— Bachelorarbeit —

Beeinflussung der Orientierung bei Rotkehlchen durch Rufe und künstliche Laute

Thomas Reichl

21. Oktober 2008

Betreuender Gutachter: Prof. Dr. Henrik Mouritsen
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Ole Næsbye Larsen

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **5**

Einführung **6**

Erforschung des Vogelzugs 6

Orientierung und Navigation während des Zuges 9

Zugrufe 13

Die Versuchstiere: Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*) 14

Material und Methoden **16**

Material 16

Versuchstiere 16

Geräte 16

Tonerzeugung 21

Signalwege 23

Methoden 24

Markieren der Vögel 25

Test vor Versuchsbeginn 26

Auswertung 26

Ergebnisse **30**

Daten 30

Methodische Fortschritte 40

Diskussion **45**

Zu den Ergebnissen 45

Verbesserungsvorschläge 45

Literatur **48**

Anhang **51**

Danksagung 51

Gerätespezifikationen 51

Personen 52

Bildnachweis 53

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Versuchsprogramm 25

Tab. 2: Mittlere Winkel für jede Phase 30

Tab. 3: Die anscheinend gut orientierten Vögel 31

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Weltkarte der Inklinationswinkel des Jahres 2005 11

Abb. 2: Versuchskäfig 19

Abb. 3: Versuchsaufbau: Tisch und Lautsprecher 20

Abb. 4: Schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus 20

Abb. 5: Oszillogramm und Spektrogramm der Laute 22

Abb. 6: Bedienungsoberfläche von ProjectOleLyd 23

Abb. 7: Frame aus einer .avi-Datei 27

Abb. 8: Graphik zu den ersten Kontrollphasen, Teil 1 31

Abb. 9: c-Phasen der gut orientierten Vögel 33

Abb. 10: Berechnungsprinzip der c/S-Differenzwinkel 34

Abb. 11: Differenzwinkel zur Richtungsänderung beim Zugruf 35

Abb. 12: Differenzwinkel zur Richtungsänderung beim „ding“ 36

Abb. 13: Graphik zu den ersten Kontrollphasen, Teil 2 36

Abb. 14: Berechnungsprinzip der Differnz zur Reizrichtung 37

Abb. 15: Differenzwinkel: Reizphase und Reizrichtung beim Zugruf 38

Abb. 16: Differenzwinkel: Reizphase und Reizrichtung beim „ding“ 39

Abb. 17: Beispiel einer vollständigen Auswertung 41

Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit wurde experimentell geprüft, ob Zugrufe von Rotkehlchen eine Zugrichtungsänderung bei Artgenossen hervorrufen können. Das Ergebnis dieses Experiments könnte die Frage beantworten, ob Zugrufe Einfluss auf die Orientierung haben.

Dazu wurden den zugbereiten Versuchstieren mittels zweier Reihen von Lautsprechern Zugrufe und als Kontrolle ein künstlicher Laut vorgespielt. Es wurde ein Überflug eines Objektes simuliert, das den jeweiligen Laut von sich gibt. Die Richtungen waren Nord–Süd, Ost–West oder jeweils umgekehrt, sodass ein möglichst großer Winkel zur Orientierungsrichtung des Vogels entstand. Die Vögel saßen in schalldurchlässigen, runden Käfigen, die in einem schallgedämpften Versuchsraum standen und dabei dem natürlichen Magnetfeld ausgesetzt waren. Jeder Versuchsdurchgang bestand aus fünf Phasen von jeweils 40 Minuten Länge. Kontrollphasen (c) und Reizphasen (S) wechselten sich nach dem Schema c-S-c-S-c ab. Während der ersten Reizphase ertönte entweder der Zugruf oder der künstliche Laut, in der zweiten Reizphase das jeweils andere Geräusch. In den Kontrollphasen sollten die Vögel Gelegenheit haben, sich unbeeinflusst zu orientieren.

In den Experimenten wurden insgesamt acht verschiedene Rotkehlchen (mehrmals) getestet. Es stellte sich jedoch leider heraus, dass die Vögel nicht gut orientiert waren. Deshalb kann hier keine aussagekräftige Antwort auf die Frage nach der Beeinflussung der Orientierung gegeben werden.

Schlüsselwörter:

Orientierung, Zugrufe, Zugvögel, Rotkehlchen, *Erithacus rubecula*, Beeinflussung

Einführung

Rotkehlchen *(Erithacus rubecula)* sind Zugvögel, die nachts und einzeln ziehen. Dabei geben sie besondere Zugrufe von sich. Obwohl es viele Erklärungsversuche dafür gibt, ist nicht bekannt warum sie diese Laute ausstoßen. Im Jahr 2004 wurde von H Mouritsen, B Andersen, O Larsen und W Kropp ein Pilotversuch durchgeführt, bei dem sie während der Zugunruhe einem Rotkehlchen überfliegende Zugrufe vorspielten. Der Vogel schien sich zunächst in seiner Orientierung von dem Laut ablenken zu lassen, orientierte sich dann aber nach etwa 20 Minuten wieder in seine ursprüngliche Richtung. Das Ergebnis dieses Pilotversuches war so vielversprechend, dass mit einem darauf aufbauenden, verbesserten Versuch die Frage bearbeitet werden sollte, ob Zugrufe von Rotkehlchen Einfluss auf die Orientierung von Artgenossen haben. Wenn diese Zugrufe keinen Einfluss haben, wäre damit die Erklärung hinfällig, dass sie zur Orientierung von Artgenossen beitragen.
Die Versuche wurden im Frühjahr 2008 an der Universität Oldenburg in den Gebäuden der AG Animal Navigation unter der Leitung von H Mouritsen und O Larsen durchgeführt. Als Elektroingenieur kümmerte sich B Andersen um die elektronischen Komponenten des Versuchsaufbaues, O Larsen entwarf unter anderem die Anordnung der Lautsprecher, richtete die Schalldämmung im Versuchsraum ein und prüfte die Akustik.
Im weiteren Verlauf der Einleitung gehe ich näher auf die Erforschung des Vogelzuges ein, dann folgt ein Abschnitt über die Orientierung und Navigation der Vögel während des Zuges. Daran schließt ein Abschnitt über Zugrufe an und schließlich gebe ich eine kurze, allgemeine Charakterisierung von Rotkehlchen.

Erforschung des Vogelzugs

Der Zug von Vögeln ist ein Phänomen, dass seit alters her beobachtet und beschrieben wird. Wie die Wanderungen von anderen Tieren, dient auch der Vogelzug dazu, in Gebiete zu gelangen, die für die Vögel zeitweise attraktiver sind, z. B. bessere Brutgebiete, weniger Feinde, größeres Nahrungsangebot, angenehmere Temperaturen oder weniger inter- oder intraspezifische Konkurrenz.

Bei der Erforschung des Vogelzuges geht es zumeist darum, welche Faktoren bewirken, dass sich Vögel auf den Zug vorbereiten, wann sie losfliegen, wie sie die Zugrichtung festlegen, wie sie den Zugablauf steuern, und nicht zuletzt wie sich die Vögel dabei orientieren.

Ein sehr wichtiger Bestandteil der Forschung ist die Datenaufnahme im Feld, d. h. Daten darüber zu gewinnen, welche Vögel (Art, bisweilen auch Individuen) sich wann wo aufhalten.
In früheren Zeiten war die Sichtbeobachtung die einzige Möglichkeit etwas über ziehende Vögel herauszufinden. Aber vor allem an Engstellen, wo viele Vögel (Schwärme) zusammenkommen, wie Gibraltar, der Bosporus, oder Gebiete wie Israel und die Halbinsel Sinaï, wird auch heute noch auf Sicht beobachtet. [Berthold (2000)]
Daneben werden Nachtzieher auch akustisch beobachtet, indem auf wahrscheinlichen Zugstrecken Mikrofone aufgestellt werden, die die Zugrufe aufnehmen. So können aber nur Arten registriert werden, die Zugrufe ausstoßen. [Evans (2006)]
Die Erfassung mit Radar ist eine sehr umfassende Methode. Sie kann bei Tag- und Nachtzug eingesetzt werden und liefert Angaben über Zugdichte, Flughöhe, Richtung und Geschwindigkeit der Vögel. Ferner kann untersucht werden, wie die Vögel auf Witterungseinflüsse und die Topographie reagieren. Es ist auch möglich, Flügelschlagmuster einzelner Vögel zu erfassen. Einige nachtziehende Arten können so bestimmt werden. [Berthold (2000)]
Eine weitere Möglichkeit ist, einzelne Tiere mit Sendern auszustatten und sie über Satellit zu verfolgen. Da die Sender immer kleiner werden, können auch immer kleinere Arten auf diese Weise untersucht werden. Da diese Methode sehr aufwändig und teuer ist, können nur wenige Vögel untersucht werden, dafür erhält man von diesen aber sehr genaue Daten. [Berthold (2000)]
Die meisten Daten wurden durch massenhafte Beringung von Vögeln aufgenommen. Auf diese Weise wurden Wanderwege, Winterquartiere, Zugzeiten und Zugformen erforscht. Auf dem Ring kann vermerkt werden wer, wann und wo den Ring angebracht hat. Werden mehrere bunte Ringe gemäß eines Farbcodes angebracht, können einzelne Vögel aus der Entfernung mit einem Fernglas identifiziert werden. Nachteile der Beringung sind, dass die Vögel erst gefangen werden müssen (dann ist die

genaue Herkunft der Vögel nicht bekannt), oder sie als Nestlinge beringt werden müssen (dann ist aber die Sterberate sehr hoch). Grundsätzlich werden nur sehr wenige Ringe wiedergefunden. Allerdings können Meldungen über Ringfunde auch von jedermann kommen und das noch lange Zeit nach dem Ableben des Vogels. Ist nun auch der Fundort und die Fundzeit eines Ringes bekannt, ergeben sich daraus die zurückgelegte Mindeststrecke und die maximal dafür benötigte Zeit. [Berthold (2000)]
Das Fangen von Vögeln mit sogenannten Japannetzen ist eine sehr effektive Methode der Datenerhebung, weil man von jedem gefangenen Vogel, unabhängig von der Beringung, Information erhält. Japannetze sind aus sehr dünnen Kunstfaserfäden gefertigt, sodass die Vögel sie nicht sehen und sich darin verfangen. Es werden damit Vögel bis zur Größe von Tauben gefangen. Die Netze werden an guten Rastplätzen aufgestellt, da dort viele Vögel zusammenkommen. Erstfänge geben z. B. Auskunft über Zugzeiten, Durchzugmuster und Habitatpräferenzen zur Zugzeit. Von Wiederfängen erfährt man u. a. Verweildauer, Ausmaß der Fettdeposition und Veränderung des Körpergewichtes, Abklingen der Mauser und Durchzugzeiten in verschiedenen Jahren. [Berthold (2000)]

In Gefangenschaft lebende Vögel zeigen Zugunruhe druch Hüpfen oder Flattern in eine mehr oder weniger bestimmte Richtung oder durch „Schwirren“ (Flügelschlag mit hoher Frequenz und geringer Amplitude). Diese Verhaltensweisen kann man erfassen, indem die Sitzstangen im Käfig mit Drucksensoren ausgestattet werden, die ein Signal geben, wenn die Stange durch einen darauf sitzenden Vogel belastet wird, oder indem eine Kamera und Leuchtdioden installiert werden, die mit Infrarotlicht arbeiten, welches für Vögel unsichtbar ist. [Berthold (2000)]
Die Orientierungsleistung kann auf verschiedene Arten untersucht werden. Durch Beringung und Wiederfänge/-funde kann die Ortstreue oder Zielgenauigkeit im Brutgebiet, Winterquartier und Rastplätzen festgestellt werden (z. B. [Mouritsen (1998a)]). Eine weitere Möglichkeit stellen Versetzungsexperimente dar. Hierbei werden standorttreue Vögel (oftmals Tauben) irgendwohin gebracht und dann beobachtet, ob und wie sie zurückfliegen [Mouritsen und Larsen (1998)]. Es können auch Zugvögel während des Zuges gefangen und versetzt werden. Vögel, die in Gefangenschaft leben, werden in sogenannten Emlen-Trichtern beobachtet. Das sind kreisrunde ko-

nische Käfige (mit dem kleineren Radius unten), die eine kleine Sitzfläche haben, oben mit einem Deckel oder einem Netz geschlossen sind, und deren schräge Wände (etwa 45°) mit Korrekturpapier oder Änlichem ausgekleidet sind. Flattern die Vögel nun los, finden sie an den schrägen Wänden keinen Halt und rutschen wieder auf den Boden. Dabei hinterlassen sie Kratzer auf dem Papier. Diese Kratzer können nach Häufigkeit und Richtung ausgewertet werden. [Mouritsen (1998b)] und [Mouritsen und Larsen (1998)]
Weitere Erkenntnis gewinnt man aus der Erforschung der Ernährung der Vögel vor, aber auch während des Zuges. Die Vögel fressen sich Fettreserven an, um während des Zuges davon zu zehren. Dabei unterscheiden und bevorzugen sie bestimmte Qualitäten der Nahrung, z. B. Energie- und Närstoffgehalt sowie Absorbtionsgeschwindigkeit. [Bairlein (1990)]

Orientierung und Navigation während des Zuges

Die offensichstliche Art sich zu orientieren scheint die Orientierung an Landmarken zu sein. In der Tat ist diese Art der Orientierung sehr gebräuchlich. Auch Nachtzieher nutzen sie, z. B. Leuchttürme oder Städte. Aber Vögel haben weitere und wichtigere Möglichkeiten, sich zu orientieren. [Berthold (2000)]
Man konnte zeigen, dass sich manche zugunruhige Vögel bei Sicht auf die Sonne in eine bestimmte Richtung orientierten. Bei bedecktem Himmel konnten sie sich dagegen nicht mehr orientieren. Allerdings haben Cochran el al. [Cochran et al. (2004)] gezeigt, dass es Nachtziehern sehr wohl möglich ist, auch an bewölkten Tagen gut orientiert zu ziehen. Diese Vögel kalibrieren ihren inneren Magnetkompass täglich neu. Die Kalibrierung findet in der Abenddämmerung statt und kann für mehrere Tage mit bedecktem Himmel für eine gute Orientierung ausreichen. Weitere Versuche haben bestätigt, dass sich Vögel am Stand der Sonne orientieren können. Sie berücksichtigen den Sonnengang im Laufe des Tages gemäß einer inneren Uhr. Die entscheidende Größe ist dabei der Azimutwinkel der Sonne. Die Nutzung dieses Kompasses muss aber erst erlernt werden, auch spielen hierbei andere Orientierungsmechanismen eine Rolle. [Berthold (2000)]

Dass sich Vögel an den Sternen orientieren können, zeigte man dadurch, dass Vögel während der Zugzeit in einem Planetatium gehalten wurden, bei dem der Himmel um 180° gedreht war. Die Vögel orientierten sich entgegengesetzt zu ihrer ursprüglichen Richtung. Dabei zeigte es sich, dass sie sich an Sternbildern orientieren, die sich um den Polarstern (Fixpunkt) drehen. Das Rotationszentrum und das Aussehen der Sternbilder sind aber letztlich nicht von Bedeutung. Sie nutzen dabei keine innere Uhr. Jungvögel müssen erst lernen, wo das Rotationszentrum ist. Daher müssen sie erst die Rotation der Sterne erfahren, um das Zentrum zu kennen. Für die Orientierung von Altvögel ist die Rotation nicht mehr nötig. [Emlen (1975)]
Das Erdmagnetfeld ist eine wichtige Größe in der Orientierung von Vögeln. Die Erde ist wie ein großer Magnet, dessen magnetischer Südpol in der Nähe des geographischen Nordpoles liegt. Die Magnetfeldlinien gehen vom magnetischen Nordpol zum magnetischen Südpol. Den Winkel, den sie zur Erdoberfläche einnehmen, nennt man Inklinationswinkel. An den magnetischen Polen beträgt der Inklinationswinkel 90°, am idealen magnetischen Äquator 0°. Gleiche Inklinationswinkel liegen jedoch nicht auf einem Kreis, der sich wie ein Breitengrad um die Erde zieht, sondern bilden eine unregelmäßige Kurve, die sich im Laufe von Jahren auch langsam verändert (Abbildung 1). Die Inklinationswinkel können daher nicht als linearer Maßstab für den Abstand zum Äquator oder Pol genutzt werden, wie etwa vergleichsweise der Winkel des Polarsterns über dem Horiont als direktes Maß für die Entfernung zum Äquator genutzt werden kann.

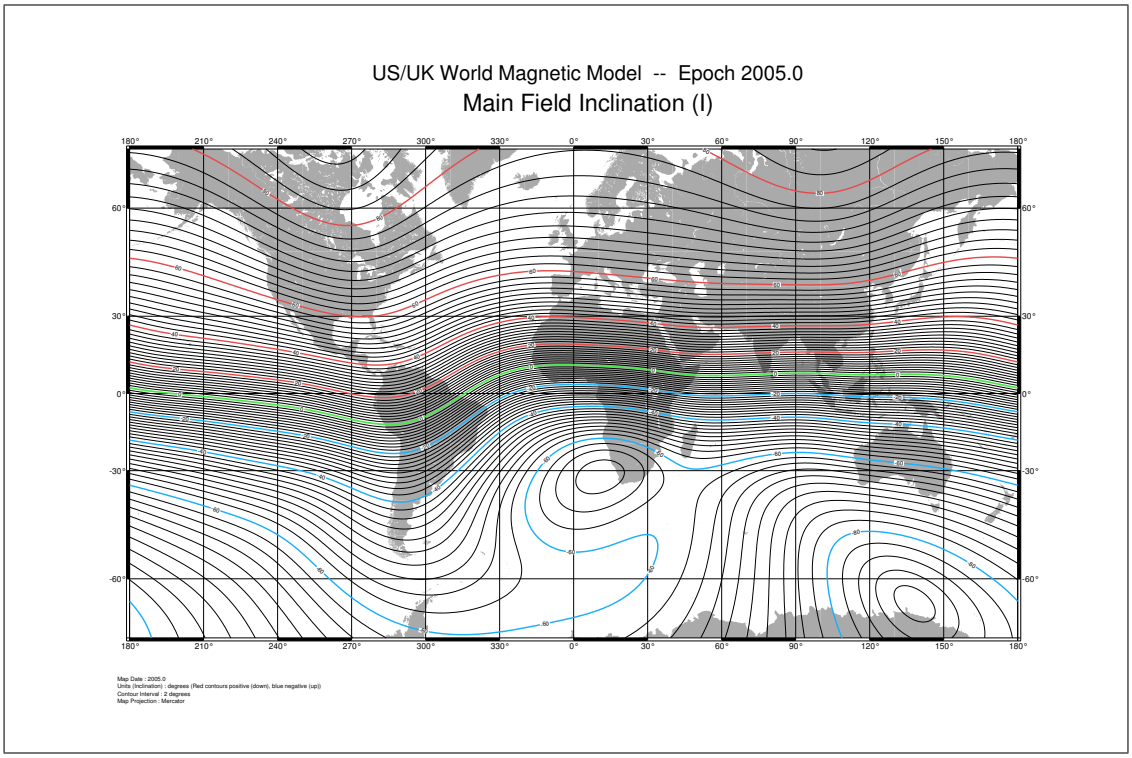

Abb. 1: Weltkarte der Inklinationswinkel des Jahres 2005. Die Linien haben einen Abstand von zwei Grad zueinander.

Es gab schon lange Hinweise auf Orientierung nach dem Magnetfeld, aber erst Wiltschko [Wiltschko (1968)] konnte nachweisen, dass tatsächlich ein innerer Magnetkompass genutzt wird. Dabei orientieren sich nach Norden ziehende Vögel am kleineren Winkel zwischen den magnetischen Feldlinien und dem Gravitationsvektor. [Wiltschko und Wiltschko (1972)]. Sie können daher nur die Richtung zum Pol oder zum Äquator erkennen. An den Polen ist dieser Winkel gleich null und somit praktisch nicht vorhanden, am Äquator ist dieser Winkel gleich 90° und daher nicht mehr unterscheidbar von dem der entgegengesetzten Richtung. Beim Überflug über den Äquator müssen die Vögel daher kurzfristig andere Orientierungsmöglichkeiten nutzen [Cochran et al. (2004)] und werten anschließend die dann wahrgenommenen Feldlinien auf der anderen Erdhalbkugel entsprechend umgekehrt. Die Vorteile des Magnetkompasses liegen darin, dass keine jahres- oder tageszeitlichen Bewegungen der Referenzgröße erlernt oder beachtet werden müssen, und dass er immer zur Verfügung steht [Berthold (2000)]. Allerdings gibt es langfristige Veränderungen des Erdmagnetfeldes, die für die Lebenszeit des einzelnen Vogels eher irrelevant sind, aber über mehrere Generationen hinweg, im Sinne der Evolution doch von Bedeu-

tung sind. So z. B. die Wanderung der Magnetpole oder gar Polsprünge.

Über die Art und Weise der Navigation wird viel diskutiert. Einige Möglichkeiten werden hier nun vorgestellt. Die Magnetfeldnavigation ist eine Hypothese und beruht auf der sogenannten Zwei-Koordinaten-Orientierung. Sie setzt voraus, dass sich (mindestens) zwei physikalische Größen über die Erdoberfläche in verschiedenen Richtungen gradiell ändern. Damit ist jeder Punkt auf der Erdoberfläche bestimmt. Die physikalischen Größen sollten die drei Komponenten des Erdmagnetfeldes sein: Inklination, Polarität und Intensität. [Berthold (2000)]
Eine weitere Hypothese ist die Navigation nach Gerüchen. Hier wird angenommen, dass die Vögel die Duftmischung ihrer Heimat kennen bzw. sie von anderen Mischungen anderer Gegenden unterscheiden können. Es gibt Hinweise darauf, dass Düfte genutzt werden (können), aber nicht die einzigen Navigationsmittel sind. Wie Vögel über größere Entfernungen anhand von Duftkarten navigieren könnten ist aber unklar. [Berthold (2000)]
Die Vektornavigation gründet auf der angeborenen Wegzugrichtung und Zugdauer und kommt vor allem bei Erstziehern vor. Das heißt, die Vögel wissen instinktiv in welche Richtung und wie lange sie ziehen müssen. Damit sollten sie automatisch in ihr Zielgebiet kommen (z. B. [Mouritsen (1998a)] und [Mouritsen (2001)]). Vögel, die nur in Käfigen gehalten wurden, zeigten zur Zugzeit die gleichen Richtungspräferenzen wie ihre freilebenden Artgenossen. Bei Kreuzungen unter Mönchsgrasmücken von Südwestziehern mit Südostziehern bevorzugten die Hybriden eine mittlere Richtung, also gegen Süden [Berthold et al. (1990)]. Versetzungsexperimente mit Staren haben gezeigt, dass unerfahrene Jungvögel (Erstzieher) ihrer angeborenen Richtung folgen, obwohl diese sie nun gar nicht mehr in ihr Zielgebiet führte. Die erwachsenen Vögel dagegen korrigierten ihren Kurs [Perdeck (1958)].
Es gibt verschiedene Mechanismen, die es den Vögel ermöglichen, trotz Hindernissen ihr Zielgebiet zu erreichen, bevor ihr inneres Zeitprogramm abgelaufen ist. Schlechtes Wetter, Gegenwind und unzureichende Fettdepots sind beispielsweise solche Hindernisse. Viele Vögel ziehen in kleinen Tagesetappen, die bei Bedarf verlängert werden können, z. B. nach einem erzwungenen Aufenthalt durch eine Schlechtwetterperiode. So kann die durchschnittliche Vorrückgeschwindigkeit eingehalten werden. Außer-

dem scheinen die meisten Zugvögel, die sich der Vektornavigation bedienen, relativ große Zielgebiete zu haben, sodass bei Verspätungen zumindest noch die Randgebiete erreicht werden. [Berthold (2000)]
Das Karte-Kompass-Konzept ist ein hypothetisches Navigationsmodell. Danach sollten sich Vögel mit Hilfe eines Kompasses orientieren (Richtung bestimmen) und dann gemäß einer inneren Karte zu ihrem Ziel finden. Diese Karte ist eine topologische Karte, die aus Landmarken, Duftfeldern und sogar Schallquellen bestehen könnte, oder eine Gradientenkarte, bei der sich mindestens zwei geophysikalische Größen über die Erdoberfläche graduell ändern. Der Gebrauch dieser Karten müsste erst erlernt werden. [Berthold (2000)]

Zugrufe

Zugrufe sind ein- bis mehrsilbige Laute, die eine Frequenz von 1–9 kHz haben und 50–300 ms lang sind. Viele Arten geben sie von sich, wenn sie lange, ununterbrochene Strecken fliegen, insbesondere, wenn sie in ihre Winter- oder Sommerquartiere ziehen. Zugrufe unterscheiden sich deutlich von anderen Rufen, wie z. B. von denen der Werbung um Partner oder von Gesängen zur Revierabgrenzung und -verteidugung. Sie unterscheiden sich auch von anderen Kurzrufen wie z. B. Alarmrufen. Es gibt Arten, die gar keine Zugrufe ausstoßen. Obwohl die Zugrufe meist nachts zu hören sind, gibt es auch Arten die tagsüber rufen. Andere Arten wiederum rufen zwar, aber nicht bei jedem Flug. (Zusammenfassend bei [Farnsworth (2005)]).
Es ist bekannt, dass die Anzahl der Rufe von den atmosphärischen Bedingungen abhängig ist. Die Anzahl der Rufe steigt mit zunehmender Bewölkung und niedrigerer Wolkenuntergrenze, besonders unter künstlicher Beleuchtung. Es werden auch dann mehr Rufe ausgestoßen, wenn sich die Vögel Luftmassen unterschiedlicher Dichte nähern, wo sie dann, z. B. wegen Höhenwind oder schlechter Sicht, tiefer fliegen müssen oder sich ansammeln (anstauen). Auch scheinen die Rufe zuzunehmen, wenn es im Herbst kälter beziehungsweise im Frühling wärmer wird. (Zusammenfassend bei [Farnsworth (2005)]).

Zugrufe wurden in unterschiedlichen Höhen, meist bis ca. 300 m, einige bis zu 500 m über dem Boden, registriert. Es ist nicht bekannt, ob Zugrufe nur in diesen niedrigeren Luftschichten vorkommen. An Küsten und vor Bergen und Gebirgen treffen viele Vögel auf ihrem Zug aufeinander. Diese Staus scheinen ebenfalls einen Anstieg der Rufhäufigkeit zu bewirken. (Zusammenfassend bei [Farnsworth (2005)]).
Die jahreszeitlichen Unterschiede in der Häufigkeit der Zugrufe sind annähernd konstant. Bei den zeitlichen Mustern der nächtlichen Rufe gibt es größere Unterschiede. Es wurde festgestellt, dass vor allem in den Stunden vor der Morgendämmerung und teilweise auch um Mitternacht die Anzahl der Rufe zunimmt. (Zusammenfassend bei [Farnsworth (2005)]).
Warum Vögel Zugrufe überhaupt ausstoßen ist nicht bekannt. Man vermutete, dass sie eine Reaktion auf Hunger, Angst, Einsamkeit oder den beginnenden Morgen sind. Es wurde auch angeführt, dass sie dazu dienen könnten, bei schlechter Sicht oder nachts die Geschlechter zu unterscheiden oder den Durchzug durch ein besetztes Revier anzuzeigen. Die aktuell diskutierten Gründe sind der Zusammenhalt von Gruppen und das Hervorrufen von Zugunruhe bei Artgenossen, eventuell sogar insbesondere bei Erstziehern. Ob die Rufe von Nachtziehern zu den gleichen Zwecken eingesetzt werden, ist nicht bekannt. Auch sie könnten durch spezielle Zugrufe und nicht durch Kontakt- oder Alarmrufe zusammengehalten werden. Die Rufe könnten den Vögeln auch dazu dienen, sich bei der Orientierung gegenseitig zu helfen. Wenn ein Vogel eine falsche Richtung einschlägt, kann er durch die anderen zurück auf einen annähernd richtigen Kurs gebracht werden. Diese Vermutung wird durch eine Arbeit von Mouritsen und Mouritsen [Mouritsen und Mouritsen (2000)] unnterstützt. Ein anderer Grund für die Zugrufe könnte sein, dass die Vögel durch Echoortung eine sich ändernde Windrichtung feststellen könnten. Allgemein können die Zugrufe dazu beitragen, selbst gehört zu werden, andere zu hören und Zusammenstöße zu vermeiden. (Zusammenfassend bei [Farnsworth (2005)]).

Die Versuchstiere: Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*)

Rotkehlchen, aus der Familie der Fliegenschläpper (Muscicapidae), Ordnung Sperlingsvögel (Passeriformes) sind ca. 14 cm lang und haben eine Flügelspannweite

von etwa 21 cm. Das Gefieder auf dem Rücken und die Flügel sind olivbraun, der Bauch ist hellgrau, Stirn, Hals und Brust sind auffallend rot/orange gefärbt und grau umkränzt. Sie haben eine rundliche Gestalt und dünne Beine. Es gibt keinen Geschlechtsdimorphismus – Männchen und Weibchen sehen gleich aus [Wikipedia].
Das Verbreitungsgebiet der Rotkehlchen ist Nordafrika, Europa (bis Sibirien), Kleinasien und die Mittelmeerinseln [Wikipedia]. Sie leben vornehmlich in feuchten und schattigen Gebieten, also in Wäldern, Gebüsch und Hecken, aber auch in Gärten, Parks und auf Friedhöfen [Wikipedia] und [Stichmann und Kretzschmar (1996)].
Rotkehlchen sind tag- und dämmerungsaktiv und ernähren sich von Samen, Früchten, Insekten, Würmern und anderen Weichtieren, die sie vornehmlich auf dem Boden suchen. Sie halten sich gerne auch im Gefolge von großen Tieren auf, die die Insekten aufscheuchen. In Städten versuchen sie auch an offen gelagerte Lebensmittel zu gelangen. Sowohl Männchen als auch Weibchen zeigen ein ausgeprägtes Revierverhalten [Wikipedia].
In Süd- und Westeuropa sind Rotkehlchen teilweise Standvögel. Nordosteuropäische Vögel ziehen im Herbst über Dänemark und Norddeutschland in den Mittelmeerraum, von wo sie im Frühjahr wieder zurückkehren [Wikipedia]. Sie ziehen nachts und nicht in Schwärmen, sondern einzeln. Dabei geben sie Zugrufe von sich.

Material und Methoden

Material

Der im Folgenden erklärte Versuchsaufbau war auf zwei Gebäude verteilt. Im Hauptgebäude der AG waren die Geräte für Steuerung und Datenerhebung untergebracht. In einem Gartenhäuschen in ca. 25 m Entfernung waren Vögel, Kamera und Lautsprecher.

Versuchstiere

Als Versuchstiere verwendete ich Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). Alle Rotkehlchen für unsere AG wurden auf dem Uni-Gelände und in den Nachbargärten gefangen und bekammen eine Kokzidienprophylaxe (Darmparasiten). Sie wurden in normgerechten Käfigen von 40 cm × 40 cm × 80 cm Größe gehalten. Die Käfige standen in einem fensterlosen Innenraum, der beheizt und belüftet war. In diesem Raum waren Tageslichtlampen installiert, die automatisch gemäß den aktuellen Sonnenauf- und untergangszeiten an- und ausgeschaltet wurden. Mit einer gedimmten Stehlampe wurde vorher bzw. nachher eine halbe Stunde Dämmerungslicht angeschaltet. Die Vögel hatten ständig Wasser mit Vitaminzusatz zur Verfügung. Sie bekammen Fettfutter (Fa. Claus). Zweimal die Woche bekammen sie zusätzlich Mehlwürmer und ab und an frische Beeren aus dem Garten. Jeder Vogel wurde wöchentlich gewogen und bekam mindestens einmal in der Woche die Gelegenheit zu baden.

Geräte

In diesem Abschnitt zähle ich alle technischen Komponenten des Versuchsaufbaus auf und beschreibe kurz ihre Aufgabe. Eine Übersicht über den Aufbau gibt die Zeichnung in Abbildung 4.

Geräte im Hauptgebäude

Im Hauptgebäude stand ein Rechner, auf dem VirtualDub (Programm zur Aufnahme von .avi-Dateien) installiert war, dazu gab es eine externe Festplatte zur

Speicherung der .avi-Dateien. Mit einem weiteren Rechner, auf dem B Andersens Programm „ProjectOleLyd.exe“ installiert war und mit einen Videorekorder (Kassetten mit 240 min) wurden die Bildsignale der Kamera aufgezeichnet. Über einen dritten Monitor, Lautsprecher und ein Mikrofon konnten die Vorgänge im Versuchsraum mitverfolgt werden. Ein HUB für die Leitung nach draußen lag bereit. Passende Kabel verbanden die Geräte untereinander.

Geräte vor dem Versuchsraum

Vom Haupgebäude zum Gartenhäuschen, dem Vesuchsraum, führten ein BNC-Kabel für die Kamera, ein BNC-Kabel, ein USB-Kabel und Repeater für den Ton und ein Stromkabel zur Stromversorgung der Geräte in der Kiste.

In der Kiste vor dem Versuchsraum waren ein Steuergerät, ein Verstärker und ein Labornetzgerät untergebracht. Die Kiste hatte einen Deckel und war somit vor Spritzwasser und Regen geschützt. Zur besseren Belüftung habe ich in den Boden der Kiste Lüftungslöcher gebohrt. Um leichter an die Geräte in der Kiste heranzukommen, baute ich eine Trägerkonstruktion mit zwei Griffen, sodass das ganze System bequem mit einem Hub aus der Kiste gehoben werden kann.

An das Gartenhäuschen wurde ein Kasten angeschraubt, der die Lautsprecherkabelverschaltung und die BNC-Verbindung zur Kamera aufnahm. Dadurch war das Betreten des Versuchsraumes während des Versuches nicht nötig.

Geräte im Versuchsraum

Die Innenwände des Versuchsraums waren mit Decken mit Kunstfaserfüllung ausgekleidet, um Schallreflexionen zu minimieren. In der Mitte des Versuchsraums stand ein Tisch, bedeckt mit einer weiteren Decke. Der Tisch und das Steifenmuster der Decke war in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet. Auf der Decke positionierte ich zwei Käfige für die Vögel. Die Käfige hatten einen Durchmesser von 40 cm und waren ebenso hoch. Die runde Sitzstange hatte einen Durchmesser von 20 cm und war 8,5 cm hoch (Abbildungen 2 und 3). Ich habe Lote angebracht, damit ich die Käfige für die Aufnahmen ausrichten konnte. Neun Hochfrequenz-Lautsprecher und eine Kamera waren 1,20 m über dem Tisch installiert. Die Kamera war ebenfalls nach Norden ausgerichtet, sodass bei den Aufnahmen Norden auf dem Bild oben war. Um die Linse der Kamera sind in einem Kranz Dioden eingebaut, die Infrarotlicht

aussenden, dessen Reflexion die Kamera auch wieder registrieren kann. Um niedrige Frequenzen zu dämpfen, wurde je ein Kondensator (47 μF, 100 V) in Reihe mit einem Lautsprecher geschaltet. Sie waren in Nord-Süd- (Nr. 1 – 2 – 3 – 4 – 5) bzw. Ost-West-Richtung (Nr. 6 – 7 – 3 – 8 – 9) in Reihe angeordnet. Ich befestigte sie in einer Fassung, die ich noch etwas verbiegen konnte, damit der Schall im richtigen Winkel von schräg oben auf die Käfige treffen konnte. Auf jeder Achse gab es fünf Lautsprecher, der Lautsprecher in der Mitte war Bestandteil beider Achsen. Die Abstände d_1 und d_2 der Lautsprecher zum Zentrumslautsprecher betrugen $d_1 = 120$ cm und $d_2 = d_1 + \frac{d_1}{2} = 180$ cm für die äußeren. Über diesen war eine weiße Plastikplane gespannt, darüber waren mehrere Glühlämpchen angebracht. Die Plastikplane streute das Licht, sodass es in dem Häuschen diffuses Licht von 0,04 Lux (entspricht ungefähr einer mondhellen Nacht) gab. Die Leuchtstärke stellte ich über einen Beleuchtungsregler ein (7,0 V und 0,32 A). Schließlich war noch infrarotreflektierendes Klebeband nötig, um die Vögel zu markieren. Anfangs benutzte ich Material, das N Troje, ein früherer Kollege meines Betreuers, vor einiger Zeit aus der Entwicklungsabteilung der Firma 3M Scotchlite™ bekommen hatte. Er benutze es, um Bewegungsabläufe von Menschen zu untersuchen. Einige Tage vor dem Ende der Versuche, entdeckte ich zufällig in einem Büromaterialbedarfsladen ein Leuchtklebeband von der gleichen Firma. Dieses Band ist dazu gedacht, es auf Taschen und Kleidung zu kleben, um im Straßenverkehr auffälliger zu sein.

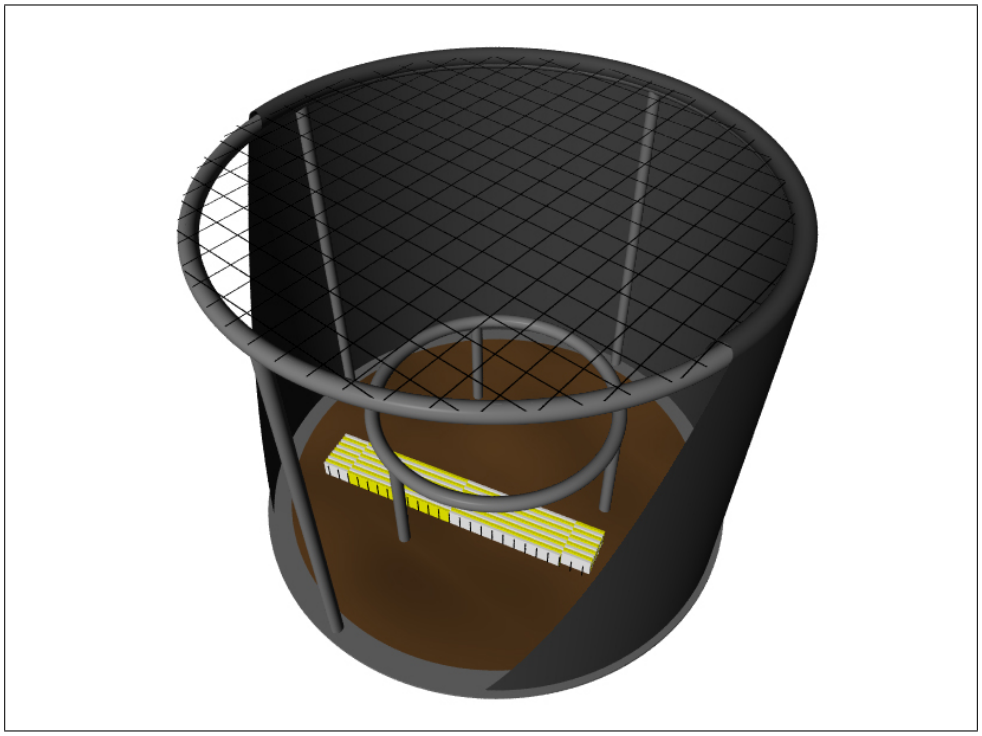

Abb. 2: Schematische Darstellung eines Versuchskäfigs. Die schwarze Stoffverkleidung ist nur teilweise dargestellt. Als Größenvergleich dient ein handelsüblicher Zollstock. (Einheitenmarkierungen: 1 cm)

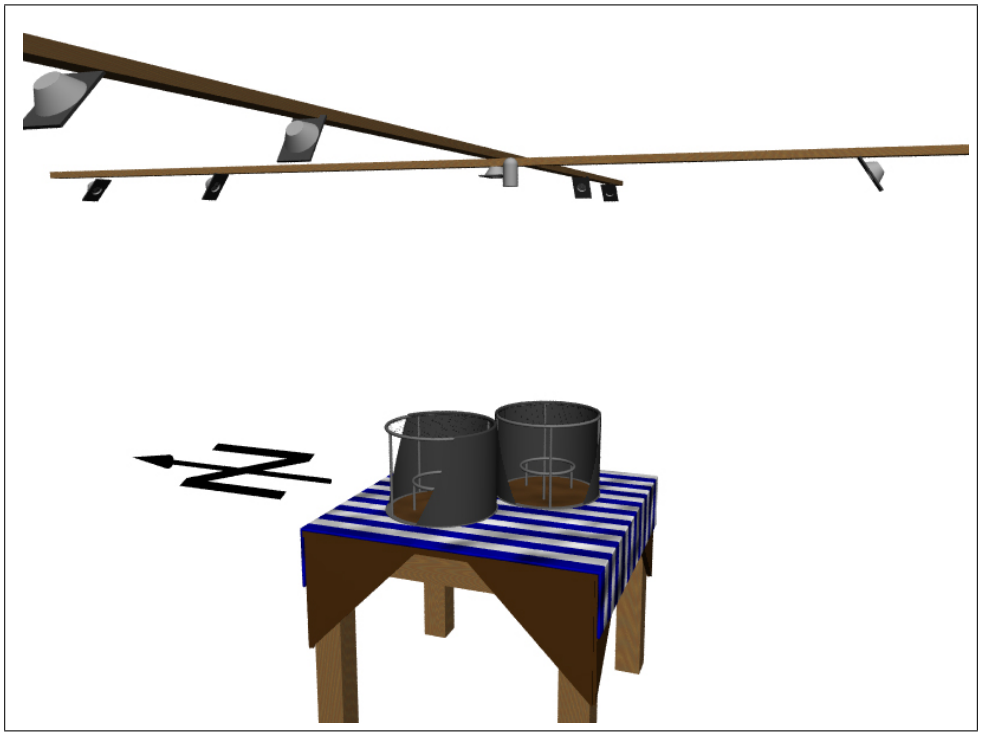

Abb. 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Tisch, Decke und die eine Leiste mit Lautsprechern sind in Nord–Süd-Richtung ausgerichtet. Die andere Lautsprecherleiste ist in Ost–West-Richtung ausgerichtet. Die Lautsprecherleisten befinden sich 1,2 m über dem Tisch, die Entfernung der Lautsprecher zum Zentrumslautsprecher beträgt jeweils 1,2 m bzw. 1,8 m. Die schwarze Stoffverkleidung der Versuchskäfige ist nur teilweise dargestellt.

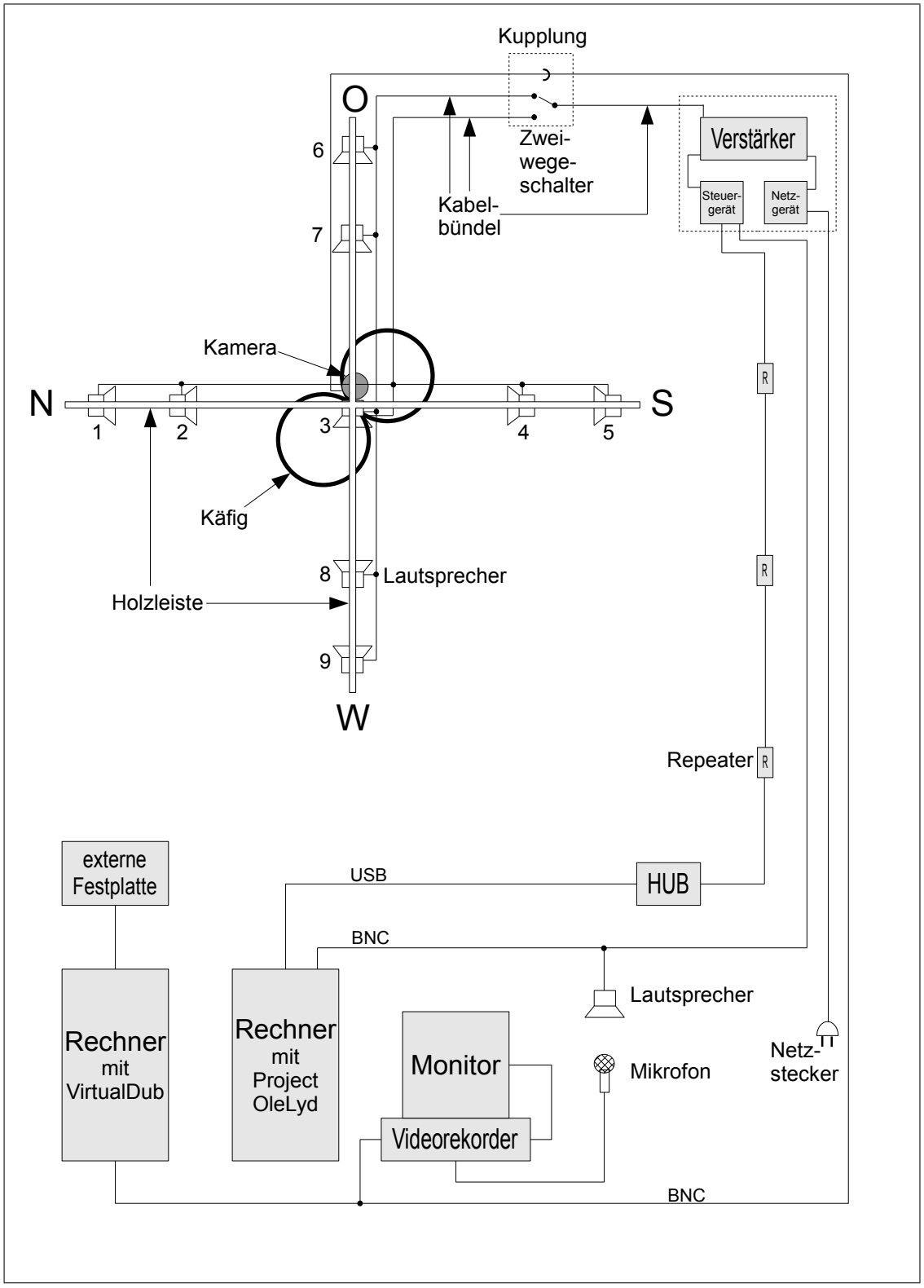

Abb. 4: Schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus.

Tonerzeugung

Um den Überflug zu simulieren, hat B Andersen mit Delphi 5 ein Programm namens ProjectOleLyd.exe geschrieben. Die Benutzeroberfläche des Programms ist in Abbildung 6 dargestellt. Es müssen zunächst einige Einstellungen gemacht werden (in Klammern meine Einstellungen):

- vertikaler Abstand zwischen Tischoberfläche und Zentrumslautsprecher (120 cm)
- Abstand d_1 zwischen den Lautsprechern (120 cm)
- zu simulierende Flughöhe (40 m)
- Länge der simulierten Flugstrecke (300 m)
- Fluggeschwindigkeit (10 m/s)
- zeitlicher Abstand zwischen den Lauten (2 s)
- Minimum (10 s) und Maximum (60 s) der zufälligen Pausenlänge zwischen den Überflügen
- Überflugrichtung
- zwei verschiedene .wav-Dateien

Als .wav-Dateien wurden „ding.wav“ von Microsoft und ein einzelner Zugruf eines Rotkehlchens verwendet. Der Kontrolllaut sollte möglichst unterschiedlich zum Ruf sein, aber die gleiche Länge haben. Die Laute sind in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Der Ruf stammt von einer Kassette mit Vogelrufen von C Chappuis [Chappuis (1989)].

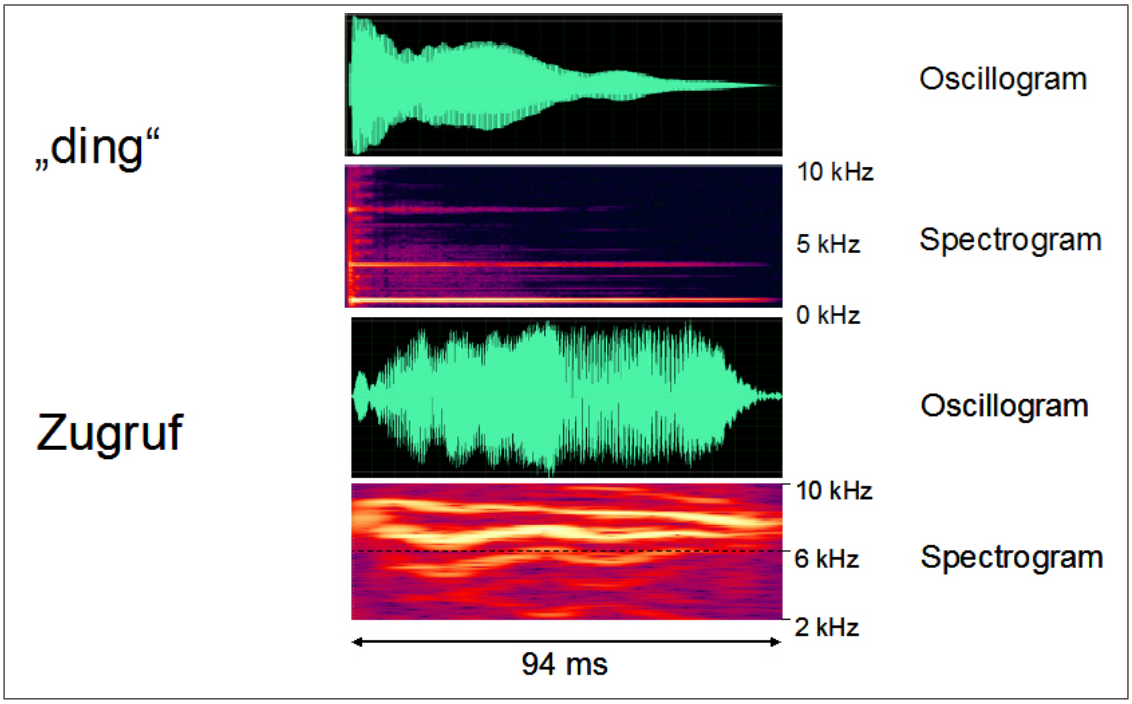

Abb. 5: Oszillogramme (oben) und Spektrogramme (unten) des „ding“-Lautes und des Zugrufes. Verändert nach O Larsen.

Nach dem Bestätigen der Einstellungen erzeugt das Programm für die zwei Laute .wav-Dateien, die in der Lautstärke gedämpft sind. Für jede Lautäußerung während des Überflugs wird eine Datei generiert. Das Ausmaß der Dämpfung ist abhängig von der jeweils zu simulierenden Entfernung zum Versuchskäfig. Es wird davon ausgegangen, dass das überfliegende Objekt die Laute mit einer Lautstärke von sich gibt, die einem Schalldruck von 80 dB in einem Meter Entfernung entspricht. Sie werden dann nacheinander abgespielt und ergeben so die Überflugsimulation. Im Versuchsraum werden dann die fünf Lautsprecher der eingestellten Achse der Reihe nach angesteuert, die äußeren Lautsprecher öfter, weil diese sozusagen für eine längere Überflugstrecke zuständig sind.

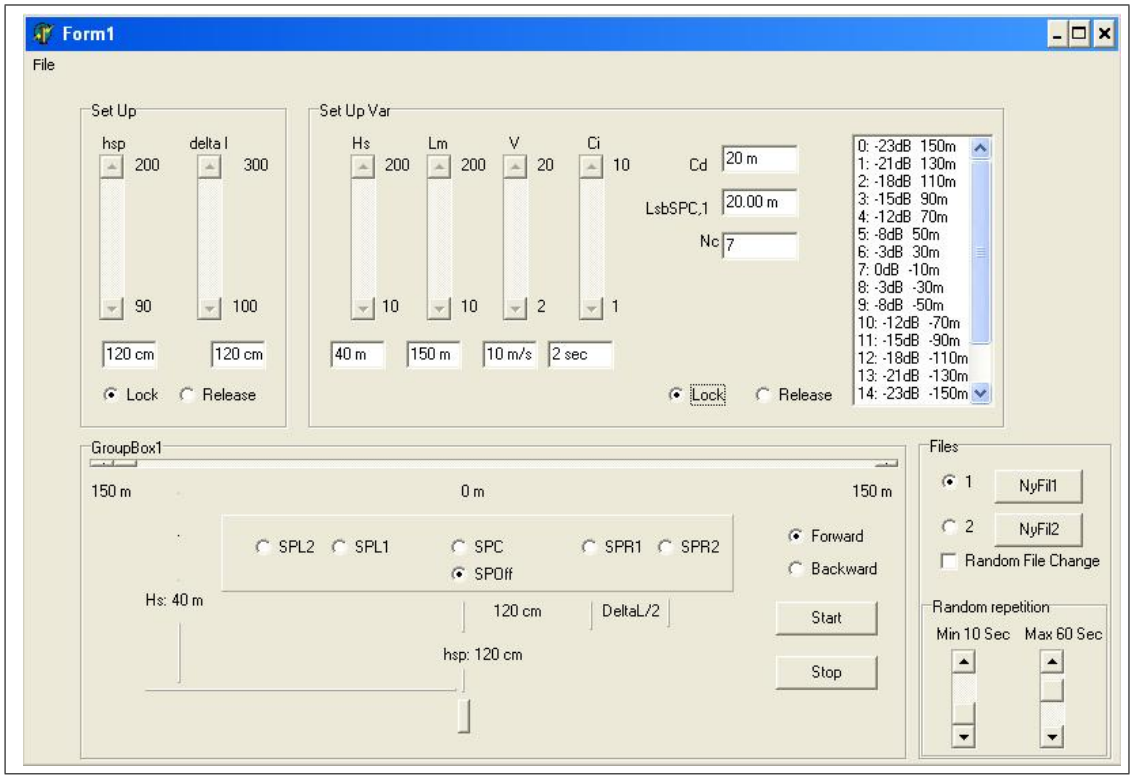

Abb. 6: Die Bedienungsoberfläche von ProjectOleLyd. Das Programm dient der Lauterzeugung und Ansteuerung der Lautsprecher im Versuchsraum. Alle Einstellungen zur Simulation werden hier vorgenommen. Abkürzungen: hsp = hight speakers, delta l = Lautsprecherabstand d_1, Hs = hight simulated, Lm = length from start to center, V = velocity, Ci = cry interval, Cd = distance between cry, LsbSPC,1 = length simulated between SPC and SPC1, Nc = number of cry files, NyFil = (dän.) neue Datei, SPL = speaker left, SPC = speaker center, SPR = speaker right.

Signalwege

Im Folgenden beschreibe ich die Signalwege von Ton und Bild zum Versuchsraum und zurück zum Hauptgebäude. Eine Übersicht darüber gibt die Zeichnung in Abbildung 4 Sämtliche Stecker und Kabelenden wurden mit einer Klebebandmarke versehen, auf der steht, um welchen Anschluss es sich handelt und wohin er führt.

Signalweg zum Versuchsraum

Zum Gartenhäuschen gingen Ton- und Steuersignale. Sie wurden mit B Andersens Programm erzeugt und verließen den Rechner auf zwei Wegen. Über die Ausgabe der Sound-Karte gingen die Tonsignale zu einer Weiche, die einerseits zu den Lautsprechern im Hauptgebäude abzweigte und andererseits über ein BNC-Kabel nach draußen zum Steuergerät führte. Die Lautsprecher innen dienten zum kontrollierenden

Mithören und, über das Mikrofon, zur Aufnahme auf Video. Vom USB-Anschluss des Rechners gingen die Steuersignale über einen HUB ebenfalls nach draußen und über drei Repeater (zur Signalverstärkung über die lange Strecke) ebenfalls bis zum Steuergerät in der Kiste vor dem Gartenhäuschen. Dieses Steuergerät sorgte dafür, dass die verschiedenen Kanäle des Verstärkers zur richtigen Zeit angesteuert wurden. Zwischen dem Verstärker und den Lautsprechern im Versuchsraum war noch ein Schalter eingebaut, mit dem zwischen Nord-Süd- und Ost-West-Achse umgeschaltet werden konnte.

Signalweg zum Hauptgebäude

Zurück zum Hauptgebäude gingen nur Videosignale. Die Kameraaufnahmen gingen über ein BNC-Kabel zu einer Weiche, die einerseits zum Videorekorder abzweigte und andererseits direkt zum Rechner führte, wo die Aufnahme mit VirtualDub auf der externen Festplatte gespeichert wurde. Diese Aufnahmen waren in schwarz/weiß und ohne Ton. Der Videorekorder war mit dem dritten Bildschirm verbunden.

Methoden

Die Versuche führte ich in der Frühjahrszugsaison von April bis Mai durch. Um die Rotkehlchen unter möglichst natürlichen Umweltreizen zu untersuchen, wurden die oben genannten Glühlämpchen und die weiße Plane (Nacht, Mondlicht) im Versuchsraum aufgehängt. An fast allen Tagen (nicht bei Regenwetter oder starker Bewölkung) wurden die Versuchstiere mindestens eine halbe Stunde vor Versuchsbeginn in den Transportkästen ins Freie gestellt. Die Kästen waren so ausgerichtet, dass die Vögel den westlichen Himmel sehen konnten. Cochran et al. [Cochran et al. (2004)] haben gezeigt, dass die Vögel nach Hinweisen aus dem Dämmerlicht – aller Wahrscheinlichkeit nach mit Hilfe des polarisierten Himmelslichtes – ihren Magnetkompass neu kalibrieren.

Wie in Tabelle 1 zu sehen, war der Ablauf der Versuche im Prinzip immer gleich. Es gab fünf Phasen: c-S-c-S-c, mit c für Kontrollphase und S für Reizphase. Zunächst dauerte jede Phase zwischen 30 und 60 Minuten, meistens 40 Minuten. Während

der c-Phasen hörten die Vögel nichts, in der einen Reizphase wurde ihnen der Ruf und in der anderen das „ding“ vorgespielt. Die Reizrichtung wurde so gewählt, dass sie einen möglichst großen Winkel zur Orientierungsrichtung des Vogels hatte. Auf diese Weise ist eine Ablenkung des Vogels am deutlichsten zu erkennen.

Tab. 1: Das Versuchsprogramm mit Art und Länge der Reize. O Osten, W Westen, R Ruf, d „ding“, c Kontrolle. Beispiel: OWR = „von Osten nach Westen: Ruf“.

Datum	Reiz und Dauer in Minuten					
28.03.08	c 44	OWR 55	c 58	OWd 40	OWR 32	
01.04.08	c 40	OWd 40	c 40	WOR 60	c 30	WOd 30
02.04.08	c 40	WOR 40	c 40	WOd 40	c 40	
08.04.08	c 40	WOd 40	c 40	WOR 40	c 40	
09.04.08	c 40	WOR 40	c 40	WOd 40	c 40	
10.04.08	c 40	WOd 40	c 40	WOR 40	c 40	
11.04.08	c 40	WOR 40	c 40	WOd 40	c 40	
12.04.08	c 46	WOd 34	c 40	WOR 40	c 40	

Nachdem die Vorauswertung einen Ablenkungseffekt deutlich zu machen schien, änderte ich die Reizphasen (zweiter Versuchsteil), um die Vögel zur Reizdiskrimination zu zwingen und so herauszufinden, welchen Reiz sie bevorzugen. Ich spielte in beiden Reizphasen beide Laute abwechseld vor, jeden mit fester, aber in jeweils entgegengesetzer Richtung zum anderen Laut. Damit jeder Laut insgesamt die gleiche Einwirkungsdauer hatte, verlängerte ich die Reizphasen auf 80 Minuten.

Markieren der Vögel

Um bei den Aufnahmen einen besseren Kontrast für die Auswertung zu erhalten, mussten die Vögel markiert werden. Ich klebte den Vögeln zu diesem Zweck mit Pin-

zette und Sekundenkleber zwei Streifen (ca. 3×15 mm) des oben genannten Leuchtbandes auf den Kopf. Dabei zeigte sich, dass es besser ist, die Steifen quer zu kleben, weil sie dann auf mehrere Federn geklebt werden und nicht so leicht von den manchmal irritierten Vögeln abgesteift werden können.

Test vor Versuchsbeginn

Bevor die Vögel markiert und in die Versuchskäfige gesetzt wurden, wurde die Funktionstüchtigkeit des Versuchsaufbaus geprüft. Bei eventuell auftretenden Fehlern (und das kam auch zweimal vor), hätten diese sofort behoben werden können. Es wäre sonst unverantwortlich gewesen, die Vögel dem Stress auszusetzen, sie zu Markieren und für den Versuch zu verwenden, wenn man dann schließlich keine verwertbaren Ergebnisse bekommen hätte.

Auswertung

Zur Auswertung der aufgenommenen Videokassetten und .avi-Dateien benutzte ich einen Videorekorder und MatLab-Programme. Das Augenmerk lag immer auf der reflektierenden Markierung auf dem Kopf der Vögel. In Bezug auf die Käfigmitte hält sich der Vogel meistens dort auf, wo er gerne hinziehen will. [Mouritsen et al. (2004a)] und [Mouritsen et al. (2004b)] Die Blickrichtung wurde nicht berücksichtigt, auch wurde nicht nach dem Geschlecht der Vögel unterschieden. Das folgende Bild, Abbildung 7, ist aus einer der .avi-Dateien und zeigt deutlich die reflektierenden Markierungen auf dem Kopf der Vögel. Schemenhaft sind die Käfige, Sitzstangen und die Vögel selbst zu erkennen. Sowohl auf den .avi-Dateien, als auch auf den Videoaufnahmen ist das Schwirren als Ausdruck der Zugunruhe zu erkennen.

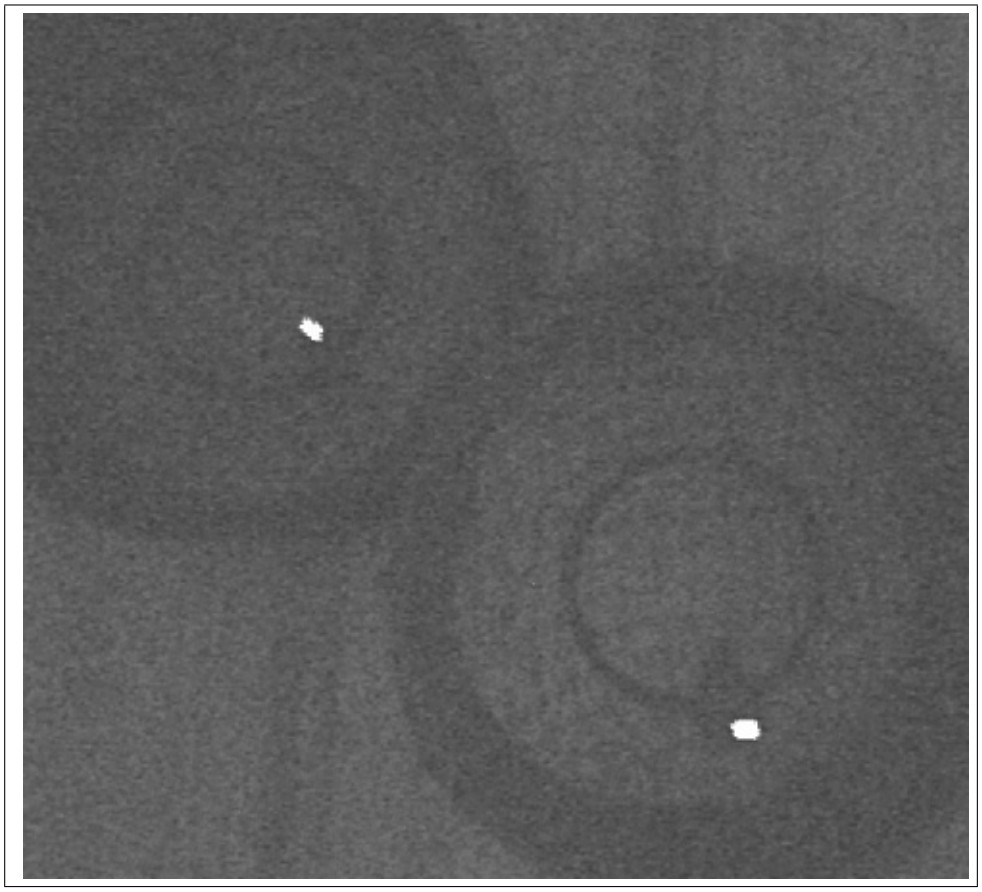

Abb. 7: Einzelbild aus einer der .avi-Dateien. Deutlich zu sehen sind die Markierungen, etwas schemenhaft sind die Käfige, Vögel und die runden Sitzstangen zu erkennen.

Vorauswertung

Die tägliche Vorauswertung sollte dazu dienen, mit der weiteren Versuchsdurchführung auf die bisherigen Ergebnisse zu reagieren. Ich spielte das aufgenommene Video im Schnellvorlauf ab und beurteilte für jede Phase durch Augenschein wohin sich der Vogel orientierte.

henrik4.m

Das Programm henrik4.m wurde von N Troje unter Mitwirkung von H Mouritsen geschrieben. Es lädt eine Folge von frames aus einer .avi-Datei in ein Anzeigefeld. Diesem Anzeigefeld ist ein Koordinatensystem unterlegt. Es werden dann zwei konzentrische Kreise angezeigt, die man von Hand mit dem Vogelkäfig in Deckung bringt. Auf diese Weise wird der Ursprung des Koordinatensystems in die Mitte des Käfigs gesetzt. Nach dem Start des Programms wird jedes Bild einzeln auf folgende Weise ausgewertet: Die Helligkeit der Pixel innerhalb des größeren Kreises

(Käfig) wird festgestellt. Dort, wo sich die hellsten Pixel häufen, erkennt das Programm die Markierung. Mithilfe des unterlegten Koordinatensystems wird dann der entsprechende Winkel, den der Vektor der Markierung gegen den Uhrzeigersinn zur x-Achse einnimmt, neben anderen Daten in eine Spalte einer Matrix geschrieben und diese schließlich als .mat-Datei gespeichert.
Ich habe immer 5-min-Intervalle ausgewertet; in Einzelfällen waren es auch Intervalle von vier oder sechs Minuten. Auf diese Weise ergaben sich für jedes Intervall ca. 1300 bis 1500 Winkel.

Video und Monitor

Bisweilen verloren die Vögel ihre Markierung. Ab diesem Zeitpunkt war es nicht mehr möglich die Winkel mit dem MatLab-Programm festzustellen. Hier musste ich dann mit dem Videorekorder auswerten. Dazu druckte ich ein Geradenbüschel mit 5°-Winkeln auf eine Klarsichtfolie und beschriftete sie mit den entsprechenden Winkelangaben (Intervall: [ganze Vielfache von 5°] ±2,5°). Diese Folie klebte ich auf den Monitor, sodass der Kreuzungspunkt der Geraden auf der Mitte des Käfigs lag. Auf einem anderen Rechner ließ ich ein Programm laufen, das alle fünf Sekunden piepste. Auf dieses Signal hin vermerkte ich das 5°-Intervall, wo der Kopf des Vogels gerade war. So bekam ich ca. 60 Winkel für ein Intervall.

Berechnung des mittleren Winkels

Das arithmetische Mittel ist zur Mittlung von Winkeln im Allgemeinen nicht geeignet. Der einfache Durchschnitt liefert nur dann den richtigen Mittelwert, wenn die paarweise Differenz zwischen den Winkeln höchstens ±180° beträgt. Liegen die Winkel nämlich im Norden, z. B. zwischen 340° und 20°, wäre das arithmetische Mittel ca. 180°, der tatsächliche Mittelwinkel aber etwa 0°.
Einen allgemeingültigen Mittelwert $\bar{w}$ für die Winkel w_i mit $i = 1 \ldots n$, erhält man durch Berechnung der Mittelwerte $\bar{c} = \frac{1}{n}\sum cos(w_i)$ und $\bar{s} = \frac{1}{n}\sum sin(w_i)$ für die einzelnen Winkel w_i. Die Richtung des Vektors $(\bar{c}\ ,\ \bar{s})$ ist dann der mittlere Winkel. Dieser beträgt $cos^{-1}(\bar{c})$ oder $sin^{-1}(\bar{s})$. Die Länge des Richtungsvektors wird mit $r = \sqrt{\bar{c}^2 + \bar{s}^2}$ berechnet.

evaluation.m

Mit dem Programm evaluation.m können die gewonnenen Winkeldaten anschaulich dargestellt werden. Dieses Programm ist nach einer Vorlage von H Mouritsen, von mir neu programmiert und darüber hinaus erweitert worden. Es zeigt einen Einheitskreis, an dessen Rand für jeden Winkel ein Punkt in dessen zugehöriges 5°-Intervall gezeichnet wird, ebenso wird der Vektor des mittleren Winkels (Richtung und Länge) berechnet und dargestellt. In dieser Darstellung fallen Häufungen in einer Richtung auf. Da es auch vorkommt, dass ein Vogel für einige Minuten einfach nur dasitzt und Pause macht oder schläft, mussten diese Zeiten aus der Wertung genommen werden. Sie würden den mittleren Winkel verfälschen und eine falsche Graphik liefern, da ja nur die Aktivphasen von Interesse sind. Daher wurde in das Programm ein Filter eingebaut, der unerwünschte Winkel aussortiert. Die Winkel liegen in einer chronologischen Folge vor. Ist diese Folge nun länger als n Stellen konstant (ich habe $n = 3$ gewählt), werden die restlichen konstanten Stellen gestrichen; die Folge wird an der nächsten nicht mehr konstanten Stelle (streng monoton steigend oder fallend) fortgesetzt.

figureseries.m

Dieses Programm liest die von henrik4 generierten .mat-Dateien ein und zeichnet eine Reihe von Plots, jeweils mit den Winkeln eines 5-min-Intervalls. Die Winkel sind gegen ihre fortlaufende Nummer aufgetragen. Die y-Achse reicht von 0° bis 360° und stellt die aufgeschnittene Mantelfläche eines Zylinders dar. (Oder etwas salopp ausgedrückt: Was oben über die 360° hinausgeht, kommt unten wieder herein.) Im Gegensatz zu evaluation.m kann man hier also die zeitliche Abfolge der Winkel sehen. So kann man erkennen wann ein Vogel die Richtung ändert, etwa nach der Änderung des Reizes.

Ergebnisse

Daten

Mit dem oben genannten Programm berechnete ich für jedes 5-min-Intervall die mittleren Winkel und aus diesen wiederum die mittleren Winkel der jeweiligen Phasen. Ein Winkel von 0° entspricht Norden. Geordnet nach dem Datum sind die Winkel in Tabelle 2 aufgelistet.

Tab. 2: Die mittleren Winkel der jeweiligen Phasen für jeden Vogel. Norden ist bei 0°.

		Mittlerer Winkel für jede Phase					
Datum	Vogel	c	WOd	c	WOR	c*	
28.03.08	ER04	163°	125°	60°	35°	27°	
28.03.08	ER35	90°	182°	—	—	—	
08.04.08	ER30	3°	288°	13°	266°	249°	
08.04.08	ER34	112°	84°	113°	100°	139°	
10.04.08	ER20	300°	302°	298°	267°	295°	
10.04.08	ER38	84°	81°	85°	97°	107°	
12.04.08	ER11	348°	36°	124°	184°	175°	
12.04.08	ER22	132°	130°	151°	142°	150°	

		c	WOR	c	WOd	c	
02.04.08	ER30	348°	339°	358°	291°	312°	
02.04.08	ER34	172°	183°	145°	155°	179°	
09.04.08	ER20	270°	291°	304°	327°	309°	
09.04.08	ER38	129°	142°	162°	129°	122°	
11.04.08	ER11	272°	280°	236°	143°	205°	
11.04.08	ER22	37°	119°	146°	263°	99°	

		c	OWd	c	WOR	c	WOd
01.04.08	ER04	174°	307°	220°	247°	2°	19°
01.04.08	ER35	279°	331°	323°	287°	296°	41°

*Am 28.3.08 war dies OWR

Nach den Angaben der Kollegen in der Arbeitsgruppe sollten die Vögel – wenn sie gut orientiert sind – nach Norden/Nordosten ziehen wollen. Das folgende Diagramm

(Abbildung 8) zeigt die mittleren Winkel der ersten Kontrollphase für die acht Vögel aus dem ersten Versuchsteil. Jeder Vogel wurde zwei mal getestet. Vier dieser mittleren Winkel lassen auf eine gute Orientierung schließen. Sie sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

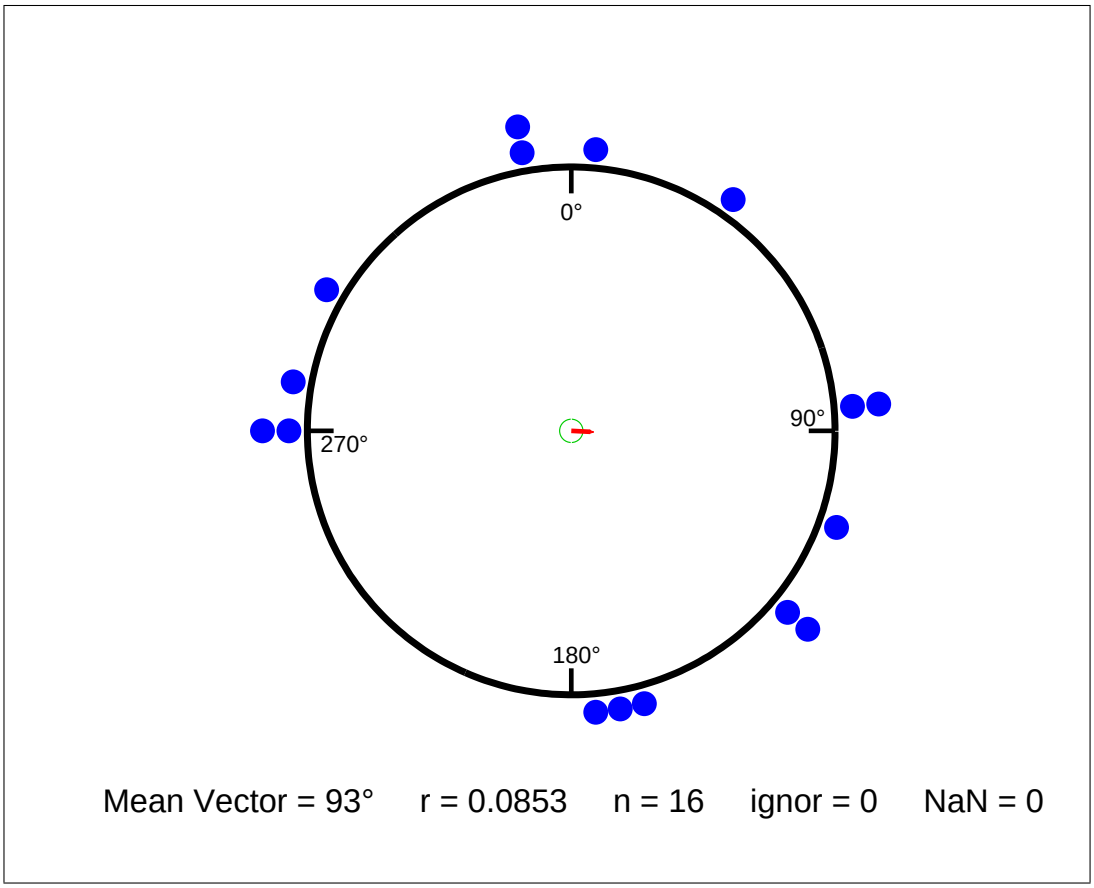

Abb. 8: Graphik zu den ersten Kontrollphasen des ersten Versuchsteils. Für jeden Vogel wurde der mittlere Winkel der ersten Kontrollphase eingezeichnet (blaue Punkte). Die Richtung und der Betrag des mittleren Winkels sind rot eingezeichnet. Basierend auf 16 Winkel, keiner wurde aussortiert, kein Wert fehlte.

Tab. 3: Die anscheinend gut orientierten Vögel. Es zeigte sich später, das sie nur zufällig gut orientiert waren.

Vogel	Datum	Orientierung
ER30	02.04.08	348°
ER30	08.04.08	3°
ER22	11.04.08	37°
ER11	12.04.08	348°

Der Anteil an Winkeln, die eine anscheinend gute Orientierung zeigen, ist so gering (4 von 16), dass man von einer zufälligen Verteilung ausgehen darf.

Für die weitere Untersuchung wurden alle Winkel der ersten c-Phasen der jeweiligen Vögeln in Abbildung 9 dargestellt. Diese kartesische Darstellung ist vollständig, weil alle Winkel eingetragen werden, im Gegensatz zur vorherigen Polardarstellung, in der nur Mittelwerte eingetragen werden. Etwa 94% der Bilder konnten auf diese Weise ausgewertet werden. Die restlichen Bilder wurden nicht berücksichtigt, weil die Markierung nicht sichtbar war, z. B. wegen einer Kopfneigung des Vogels. Die vorliegende Graphik besteht aus mehreren Einzelbildern, die jeweils für ein 5-min-Intervall stehen. Die Winkel sind gegen ihre fortlaufende Nummer aufgetragen, also in zeitlicher Reihenfolge. Die y-Achse reicht von 0° bis 360°. Für jedes Einzelbild ist der mittlere Winkel als durchgezogene Linie eingezeichnet. Ein kritisches Studium der Graphiken hat gezeigt, dass diese vier auffälligen Mittelwinkel tatsächlich von nicht gut orientierten Vögeln herrühren. Die Streuung ist augenscheinlich zu breit für eine gute Orientierung. Ich habe auch die anderen Vögel auf diese Weise untersucht und auch hier keinerlei Orientierung festgestellt.

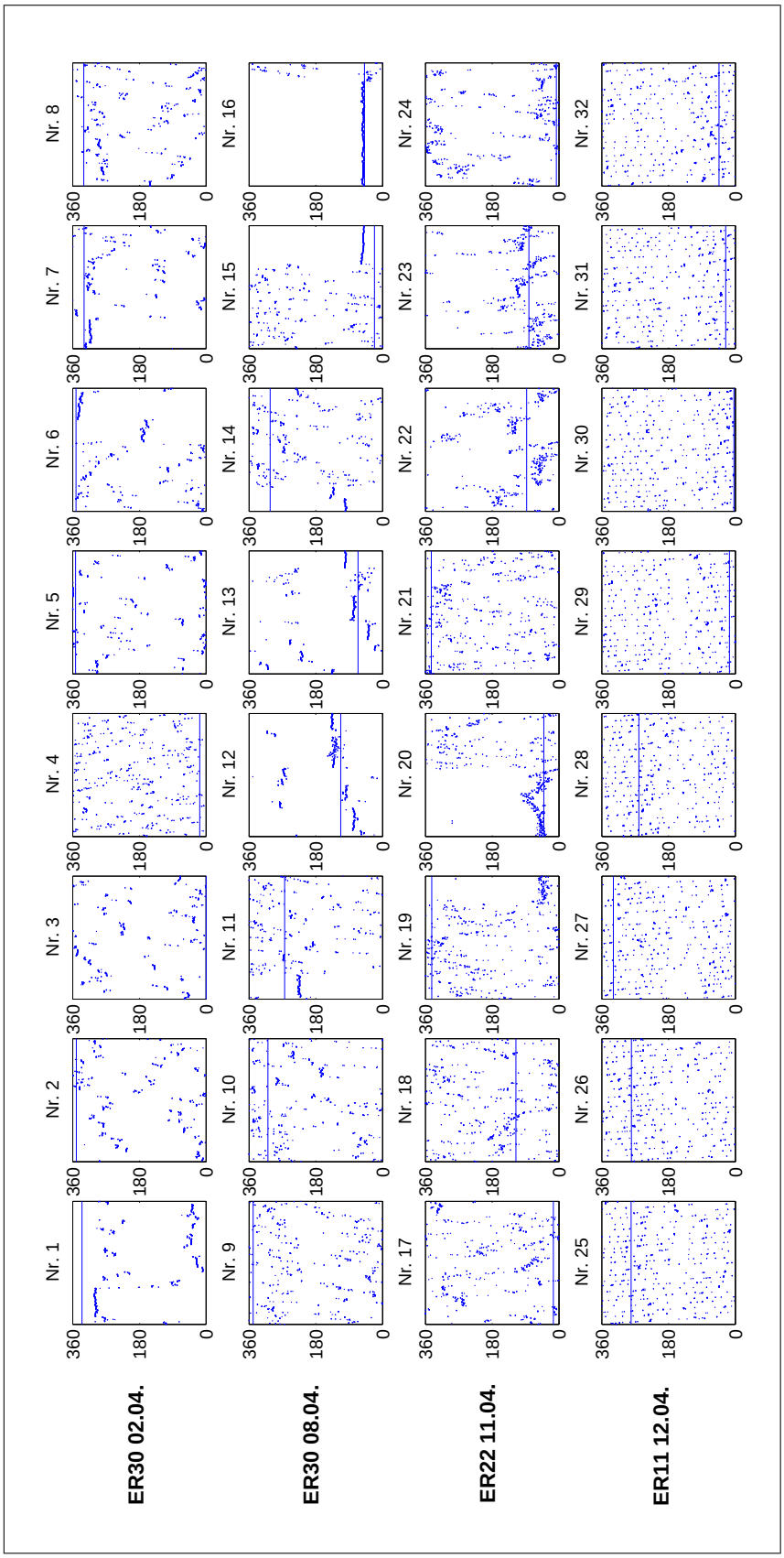

Abb. 9: Die ersten c-Phasen der scheinbar gut orientierten Vögel, aufgeteilt in 5-min-Intervalle. Die Winkel sind gegen ihre fortlaufende Nummer (zeitliche Reihenfolge) aufgetragen. Der mittlere Winkel ist als durchgezogene Linie gezeichnet.

Um zu prüfen, ob es eine Reaktion auf die Reize gegeben hat, habe ich die Differenzen der mittleren Winkel der Kontrollphasen und der jeweils darauf folgenden Reizphasen berechnet. Abbildung 10 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise. Eine Differenz wurde als positiv definiert, wenn der mittlere Reizphasenwinkel näher an der Reizrichtung war, sonst als negativ.

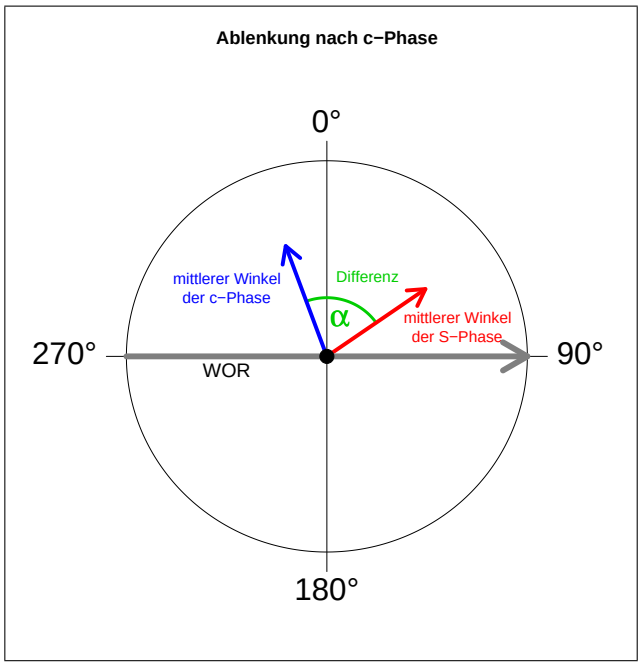

Abb. 10: Berechnungsprinzip der c/S-Differenzwinkel. Differenzen wurden als positiv angesehen, wenn sie, so wie in der Graphik, näher zur Reizrichtung lagen.

Haben sich die Vögel während der Reizphase genauso orientiert wie in der vorherigen Kontrollphase, müssten die Differenzen signifikant gleich null sein. Ich prüfte, ob null im 95%-Konfidenzintervall ($\pm\delta$) der Differenzen lag. Mit der Vektorlänge des mittleren Winkels kann dies in einer Graphik bei Batschelet (1981) abgelesen werden [Batschelet (1981)]. Bei beiden Reizen gibt es tatsächlich keine Ablenkung, da das jeweilige Konfidenzintervall die Null überdeckt. Beim Zugruf liegt die mittlere Abweichung bei $-17°$ (von der Reizrichtung weg) mit $r = 0,614$, $n = 14$ und $\delta = \pm 34°$. Beim „ding“ ist die mittlere Abweichung $17°$ mit $r = 0,663$, $n = 16$ und $\delta = \pm 28°$. Die Graphiken hierzu sind dargestellt in Abbildung 11 für Zugruf und Abbildung 12 für „ding“.

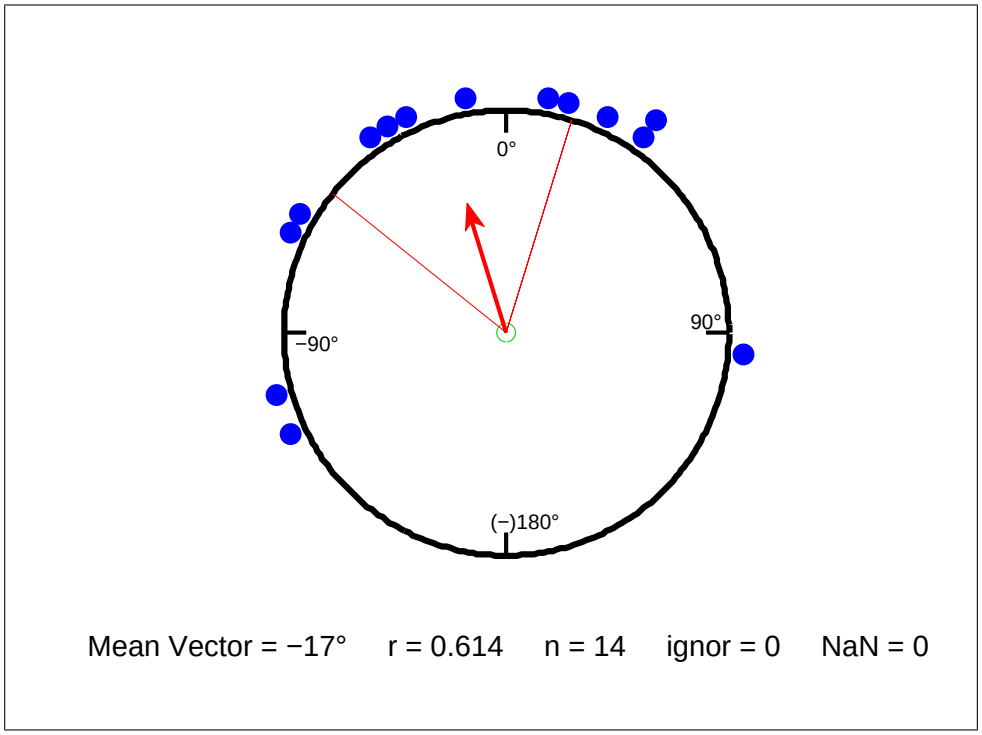

Abb. 11: Differenzwinkel zur Richtungsänderung beim Zugruf. Differenz zwischen den mittleren Winkeln der Reizphasen und der vorhergehenden Kontrollphase. Positive Differenzen stehen für eine Änderung zur Reizrichtung hin, negative gehen davon weg. Gemäß dem 95%-Konfidenzintervall ist $\delta = \pm 34°$; 0° wird überdeckt.

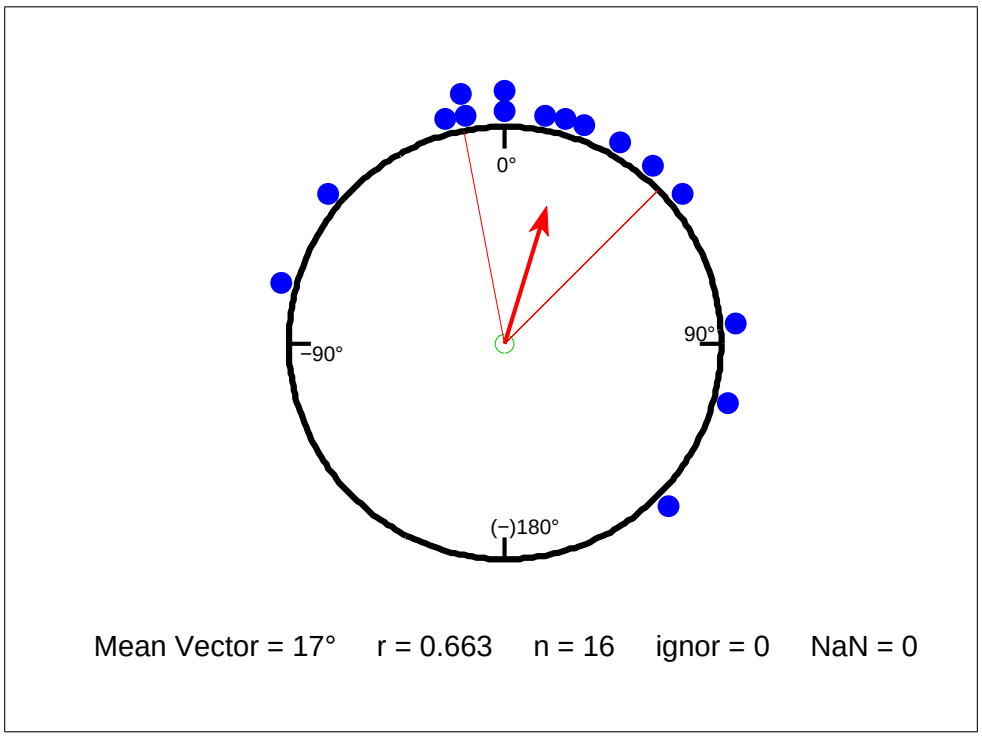

Abb. 12: Differenzwinkel zur Richtungsänderung beim „ding“. Differenz zwischen den mittleren Winkeln der Reizphasen und der vorhergehenden Kontrollphase. Positive Differenzen stehen für eine Änderung zur Reizrichtung hin, negative gehen davon weg. Gemäß dem 95%-Konfidenzintervall ist $\delta = \pm 28°$; 0° wird überdeckt.

Bei den Versuchen meiner Kollegin M Zapka aus der Arbeitsgruppe waren die Vögel ab dem 5. Mai 2008 gut orientiert. Deshalb wertete ich auch die ersten c-Phasen des zweiten Versuchsteils aus, um dann eventuell wenigstens diese Daten für weiterführende Aussagen zu nutzen. Hier konnte ich lediglich 84% der Bilder nutzen, bei den ungenutzen war die Markierung zwar vorhanden, aber gerade verdeckt oder nicht hell genug. Leider stellte sich heraus, dass auch hier die Vögel nicht orientiert waren. Die unterschiedliche Orientierungsleistung der Vögel könnte dadurch erklärt werden, dass meine Kollegin andere Individuen für ihre Versuche nutzte. Nachstehend die Graphik (Abbildung 13) mit den mittleren Winkeln der ersten Kontrollphasen ab dem 5. Mai.

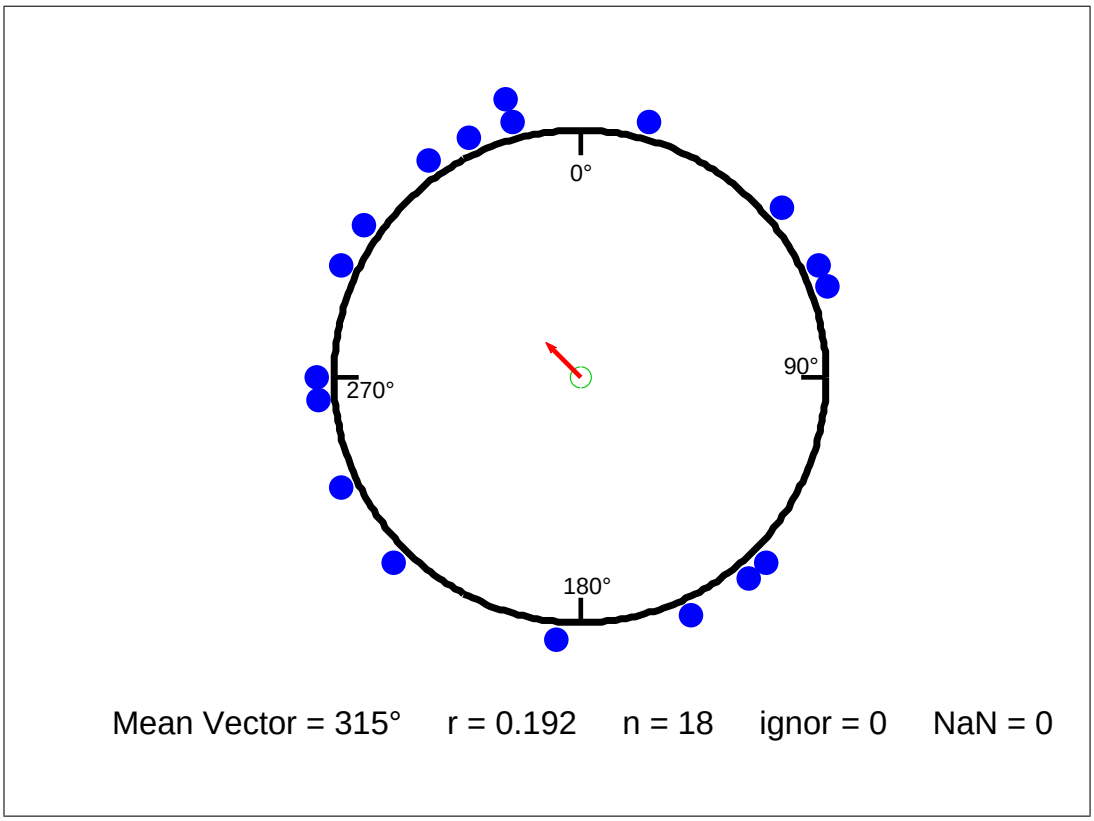

Abb. 13: Graphik zu den ersten Kontrollphasen des zweiten Versuchsteils für die Tage ab dem 5.5.08. Für jeden Vogel wurde der mittlere Winkel der ersten Kontrollphase eingezeichnet (blaue Punkte). Die Richtung und der Betrag des mittleren Winkels sind rot eingezeichnet. Basierend auf 18 Winkel, keiner wurde aussortiert, kein Wert fehlte.

Wären die Vögel gar nicht in Zugunruhe gewesen, wären sie sitzengeblieben und hätten geschlafen. Das haben sie aber nicht getan; sie sind die meiste Zeit über in Bewegung gewesen, wenn es auch manchmal längere Zeiten gab, wo ein Vogel einfach Pause gemacht oder sogar geschlafen hat.

Da also die Zugunruhe bereits geweckt war, hätte es sein können, dass die Vögel von den Lauten dahingehend stimuliert worden wären, dass sie sich dann doch genau orientiert hätten, dann vielleicht sogar mit erhöhter Wahrscheinlichkeit in die entsprechende Reizrichtung.

Ich habe die Differenzen zwischen den mittleren Winkel der Reizphasen und der Reizrichtung berechnet. Dabei habe ich eine Differenz als positiv definiert, wenn der mittlere Winkel in der Nordhälfte lag, sonst als negativ. Die Abbildung 14 zeigt die Vorgehensweise.

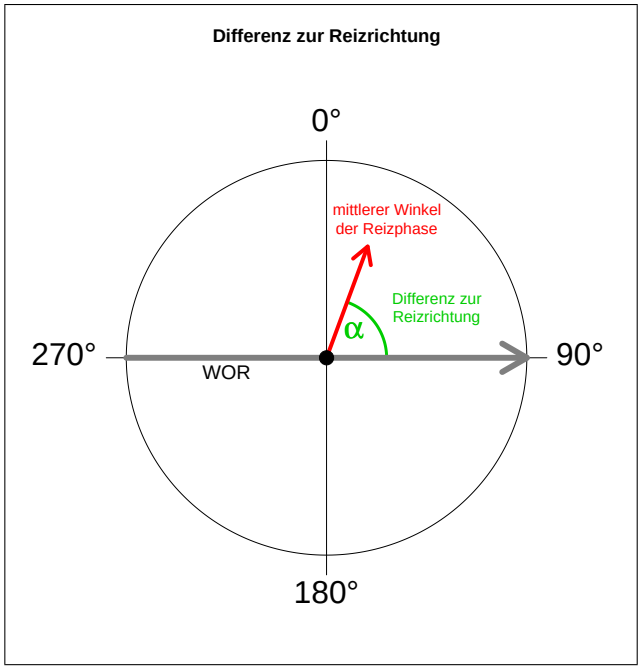

Abb. 14: Berechnungsprinzip der Differnz zur Reizrichtung. Differenzen wurden als positiv angesehen, wenn sie, so wie in der Graphik, in der Nordhälfte lagen, sonst als negativ.

Hätten sich die Vögel in Reizrichtung orientiert, würden die Differenzen um 0° streuen. Das heißt, der 0°-Winkel würde im 95%-Konfidenzintervall der Differenzen liegen. Abbildung 15 zeigt, dass bei den Zugrufen der mittlere Winkel der Differenzen um $-125°$ von 0° abweicht. Mit $r = 0,187$ und $n = 15$ hat das Konfidenzintervall eine Breite von $\delta \gg \pm 90°$ (aus der Graphik bei Batschelet [Batschelet (1981)] nicht mehr ablesbar).

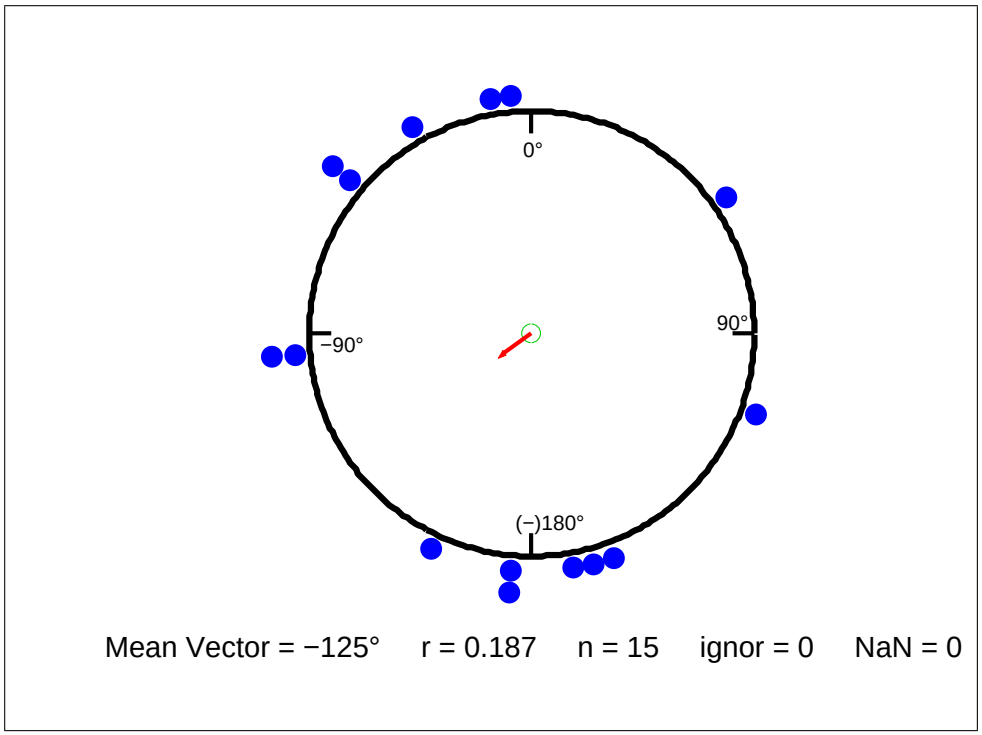

Abb. 15: Differenzwinkel zwischen den mittleren Winkeln der Reizphase und der Reizrichtung für die Zugrufe. Differenzen im nördlichen Halbkreis wurden als positiv definiert, die anderen als negativ. Die Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls sind nicht angebbar, denn sie sind $\gg \pm 90°$.

In Abbildung 16 ist zu erkennen, das beim „ding“-Laut die Abweichung des mittleren Winkels der Differenzen zu 0° gleich 22° ist, mit $r = 0,235$, $n = 18$ und $\delta \gg \pm 90°$ (auch nicht mehr ablesbar). In beiden Fällen ist also nicht festzustellen, dass die Vögel sich in die Reizrichtung orientiert haben.

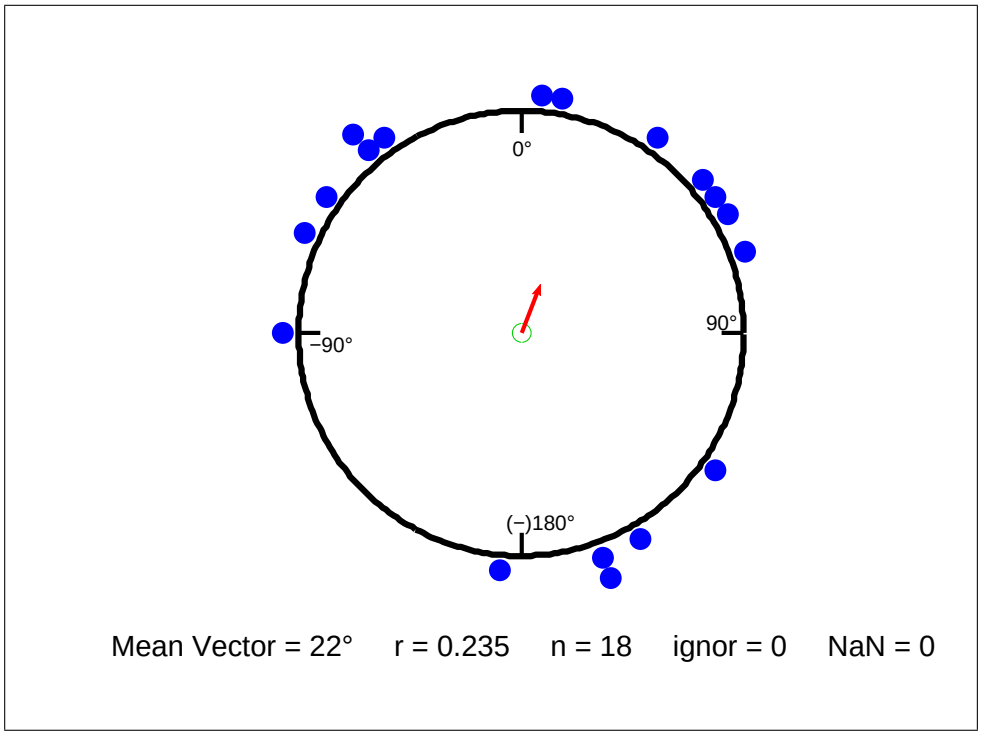

Abb. 16: Differenzwinkel zwischen den mittleren Winkeln der Reizphase und der Reizrichtung für das „ding“. Differenzen im nördlichen Halbkreis wurden als positiv definiert, die anderen als negativ. Die Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls sind nicht angebbar, denn sie sind $\gg \pm 90°$.

Da die bisher ausgewerteten Daten zeigten, dass die Vögel nicht gut orientiert waren, habe ich die restlichen Aufnahmen des zweiten Versuchsteils nicht mehr ausgewertet, weil aus diesen Daten keine weiteren Erkenntnisse hätten gewonnen werden können.

Methodische Fortschritte

Da die Daten wegen der schlechten Orientierung der Vögel keine besonders interessanten Ergebnisse lieferten, konzentriere ich mich nun auf die methodischen Fortschritte, die durch meine Arbeit und Programmierung entstanden sind.
Als Beispiel einer vollständigen Auswertung mit der neuen Methode diene die Graphik zu ER22 am 11.04.08 (Abbildung 17). Das ist einer der vier scheinbar gut orientierten Vögel. Für jedes 5-min-Intervall gibt es ein Einzelbild. Die einzelnen Winkel sind gegen ihren fortlaufende Nummer in zeitlicher Reihenfolge aufgetragen. Eine durchgezogene Linie steht für den mittleren Winkel. Blau sind die c-Phasen, rot die Reizphasen.

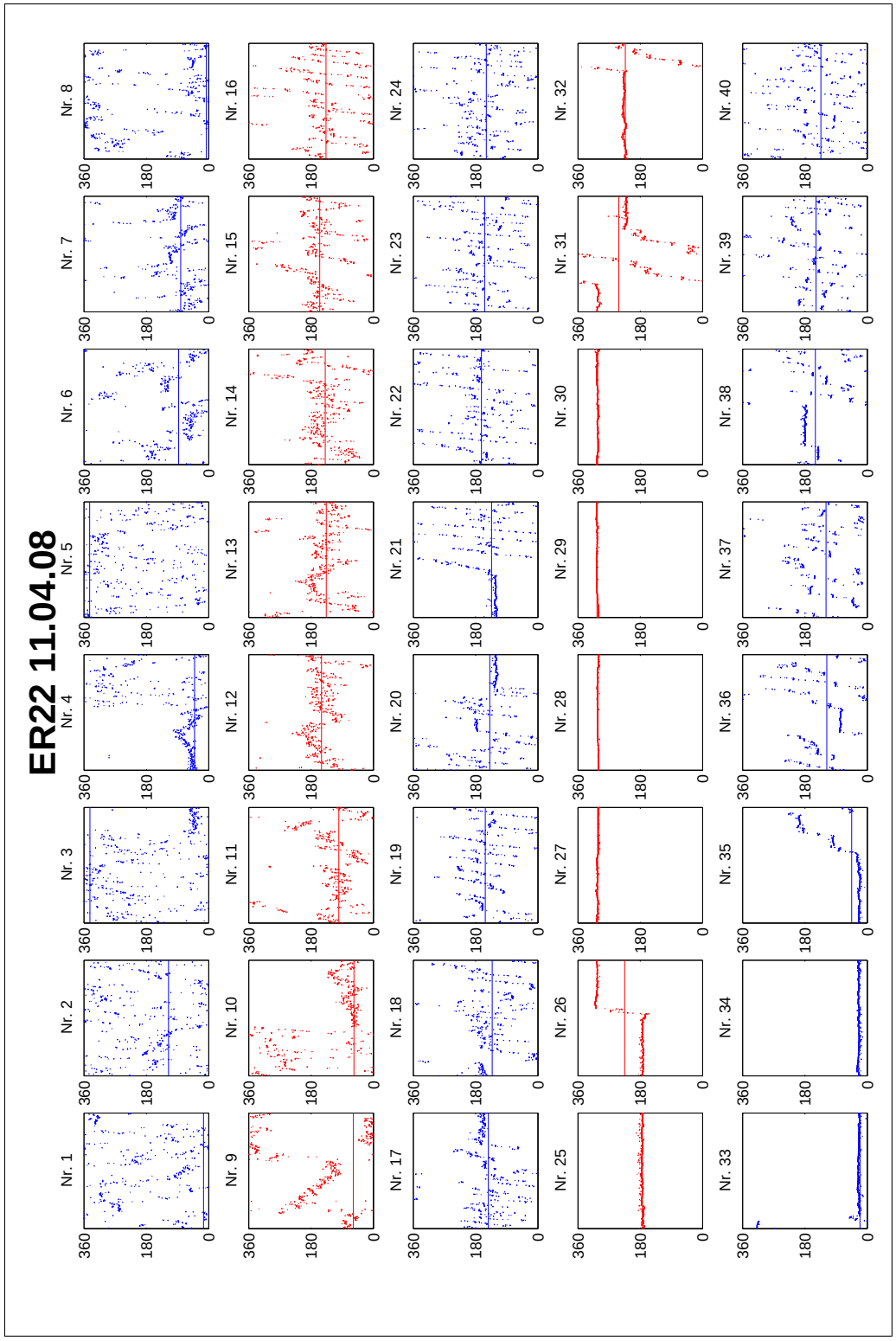

Abb. 17: Das Verhalten von ER22 am 11.04.08 als Beispiel einer vollständigen Auswertung. Die Winkel sind in zeitlicher Reihenfolge gegen ihre fortlaufende Nummer aufgetragen. c-Phasen sind blau, Reizphasen rot. Eine durchgezogene Linie stellt den mittleren Winkel dar.

Interpretation:

Am Übergang von Bild Nr. 3 zu Nr. 4 und von Nr. 17 zu Nr. 18 ist ein Zeitintervall mit einer ziemlich deutlichen Richtung. Hier blieb der Vogel an einem Platz, blickte umher, machte bisweilen einen Schritt nach rechts oder links und zurück, drehte sich manchmal, putzte sich und versuchte auch, die Markierung abzustreifen. Ein Beispiel für verhältnismäßig gute Orientierung sind die Bilder Nr. 11 bis Nr. 15, insbesondere Nr. 12, 13 und 14. Hier trat zweitweise kurzes Schwirren auf. Leider kommt so etwas bei den anderen Vögeln gar nicht vor und bei diesem (ER22) auch nur ein einziges Mal. Auf den Bildern Nr. 16 bis 24 sind Winkelfolgen mit positiver Steigung zu erkennen. Mit steigender Winkelnummer ändert sich der Winkel von 0° über 90°, 180° und 270° wieder nach 0°, also von Norden über Osten, Süden und Westen wieder nach Norden – der Vogel ist im Uhrzeigersinn auf der Stange im Kreis gehüpft! In Bild Nr. 19 ist deutlich zu erkennen, das sich die Winkelfolgen nicht durch das ganze Bild ziehen. Das bedeutet, dass der Vogel lediglich einen Halbkreis gehüpft ist und dann zum Ausgangspunkt zurückgesprungen/-geflogen ist. Am Übergang von Bild Nr. 20 zu Nr. 21 erkennt man, dass der Vogel still dasaß und nur umhergeblickt hat; daher die geringe Streuung. An den Bildern Nr. 25 bis 30 kann man erkennen, dass der Vogel sich nicht bewegt hat. Eine Kontrolle der zugehörigen Videosequenz bestätigte die Vermutung, dass der Vogel geschlafen hat. Die kaum vorhandene Streuung der Winkel ist zu gering für eine Bewegung des Vogels. Die Bilder Nr. 25 und Nr. 26 zeigen, wie eine Überprüfung der Videoaufnahme bestätigte, dass der Vogel nur dasaß und erst noch etwas umhergeblickt hat, dann den Ort gewechselt und geschlafen hat. Ein Bild wie Nr. 26 könnte aber auch folgendermaßen entstanden sein: Der Vogel hat die Markierung abgestreift, die dann mit der reflektierenden Seite nach oben auf dem Boden des Käfigs lag. Beim Umherflattern wirbelte der Vogel den Streifen auf, sodass er wo anders zu liegen kam. Irgendwann aber würde die Winkelfolge dann wahrscheinlich abbrechen, weil der Streifen umgedreht oder aus dem Käfig herausgeweht wurde. Erfahrungsgemäß finden sich diese Streifen jedoch im Schatten am Rande des Käfigbodens am Stoff verhakt, wo sie dann nicht mehr zu erkennen sind.

Grundsätzlich gilt: auf den Bildern kann man nicht erkennen wie weit der Vogel von der Käfigmitte entfernt ist. Manchmal versucht er oben am Rand des Käfigs zu entkommen, manchmal sitzt, dreht sich oder hüpft er in der Käfigmitte herum. Im mittleren Teil von Bild Nr. 3 ist dies z. B. der Fall. Bei solch eher gleichverteilten Punkten ist also nicht unbedingt viel über das Ausmahß der Aktivität zu sagen. In der Käfigmitte genügen ein paar Kopfdrehungen für eine breite Streuung, auf der Rundstange muss der Vogel schon beträchtlich aktiver sein, um eine solche Streuung der Winkel zu erreichen. Dazu müsste er dann immer wieder kreuz und quer Sprünge von einer Seite zur anderen machen, denn im Kreis Hüpfen ergibt ein anderes Bild (z. B. Nr. 16).

Ein Blick auf die Mittelwertlinien gibt einen groben Überblick darüber, ob die Werte etwa gleichverteilt sind, und damit der Vogel als unorientiert gelten muss. Sind die Mittelwerte der 5-min-Intervalle gleichverteilt, ist es auch die Grundgesamtheit der betrachteten Zeitintervalle. Ähnliche Mittelwerte dagegen sind eine notwendige Bedingung, um auf eine gute Orientierung des Vogels während der betrachteten Zeitintervalle schließen zu können. Ähnliche Mittelwerte sind aber keine hinreichende Bedingung. In den Bildern Nr. 12 bis Nr. 24 liegen zwar ähnliche Mittelwerte vor, aber die Messwerte variieren ohne Vorzugsrichtung über das ganze Winkelintervall. Unähnliche Mittelwerte sind aber eine hinreichende Bedingung, um in einem Datensatz eine schlechte Orientierung des Vogels zu erkennen. Man beachte, dass Mittelwerte nahe 0° und nahe 360° eine ähnliche Richtung bedeuten. Die Bilder stellen ja im Prinzip aufgeschnittene und ausgebreitete Mantelflächen von Zylindern dar.

Die zwei Punkte links oben in Bild Nr. 4 sind Artefakte, die folgendermaßen zu erklären sind: Das Programm, das die Rohdaten erzeugt (henrik4), sucht nach der hellsten Stelle innerhalb des abgebildeten Käfigs. Dies ist normalerweise die Markierung. Ist sie einmal nicht zu sehen oder zu sehr abgedunkelt, findet das Programm anderswo eine hellste Stelle. Also wird ein Messwert aufgenommen, wo gar kein Vogel ist. Das Programm erlaubt es zwar, einen Schwellenwert für die Mindesthelligkeit zur Erkennung einzustellen, dieser wird aber manchmal auch von anderen Stellen des Bildes überschritten, wenn die Markierung nicht zu sehen ist. Das Artefakt in

Bild Nr. 4 entstand, als der Vogel beim Putzen den Kopf so weit geneigt hat, dass die Markierung kurzzeitig nicht zu sehen war. Mit derartigen Artefakten ist immer zu rechnen, aber sie treten erfahrungsgemäß nicht häufig auf und es sind auch nur Einzelbilder oder sehr kurze Bilderfolgen betroffen.

Diskussion

Zu den Ergebnissen

In keiner der Kontrollphasen konnte eine Orientierung nachgewiesen werden. Ohne eine Referenzrichtung können aber keine Aussagen darüber gemacht werden, ob oder wie weit sich die Vögel von den Lauten haben ablenken lassen. Selbst wenn die Vögel auf die Reize mit einer guten Orientierung reagiert hätten, könnte nicht gesagt werden, wie weit sie abgelenkt worden wären, d. h. wie stark die Beeinflussung gewesen wäre. Ebensowenig wäre erkannt worden, ob der Zugruf oder der künstliche Laut einen größeren Einfluss gehabt hätte.
Die allgemein schlechte Orientierung meiner Versuchstiere könnte dadurch erklärt werden, dass sie nicht richtig in Zugstimmung waren, weil z. B. die Witterungsbedingungen ungünstig waren. Ob es wirklich an schlechter Witterung lag, könnte im Vergleich mit anderen Versuchen unter Berücksichtigung der Wetterdaten festgestellt werden. Die Methoden der Datenaufnahme und -auswertung sollten bei diesen Versuchen aber die gleichen gewesen sein.

Verbesserungsvorschläge

Es ist möglich, die Kamerasignale simultan mit der Aufnahme auszuwerten. H Mouritsen et al. haben das bereits in früheren Versuchen gemacht. Auf diese Weise hat man bereits am Ende des Versuchstages die Rohdaten (d. h. Winkel) und kann sie sofort auswerten. Die zeitraubende und nur sehr grobe Vorauswertung entfiele dann gänzlich. So wäre es zum Beispiel auch möglich, zunächst einmal die erste Kontrollphase so lange auszudehnen, bis mindestens ein Versuchstier gut orientiert ist. Daraufhin kann die Richtung des Reizes festgelegt werden. Sind die Vögel in einer Versuchsnacht nicht gut orientiert, kann man den Versuch vorzeitig abbrechen. Ein noch größerer zeitlicher Vorteil liegt darin, dass man auf diese Weise den Zeitpunkt in einer Zugsaison abwarten kann, ab dem die Vögel gut orientiert sind, um dann umso effizienter zu testen.

Manchmal haben die Vögel die Klebebandmarkierung abgekratzt. Dabei haben sie ein paar Federn gelassen und mir dadurch die Auswertung der Aufnahmen erschwert, wodurch für diese Zeiten die Menge der Rohdaten stark vermindert wurde. Ich wollte diese Unannehmlichkeit umgehen, indem ich statt des Klebebandes eine entsprechend IR-reflektierende Farbe verwende. Einen Farbklecks auf dem Gefieder würden die Vögel wahrscheinlich gar nicht wahrnehmen und sie wären überhaupt nicht irritiert. Das Beste schien mir der Lack zu sein, mit dem Autonummernschilder gefertigt werden. Nachfragen bei TÜV, Nummernschildfabrikanten, Lackherstellern und Physikern und schließlich das Ausprobieren von drei vielversprechenden Farben zeigten aber, dass die Idee nicht umsetzbar war: Nummernschilder werden mit einer sehr dünnen reflektierenden Folie überzogen, auf die dann die schwarzen Ziffern gedruckt werden, und ungiftige IR-reflektierende Farben oder Lacke, die für derartige Versuche geeignet sind, gibt es nicht.

Um zu prüfen, ob die Tonsignale auch richtig im Versuchsraumn ankommen, sollte während des Versuches mit einem Babyphon mitgehört werden. Das Babyphon reagierte aber nicht auf die Laute und so wurde die Umsetzung dieser Idee vorläufig aufgegeben. Später entwickelte ich die Idee dann weiter. Man könnte in einem kleinen Kästchen ein Mikrophon und einen Lautsprecher installieren und – mit einem entsprechenden Gegenstück im Hauptgebäude – mithören. Diese Gegensprechanlage wäre auch beim Aufbau der Versuchsanordnung sehr nützlich, weil sich auf diese Weise das laute Rufen zwischen Gartenhäuschen und Hauptgebäude erübrigt. Desweiteren könnte man auf dem Kästchen ein Leuchtdiodenfeld unterbringen (drei mal drei, mit Schaltern auf dem Gegenstück). Das Kästchen sollte so platziert werden, dass es auf den Aufnahmen zu sehen ist. Durch einen Code, welche Dioden leuchten und welche nicht, kann verschlüsselt werden, welcher Reiz gerade gegeben wird.

Als im zweiten Versuchsteil mit den Doppelreizen zwei Reize in zwei Richtungen abwechseld vorgespielt werden sollten, musste die ganze Zeit von Hand umgestellt werden. Das könnte einfacher gemacht werden, indem das Programm und die Bedienungsoberfläche des Steuerprogramms ProjektOleLyd umgeschrieben würde.

Durch den schrägen Einfallswinkel des IR-Lichtes von der Kamera gab es in den Käfigen Schatten. Die Markierung war dann auf den Aufnahmen zwar noch zu sehen,

aber manchmal nur so schwach, dass sie vom Programm nicht mehr erfasst und daher als fehlend gewertet wurde. Da es sich hierbei nur um kurze Zeitintervalle von einigen Sekunden bis wenigen Minuten (wenn der Vogel stillsaß) handelte, war auch die Videoauswertung nicht möglich. Um die Datengewinnung in dieser Hinsicht zu verbessern, könnte mit zusätzlichen IR-Dioden, mittig über den Versuchskäfigen, Abhilfe geschaffen werden.

Literatur

[Bairlein (1990)] F. Bairlein (1990), Nutrition and Food Selection in Migratory Birds. *Bird Migration*, E. Gwinner, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990.

[Batschelet (1981)] Edward Batschelet (1981). *Circular Statistics in Biology.* Academic Press, London New York Toronto Sydney San Francisco.

[Berthold et al. (1990)] P. Berthold, W. Wiltschko, H. Miltenberger, U. Querner (1990). Genetic transmission of migratory behavior into a nonmigratory bird population. Experientia 46:107-108

[Berthold (2000)] Peter Berthold. *Vogelzug. Eine aktuelle Gesamtübesicht.* 4., stark überarbeitete und erweiterte Auflage, Darmstadt, 2000. Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

[Chappuis (1989)] C. Chappuis, 1989. *Sound of Migrant and Wintering Birds* (zwei Kassetten). European Robin: „Migrating call (October, south-west France)“

[Cochran et al. (2004)] William W. Cochran, Henrik Mouritsen, Martin Wikelski (2004). Migrating Songbirds Recalibrate Their Magnetic Compass Daily from Twilight Cues. Science Vol. 304

[Emlen (1975)] Stephen T. Emlen (1975). The Stellar-Orientation System of a Migratory Bird. Scientific American, August 1975.

[Evans (2006)] Bill Evans (2006). Acoustical monitoring of bird migration – capabilities, limitations, and utility in the context of assessing use and impacts of wind turbines. PowerPoint-Präsentation.

[Farnsworth (2005)] Andrew Farnsworth (2005). FLIGHT CALLS AND THEIR VALUE FOR FUTURE ORNITHOLOGICAL STUDIES AND CONSERVATION RESEARCH. The Auk (July 2005).

[Mouritsen (1998a)] Hernik Mouritsen (1998a). Modelling Migration: the clock-and-compass model can explain the distribution of ringing recoveries. Animal Behaviour, 1998, **56**, 899–907.

[Mouritsen (1998b)] Henrik Mouritsen (1998b). Redstarts, *Phoenicurus phoenicurus*, can orient in a true-zero magnetic field. Animal Behaviour, 1998, **55**, 1311–1324.

[Mouritsen (2001)] Henrik Mouritsen (2001). RINGING RECOVERIES CONTAIN HIDDEN INFORMATION ABOUT ORIENTATION MECHANISMS. Ardea 89(special issue): 31–42.

[Mouritsen und Mouritsen (2000)] Henrik Mouritsen und Ole Mouritsen (2000). A Mathematical Expectation Model for Bird Navigation based on the Clock-and-Compass Strategy. J. theor. Biol. (2000) **207**, 283-291.

[Mouritsen und Larsen (1998)] Henrik Mouritsen und Ole Næsbye Larsen (1998). MIGRATING YOUNG PIED FLYCATCHERS *FICEDULA HYPOLEUCA* DO NOT COMPENSATE FOR GEOGRAPHICAL DISPLACEMENT. The Journal of Experimental Biology 201, 2929–2934 (1998).

[Mouritsen et al. (2004a)] Henrik Mouritsen, Ulrike Janssen-Bienhold, Miriam Liedvogel, Gesa Feenders, Julia Stalleicken, Petra Dirks, Reto Weiler (2004). Cryptochromes and neuronal-activity markers colocalize in the retina of migratory birds during magnetic orientation. PNAS, vol. 101, no. 39, **14294–14299**

[Mouritsen et al. (2004b)] Henrik Mouritsen, Gesa Feenders, Miriam Liedvogel, Wiebke Kropp (2004). Migratory Birds Use Head Scans to Detect the Direction of the Earth's Magnetic Field. Current Biology, Vol. 14, 1946–1949

[Perdeck (1958)] A. C. Perdeck (1958). Two types of orientation in migrating starlings, *Sturnus vulgaris L.*, and chaffinches, *Fringilla coelebs L.*, as revealed by displacement experiments. Ardea 46:1-37.

[Stichmann und Kretzschmar (1996)] Wilfried Stichman und Erich Kretzschmar. *Der neue Kosmos Tierführer*. Stuttgart, 1996. Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co.

[Wikipedia] www.wikipedia.de, verschiedene Autoren.

[Wiltschko (1968)] W. Wiltschko (1968). Über den Einfluß statischer Magnetfelder auf die Zugorientierung der Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). Z. Tierpsychol. 25:537–558.

[Wiltschko und Wiltschko (1972)] Wolfgang Wiltschko und Roswitha Wiltschko (1972). Magnetic Compass of European Robins. SCIENCE, Vol. 176.

Anhang

Danksagung

Ich danke Henrik Mouritsen für die Betreuung, Bent Andersen und Ole Larsen für die Hilfe beim Versuchsaufbau und der Klärung einiger Fragen, den Doktorandinnen Manuela Zapka, Christine Hein und Morgane Bordonnaise für das Fangen und Markieren der Vögel und Margrit Kanje dafür, dass sie immer da war, wenn man sie gebraucht hat.

Gerätespezifikationen

Kamera Color CCD IR Camera (Night Vision). Die genaue Bezeichnung ist nicht mehr feststellbar. Ein vergleichbares Modell ist: Standard IR-Stiftkamera mit 480 TVL, 1/4" Super-HAD-CCD Sensor von Sony®, 10 Meter Nachtsichtfähigkeit, 4,0 mm, 50°-Objektiv, wetterbeständig; www.hitecsecurity.de

Lautsprecher Die vier äußeren: Peerless vline BC25SC55-04 PDE17 Vifa Logic; Acoustic Systems Engineering, Dipl.-Ing. (FH) Gerd Lommersum, Lerchenstr. 9, D-72336 Balingen-Erzingen; www.vifa.de.
Die fünf inneren: vifa D26NC-55-06; www.d-s-t.com

Kondensatoren Bei den äußeren Lautsprechern: Giant, 47 μF, 100 V.
Bei den inneren: F&T, 47 μF, 100 V, BIPOLAR, ELKO RAUH, ATBI S5

Leuchtklebeband 3M Deutschland GmbH, Carl-Schurz-Straße 1, 41453 Neuss; www.3m-scotchlite.de

VirtualDub Version 1.5.10, ©1998-2003 by Avery Lee, build 18160/release

MatLab Version 6.5.0.180913a Release 13; June 18, 2002
und Version 6.1.0.450 Release 12.1; May 18, 2001

Personen

B Andersen Bent Bach Andersen, Elektroingenieur am Biologischen Institut der Syddansk Universitet Odense.

W Kropp Wiebke Kropp, Diplomandin.

O Larsen Prof. Dr. Ole Næsbye Larsen, zweiter Gutachter, Associate Professor und Leiter des Biologischen Institutes der Syddansk Universitet Odense.

H Mouritsen Prof. Dr. Henrik Østergard Mouritsen, betreuender Gutachter, Leiter der AG Animal Navigation der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.

N Troje Dr. rer. nat. Niko Troje, Canada Research Chair in Vision and Behavioural Sciences NSERC Steacie Fellow, Department of Psychology and School of Computing, Queen's University Kingston, Canada

M Zapka Manuela Zapka, Doktorandin, AG Animal Navigation der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.

Bildnachweis

Titelbild www.naturfoto.cz, *19. September 2008*, © Jiří Bohdal

Abb. 1 Maps of Magnetic Elements from the WMM (World Magnetic Model) 2005. Das World Magnetic Model ist ein Produkt der United States National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). Das U.S. National Geophysical Data Center (NGDC) und das British Geological Survey (BGS) produzierten es mit Unterstützung der NGA aus den USA und der Defence Geographic Imagery and Intelligence Agency (DGIA) aus Großbritannien.
www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml, *10. Oktober 2008*

Abb. 5 Aus: „Function of migratory bird calls: do they influence orientation and navigation?“ (PowerPoint-Präsentation). O Larsen (2008). Mara 2008, the fourth International Conference in Africa for Comparative Physiology and Biochemistry, Maasai Mara National Reserve, Kenya

Diese Arbeit habe ich mit LaTeX geschrieben. Die Bilder mit dem Käfig und dem Tisch mit Lautsprecherleisten (Abb. 2 und 3) habe ich mit POV-Ray 3.6 gerendert. Die Graphiken zu den schematischen Darstellungen der Berechnungsprizipien (Abb. 10 und 14) habe ich mit R 2.7 (R: A language and environment for statistical computing) programmiert und die schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus (Abb. 4) erstellte ich mit OpenOffice.org Draw.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Thomas Reichl

Oldenburg, 21. Oktober 2008