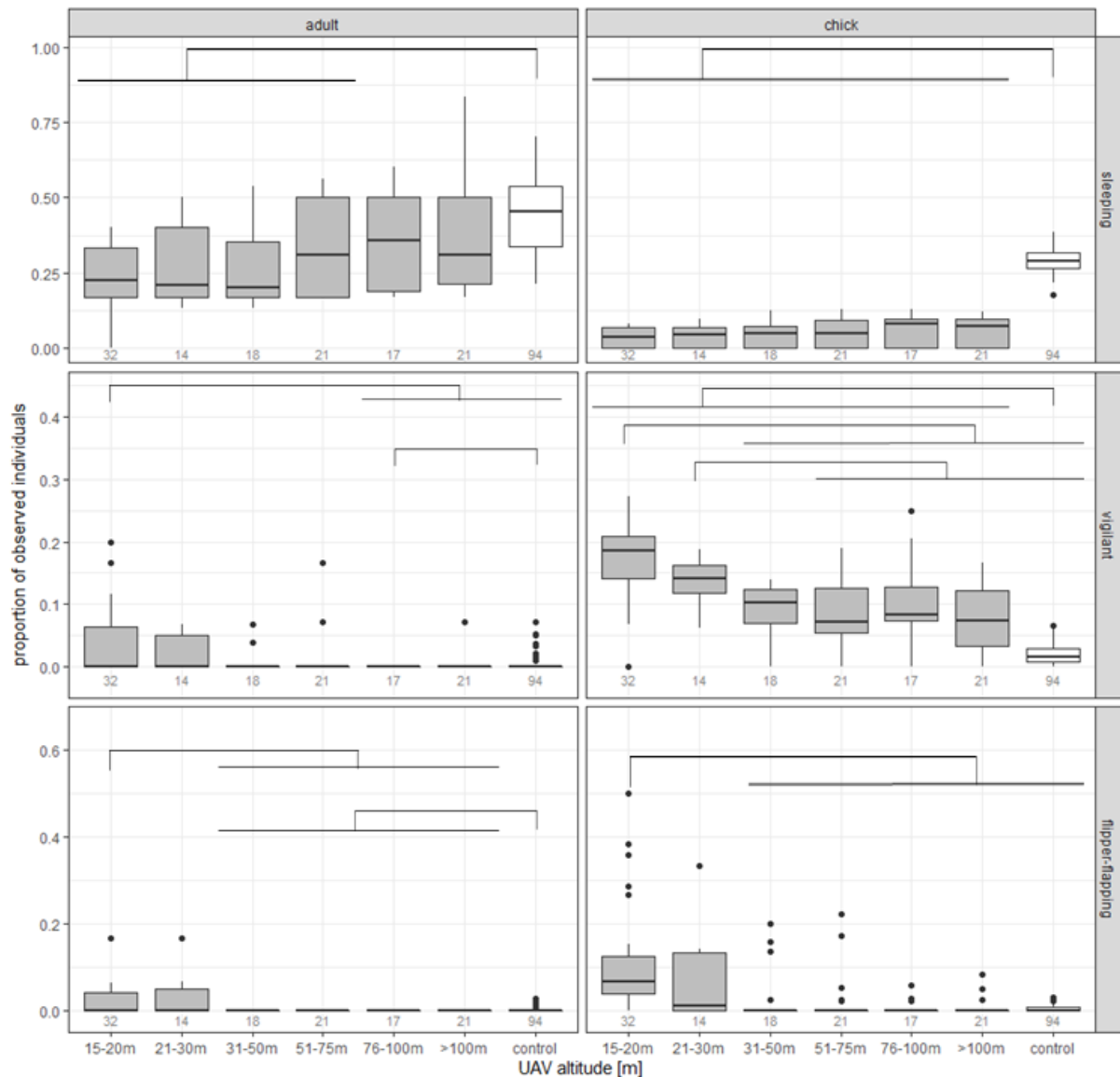


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Während der Kontrollaufnahmen wurde ein signifikant höherer Anteil der Küken schlafend beobachtet als während der gesamten Drohnenaktivität (Abbildung 14 rechts). Gleiches wurde für das Vigilanzverhalten beobachtet. Allerdings waren die Individuen zusätzlich signifikant vigilanter, wenn die Drohne niedrig flog (< 30 m), als wenn sie sich in größeren Höhen befand. Flügelschlägen wurde signifikant häufiger bei Drohnenflughöhen unter 20 m beobachtet als bei allen Höhen über 30 m. Es gab auch mehr Flügelschlägen bei niedrigen Höhen als in den Kontrollaufnahmen.

Im Allgemeinen gab es während der vertikalen Anflüge eine allmähliche Zunahme des Anteils der Individuen, die vigilantes Verhalten oder Flügelschlägen zeigten, und zwar in zunehmendem

Maße, wenn die Drohne unter 30 m abstieg. Es wurden insbesondere bei Küken starke Reaktionen beobachtet, wenn die Drohne nach Erreichen der niedrigsten Flughöhe wieder aufzusteigen begann. Die Reaktionen beinhalteten in einigen Fällen Lauf- und Gruppenbewegungen. Diese starken Reaktionen treten wahrscheinlich auf, weil die Drohne beim Aufstieg aufgrund der höheren Rotordrehzahl lauter ist. Diese Situation ist jedoch nicht kontrollierbar und somit ist ein Vergleich nicht möglich und diese Zeitpunkte sind nicht in den Daten enthalten. Daher konnten wir diese starken Reaktionen zum Beginn des Wiederaufstiegs der Drohne nicht im Detail analysieren.

3.1.2.1.4 Annäherung einer Person

Es gab signifikante Zusammenhänge zwischen der Annäherung einer Person und allen Stress anzeigenden Verhaltensweisen bei Adulten und Küken mit Ausnahme des Flügelschlagens bei Küken. Das Schlafen stand jedoch nicht in signifikantem Zusammenhang mit der Annäherungsdistanz (Abbildung 15).

Abbildung 15 Anteile der Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während der Annäherung durch eine Person zeigen; p-Werte entsprechen den GLME-Ergebnissen; signifikante Werte sind fett gedruckt; grau: GAM-Anpassung mit Konfidenzintervall 0,95

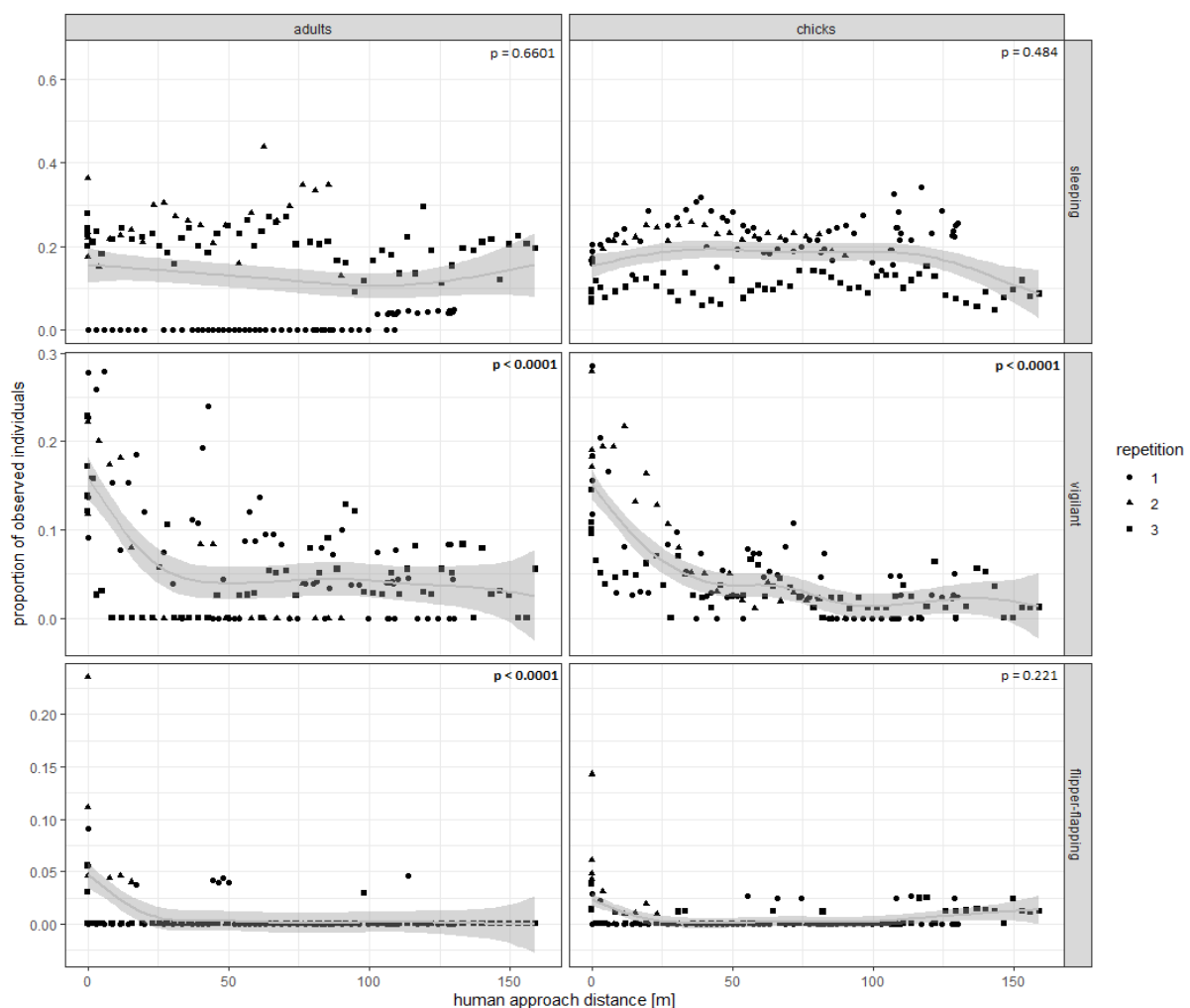


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Die paarweisen Vergleiche zeigten Unterschiede im Anteil schlafender Adulter zwischen den Kontrollaufnahmen und fast allen Distanzklassen, wobei der Anteil schlafender Adulter in den Kontrolldaten am höchsten ist (Abbildung 16 links). Adulte mit vigilantem Verhalten waren in der nächstgelegenen Distanzklasse häufiger als in allen Entfernungen von 21 m und mehr. Die Kontrolldaten waren signifikant niedriger als diese nächstgelegene Klasse und als 51 - 100 m. Beim Flügelschlagen wurden keine starken Unterschiede zwischen den Klassen festgestellt, nur zwischen den Kontrolldaten und 21 - 30 m wurde eine signifikante Beziehung gefunden.

Abbildung 16 Boxplot der gruppierten Distanzen während der Annäherung einer Person; Graue Zahlen = n (Anzahl der analysierten Frames); horizontale Linien stellen signifikante Unterschiede zwischen Gruppen dar.

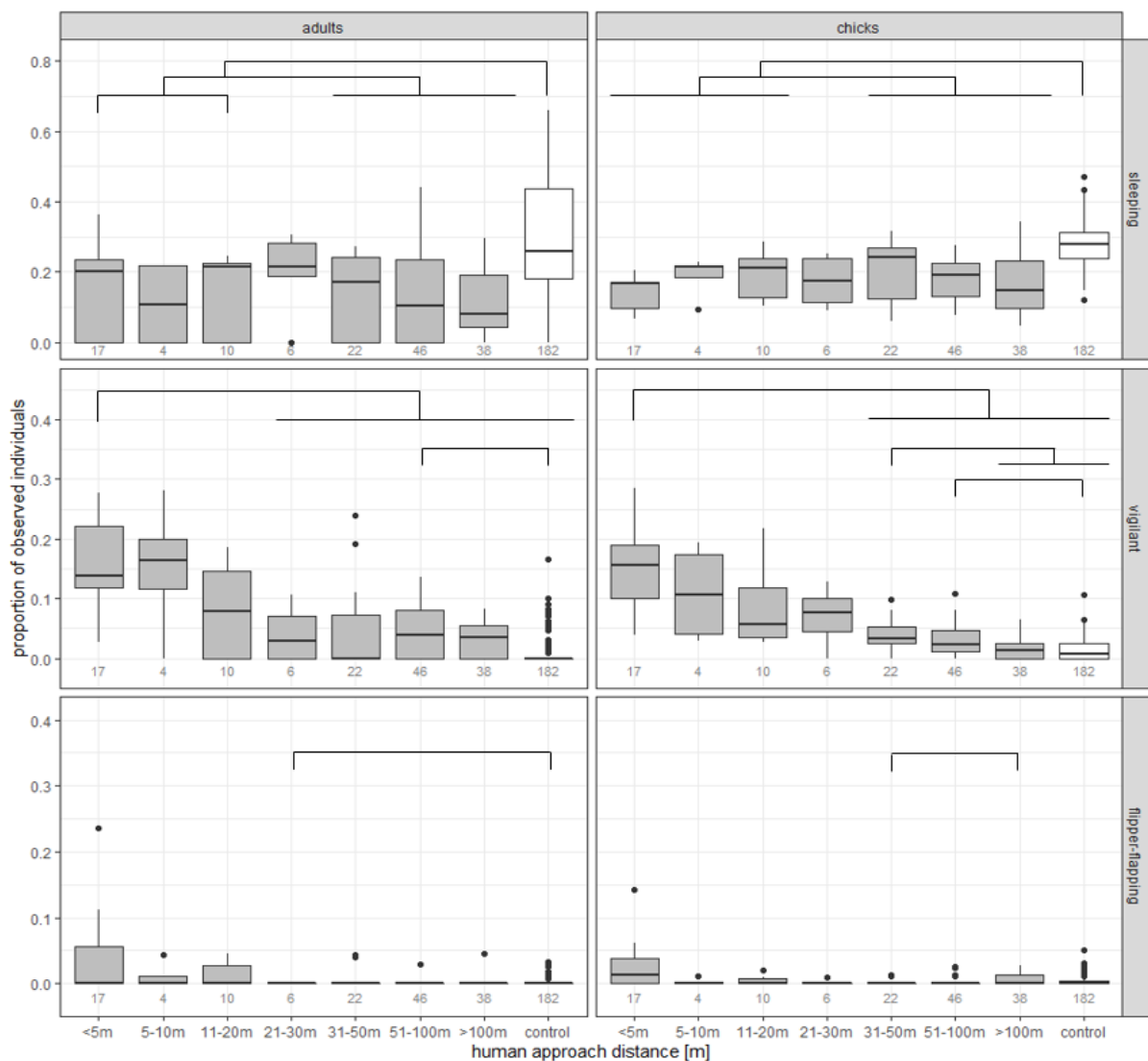


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Die Anteile schlafender Küken unterschieden sich zwischen den Kontrollaufnahmen und fast allen Distanzklassen, wobei während der Kontrollaufnahmen mehr Individuen schliefen (Abbildung 16 rechts). Der Anteil der vigilanten Küken war bei der geringsten Distanz der sich nähernden Person signifikant höher als bei allen Distanzen von 31 m und mehr, einschließlich der Kontrollaufnahmen. Darüber hinaus gab es signifikante Unterschiede zwischen den weiteren Annäherungsdistanzen. Diese Unterschiede beschreiben eine stufenweise Zunahme der Vigilanz

mit der Verringerung der Entfernung. Die Anteile des Flügelschlagens bei Küken waren bei Distanzen von 31 - 50 m signifikant niedriger als bei Distanzen von mehr als 100 m. Die höchsten Anteile waren jedoch bei der geringsten Personenannäherungsdistanz zu verzeichnen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Anteil der vigilanten Individuen ab einer Distanz von ca. 30 m am höchsten war und das Flügelschlagen ab ca. 20 m zunahm. Erst in wenigen Metern Entfernung wurden Fluchtbewegungen von mehr als Einzeltieren beobachtet. Die Reaktionen hörten bei den meisten Individuen auf, sobald sich die Person nicht mehr näherte. Die Vögel kehrten dann zu ihren vorherigen Verhaltensweisen zurück.

3.1.2.1.5 Vergleich der verschiedenen Störungsquellen

Reaktionen auf horizontale Überflüge waren im Allgemeinen weniger deutlich als auf die Annäherung einer Person und auf vertikale Überflüge (siehe Abbildung 17). Bei Adulten lag der mittlere Prozentsatz der Individuen, die bei horizontalen Überflügen 11 - 20 s, nachdem die Drohne direkt über ihnen war, reagierten, nicht deutlich über dem der Kontrolldaten. Bei Küken hingegen traten das Flügelschlagen häufiger und die Vigilanz deutlich häufiger auf. Küken reagierten stark auf eine sich vertikal nähernde Drohne in Höhen unter 20 m, sowohl durch starke Vigilanz als auch durch mehr als 10 % der Individuen, die mit den Flügeln schlugen. Adulte Tiere blieben unter den gleichen Umständen relativ ruhig, weniger als 5 % zeigten Vigilanz oder Flügelschlagen.

Abbildung 17 Vergleich der beobachteten störungsanzeigenden Verhaltensreaktionen (prozentualer Anteil der Individuen mit Vigilanz oder Flügelschlagen) auf verschiedene Störungsquellen. Angezeigt werden der Mittelwert und der Standardfehler während des Auftretens der Klasse der höchsten Störung (11 – 20s nach TDO bei Horizontalflügen, 15 – 20 m bei Vertikalflügen, <5 m bei Annäherung einer Person).

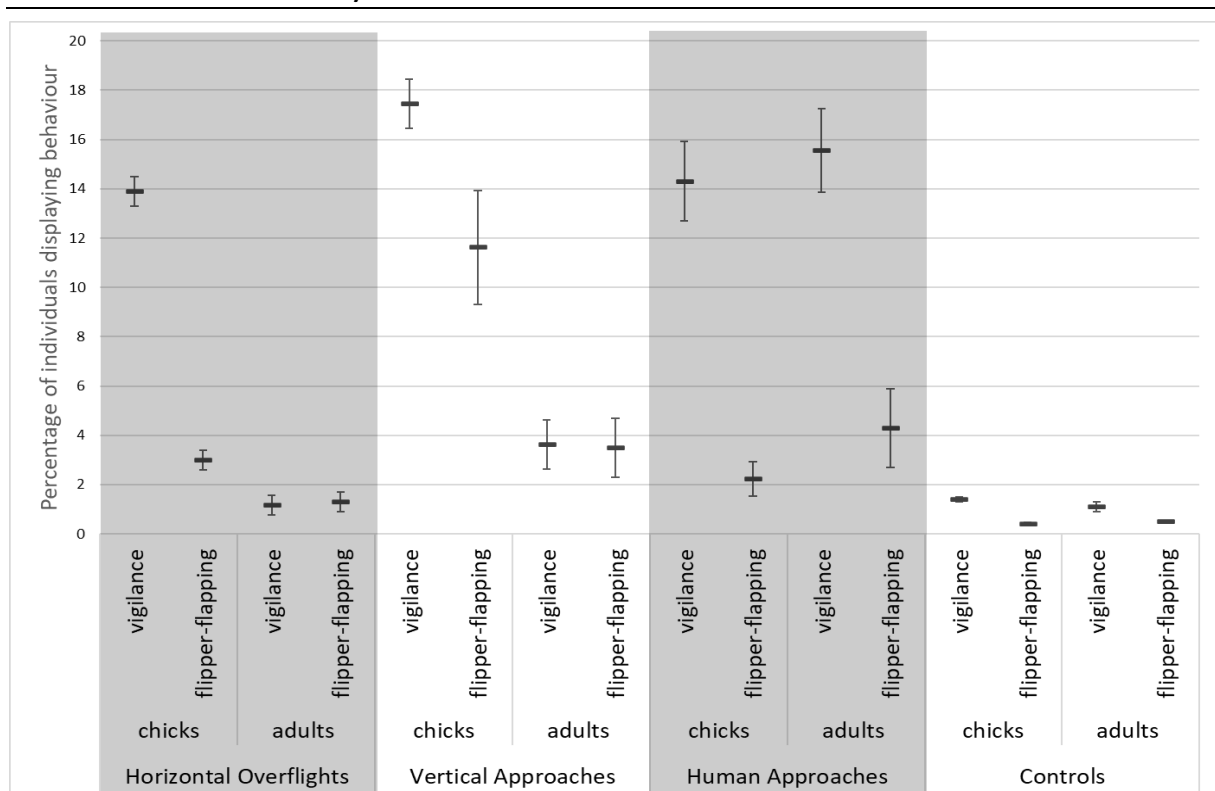


Abbildung aus Rümmler et al. (2021a)

Vigilanz trat als Reaktion auf die Annäherung einer Person in der Entfernungsklasse weniger als 5 m sowohl bei Adulten als auch bei Küken häufig auf. Flügelschlagen war dagegen bei Küken gering (durchschnittlich weniger als 5 % der Individuen) wenn auch höher als in den Kontrolldaten, bei Adulten jedoch hoch. Bei weiterer Annäherung (wenige Meter) kam es teilweise zu Fluchtreaktionen, bei deren Auftreten die Versuche jedoch sofort beendet wurden. Die Tiere kehrten danach im Normalfall sofort zu ihrem vorherigen Verhalten zurück.

3.1.2.2 Einfluss der Flughöhe

Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen zu den Einflüssen von Flughöhe (Kapitel 3.1.2.2), des Drohnentyps (Kapitel 3.1.2.3) und des Saisonzeitpunkts (Kapitel 3.1.2.4) zeigen Abbildung 18 für Küken und Abbildung 19 für Adulte.

Abbildung 18 Anteile der Küken, die eine bestimmte Verhaltensweise während Überflügen von zwei Drohnenmodellen in unterschiedlichen Flughöhen an zwei verschiedenen Untersuchungstagen zeigen. Tag 1: 14.11.2019, Tag 2: 29.12.2019.

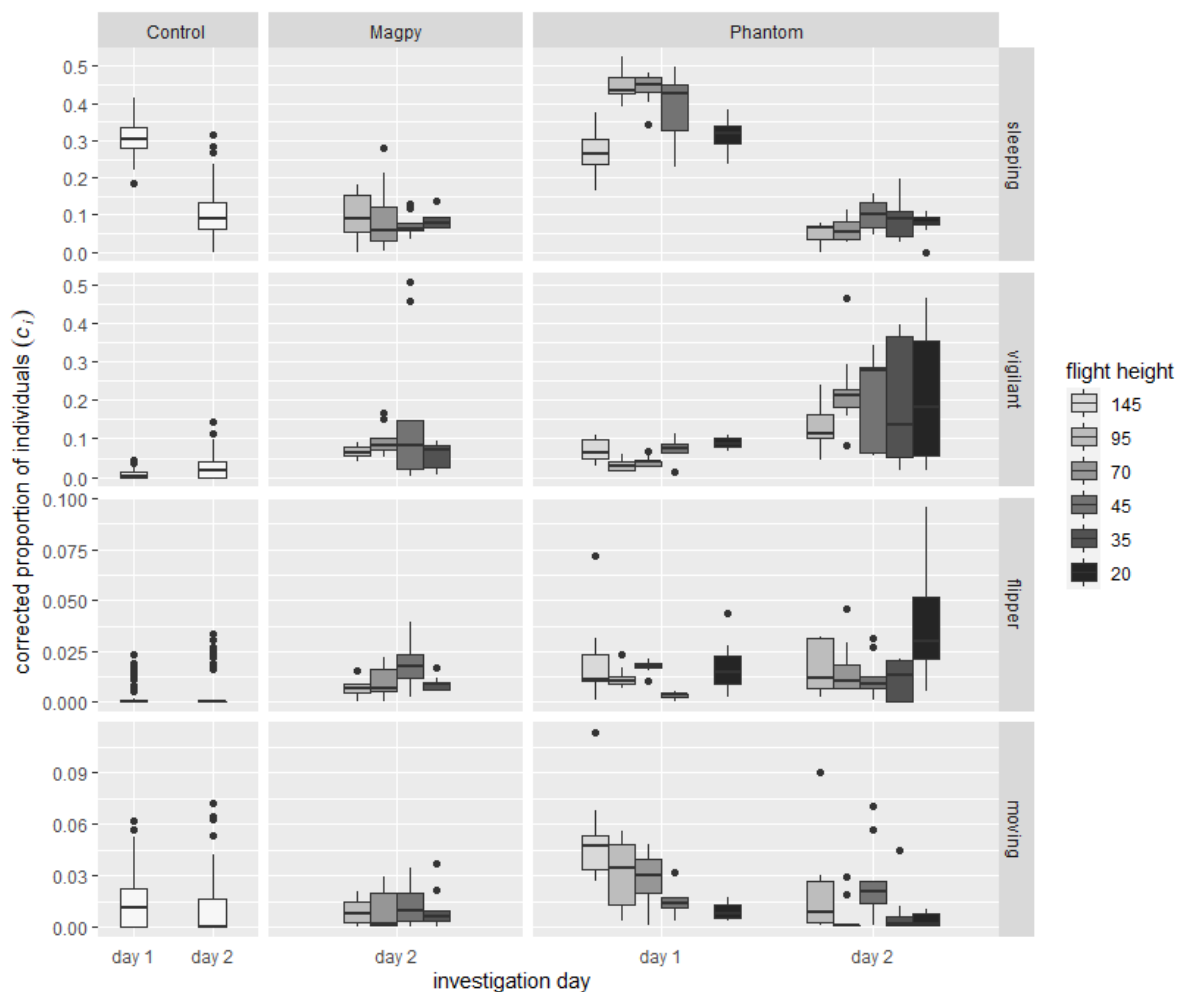


Abbildung aus Rümmler et al. (2021b)

Bei der Phantom (Tabelle 3, Abbildung 18 rechts und Abbildung 19 rechts) gab es signifikante Unterschiede zwischen den Flughöhen bei Adulten und Küken für beide störungsinduzierten

Verhaltensweisen (Vigilanz und Flügelschlagen). Die Werte c_v und c_f waren bei den Kontrollaufnahmen signifikant niedriger als bei allen Flughöhen (außer c_f bei 35 m). Bei den Adulten war das Auftreten dieser Verhaltensweisen in Höhen von 45 m (a_v) bzw. 70 m (a_f) und darunter signifikant höher als bei den Kontrollaufnahmen. Die Werte in größeren Höhen unterschieden sich nicht von den Kontrollaufnahmen. Signifikant niedrigeres c_s als in den Kontrolldaten wurde nur während der Phantom-Flüge auf 95 m beobachtet. Sich bewegende Küken (c_m) wurden während der Flüge auf 45 m und 95 m signifikant häufiger beobachtet als während der Kontrollaufnahmen. Keine dieser Verhaltensweisen (a_s , a_m) hatte signifikante Zusammenhänge bei Adulten.

Abbildung 19 Anteile der adulten Individuen, die eine bestimmte Verhaltensweise während Überflügen von zwei Drohnenmodellen in unterschiedlichen Flughöhen an zwei verschiedenen Untersuchungstagen zeigen. Tag 1: 14.11.2019, Tag 2: 29.12.2019.

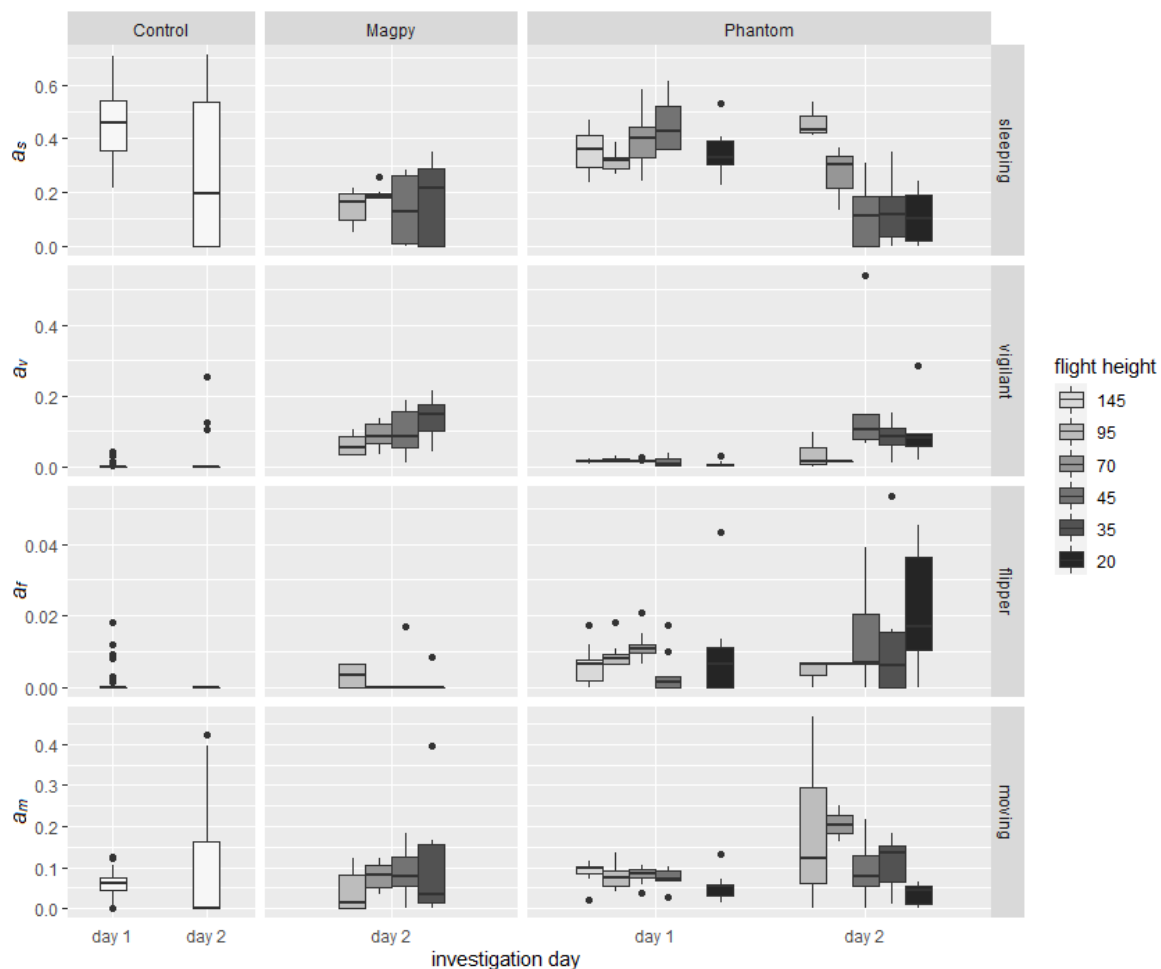


Abbildung aus Rümmler et al. (2021b)

Während der Magpy-Flüge (Tabelle 3) waren störungsinduzierte Verhaltensweisen signifikant assoziiert (Abbildung 18 Mitte und Abbildung 19 Mitte). Vigilanz wurde bei den Küken während der Magpy-Flüge signifikant häufiger als in den Kontrollaufnahmen beobachtet. Die einzige Ausnahme ist die niedrigste Höhe von 35 m, wo kein signifikanter Zusammenhang bestand, obwohl die Reaktion höher zu sein schien als bei den Kontrollaufnahmen. Flügelschlagen wurde bei Küken während Magpy-Flügen in allen Höhen signifikant häufiger beobachtet als während

der Kontrollaufnahmen. Bei adulten Tieren trat Vigilanz bei allen Überflügen im Vergleich zu den Kontrolldaten häufiger auf. Während der Überflüge auf 95 m wurde ein signifikant höheres a_f gefunden als bei den Kontrollaufnahmen. Außerdem war a_f während 70 m und 35 m Überflügen niedriger als bei 95 m. Bei schlafenden Küken wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden. Die Analyse ergab signifikante Unterschiede für Küken in Bewegung, jedoch konnten diese nicht näher definiert werden. Bei Adulten zeigten weder Schlafen noch Bewegung einen signifikanten Zusammenhang.

Analysen verschiedener Flughöhen der Phantom ergaben, dass vigilante Adulte in Flughöhen von 45 m und höher nicht signifikant häufiger vorkommen als in während der Kontrollaufnahmen. Jedoch wurde Flügelschlagen signifikant häufiger in 70 m und darunter beobachtet. Daraus schließen wir, dass Flüge ab der nächsten untersuchten Höhe von 95 m über den Adulten während dieser Brutphase anscheinend keine messbare Störung verursachen. Unsere Daten stützen eine solche Aussage für Küken jedoch nicht, da in allen getesteten Flughöhen sowohl Flügelschlagen als auch Vigilanz häufiger beobachtet wurden als während der Kontrollaufnahmen. Zwischen den einzelnen Flughöhen wurden weder bei Küken noch bei Adulten Unterschiede gefunden, dies gilt für alle Verhaltensweisen.

Während der Flüge mit der Magpy wurde weder für Küken noch für Adulte eine störungsfreie Flughöhe gefunden, denn auch bei großen Überflughöhen unterschied sich das Vigilanzverhalten signifikant von den Kontrolldaten. Interessanterweise unterschied sich die Vigilanz der Küken bei Überflügen in der niedrigsten getesteten Höhe von 35 m nicht von den Kontrolldaten. Diese Beobachtung ist noch extremer bei Adulten, bei denen sich lediglich die höchste Flughöhe signifikant von den Kontrolldaten unterschied. Wir können nicht sagen, warum die Individuen bei niedrigen Flughöhen nicht mehr auf das Starrflügelmodell reagieren. Eine mögliche Erklärung ist, dass dies durch externe Faktoren provoziert wurde, die wir weder gemessen noch wahrgenommen haben. Der Einfluss lokaler Räuber wie Südpolar-Skuas (*Catharacta maccormicki*) oder Südliche Riesensturmvögel (*Macronectes giganteus*), die in der Kolonie aktiv sind, könnte ein solcher Faktor sein. Eine andere mögliche Erklärung ist, dass das Profil des Starrflüglers umso geringer wahrgenommen wird, je niedriger er fliegt. Beim Anflug in großer Höhe ist seine flugzeugähnliche Form sichtbar. In geringer Höhe hingegen erscheint er kaum mehr als eine horizontale Linie. Es ist auch möglich, dass die Pinguine, wenn sich die Drohne in dieser Höhe befindet, ein Verhalten zeigen, dass von den hier verwendeten Verhaltenskategorien nicht abgedeckt wird. Abgesehen von dieser unerklärlichen Beobachtung gab es keine Unterschiede zwischen den Flughöhen und wir konnten keine Flughöhe definieren, in der die Drohne nicht mehr wahrgenommen wird.

Im Allgemeinen war die Flughöhe nicht mit dem Anteil der schlafenden Individuen assoziiert. Daraus schließen wir, dass Drohnenüberflüge Kaiserpinguine nicht genug stören, um sie in größeren Gruppen aufzuwecken. Obwohl es auch keinen signifikanten Zusammenhang zwischen sich bewegendenden Individuen und der Flughöhe gab, fanden wir ein wiederkehrendes Muster in den Daten. Bei Adulten und Küken nimmt der Anteil der sich bewegendenden Individuen während der Phantom-Flüge tendenziell in niedrigeren Flughöhen ab (Abbildung 18 und Abbildung 19). Auch wenn dieser Effekt nicht stark genug ist, um signifikant zu sein, nehmen wir an, dass es eine Tendenz gibt, dass die Individuen ihre Bewegung durch die Kolonie während niedriger Überflüge einstellen. Dies ist wahrscheinlich nicht mit einem höheren Stresslevel verbunden, kann jedoch die Zeit verlängern, bis die adulten Tiere ihre Nachkommen zur Fütterung erreichen. Da die Dauer der Reaktion nachweislich eher kurz ist (siehe Kap. 3.1.2.1.2 und Rümmler et al. 2021a), gehen wir davon aus, dass dies keine langfristigen Folgen hat.

3.1.2.3 Einfluss des Drohnentyps

Der Vergleich der Drohnentypen (Abbildung 20) ergab Unterschiede in den Anteilen von Vigilanz und Flügelschlagen bei Adulten und Küken sowie bei sich bewegenden Küken. Die anderen Verhaltensweisen unterschieden sich jedoch nicht signifikant zwischen den Drohnentypen. Für c_v (vigilante Küken) gab es sowohl Unterschiede zwischen den Drohnentypen und den Kontrolldaten als auch zwischen den Drohnentypen selbst. Sie wurden während der Phantom-Flüge am häufigsten und während der Kontrollaufnahmen am seltensten beobachtet. Für vigilante Adulte a_v gab es Unterschiede zwischen Kontrollaufnahmen und Drohnenflügen (wobei die Kontrolldaten ein kleineres a_v als die Flüge zeigten), aber nicht zwischen den beiden Drohnentypen. Dasselbe zeigte sich für Flügelschlagen bei Küken (c_f). Die Anteile flügelschlagender Adulte (a_f) unterschieden sich sowohl zwischen den Drohnenmodellen als auch jeweils zu den Kontrollaufnahmen, mit den höchsten Anteilen während der Phantom-Flüge und den niedrigsten während der Kontrollaufnahmen. Sich bewegende Küken (c_m) wurden während beider Drohnenflüge häufiger gefunden als während der Kontrollaufnahmen.

Abbildung 20 Vergleich des Anteils der Pinguine, die bestimmte Verhaltensweisen während der Flüge mit zwei verschiedenen Drohnentypen bzw. während der Kontrollaufnahmen zeigen.

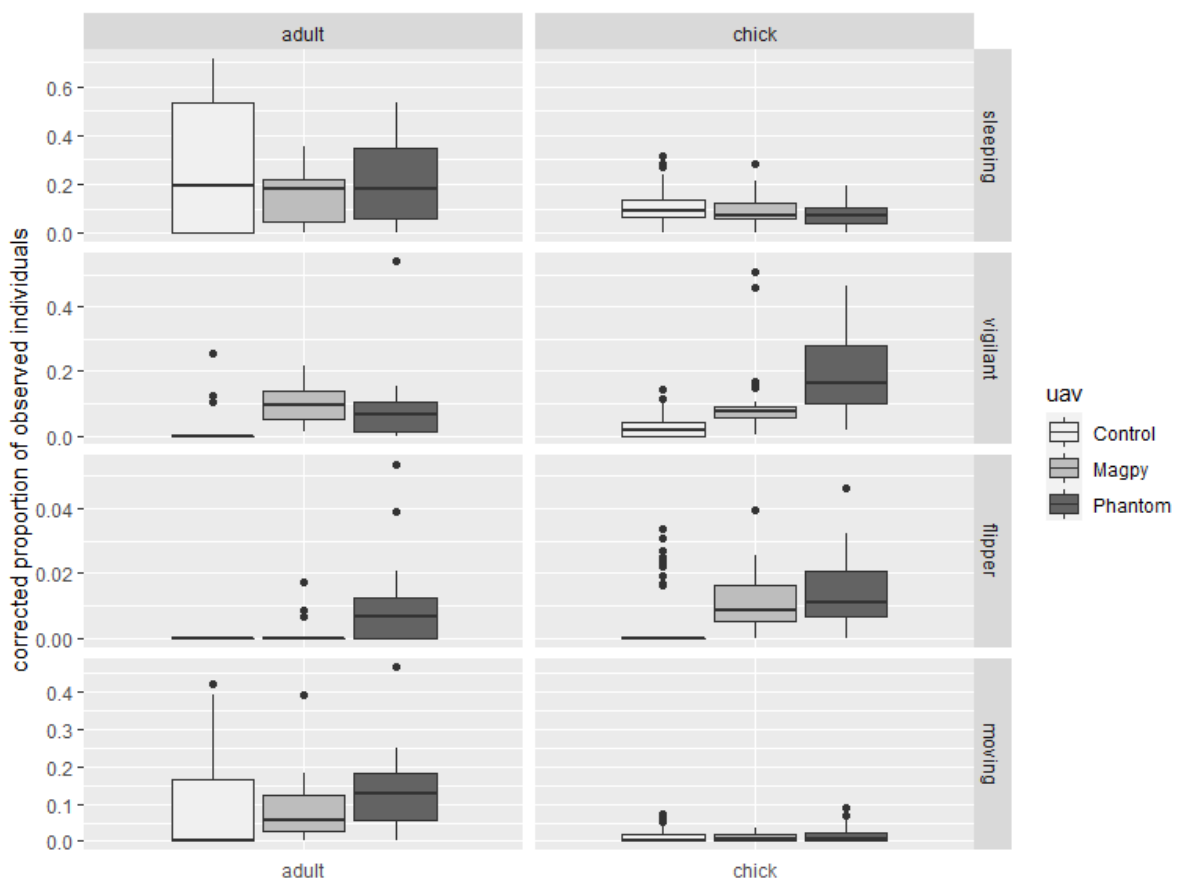


Abbildung aus Rümmler et al. (2021b)

Die Reaktionen auf die Phantom waren sowohl bei Adulten als auch bei Küken insgesamt stärker als die Reaktionen auf die Magpy (Abbildung 20). Beide Drohnenmodelle waren aufgrund ihrer Größe und unauffälligen Färbung von unten gesehen für das menschliche Auge nahezu

unsichtbar. Dies war besonders bei bewölktem Himmel der Fall. Da das Sehvermögen von Pinguinen an Land dem des Menschen entspricht oder sogar schlechter ist (Howland und Sivak 1984; Martin 1999), halten wir es für unwahrscheinlich, dass Kaiserpinguine die Drohnen zumindest in größeren Flughöhen visuell erkennen. Es ist daher wahrscheinlicher, dass die Pinguine die Drohnen akustisch wahrnehmen. Andere Studien bestätigen dies, indem sie beobachteten, dass lautere Drohnen eine stärkere Störung hervorrufen als vergleichbare leisere Modelle (Korczak-Abshire et al. 2016). Andererseits reagierten andere Arten (z.B. Amseln) früher auf Drohnenmodelle, die ähnliche Formen wie Prädatoren hatten, als auf lautere Modelle (Egan et al. 2020). Aufgrund der großen Variation der Geräuschpegel von Drohnen, der Hörfähigkeit verschiedener Arten und des Ökosystems sollte für jede Studiensituation evaluiert werden, ob akustische oder visuelle Signale entscheidend sind (Scobie und Hugenholtz 2016). In Königspinguinkolonien, die mit Kaiserpinguinen in Größe und Koloniestruktur vergleichbar sind, wurden Geräuschpegel von 75 dB in 2 m Entfernung gemessen (Aubin und Jouventin 1998). In den getesteten Entfernungen in unserer Studie sollte bei diesem Grundgeräuschpegel selbst die lautere Phantom-Drohne nicht akustisch wahrnehmbar sein. Auch in anderen Studien wurde gezeigt, dass Drohnen die Umgebungsgeräusche nicht übertönen, wenn sie in der Nähe von Pinguinkolonien geflogen werden (Arona et al. 2018). Zu beachten ist jedoch, dass der Geräuschpegel allein nicht ausschließt, ob ein Stimulus akustisch wahrgenommen werden kann. Auch Frequenzspektren müssen dafür beachtet werden, da besonders hohe oder niedrige Frequenzen auch wahrgenommen werden können, wenn Hintergrundgeräusche sehr laut sind. Zu den Frequenzen der verschiedenen vorhandenen Geräuschquellen können hier jedoch keine Aussagen gemacht werden.

Es konnte gezeigt werden, dass Starrflüglerdrohnen bei Wasservögeln eine höhere Störung auslösen als Multikoptermodelle (McEvoy et al. 2016). Hier wurden Fluchtreaktionen nur bei dem Starrflüglermodell beobachtet, und Vigilanz trat früher auf. Es wurde diskutiert, dass, obwohl sie leiser sind, Starrflüglerdrohnen aufgrund ihrer vogelartigen Form als Gefahr wahrgenommen werden können (Arona et al. 2018; Egan et al. 2020; McEvoy et al. 2016; Vas et al. 2015). Wir gehen nicht davon aus, dass dies bei Kaiserpinguinen der Fall ist. Erstens fanden wir weniger Störungen mit diesem Modell. Zweitens sind Kaiserpinguine an Land nur geringer Prädation ausgesetzt. Dies gilt sogar für die Küken, da diese im November und Dezember, zum Zeitpunkt unserer Untersuchungen, bereits recht groß sind. Eine weitere Erklärung für die Unterschiede zwischen den Drohnenmodellen könnte die Zeitspanne sein, die wir für die Analysen verwendet haben (10 - 30 s nach TDO). Diese Zeit ist die Phase maximaler Reaktion bei Phantomflügen in geringer Höhe (Rümler et al. 2021a). Es ist denkbar, dass die Reaktion auf die Magpy-Drohne zeitversetzt (früher oder später) geschieht und daher nicht optimal erfasst wurde.

3.1.2.4 Einfluss des Saisonzeitpunkts

Die mit der Phantom durchgeführten Tests auf Unterschiede zwischen den Untersuchungstagen (Abbildung 18 und Abbildung 19) zeigten signifikant höhere c_v und a_v (vigilante Küken/Adulte) am zweiten Tag. Das Gegenteil wurde für schlafende Individuen (c_s und a_s) beobachtet. Bewegung wurde bei Küken (c_m) am ersten Untersuchungstag signifikant häufiger beobachtet, während für a_m keine signifikanten Unterschiede gefunden wurden. Beim Flügelschlagen gab es keinen Unterschied zwischen den beiden Tagen.

Beim Vergleich der Kontrollsituationen an beiden Tagen fanden wir signifikante Unterschiede für alle Verhaltensweisen außer a_v und a_m (Adulte in Vigilanz/Bewegung). Der Anteil der schlafenden Individuen (c_s und a_s) war am zweiten Untersuchungstag geringer, ebenso wie

Küken in Bewegung und flügelschlagende Adulte (c_m und a_f). Vigilanz wurde bei Küken am zweiten Untersuchungstag häufiger beobachtet (c_v).

Die unterschiedlichen Kontrollniveaus an beiden Untersuchungstagen erschweren die Bestimmung der tatsächlichen Effektgröße. Um die Veränderung des Effekts der Drohne zwischen den Beobachtungstagen zu untersuchen, berechneten wir die Quotienten r_a und r_c (3a, 3b) zwischen den Anteilen der gezeigten Verhaltensweisen während der Kontrollaufnahmen und den Drohnenflügen für jeden Tag und für Adulte und Küken getrennt.

$$r_a = \frac{a_i \text{ (Kontrolle)}}{a_i \text{ (Überflug)}} \quad (3a); \quad r_c = \frac{c_i \text{ (Kontrolle)}}{c_i \text{ (Überflug)}} \quad (3b)$$

Quotienten kleiner als 1 zeigen an, dass die Drohne einen erhöhten Anteil des jeweiligen Verhaltens im Vergleich zur Kontrollaufnahme produzierte. Je verschiedener $r_{a,c}$ von 1 ist, desto stärker wird die jeweilige Verhaltensweise vom Überflug der Drohne beeinflusst. Die Änderung von $r_{a,c}$ zwischen den Untersuchungstagen zeigt daher den Einfluss des Saisonzeitpunkts auf die Reaktion der Pinguine.

Abbildung 21 Vergleich des Quotienten aus dem Anteil der beobachteten Verhaltensweisen während der Kontrollaufnahmen und dem Anteil der beobachteten Verhaltensweisen während der Flüge an beiden Beobachtungstagen. Ein Verhältnis von 1 bedeutet gleiche Anteile, Verhältnisse kleiner als 1 deuten auf höhere Anteile während der Phantom-Überflüge hin.

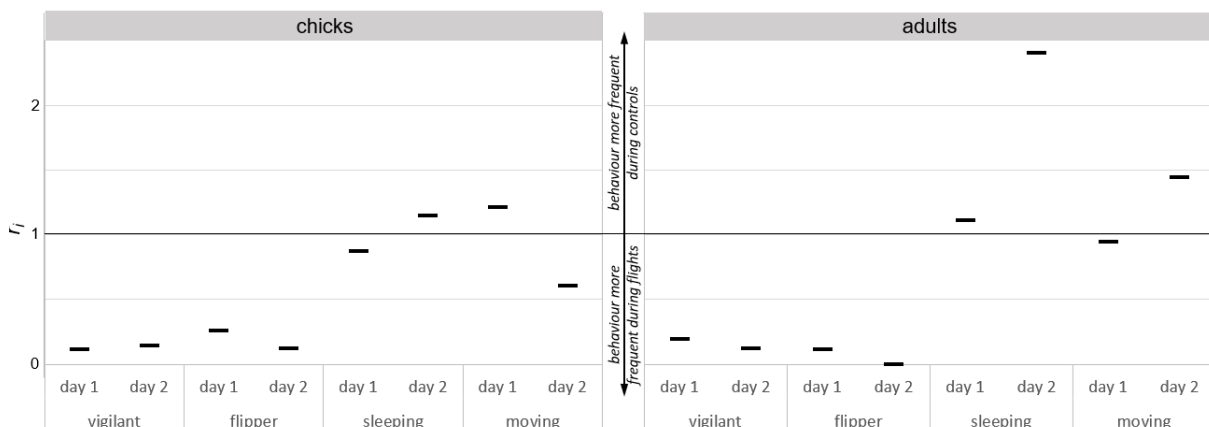


Abbildung aus Rümmler et al. (2021b)

Durch den Vergleich der Quotienten $r_{a,c}$ (Abbildung 21) fanden wir heraus, dass die Drohne einen höheren Einfluss auf das Verhalten am zweiten Untersuchungstag für vigilante Adulte a_v , flügelschlagende Küken c_f und Adulte a_f und für das Schlafen sowohl bei Adulten als auch bei Küken c_s, a_s hatte (Verhältnis r_i kleiner während der Flüge am zweiten Tag bzw. größer für Schlafen). Die durch die Drohne verursachte Bewegung nahm am zweiten Untersuchungstag bei Küken zu, während sie bei Erwachsenen abnahm.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass es bereits bei den Kontrollsituationen Unterschiede zwischen den Untersuchungstagen gab. Es scheint, dass am zweiten Untersuchungstag deutlich weniger Individuen während der Kontrollaufnahmen schliefen. Ebenso waren mehr Küken bereits während der Kontrollaufnahmen am zweiten Tag vigilant. Diese Unterschiede im Ausgangsverhalten sind neben jahreszeitlichen Entwicklungen auf verschiedene Faktoren zurückführbar, die nicht gemessen wurden oder nicht ermittelt werden können. Wir nehmen an,

dass ältere Küken mobiler sind, was möglicherweise bedeutet, dass am Tag 2 (Phase des Flüggewerdens) generell mehr Aktivität in der Kolonie herrschte. Ein weiterer möglicher Faktor ist das Tagesmuster, insbesondere in Bezug auf die Rückkehr der Adulten von ihren Jagdausflügen. Vermutlich werden mehr Küken zu diesen Zeiten vigilant sein und häufiger nach ihren Eltern suchen. Diese Überlegungen können jedoch nicht überprüft werden, da keine Informationen über die tageszeitliche Variabilität des Verhaltens von Kaiserpinguinen verfügbar sind. Während Helikopterüberflügen konnten keine Unterschiede in der Reaktion zwischen unterschiedlichen Tageszeiten festgestellt werden (Giese und Riddle 1999). Das Wetter und damit die Koloniedichte ist ein weiterer möglicher Einfluss. Bei windigen und kalten Bedingungen rücken die Individuen enger zusammen (Richter et al. 2018b) und schützen sich so gegenseitig. Um diese Unterschiede in den Kontrollsituationen zu berücksichtigen, wandten wir die Quotienten r_a und r_c an, welche die Veränderung im Vergleich zum Kontrollniveau am jeweiligen Tag darstellen. Diese Vergleiche ergaben im Allgemeinen einen höheren Einfluss der Drohne (Phantom) am zweiten Untersuchungstag. Möglicherweise spielt hier der unterschiedlich hohe Anteil an bereits schlafenden Individuen eine Rolle, da diese die Drohne, zumindest in großen Höhen, oftmals gar nicht wahrnehmen. In der Literatur wird von einer geringeren Reaktion auf Störungen zu einem späteren Zeitpunkt des Brutzyklus berichtet (Kooyman und Mullins 1990). Hier wurde ein Zeitpunkt während des Brütens mit einem Zeitpunkt, zu dem die Küken bereits geschlüpft waren, verglichen. Diese Beobachtung können wir mit unserer Studie nicht bestätigen, allerdings fanden unsere Untersuchungen auch zu einem späteren Zeitpunkt statt. Bei Zügelpinguinen wurden steigende Reaktionen während des Saisonverlaufs beobachtet (Krause et al. 2021). Als Ursachen für die von uns festgestellte Zunahme der Reaktion zwischen den zwei untersuchten Saisonzeitpunkten nehmen wir das Wachstum der Küken zwischen November und Dezember und den Übergang von der Crèche-Phase zur Phase des Flüggewerdens an. Wir können aber nicht ausschließen, dass andere Faktoren, wie z.B. Tagesrhythmen oder Aktivität von Prädatoren hier ursächlich sind.

3.1.2.5 Übergreifende Betrachtungen

Die weiße und relativ kleine Drohne ist gegen den Himmel nicht sehr deutlich zu erkennen. Vor allem gegen Wolken ist sie schwer zu sehen. Man nimmt an, dass Pinguine an Land emmetrop sind, mit einer leichten Tendenz zur Kurzsichtigkeit (etwa 2 Dioptrien, bei Königspinguinen sogar 10 Dioptrien, Howland und Sivak 1984; Martin 1999; Sivak und Millodot 1977). Sie haben ein kleines binokulares Feld, so dass das dreidimensionale Sehen eingeschränkt ist. Daher werden sie vermutlich nicht in der Lage sein, die Drohne besser zu sehen als menschliche Beobachtende. Sehr wahrscheinlich ist ihre Sehfähigkeit sogar schlechter. Daher nehmen wir an, dass Pinguine Drohnen zumindest teilweise durch Geräusche wahrnehmen. Dagegen ist nicht bekannt, wie gut Kaiserpinguine an Land hören können.

Giese und Riddle (1999) beobachteten, dass 20 bis 25 % der Kaiserpinguinküken bei Überflügen eines Hubschraubers in 1.000 m Höhe mit den Flügeln schlugen. Dies ist ein viel größerer Anteil als wir bei horizontalen Drohnenüberflügen in allen untersuchten Höhen beobachtet haben. Der maximale Anteil von Pinguinen, die mit den Flügeln schlugen, lag unter 10 % und meistens sogar unter 5 %. Somit verursachen Drohnen, selbst in sehr geringer Höhe, eindeutig weniger Störungen als Hubschrauber.

Wir haben nur Verhaltensänderungen untersucht. Wir können daher nicht abschätzen, ob und wenn ja, wie stark Verhaltensänderungen physiologische Konsequenzen haben und damit einen höheren Energieaufwand verursachen. Bestimmte Verhaltensweisen könnten mit Änderung in der Physiologie verbunden sein (wie beispielsweise bei Königspinguinküken, Weimerskirch et al. 2018). Die Physiologie könnte sich ändern, noch bevor ein verändertes Verhalten erkennbar

ist (beispielsweise Schwarzbären, Ditmer et al. 2015; adulte Königspinguine, Weimerskirch et al. 2018), oder beobachtete Verhaltensänderungen könnten keine Auswirkungen auf die Physiologie haben. Regel und Pütz (1997) maßen die Körpertemperaturen von Kaiserpinguinen, um den Energieaufwand während des Stresses zu berechnen. Sie fanden einen Anstieg von 1,5 K als Reaktion auf den Kontakt mit Menschen. Bei Hubschrauberüberflügen berechneten sie den zusätzlichen Energiebedarf aufgrund von Aufregung als Prozentsatz des gesamten täglichen Energieverbrauchs während der Mauser (Regel und Pütz 1997, Tabelle 4). Dieser betrug 9,9 % für Küken und 1,7 % für Adulte. Für Küken war dies der höchste kalkulierte Energieverlust, obwohl andere Störungen bei Adulten stärkere Temperaturerhöhungen verursachten. Dies stimmt mit unseren Ergebnissen überein, dass Küken empfindlicher auf Störungen aus der Luft reagieren als adulte Kaiserpinguine. Es zeigt auch, wie sich Störungen auf eine Art in einer Umgebung auswirken können, in der jegliche Energieverluste schwerwiegende Folgen haben können. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen jedoch nur sehr minimale Verhaltensänderungen bei einem kleinen Teil der Individuen. Vorkommnisse von Panik oder größerer Gruppenbewegungen wurden dagegen nicht beobachtet. Wir gehen daher davon aus, dass der Einfluss auf die Physiologie der betroffenen Tiere gering ist.

3.2 Reaktionen anderer Vögel auf Drohnenüberflüge

3.2.1 Schneesturmvögel

Schneesturmvögel (*Pagodroma nivea*) waren sowohl im Bereich der Stationsgebäude als auch an der Pinguinkolonie häufig zu sehen. Sie traten dabei oft zu zweit, aber auch in größeren Gruppen auf. Wir konnten häufig deutliche Reaktion dieser Art auf den Quadroptor beobachten. Es gab eine Reihe deutlicher Annäherungen und Umkreisungen bis hin zu Scheinattacken, bei denen die Tiere der Drohne bis auf wenige Zentimeter nahekamen. Bestätigt wurden solche Ereignisse durch Beobachtungen eines Fernseheteams, das im November 2019 im Gebiet unterwegs war und eine Attacke auf ihre Drohne (ebenfalls DJI Phantom 4 Pro) beschrieben. Unser Versuch, diese Beobachtungen durch gezielte Experimente genauer zu untersuchen, blieb jedoch aufgrund der Unbeständigkeit der Art in ihrem Vorkommen an der Station erfolglos.

Für das Starrflüglermodell wurde ein solches Verhalten nicht beobachtet.

3.2.2 Weitere Arten

Südpolarskuas (*Catharacta maccormicki*) beobachteten wir häufig im Bereich der Kaiserpinguinkolonie. Sichtbar waren meist 4 – 8 Individuen, die sich vorwiegend von Kadavern der Pinguinküken ernährten. Da es weder im näheren, noch im weiteren Umfeld eisfreie Bereiche gibt, auf welche die Art zum Brüten angewiesen ist, gehen wir davon aus, dass es sich bei den beobachteten Skuas um Nichtbrüter handelt. Während der recht häufigen Flüge mit dem Quadroptor Phantom beobachteten wir bei den Skuas keinerlei Reaktionen. Dagegen wurde die Magpy am 17.12.2019 von einer Südpolarskua über eine recht lange Strecke verfolgt. Die Verfolgung fand zwar überwiegend „beobachtend“ mit großem Abstand statt, jedoch wurde die Drohne mehrfach dicht angefliegen. Dies bestätigt Beobachtungen von King George Island, dass Skuas offenbar kaum auf Multitrotordrohnen, dagegen jedoch teilweise sehr heftig auf Starrflügler reagieren (Mustafa et al. 2018).

Buntfusssturmschwalben (*Oceanites oceanicus*) treten in kleinen Gruppen von bis zu 10 Individuen vor allem im Bereich der Station Neumayer III, aber gelegentlich auch am Winterlager oder an der Pinguinkolonie auf. Lokale Brutnachweise gibt es auch für diese Art bisher noch nicht. Wiederholt beobachteten wir, dass beide Drohnenmodelle verfolgt und

umflogen wurden. Aggression war dabei nicht erkennbar. Das Verhalten machte auf die Beobachtenden eher den Eindruck von Neugier. Ganz ähnlich verhielten sich Buntfusssturmschwalben auch gegenüber anderen beweglichen Objekten (z.B. Schneemobile).

3.3 Aktualisierter Stand des Wissens zum Einfluss von Drohnen auf die antarktische Tierwelt

In den aktuellen Umweltrichtlinien zum Betreiben unbemannter Fluggeräte in der Antarktis (ATCM 2018) wurde ausdrücklich auf den Mangel an wissenschaftlichen Daten zur Einschätzung des Störpotentials von Drohnen in der Antarktis hingewiesen. Zudem enthalten die Richtlinien einen Aufruf, gezielte Studien zur Beantwortung zentraler Fragen in Bezug auf Drohnennutzung durchzuführen und entsprechende Beobachtungen zu publizieren. Auch Mustafa et al. (2018), die den zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Wissensstand zusammentrugen und diskutierten, betonten die Lückenhaftigkeit des bisherigen Wissens und die Notwendigkeit weiterer Forschungsarbeiten. Trotz dieser Aufrufe wurden seither nur sehr wenige gezielte Arbeiten zum Einfluss von Drohnen auf antarktische Arten veröffentlicht. Im Folgenden sollen daher neben der Betrachtung der seither gewonnenen Erkenntnisse zu antarktischen Arten auch Beobachtungen an vergleichbaren Arten außerhalb der Antarktis besprochen werden. Die Zusammenfassung dieser Erkenntnisse erfolgt für die antarktischen Arten in tabellarischer Form (Anhang A) in Anlehnung an und Ergänzung zu Tabelle 1 in Mustafa et al. (2018).

3.3.1 Pinguine

Seit 2018 wurde außer den hier in Kapitel 3.1 beschriebenen Untersuchungen an Kaiserpinguinen lediglich eine Studie zur Störungswirkung von Drohnen auf Pinguinen publiziert (Krause et al. 2021). Diese beschäftigt sich mit Zügelpinguinen (*Pygoscelis antarcticus*) auf Livingston Island (Cape Shireff). Hier wurden neben gezielten Drohnenüberflügen auf bestimmten Höhen auch der Einfluss von Kartierungsflügen sowie Bodenkartierungen durch Personen zu Fuß miteinander verglichen (Drohne: Hexakopter APH-22; Aerial Imaging Solutions LLC). Dabei wurden auf Flughöhen von 30 m und 46 m keine Unterschiede im Verhalten im Vergleich zu den Kontrollaufnahmen festgestellt. Dagegen wurden bei Flughöhen von 15 m und 8 m signifikante Veränderungen im Verhalten beobachtet. Es wurden hauptsächlich Ruhe- und Vigilanzverhalten festgestellt (Letzteres zunehmend in Höhen unter 30 m). Fluchtverhalten wurde lediglich während Bodenzählungen von Küken und während niedrigen Drohnenüberflügen (8 und 15 m) bei mausernden Adulten beobachtet. Es wurde außerdem festgestellt, dass die Reaktionen auf Drohnenüberflüge im Laufe der Saison zunehmen: während brütende Zügelpinguine nur sehr leichte Reaktionen gegenüber den Kontrolldaten zeigten, nahm die Reaktion bei Adulten mit Küken im Nest bereits zu. Am deutlichsten fiel die Reaktion von mausernden Adulten nach der Kükenaufzucht aus. Insgesamt war die Reaktion während der Kartierungsüberflüge leicht erhöht gegenüber den Kontrolldaten, jedoch deutlich geringer als während der Bodenkartierungen.

Unsere eigene Arbeitsgruppe führte in Zusammenarbeit mit spanischen Kollegen (Arbeitsgruppe Andres Barbosa/Museo Nacional de Ciencias Naturales) Experimente an Zügelpinguinküken durch, um den Zusammenhang von Verhalten und physiologischen Reaktionen, speziell dem Niveau des Stress-Hormons Kortikosteron im Blut, zu untersuchen. Im Verhalten zeigte sich eine deutliche Reaktion auf eine niedrige Flughöhe (5 m, DJI Phantom Quadrocopter), während sich die große Flughöhe (50 m) nicht von der Kontrollsituation ohne Drohnenaktivität unterschied. Im Hormonspiegel konnten keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Drohnenaktivitäten nachgewiesen werden. Aufgrund des großen Einflusses des

dabei notwendigen Handlings, also des Einfangens der Tiere und der Blutabnahme, lässt sich daraus jedoch lediglich ableiten, dass der durch die Drohne verursachte Anstieg des Hormonspiegels maximal dem Anstieg durch das Handling entspricht. Wir schließen daraus, dass der physiologische Einfluss der Drohne nicht größer ist als der durch direktes Handling durch Menschen.

Unsere in Kapitel 3.1. dargestellten Untersuchungen an Kaiserpinguinen (*Aptenodytes forsteri*) zeigten, dass horizontale Überflüge sowohl bei Adulten als auch bei Küken eine geringere Verhaltensreaktion auslösten als vertikale Überflüge und die Annäherung von Personen zu Fuß. Adulte reagierten auf letztere am stärksten, während bei Küken Vertikalflüge die größte Reaktion auslösen. In diesen Arbeiten konnten wir außerdem zeigen, dass adulte Kaiserpinguine ab einer Flughöhe von 95 m nicht maßgeblich auf einen Quadropter reagieren. Für Küken sowie Überflüge mit einem Starrflügler konnte eine solche Flughöhe ohne Störung nicht experimentell bestimmt werden. Jedoch wird selbst bei niedrigeren Flughöhen die Störung als eher gering eingeschätzt.

3.3.2 Säugetiere an Land (Robben)

Über Robben wurden in den letzten Jahren offenbar die meisten Arbeiten zu drohneninduzierten Störungen angefertigt. Davon beschäftigen sich jedoch lediglich Laborie et al. (2021) und Krause et al. (2021) mit antarktischen Arten.

Laborie et al. (2021) führten mit einem Quadropter Anflüge auf Weddellrobben (*Leptonychotes weddellii*) auf 25 m bis 15 m Flughöhe durch und beobachteten die Tiere währenddessen vor Ort. Dabei wurden keine oder nur geringfügige Reaktionen im Verhalten beobachtet. Die stärksten Reaktionen wurden bei Weibchen mit Jungtieren bei geringen Windgeschwindigkeiten registriert. In dieser Arbeit wird eine minimale Flughöhe von 25 m über Weddellrobben auf dem Land empfohlen.

In Krause et al. (2021) werden die Reaktionen von Antarktischen Seebären (*Arctocephalus gazellus*) und Seeleoparden (*Hydrurga leptonyx*) auf einen Hexakopter (APH-22; Aerial Imaging Solutions LLC) beschrieben. Bei Antarktischen Seebären wurde in 30 m Flughöhe und niedriger eine Reaktion beobachtet. Dabei hatte der Saisonzeitpunkt keinen eindeutigen Effekt auf die Reaktion. Kartierungsüberflüge verursachten eine gegenüber den Kontrolldaten leicht erhöhte, Kartierarbeiten von Personen am Boden dagegen eine deutliche Reaktion. Die Reaktionen von Seeleoparden nahmen in den in dieser Studie getesteten Höhen nach unten hin kontinuierlich zu, war jedoch bei 46 m nicht höher als während der Kontrollaufnahmen. Bei dieser Art wurde im Vergleich zu den Kontrolldaten die deutlichste Reaktion auf die Drohne (der drei in dieser Studie untersuchten Arten) beobachtet. Auf menschliche Annäherung (Bodenkartierung) wurde jedoch in 100 % der Fälle durch Flucht reagiert. Somit stellt die Drohne hier ebenfalls die deutlich geringere Störung dar. Für Seeleoparden wurden außerdem physiologische Untersuchungen durchgeführt, indem die Respirationsrate gemessen wurde. Dabei wurde festgestellt, dass diese während der Kontrollaufnahmen am höchsten war und am niedrigsten bei Überflügen auf 46 m Höhe. Während der folgenden Überflüge (30, 15, 8 m) nahm die Atemfrequenz immer weiter zu. Dabei werden die hohen Werte bei den Kontrollaufnahmen als Artefakte des Untersuchungsablaufs interpretiert (Ankunft der Beobachter im Gebiet).

In der Antarktis kommen Robbenarten der beiden Familien Hunds- und Ohrenrobben vor. Die beiden unterscheiden sich deutlich in ihrem Verhalten an Land: Während Hundsrobben, auch aufgrund ihrer langsamen Fortbewegung an Land, eher träge sind, sind Ohrenrobben erheblich aktiver und zeigen auch häufiger deutliche Interaktionen und Aggressionen untereinander. Eine

Ausnahme hiervon stellen die Harems der zu den Hundsrobben gehörenden Seeelefanten dar, in denen Revierverteidigung und Aggressionen alltäglich sind. Auch der Habitus der beiden Familien unterscheidet sich deutlich, was unter anderem zu unterschiedlichen Ausprägungsmöglichkeiten von gezeigtem Verhalten führt. Während Hundsrobben einen Stimulus von oben beispielsweise aufgrund ihrer Bewegungsmöglichkeiten nur durch das Anheben des Kopfes beobachten können, können sich Ohrenrobben aufrichten und damit ein deutlicheres und mobileres Verhalten zeigen. Aufgrund dieser Unterschiede zwischen den beiden Familien werden diese auch in der Suche nach vergleichbaren Studien außerhalb der Antarktis im Folgenden getrennt betrachtet.

► Studien an nicht-antarktischen Hundsrobben:

Zwei Studien sind zu Kegelrobben (*Halichoerus grypus*) und Seehunden (*Phoca vitulina*) bekannt (Arona et al. 2018; Pomeroy et al. 2015), die mit den Antarktischen Hundsrobben Weddellrobbe, Südlicher Seeelefant (*Mirounga leonina*), Krabbenfresser (*Lobodon carcinophaga*) und Seeleopard vergleichbar sind. Im Allgemeinen wurden bei diesen Arten nur sehr geringe Reaktionen beobachtet. Laut Arona et al. (2018) gibt es keine Anzeichen, dass eine Starrflüglerdrohne (eBee; SenseFly) auf 75 - 80 m Flughöhe überhaupt wahrgenommen wird. Pomeroy et al. (2015) hingegen berichten von Reaktionen auf verschiedene Multirotor-Drohnen auf 30 m Flughöhe, wobei auch hier die Reaktionen meist eher mild ausfallen. Allerdings wird hier auch von Einzelereignissen mit starker Störung (beispielsweise Flucht von 60 Jungtieren bei einer Entfernung von 200 m) berichtet. Es wird vermutet, dass bei diesen Robbenarten viele Faktoren wie Alter, Zeitpunkt während des Fortpflanzungskreislaufes, Gruppenzusammensetzung, aber auch Wetter (vor allem die Windgeschwindigkeit) die Reaktion beeinflussen können. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf antarktische Arten bleibt daher fraglich.

► Studien an nicht-antarktischen Ohrenrobben:

Eine vergleichbare Studie wurde an Australischen Seebären (*Arctocephalus pusillus doriferus*) durchgeführt (McIntosh et al. 2018). Hier kamen zwei verschiedene Drohnenmodelle zum Einsatz: die größere Gryphon Dynamics Drohne (1,4 m diagonale, Oktokopter) löste bei 80 m Flughöhe geringe Störung aus, während sie bei 60 m Flughöhe so starke Störungen verursachte, dass die Autoren sie als „unakzeptabel“ einschätzten. Es wurde außerdem beobachtet, dass Schweben über den Tieren große Störungen verursachte. Der kleinere DJI Phantom 4 Quadroptopter hingegen verursachte auf keiner der getesteten Flughöhen (Minimum 40 m) sichtbare Verhaltensänderungen.

3.3.3 Andere Vogelarten

► Möwen

Zur in der Antarktis vorkommenden Dominikanermöwe (*Larus dominicanus*) konnten nach wie vor keine Untersuchungen gefunden werden. Zu anderen Möwenarten der Gattung *Larus* weltweit gibt es jedoch einige Studien. Während bei Eismöwen (*Larus hyperboreus*) keine Reaktionen auf eine Drohne festgestellt wurden, konnte bei Polarmöwen (*Larus glaucooides*) Alarmverhalten bei 32 ± 5 m Drohnenentfernung beobachtet werden (kleiner Quadroptopter, Brisson-Curadeau et al. 2017). Die Störung war jedoch nur von kurzer Dauer, die Tiere kehrten innerhalb von maximal 4,5 min zurück. Heringsmöwen (*Larus fuscus*) reagierten ebenfalls nicht auf eine Multirotor-Drohne in 15 m Flughöhe, bis auf einen beobachteten sehr kurzen Anflug

(Rush et al. 2018). Silberkopfmöwen (*Larus novaehollandiae*) schienen einen großen Quadrokopter (siehe 3.3.2) auf 60 und 80 m zwar wahrzunehmen, verließen jedoch ihr Nest nicht. Kleinere Drohnen der Typen DJI Phantom 4 und DJI Phantom 4 Pro wurden bis auf 40 m Flughöhe nicht wahrgenommen (McIntosh et al. 2018).

Insgesamt scheinen Möwen in Einzelfällen (abhängig möglicherweise von Art, Koloniezusammensetzung, Prädationsdruck u. ä.) stark, teilweise auch mit Attacken, auf Drohnen zu reagieren. Im Allgemeinen und nach relativ kurzer Gewöhnung verringert sich dies jedoch auf keine bis sehr schwache Reaktionen.

► Seeschwalben

Auch zu Seeschwalben konnten keine Studien für die Antarktis gefunden werden. Es gibt jedoch zwei Arbeiten zu Seeschwalben im Allgemeinen. Bevan et al. (2018) empfehlen, Flüge über Eilseeschwalben (*Thalasseus bergii*) nicht unter 60 m durchzuführen (getestet mit einem DJI Phantom 4 Pro Quadrokopter). Für Brandseeschwalben (*Thalasseus sandvicensis*) wurde festgestellt, dass die Störung durch Drohnen wesentlich geringer ist als die durch Menschen in der Kolonie ausgelöste Störung. Während der Drohnenflüge wurden kurze Bewegungen von wenigen Sekunden Dauer durch Adulte und Küken beobachtet. Wenn die Drohne (DJI Mavic Pro) langsam geflogen wurde, konnten keine Reaktionen von Gruppen von Küken beobachtet werden (Valle und Scarton 2021).

► Riesensturmvögel

Die Recherche ergab nur eine Studie, in der die Reaktion von Riesensturmvögeln auf Drohnen betrachtet wird. Rexer-Huber et al. (2020) führten Bestandserfassungen an Nördlichen Riesensturmvögeln (*Macronectes halli*) durch. Sie berichten von keinerlei beobachteter Störung und keinen Konflikten in der Luft. Allerdings wurde in dieser Studie immer ein Mindestabstand von 150 m von den Tieren eingehalten. Die verwendete Drohne war ein kleiner Quadrokopter (DJI Mavic).

► Skuas

Keine neuen Arbeiten zur Reaktion von Skuas (Antarktis und weltweit) wurden während unserer Literaturrecherche gefunden.

► Albatrosse

Zu den verschiedenen Albatrosarten wurde nach unserer Recherche lediglich eine Studie (Rexer-Huber et al. 2020), siehe oben) veröffentlicht. Hier wurden drei Arten untersucht: Graukopfalbatros (*Thalassarche chrysostoma*), Campbell-Albatrosse (*Thalassarche impavida*) und Königsalbatros (*Diomedea epomophora*). Wie bereits oben für Nördliche Riesensturmvögel beschrieben, wurden hier keine Störungen beobachtet. Allerdings wurde die Drohne auf mindestens 150 m horizontaler Entfernung geflogen.

► Kormorane

Keine neuen Arbeiten zur Reaktion von Kormoranen (Antarktis und weltweit) wurden während unserer Literaturrecherche gefunden.

Aufgrund unserer Beobachtungen aus dieser Studie können wir außerdem die folgenden Arten mit ersten, anekdotischen Beobachtungen hinzufügen:

► Schneesturmvögel (*Pagodroma nivea*)

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, wurden Reaktionen auf Multikopter beobachtet. Dabei wurden neben begleitendem Fliegen auch Scheinattacken gesichtet.

► Buntfusssturmschwalben (*Oceanites oceanicus*)

Auch hier konnte das Annähern an den Multikopter beobachtet werden, Zeichen von Aggression wurden jedoch nicht verzeichnet.

4 Kartierung der Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht

Zusätzlich zu den Störungsexperimenten wurde die Gelegenheit genutzt, um die Kolonie durch Drohnen-Befliegung zu kartieren und in ihrem Bestand zu erfassen. Direkte Quantifizierungen von Kaiserpinguinkolonien sind gegenwärtig kaum verfügbar. Der aktuellste Wert für die Größe der Kolonie Atka-Bucht wurde von Fretwell et al. (2012) mit 9.657 Brutpaaren angegeben. Wie wir bereits bei einer vorangegangenen Analyse zu Veränderungen des Meereises im Bereich dieser Kolonie (Mustafa et al. 2016) erstmalig festgestellt hatten, hielt sich auch in der Brutsaison 2019 ein Teil der Kolonie auf dem Schelfeis auf. Ob es sich hier um einen Trend oder ein gelegentlich wiederkehrendes Verhalten handelt ist nicht bekannt. Eine Quantifizierung der Subkolonie auf dem Schelfeis lag bisher noch nicht vor.

4.1 Methodik

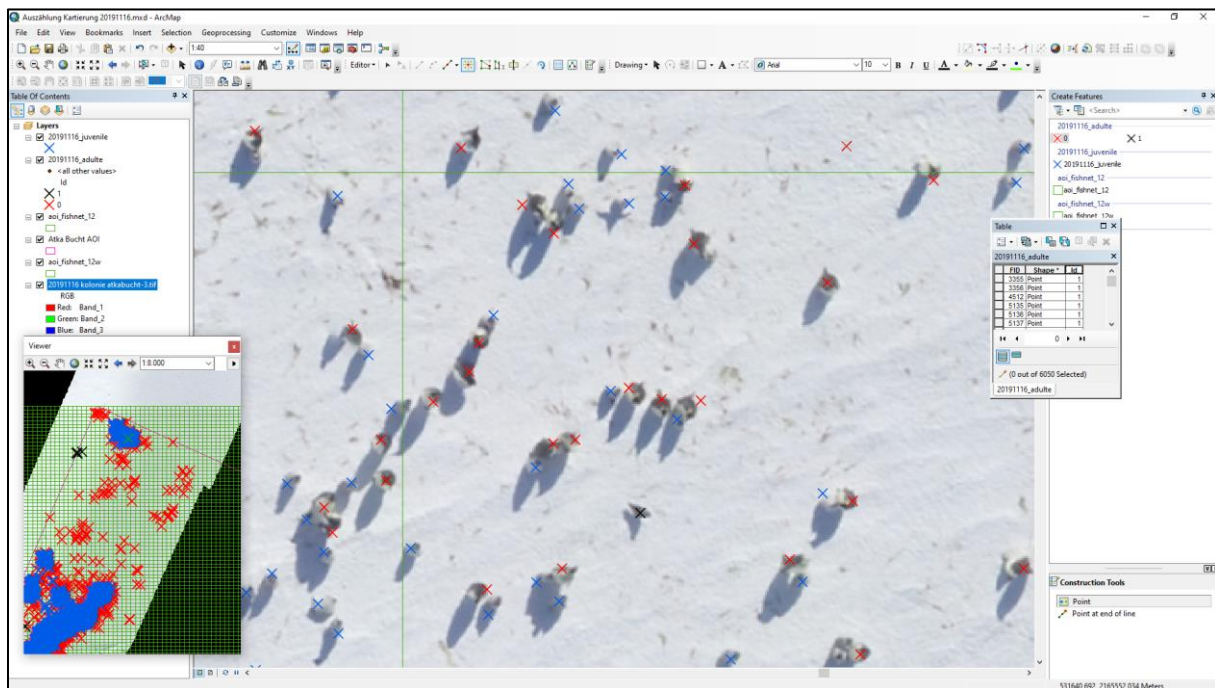
Während der Brutsaison 2019 verteilte sich die Kolonie Atka-Bucht auf eine Hauptkolonie auf dem Meereis des westlichen Randes der Bucht unmittelbar an der Schelfeiskante und eine westlich davon sich auf dem Schelfeis aufhaltenden Subkolonie (Abbildung 2 und Abbildung 23).

Beide Teilkolonien wurden am 16. November 2019 vollständig kartiert. Für diese Datenaufnahme wurde mit dem Quadroptor DJI Phantom 4 Pro und der Flugplanungssoftware „Map Pilot for DJI - Business“ v.4.1.0 gearbeitet. Um ein optimales Verhältnis von Bodenauflösung (ground sampling distance / GSD) und der zur Verfügung stehenden Ressourcen an Zeit und Batteriestrom zu erreichen, strebten wir eine Flughöhe von ca. 60 m über den Pinguinen an. Da die genaue Ausdehnung der beiden Teilkolonien nicht bekannt war, wurde ein erheblich größerer Bereich kartiert, um sicher zu gehen, dass die Abdeckung vollständig ist. Dabei orientierten wir uns vor allem an der vollständigen Erfassung der Küken. Adulte Tiere sind insbesondere durch ihren Weg von der Meereiskante bis zur Kolonie so weit im Gelände verstreut, dass eine exakte Abgrenzung des Kartiergebietes nicht möglich ist. Zudem lässt sich aus der Anzahl der Küken auf die Brutpaarzahl der Kolonie schließen.

Die durch die Drohne in regelmäßigen Abständen und mit Überlappung aufgenommenen Einzelbilder wurden für beide Teilkolonien zu je einem Orthomosaik verarbeitet (Lowe 2004; Mustafa et al. 2020, 2019, 2017; Pfeifer et al. 2021; Snavely et al. 2008). Für die Mosaikierung wurde das Programm „AgiSoft Metashape“ v.1.5.2 verwendet.

Die Quantifizierung führten wir anhand manueller Delineation mit dem Programm „ESRI ArcGIS“ v.10.5 durch. Dabei wurde zwischen Kaiserpinguinküken, adulten Kaiserpinguinen und anderen Vögeln unterschieden. Bei Letzteren handelte es sich entweder um Adéliepinguine (*Pygoscelis adeliae*) oder um Südpolar skuas (*Catharacta maccormicki*). Diese Kategorien waren in der Regel an Habitus und Größe unterscheidbar. Bei stehenden Pinguinen waren die Unterschiede nicht immer deutlich zu erkennen, jedoch konnte hier der Schattenwurf als zusätzliches Merkmal verwendet werden. Farbliche Unterschiede waren nicht zu erkennen. Dagegen bot die eher „weiche“ Textur des Gefieders der Küken ein deutliches Unterscheidungsmerkmal zum kontrastreichen Gefieder der adulten Vögel. Abbildung 22 zeigt einen typischen Ausschnitt der Arbeitsoberfläche mit den verschiedenen delinierten Kategorien. Um Doppelzählungen oder Lücken zu vermeiden, wurde das auszuzählende Orthofotomosaik mit einem Raster von 15 x 12 m überlagert und dann zellenweise deliniert.

Abbildung 22 Screenshot der Auswertungsoberfläche im Programm ArcGIS (ESRI Inc.) für die Auszählung der Pinguinkolonie mit differenzierten Symbolen (rot – Adulte, blau – Küken, schwarz – Skua)



Eigene Darstellung – THINK

4.2 Ergebnisse

Bei den Befliegungen am 16. November 2019 konnten beide Teilkolonien vollständig erfasst werden. Für die Abdeckung der Teilkolonie Meereis waren vier Flüge notwendig, für die Abdeckung der Teilkolonie Winterlager zwei. In beiden Gebieten wurde jedoch deutlich mehr Fläche kartiert, als für die Abdeckung der Kolonie notwendig gewesen wäre. Eine exakte Befliegung der Kolonie hätte allerdings eine genaue Kenntnis von Position und Ausdehnung vorausgesetzt. Beides ändert sich jedoch teilweise innerhalb weniger Stunden. So war für das Lokalisieren der Teilkolonie Winterlager eine mehrstündige Suche per Schneemobil notwendig. Daher setzten wir in der Flugplanung die abzudeckende Fläche eher großzügig an. Die schwankenden Lichtbedingungen während der verschiedenen Einzelflüge sind in den resultierenden Orthofotomosaiken (Abbildung 23) noch deutlich als hellere bzw. dunklere Streifen zu erkennen. Diese hatten aber keine Auswirkungen auf deren Auswertbarkeit. Die angestrebte Überflughöhe von 60 m konnte im relativ ebenen Gelände der Teilkolonie Winterlager gut eingehalten werden (Tabelle 4). Anspruchsvoller war dies an der Teilkolonie Meereis, da sich der Startpunkt am SPOT-Observatorium auf dem Schelfeis einige Meter oberhalb der Pinguinkolonie befand. Die Flughöhe über den Pinguinen konnte daher nur geschätzt werden. Die anschließende Auswertung des im Zuge der Mosaikierung entstandenen Höhenmodells ergab hier einen Höhenunterschied von 10 – 12 m zwischen Meereis und Schelfeisoberfläche. Damit erwies sich die aufgrund von Schätzung gewählte Flughöhe von 50 m über dem Startpunkt als recht zutreffend. Die gewählte Flughöhe ist nicht nur von Bedeutung für die Bodenauflösung der Aufnahmen, sondern auch für die Gewährleistung einer ausreichenden Überlappung der Einzelbilder als Voraussetzung für die Mosaikierung. Die wichtigsten Prozessierungsparameter für beide Orthofotomosaiken sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Prozessierungsparameter für die aus den Befliegungen vom 16. November 2019 stammenden Orthofotomosaiken

Parameter	Befliegung Teilkolonie Meereis	Befliegung Teilkolonie Winterlager
Datum	16. November 2019	16. November 2019
Uhrzeit (UTC)	10:00 – 12:00 Uhr	16:30 – 17:15 Uhr
Anzahl Flüge	4	2
Aufnahmen insgesamt	1.532	373
Aufnahmen verwendet	1.524	373
Abgedeckte Fläche	1,0 km ²	0,44 km ²
Flughöhe über Startpunkt	48,4 m	61,7 m
Bodenauflösung/GSD (original)	1,31 cm	1,65 cm
Bodenauflösung/GSD (resampling)	1,2 cm	1,65 cm
Ergebnisraster (pix)	99.791 x 208.524	68.940 x 28.434

Tabelle 5 zeigt die durch manuelle Delineation ermittelte Anzahl an Individuen.

Tabelle 5 Die für den 16. November ermittelten Individuenzahlen im den Teilkolonien der Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht

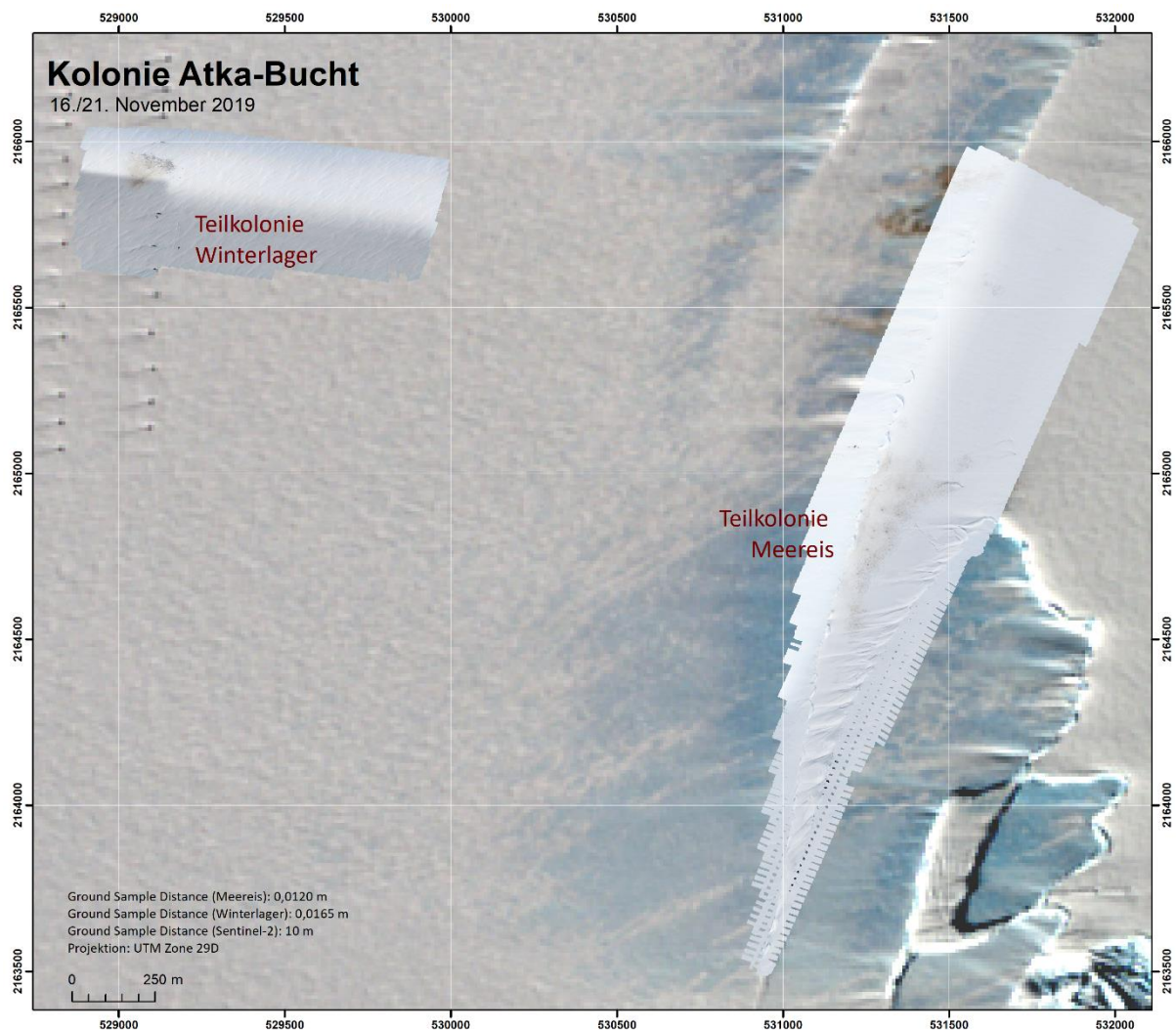
Parameter	Teilkolonie Winterlager	Teilkolonie Meereis	Gesamt
Kaiserpinguin (Küken)	2.228	7.796	10.024
Kaiserpinguin (adult)	461	5.580	6.041
Südpolarskua	1	5	6
Adéliepinguin	0	3	3

Wie oben beschrieben, lag der Schwerpunkt der Auswertung auf der Erfassung der Küken. Da Kaiserpinguinpaare nur ein Ei pro Saison legen, gehen wir davon aus, dass die Anzahl an Küken recht nah an der Brutpaarzahl liegt. Im Saisonverlauf verstirbt ein nicht unerheblicher Teil der geschlüpften Küken. Aufgrund der permanent niedrigen Temperaturen im Gebiet sind tote Küken aber auch nach mehreren Wochen noch gut erhalten vorzufinden und damit auch in den Drohnenaufnahmen zu erkennen. Zwar ernähren sich die im Gebiet vorhandenen Prädatoren von diesen Kadavern, jedoch ist deren Zahl vergleichsweise gering. Wir beobachteten maximal 6 Südpolarskuas (*Catharacta maccormicki*) und nur einmal einen Riesensturmvogel (*Macronectes giganteus*) im Gebiet. Eine Differenz zwischen der von uns detektierten Anzahl an Küken und der tatsächlichen Brutpaarzahl entsteht jedoch durch die nicht erfassbare Anzahl an verloren gegangenen Eiern. Die ermittelte Anzahl von 10.024 Kaiserpinguinküken (Tabelle 5) entspricht daher einem Mindestwert für die Anzahl der Brutpaare, zu der die Anzahl der verloren gegangenen Eier hinzugezählt werden müsste. Es ist davon auszugehen, dass diese Limitierung auch bei anderen Fernerkundungsmethoden besteht.

Im Unterschied zu den Küken halten sich adulte Kaiserpinguine und die Vögel anderer registrierter Arten auch außerhalb des Koloniebereiches auf. Die ermittelten Individuenzahlen

für die durch die Orthofotomosaike abgedeckten Gebiete sind daher nicht identisch mit der Gesamtpopulation. Allerdings nimmt die Anzahl der Individuen außerhalb des unmittelbaren Koloniebereiches deutlich ab, so, dass wir die ermittelten Zahlen trotzdem als gute Näherung betrachten. Die im Vergleich zur Anzahl der Küken deutlich geringere Anzahl an beobachteten adulten Individuen ergibt sich aus deren permanenter Nahrungssuche im offenen Meer.

Abbildung 23 Die Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht mit den beiden Teilkolonien auf dem Meereis und am Winterlager. Im Hintergrund ein Satellitenbild (Sentinel-2) vom 21. November 2019. Im Vordergrund die Orthofotomosaike der Drohnenbefliegungen am 16. November 2019. Die Kolonie ist erkennbar durch bräunliche (Guano) und schwarze (Pinguine) Färbungen. Auch im Satellitenbild sind ältere Guanoablagerungen zu erkennen.



Eigene Darstellung - THINK (Datengrundlage THINK, ESA)

Neben der Ermittlung eines Mindestwertes für die Brutpaarzahl der Kaiserpinguinkolonie Atka-Bucht unterstreicht diese Untersuchung das methodische Potential von drohnenbasierten Populationserfassungen für diese Art. Während bisher angewandte Fernerkundungsverfahren von Flugzeug- oder Satellitenplattformen aus auf der Zählung von adulten Individuen oder Flächenabschätzungen basieren, können mit dieser Technologie Küken einzeln identifiziert

werden. Deren Präsenz in der Kolonie ist deutlich konstanter als die der adulten Individuen. Dies verspricht eine deutlich präzisere Abschätzung der Brutpaarzahl einer Kaiserpinguinkolonie.

5 Erfahrungen zum wissenschaftlichen Arbeiten mit Drohnen in der kontinentalen Antarktis

Die extremen naturräumlichen Bedingungen der kontinentalen Antarktis stellen besondere Herausforderungen an das wissenschaftliche Arbeiten in diesem Naturraum. Dies sind zum einen die meteorologischen Rahmenbedingungen, aber auch die Besonderheiten des Öko- und Geosystems und die logistischen Herausforderungen durch seine Abgeschiedenheit.

► Witterung

Niedrige Temperaturen zwingen nicht nur Menschen zu warmer Bekleidung, auch Technik muss darauf eingestellt sein. Für unsere Arbeit war hier insbesondere die potentielle Auskühlung von Lithium-Polymer-Akkumulatoren (Akkus) relevant, der erfolgreich durch Isolation und zusätzliche Wärmezufuhr begegnet werden konnte. Solche Akkus versorgen nicht nur die eingesetzten Drohnen mit Energie, sondern auch Video- bzw. Fotokameras und Geländecomputer. Die Kälte sorgte aber auch für eine erhöhte Steifigkeit und Brüchigkeit von Kunststoffen. Geräte aller Art, bis hin zu Kabeln, können so durch unvorsichtige Handhabung schnell zu Schaden kommen.

Die oftmals starke *Sonneneinstrahlung*, einschließlich der Reflexion am fast ausnahmslos weißen Untergrund, erfordert das permanente Tragen einer Schutzbrille. Sowohl die Brille, als auch die Umgebungshelligkeit sind oftmals hinderlich beim Ablesen von Gerätedisplays und Computerbildschirmen. Andererseits ist der durch direkte Sonneneinstrahlung hervorgerufene Schattenwurf wichtig zur Erkennung dreidimensionaler Strukturen, sowohl beim Bewegen im Gelände als auch bei der Auswertung von Drohnenaufnahmen.

Starke *Stürme*, die mehrere Tage andauern können, machen eine Geländearbeit in der Regel unmöglich. Sie treten häufig auf und zwingen zu Sicherheitsmaßnahmen bei allen Arten von Geländearbeiten. Dies betrifft eine regelmäßige Beobachtung der Witterungsentwicklung, die Aufrechterhaltung der Funkverbindung zur Station, eine flexible Zeitplanung sowie Vorkehrungen für eine Orientierung im White-Out und für Notfälle (z.B. zusätzliche Sicherheitsausrüstung). Bei sämtlichen Installationen im Gelände muss die „Sturmfestigkeit“ beachtet werden, dies gilt z.B. auch für abgestellte Fahrzeuge. Auch bei relativ moderaten Windbedingungen am Boden können in den Flughöhen einer Drohne höhere Windgeschwindigkeiten auftreten, die zu erhöhtem Energieverbrauch und damit verkürzter Flugzeit führen. Je nach Windstärke und Drohnenmodell ist es auch möglich, dass die Navigationsfähigkeit des Gerätes eingeschränkt wird oder gar verloren geht.

Nebel kann vor allem in Küstennähe sehr plötzlich auftreten. Auch hier sind Vorkehrungen zur Orientierung im White-Out aus Sicherheitsgründen notwendig. Für Drohnen besteht unter solchen Bedingungen die Gefahr der Vereisung von Rotorblättern.

Bewölkung blockiert die direkte Sonneneinstrahlung und damit den Schattenwurf. Da eine Landschaft aus Eis und Schnee praktisch „farblos“ ist, sind ohne Schattenwurf kaum Oberflächenkonturen zu erkennen. Dies behindert nicht nur die Fortbewegung und Orientierung im Gelände, sondern senkt auch die Auswertbarkeit von Drohnenaufnahmen deutlich.

Die Lichtverhältnisse sind aufgrund der hohen geographischen Breite durch sehr lange Sonnenscheindauer im Sommer und durch Polarnachtbedingungen im Winter gekennzeichnet. Für Drohneneinsätze eröffnet dies die Möglichkeit einer sehr langen Arbeitszeit im Sommer, während im Winter aufgrund der Dunkelheit zumindest optische Aufnahmen unmöglich sind.

► Ökosystem

Das Ökosystem der kontinentalen Antarktis besteht nur aus wenigen Elementen. Im Untersuchungsgebiet wurden von uns, neben den im Bericht bereits aufgeführten Vogelarten auch Antarktissturmvögel (*Thalassoica antarctica*) und auf dem Meereis Weddellrobben gesichtet. Aufgrund der extremen Witterungsbedingungen können zusätzliche *Energieverluste* (z.B. durch Störungen) erhebliche Auswirkungen auf die Individuen oder Populationen haben. Jegliche Aktivitäten in der Nähe von Tieren erfordern daher besondere Vorsicht.

► Geosystem

Die Landschaft im Untersuchungsgebiet ist geprägt durch das Schelf- und Meereis. Bei der Bewegung im Gelände müssen hier insbesondere Gefahren durch *Spalten* beachtet werden. Da das *Eis in permanenter Bewegung* ist, verändert sich die diesbezügliche Situation täglich. Drohnen bieten hier aber auch die Möglichkeit, unsichere Bereiche zu erkunden, ohne dabei Menschen zu gefährden. Die permanente Bewegung der Eiskörper führt dazu, dass sich auch Orientierungspunkte (z.B. Stationsgebäude, Installationen, Tierkolonien, Landschaftselemente) permanent in ihrer Position ändern. Repetitive Untersuchungen machen daher entweder eine Korrektur der Geoposition oder die Verwendung relativer Bezugssysteme notwendig.

Die Nähe und Lage des Untersuchungsgebietes relativ zu magnetischem und geographischem Südpol machte eine Korrektur der Richtungsanzeige magnetischer Kompass um den Betrag der *Missweisung* notwendig. Um Fehlfunktionen in der Steuerung zu vermeiden, sollten Drohnen unbedingt im Gebiet neu kalibriert werden. Die magnetische *Inklination* war im Untersuchungsgebiet unproblematisch für die Drohnensteuerung, jedoch ist sie in anderen Gebieten des antarktischen Kontinents deutlich höher und kann zu Funktionsausfällen führen.

► Logistik

Die Arbeit mit Drohnen in der Antarktis unterliegt ähnlichen logistischen Begrenzungen wie andere Geländearbeiten in dieser Region. Diese ergeben sich sowohl aus den oben aufgeführten meteorologischen Bedingungen als auch den Besonderheiten des Geosystems. Neben Fragestellungen der Sicherheit, Orientierung und Energieversorgung sei auf die Abgeschiedenheit der Region hingewiesen. Potentiellen technischen Ausfällen kann nur durch eigene Reparatur oder vorsorglich mitgebrachten Ersatz begegnet werden. So bewährte sich das Mitführen von Ersatzteilen und -geräten bei der Drohnentechnik, da es durch die besonderen Witterungsbedingungen auch zu unvorhergesehenen Ausfällen und Beschädigungen kam. Auch das Mitführen von genügend Batterien und Thermoelementen erwies sich als nützlich. Vorteilhaft ist auch ein einfacher und schneller Versuchsaufbau/ -abbau.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Studie befasst sich mit dem Einsatz von Drohnen an Kaiserpinguinkolonien auf dem Antarktischen Kontinent. Schwerpunkt war dabei die Untersuchung der Wirkung solcher unbemannten Fluggeräte auf Kaiserpinguine – einer Charakterart der kontinentalen Antarktis. Aber auch Möglichkeiten und Grenzen des wissenschaftlichen Einsatzes dieser Technologie wurden betrachtet.

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass es möglich ist, mit handelsüblichen Drohnen auch unter den Bedingungen des Antarktischen Kontinents wissenschaftlich zu arbeiten. Es wurde auch bestätigt, dass Kaiserpinguine Drohnenüberflüge wahrnehmen und dass diese Wahrnehmung durch verhaltensbiologische Methoden quantifizierbar ist.

Dabei wurde die Annahme bestätigt, dass das Ausmaß der Reaktion von Kaiserpinguinen von verschiedenen Faktoren abhängt: der Höhe und dem Zeitpunkt des Überflugs, der Art des Fluggerätes und davon, ob es sich um Küken oder adulte Tiere handelt. Nicht alle erzielten Ergebnisse sind leicht interpretierbar. Das liegt vor allem daran, dass das Wissen zu dieser Art generell noch recht begrenzt ist, z.B. hinsichtlich ihrer Sinneswahrnehmung und der Abhängigkeit ihres Verhaltens von Tagesrhythmen oder Saisonzeitpunkten. Trotzdem lässt sich bereits mit dem jetzigen Wissensstand erkennen, dass die Tiere besonders stark auf vertikale Überflüge reagieren. Deutlich sichtbar wird jedoch auch, dass die für wissenschaftliche Untersuchungen (z.B. Populationserfassungen) typischen Charakteristika von Drohnenflügen (horizontale Überflüge in mehr als 50 m Höhe) einen geringeren Einfluss auf die Reaktionen von Kaiserpinguinen haben, als Methoden, bei denen sich Personen den Tieren zu Fuß nähern.

Es wird vorläufig empfohlen, Häufungen von Drohnenflügen direkt über Kaiserpinguinen zu vermeiden. Wissenschaftliche Einsätze sollten auch aufgrund ihrer Flugcharakteristik privilegiert werden. Horizontale Flüge sind, wo möglich, vertikalen Flügen vorzuziehen, die Verwendung von Starrflüglermodellen sollte Vorrang vor dem Einsatz von Multikoptern haben. Zumindest horizontale Überflüge, selbst in geringen Höhen, scheinen weniger Reaktion auszulösen als direkte menschlichen Störung in der Kolonie. Daher können Drohneneinsätze Methoden, die das Betreten der Kolonie einfordern, durchaus sinnvoll ersetzen. In Bezug auf Flughöhen konnten zwar Höhen ab 95 m für Adulte und Quadrokopterflüge als reaktionsfrei beobachtet werden, jedoch gilt dies nicht für Küken. Da sich die Kolonie aus beiden Altersklassen zusammensetzt, muss hier die sensiblere Gruppe als Maßstab gelten. Daher können wir aus unseren Ergebnissen bisher keine Flughöhe, in der eine Reaktion sicher ausgeschlossen werden kann, ableiten. Dasselbe gilt für Starrflüglerdrohnen. Allerdings wurde auch festgestellt, dass die Reaktionen im Allgemeinen nicht besonders stark in Bezug auf ihre Intensität ausfallen. Zudem reagierte stets nur ein Teil der anwesenden Individuen und die Reaktionen waren nur von kurzer Dauer. Unter Beachtung der oben genannten Empfehlungen und bei entsprechender Notwendigkeit können Flüge (in möglichst großen Höhen) demnach, entsprechend unseren Ergebnissen, ohne größere Bedenken durchgeführt werden.

Die drohnenbasierte Erfassung einer Kaiserpinguinkolonie konnte erfolgreich demonstriert werden. Im Unterschied zu bisherigen Fernerkundungsverfahren (Flugzeug- oder Satellitenbilder) auf Basis von Flächenabschätzungen oder der zeitlich variablen Anzahl adulter Individuen, erlaubt die durch Drohnenaufnahmen mögliche Quantifizierung der Küken eine deutlich präzisere Erfassung der Brutpaarzahl.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass, unter Beachtung der naturräumlichen Herausforderungen der kontinentalen Antarktis, Drohnen ein vielversprechendes Werkzeug für wissenschaftliches Arbeiten auch in diesem Teil der Welt sind.

7 Quellenverzeichnis

- Arona, L., Dale, J., Heaslip, S.G., Hammill, M.O., Johnston, D.W., 2018. Assessing the disturbance potential of small unoccupied aircraft systems (UAS) on gray seals (*Halichoerus grypus*) at breeding colonies in Nova Scotia, Canada. PeerJ 6, e4467. <https://doi.org/10.7717/peerj.4467>
- ATCM, 2018. Environmental Guidelines for Operation of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) in Antarctica. Presented at the ATCM XLI.
- Aubin, T., Jouventin, P., 1998. Cocktail-party effect in king penguin colonies. Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 265, 1665–1673. <https://doi.org/10.1098/rspb.1998.0486>
- Bevan, E., Whiting, S., Tucker, T., Guinea, M., Raith, A., Douglas, R., 2018. Measuring behavioral responses of sea turtles, saltwater crocodiles, and crested terns to drone disturbance to define ethical operating thresholds. PLOS ONE 13, e0194460. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194460>
- Brisson-Curadeau, E., Bird, D., Burke, C., Fifield, D.A., Pace, P., Sherley, R.B., Elliott, K.H., 2017. Seabird species vary in behavioural response to drone census. Sci. Rep. 7, 17884. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18202-3>
- Burger, J., Gochfeld, M., 2007. Responses of Emperor Penguins (*Aptenodytes forsteri*) to encounters with ecotourists while commuting to and from their breeding colony. Polar Biol. 30, 1303–1313. <https://doi.org/10.1007/s00300-007-0291-1>
- Ditmer, M.A., Vincent, J.B., Werden, L.K., Tanner, J.C., Laske, T.G., Iazzo, P.A., Garshelis, D.L., Fieberg, J.R., 2015. Bears Show a Physiological but Limited Behavioral Response to Unmanned Aerial Vehicles. Curr. Biol. 25, 2278–2283. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.07.024>
- Egan, C.C., Blackwell, B.F., Fernández-Juricic, E., Klug, P.E., 2020. Testing a key assumption of using drones as frightening devices: Do birds perceive drones as risky? The Condor. <https://doi.org/10.1093/condor/duaa014>
- Fretwell, P.T., Larue, M.A., Morin, P., Kooyman, G.L., Wienecke, B., Ratcliffe, N., Fox, A.J., Fleming, A.H., Porter, C., Trathan, P.N., 2012. An emperor penguin population estimate: the first global, synoptic survey of a species from space. PloS One 7, e33751. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033751>
- Fretwell, P.T., Trathan, P.N., 2020. Discovery of new colonies by Sentinel2 reveals good and bad news for emperor penguins. Remote Sens. Ecol. Conserv. rse2.176. <https://doi.org/10.1002/rse2.176>
- Fromm, T., Oberdieck, C., Matz, T., Wesche, C., 2020. Expeditions to Antarctica: ANT-Land 2019/20 Neumayer Station III, Kohnen Station, Flight Operations and Field Campaigns, Reports on Polar and Marine Research. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven.
- Gardner, S., LeRoi, D., Perryman, W., 2010. A penguin population polar express: NOAA's quest to count penguin breeds speeds up with a VTOL UAS. Unmanned Syst. 29.
- Gerum, R.C., Richter, S., Fabry, B., Zitterbart, D.P., 2017. ClickPoints: an expandable toolbox for scientific image annotation and analysis. Methods Ecol. Evol. 8, 750–756. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12702>
- Giese, M., Riddle, M., 1999. Disturbance of emperor penguin *Aptenodytes forsteri* chicks by helicopters. Polar Biol. 22, 366–371. <https://doi.org/10.1007/s0030000050430>
- Harris, C., Lorenz, K., Fishpool, L.D.C., Lascelles, B., Cooper, J., Coria, N.R., Croxall, J.P., Emmerson, L.M., Fraser, W.R., Fijn, R.C., Jouventin, P., LaRue, M.A., Le Maho, Y., Lynch, H.J., Naveen, R., Patterson-Fraser, D.L., Peter, H.-U., Poncet, S., Phillips, R.A., Southwell, C.J., van Franeker, J.A., Weimerskirch, H., Wienecke, B., Woehler, E.J., 2015. Important Bird Areas in Antarctica 2015, BirdLife International and Environmental Research & Assessment Ltd. Cambridge.

- Howland, H.C., Sivak, J.G., 1984. Penguin vision in air and water. *Vision Res.* 24, 1905–1909.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(84)90024-5)
- Kooyman, G.L., Mullins, J.L., 1990. Ross Sea Emperor Penguin Breeding Populations Estimated by Aerial Photography, in: Kerry, K.R., Hempel, G. (Eds.), *Antarctic Ecosystems*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 169–176.
- Korczak-Abshire, M., Kidawa, A., Zmarz, A., Storvold, R., Karlsen, S.R., Rodzewicz, M., Chwedorzewska, K., Znoj, A., 2016. Preliminary study on nesting Adélie penguins disturbance by unmanned aerial vehicles. *CCAMLR Sci.* 23, 1–16.
- Krause, D.J., Hinke, J.T., Goebel, M.E., Perryman, W.L., 2021. Drones Minimize Antarctic Predator Responses Relative to Ground Survey Methods: An Appeal for Context in Policy Advice. *Front. Mar. Sci.* 8, 648772.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.648772>
- Laborie, J., Christiansen, F., Beedholm, K., Madsen, P.T., Heerah, K., 2021. Behavioural impact assessment of unmanned aerial vehicles on Weddell seals (*Leptonychotes weddellii*). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 536, 151509.
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.151509>
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vis.* 60, 91–110.
- Martin, G.R., 1999. Eye structure and foraging in King Penguins *Aptenodytes patagonicus*. *Ibis* 141, 444–450.
<https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.1999.tb04413.x>
- McEvoy, J.F., Hall, G.P., McDonald, P.G., 2016. Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowl surveys: disturbance effects and species recognition. *PeerJ* 4, e1831.
<https://doi.org/10.7717/peerj.1831>
- McIntosh, R.R., Holmberg, R., Dann, P., 2018. Looking Without Landing—Using Remote Piloted Aircraft to Monitor Fur Seal Populations Without Disturbance. *Front. Mar. Sci.* 5.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00202>
- Mustafa, O., Barbosa, A., Krause, D.J., Peter, H.-U., Vieira, G., Rümmler, M.-C., 2018. State of knowledge: Antarctic wildlife response to unmanned aerial systems. *Polar Biol.* 41, 2387–2398.
<https://doi.org/10.1007/s00300-018-2363-9>
- Mustafa, O., Braun, C., Esefeld, J., Knetsch, S., Maercker, J., Pfeifer, C., Rümmler, M.-C., 2019. Detecting Antarctic seals and flying seabirds by UAV. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* IV-2/W5, 141–148. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-141-2019>
- Mustafa, O., Esefeld, J., Grämer, H., Maercker, J., Rümmler, M.-C., Pfeifer, C., 2017. Monitoring penguin colonies in the Antarctic using remote sensing data. *Texte* 30/2017, 1–162.
- Mustafa, O., Firla, M., Grämer, H., Hallabrin, M., Hauke, M., Knetsch, S., Maercker, J., Rümmler, M.-C., Senf, M., Pfeifer, C., 2020. Monitoring von Pinguinkolonien in der Antarktis mit Hilfe der Fernerkundung. *Texte* 112/2020, 132.
- Mustafa, O., Griebisch, H., Knetsch, S., Pfeifer, C., 2016. Dynamics of landfast sea ice of Atka Bay, Antarctica. *Texte* 01/2016 *Texte* 01/2016, 38.
- Pfeifer, C., Barbosa, A., Mustafa, O., Peter, H.-U., Rümmler, M.-C., Brenning, A., 2019. Using Fixed-Wing UAV for Detecting and Mapping the Distribution and Abundance of Penguins on the South Shetlands Islands, Antarctica. *Drones* 3, 39. <https://doi.org/10.3390/drones3020039>
- Pfeifer, C., Rümmler, M.-C., Mustafa, O., 2021. Assessing colonies of Antarctic shags by unmanned aerial vehicle (UAV) at South Shetland Islands, Antarctica. *Antarct. Sci.* 1–17. <https://doi.org/10.1017/S0954102020000644>

- Pomeroy, P., O'Connor, L., Davies, P., 2015. Assessing use of and reaction to unmanned aerial systems in gray and harbor seals during breeding and molt in the UK. *J. Unmanned Veh. Syst.* 3, 102–113. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0013>
- Ratcliffe, N., Guihen, D., Robst, J., Crofts, S., Stanworth, A., Enderlein, P., 2015. A protocol for the aerial survey of penguin colonies using UAVs. *J. Unmanned Veh. Syst.* 3, 95–101. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0006>
- Regel, J., Pütz, K., 1997. Effect of human disturbance on body temperature and energy expenditure in penguins. *Polar Biol.* 18, 246–253.
- Rexer-Huber, K., Parker, K.A., Parker, G.C., 2020. Campbell Island seabirds: Operation Endurance November 2019. Final Rep. Mar. Species Threats, Department of Conservation. Parker Conservation, Dunedin, 23p.
- Richter, S., Gerum, R.C., Schneider, W., Fabry, B., Le Bohec, C., Zitterbart, D.P., 2018a. A remote-controlled observatory for behavioural and ecological research: A case study on emperor penguins. *Methods Ecol. Evol.* 9, 1168–1178. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12971>
- Richter, S., Gerum, R.C., Winterl, A., Houstin, A., Seifert, M., Peschel, J., Fabry, B., Le Bohec, C., Zitterbart, D.P., 2018b. Phase transitions in huddling emperor penguins. *J. Phys. Appl. Phys.* 51, 214002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aabb8e>
- Rümmler, M.-C., Esefeld, J., Hallabrin, M.T., Pfeifer, C., Mustafa, O., 2021a. Emperor penguin reactions to UAVs: First observations and comparisons with effects of human approach. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 23, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100545>
- Rümmler, M.-C., Esefeld, J., Pfeifer, C., Mustafa, O., 2021b. Effects of UAV overflight height, UAV type, and season on the behaviour of emperor penguin adults and chicks. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 23, 100558. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100558>
- Rümmler, M.-C., Mustafa, O., Maercker, J., Peter, H.-U., Esefeld, J., 2018. Sensitivity of Adélie and Gentoo penguins to various flight activities of a micro UAV. *Polar Biol.* 41, 2481–2493. <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2385-3>
- Rümmler, M.-C., Mustafa, O., Maercker, J., Peter, H.-U., Esefeld, J., 2016. Measuring the influence of unmanned aerial vehicles on Adélie penguins. *Polar Biol.* 39, 1329–1334. <https://doi.org/10.1007/s00300-015-1838-1>
- Rush, G.P., Clarke, L.E., Stone, M., Wood, M.J., 2018. Can drones count gulls? Minimal disturbance and semiautomated image processing with an unmanned aerial vehicle for colony-nesting seabirds. *Ecol. Evol.* 8, 12322–12334. <https://doi.org/10.1002/ece3.4495>
- Sandhäger, H., Blindow, N., 2000. Surface elevation, ice thickness, and subglacial-bedrock topography of Ekström Ice Shelf (Antarctica) and its catchment area. *Ann. Glaciol.* 30, 61–68. <https://doi.org/10.3189/172756400781820723>
- Scobie, C.A., Hugenholtz, C.H., 2016. Wildlife monitoring with unmanned aerial vehicles: Quantifying distance to auditory detection. *Wildl. Soc. Bull.* 40, 781–785.
- Sivak, J.G., Millodot, M., 1977. Optical performance of the penguin eye in air and water. *J. Comp. Physiol.* 119, 241–247. <https://doi.org/10.1007/BF00656636>
- Snavey, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from internet photo collections. *Int. J. Comput. Vis.* 80, 189–210.
- Trathan, P.N., Wienecke, B., Barbraud, C., Jenouvrier, S., Kooyman, G., Le Bohec, C., Ainley, D.G., Ancel, A., Zitterbart, D.P., Chown, S.L., LaRue, M., Cristofari, R., Younger, J., Clucas, G., Bost, C.-A., Brown, J.A., Gillett, H.J., Fretwell, P.T., 2020. The emperor penguin - Vulnerable to projected rates of warming and sea ice loss. *Biol. Conserv.* 241, 108216. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108216>

Valle, R.G., Scarton, F., 2021. Drone-conducted counts as a tool for the rapid assessment of productivity of Sandwich Terns (*Thalasseus sandvicensis*). *J. Ornithol.* <https://doi.org/10.1007/s10336-020-01854-w>

Vas, E., Lescroël, A., Duriez, O., Boguszewski, G., Grémillet, D., 2015. Approaching birds with drones: first experiments and ethical guidelines. *Biol. Lett.* 11. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.0754>

Weimerskirch, H., Prudor, A., Schull, Q., 2018. Flights of drones over sub-Antarctic seabirds show species- and status-specific behavioural and physiological responses. *Polar Biol.* 41, 259–266. <https://doi.org/10.1007/s00300-017-2187-z>

A Anhang

Species traits				Study traits					UAS type			Results	Reference
Group	Species	Life-history stage	Aggregation	Vertical heights (m)	Targeted disturbance study?	Were responses to sound observed?	Were behavioral responses observed?	Were physiological responses observed?	Size (cm)	Type and engine	Flight pattern		
Penguins	Emperor Penguin <i>Aptenodytes forsteri</i>	breeding adult	colony	20 -145	Yes	n.a.	Yes	No	38 x 22 x 32.5	4-copter electric	lawn-mower	at 95 m and higher no reaction	Rümmler et al. (2021a, b)
	Emperor Penguin <i>Aptenodytes forsteri</i>	breeding adult	colony	35-95	Yes	n.a.	Yes	No	86.4x 58.4 x 14	fixed wing	lawn-mower	in general lower level of reactions than to copter, altitude without disturbance not measured	Rümmler et al. (2021a, b)
	Emperor Penguin <i>Aptenodytes forsteri</i>	breeding adult	colony	35-95	Yes	n.a.	Yes	No	38 x 22 x 32.5	4-copter electric	direct approach (vertical)	more disturbance than horizontal overflights, less than approaching humans	Rümmler et al. (2021a, b)
	Emperor Penguin <i>Aptenodytes forsteri</i>	chick	colony	20 -145	Yes	n.a.	Yes	No	38 x 22 x 32.5	4-copter electric	lawn-mower	altitude without disturbance not measured; reaction stronger in older chicks (fledglings)	Rümmler et al. (2021a, b)
	Emperor Penguin <i>Aptenodytes forsteri</i>	chick	colony	35-95	Yes	n.a.	Yes	No	86.4x 58.4 x 14	fixed wing	lawn-mower	In general lower level of reactions than to copter, altitude without disturbance not measured	Rümmler et al. (2021a, b)
	Emperor Penguin <i>Aptenodytes forsteri</i>	chick	colony	20 -145	Yes	n.a.	Yes	No	38 x 22 x 32.5	4-copter electric	direct approach (vertical)	more disturbance than horizontal overflights and then approaching humans	Rümmler et al. (2021a, b)

Species traits				Study traits					UAS type			Results	Reference
Group	Species	Life-history stage	Aggregation	Vertical heights (m)	Targeted disturbance study?	Were responses to sound observed?	Were behavioral responses observed?	Were physiological responses observed?	Size (cm)	Type and engine	Flight pattern		
	Chinstrap penguin <i>Pygoscelis antarcticus</i>	chicks	colony	5, 50	Yes	n.a.	Yes	Yes	86.4x 58.4 x 14	fixed wing	special	clear behavioural reaction at 5 m, none at 50 m, stress hormone level not higher than during animal handling	Rümmeler et al. pers. comm.
	Chinstrap penguin <i>Pygoscelis antarcticus</i>	incubating adults	colony	8 – 46	Yes	n.a.	Yes	No	diameter < 60	6-copter	lawn-mower	small increase in behavioural reaction < 30 m	Krause et al. (2021)
	Chinstrap penguin <i>Pygoscelis antarcticus</i>	adults in guard stage	colony	8 – 46	Yes	n.a.	Yes	No	diameter < 60	6-copter	lawn-mower	intermediate increase in behavioural reaction < 30 m	Krause et al. (2021)
	Chinstrap penguin <i>Pygoscelis antarcticus</i>	adults in molt	colony	8 – 46	Yes	n.a.	Yes	No	diameter < 60	6-copter	lawn-mower	clear increase in behavioural reaction < 30 m; escape in low alt (8 m)	Krause et al.(2021)
Mammals on land	Weddell Seal <i>Leptonychotes weddellii</i>	breeding	haul-out	15 - 25	Yes	Yes	Yes	No	35.4	4-copter electric	approach , hover	little or no reaction	Laborie et al. (2021)
	Antarctic Fur Seal <i>Arctocephalus gazella</i>	harem/ post-harem/ non-harem	harem and after	8 – 46	Yes	n.a.	Yes	No	diameter < 60	6-copter	lawn-mower	behavioural reaction observed at 30 m and below	Krause et al. (2021)
	Leopard Seal <i>Hydrurga leptonyx</i>	molt, post-molt	single	8 – 46	Yes	n.a.	Yes	Yes	diameter < 60	6-copter	lawn-mower	behavioural reaction observed below 46 m; highest respiration rate during controls, increase with decreasing UAV altitude	Krause et al. (2021)

Species traits				Study traits					UAS type			Results	Reference
Group	Species	Life-history stage	Aggregation	Vertical heights (m)	Targeted disturbance study?	Were responses to sound observed?	Were behavioral responses observed?	Were physiological responses observed?	Size (cm)	Type and engine	Flight pattern		
Other birds	Northern giant petrel <i>Macronectes halli</i>	breeding	single or small clusters	distance >150	No	n.a.	Yes	No	35.4	4-copter electric	lawn-mower	no disturbance	Rexer-Huber et al. (2020)
	Wilson's storm petrel <i>Oceanites oceanicus</i>	non-breeders	small groups	n.a.	No	n.a.	Yes	No	38 x 22 x 32.5	4-copter electric	lawn-mower	closing in on UAV, no aggressions observed	This study
	Snow petrel <i>Pagodroma nivea</i>	non-breeders	small groups	n.a.	No	n.a.	Yes	No	38 x 22 x 32.5	4-copter electric	diverse	closing in and pseudo attacks	This study
	Snow petrel <i>Pagodroma nivea</i>	non-breeders	small groups	n.a.	No	n.a.	Yes	No	86.4x 58.4 x 14	fixed wing	lawn-mower	no reaction observed	This study