# Zusammenfassung

In Gruppen lebende Tiere profitieren von Vorteilen, müssen allerdings auch mit Herausforderungen umgehen. Aus Sicht der Sinneswahrnehmung für das Einzeltier besteht zum Bespiel die Herausforderung spezifische Signale aus einer Vielzahl an Signalen zu verarbeiten. Es ist bereits sehr gut untersucht, wie Tiere welche ihre Umwelt mit passiven Sinnen erfahren (wie zum Beispiel das Sehen oder Hören), also lediglich Signale „empfangen“, mit der Vielzahl an Signalen in Gruppen umgehen. Bei vielen dieser Tiere beeinflusst die eigene Wahrnehmung von Signalen die Wahrnehmung der benachbarten Tiere nicht. Im Gegensatz dazu gibt es Tiere welche ihre Umwelt über aktive Sinne erfahren, hierbei senden die Tiere aktiv Energie aus um damit ihre Umgebung „abzutasten“. Wenn solche Tiere Gruppen bilden wird erwartet, dass sich die von ihnen ausgesendete Energie gegenseitig beeinträchtigt und somit ihre Sinneswahrnehmung beeinflusst oder sogar überschreibt. Trotz der Möglichkeit dieser Überschreibung von Signalen, kommt soziales Verhalten und Gruppenaufkommen in Tieren mit aktiver Sinneswahrnehmung häufig vor. In dieser Thesis erforsche ich, wie Tiere mit aktiver Sinneswahrnehmung, echoortende Fledermäuse, es schaffen ihre Sinneswahrnehmung in Gruppen aufrechtzuerhalten. Dabei verwende ich eine Kombination aus Computersimulation und Feldstudien und trage mit Methoden bei, welche das akustische Verfolgen und die Analyse von Echoortungsrufen erleichtern.

Im Kapitel \@ref(cpnchapter) quantifiziere ich die sensorische Herausforderung von Echoortung in Gruppen. In Gruppen werden informationsreiche Echos von den Rufen und Echos umliegender Fledermäuse überschrieben. Diese Überschreibung, auch „jamming“ genannt, steigt vermutlich in einer nicht linearen Weise mit ansteigender Gruppengröße. Trotz dieser Annahme bilden freilebende Fledermäuse Gruppen von mehreren tausend Individuen. Um diese Beeinträchtigung von Echowahrnehmung abschätzen zu können benutze ich Computersimulationen. Ich generierte ein Model, dessen Parameter auf experimentelle Daten basierte und berücksichtigte die Funktion des Fledermausgehörs, Schallausbreitung und Gruppengeometrie. Meine Resultate zeigen, dass Fledermäuse vermutlich immer noch in der Lage sind ihre eigenen Echos zu empfangen, selbst bei Gruppengrößen von hunderten von Tieren. Fledermäuse in solch großen Gruppen detektieren bei jedem dritten Ruf allerdings nur noch einen ihrer umliegenden Nachbarn bzw. das von Nachbarn zurückgeworfene Echo. Das Model berücksichtigt eine vereinfachte Version des auditorischen Systems und spiegelt deshalb eine Untergrenze der Echowahrnehmung wieder. Mein Model repräsentiert den ersten Ansatz eines biologisch parametrisierten Models von Echoortung in Gruppen. Die Ergebnisse werfen die Frage der Beeinträchtigung von Echoortung in Gruppen auf und schätzen die sensorische Information ab, welche in kollektive fliegenden Fledermausgruppen für das Einzeltier zur Verfügung steht.

Kapitel \@ref(hbcchapter) handelt von einer Beobachtungstudie im Feld, welche die Echoortung von Fledermäusen mit einem sogenannten hohen „duty-cycle“ über verschiedene Gruppengrößen untersucht. Fledermäusen mit einem hohen duty cycle senden relative lange Rufe mit kurzen Pausen dazwischen aus. Ihre langen Rufe und die hohe Ruffrequenz erhöhen das Risiko der Überlappung von Rufen und Echos, selbst in kleineren Gruppen. Da die Analyse von solch überlappenden Rufen sehr herausfordernd ist, wurden Fledermäuse mit diesem Ruftyp bisher nur wenig und wenn dann im geschlossenen Flugraum untersucht. Mit Hilfe von Audio- und Videoaufnahmen von freifliegenden Fledermäusen in Höhlen, analysiere ich den Unterschied in Echoortung zwischen alleine fliegenden Tieren und Tieren in Gruppen von bis zu vier Individuen. Ich entwickelte ein Programmpaket um die Segmentierung und Messung von einzelnen Komponenten individueller Rufe zu automatisieren (beschrieben in Kapitel \@ref(itsfmchapter)). Ebenso entwickelte ich eine Methode zur Analyse von Audioaufnahmen mit überlappenden Rufen und benutzte sie in Verknüpfung mit Simulationen um besser zu verstehen, ob und wie Fledermäuse ihr Rufverhalten in Gruppen anpassen. Die Ergebnisse suggerieren keine maßgeblichen Veränderungen des Echoortungsverhaltens zwischen alleine und in Gruppen fliegenden Tiere. Die Studie trägt damit zu den Analysen von überlappenden Rufen und der Automatisierung von Einzel-Rufanalysen bei. Die Studie betont die Robustheit von Echoortung in Fledermäusen und hebt dabei die Wichtigkeit von Feldstudien hervor um die Fähigkeiten von Tieren mit aktiver Sinneswahrnehmung zu beschreiben.

In Kapitel \@ref(ushichkachapter) untersuchte ich einen in der Orlova Chuka Höhle erhobenen Langzeitdatensatz um das Gruppenechoortungsverhalten in freifliegenden Fledermäusen mit niedrigem duty cycle zu verstehen. Fledermäuse mit niedrigem duty cycle senden kurze Rufe mit langen Pausen dazwischen aus. Trotz der verhältnismäßig geringen Rufrate dieser Fledermäuse, zeigten Ergebnisse der Modellierung in Kapitel \@ref(cpnchapter) eine Beeinträchtigung von Echo-Wahrnehmung bereits bei einer Gruppengröße von 30 Tieren. Hier präsentiere ich die Methode und das investigative Potential dieses „Uchichka“ Datensatzes. „Uchichka“ ist ein multi-Kanal, multi-Sensor Datensatz vom Echoortungsverhalten von *Myotis myotis* und *Myotis blythii* Fledermäusen, bei wechselnder Gruppengröße von 1-30 Tieren in einer separaten Kammer der Höhle. Die Daten wurden mit Hilfe von synchronisierten Mikrophonen und Wärmebildkamera-Arrays aufgenommen, verknüpft mit einem LiDAR-Scan der Höhlenkammer. Die Microphon-Arrays nahmen die Rufemission auf, die Kamera-Arrays die Flugbahnen der Tiere. Der LiDAR-Scan unterstützt mit einer kontextuellen 3D-Aufnhamen des Volumens der Kammer, in welchem sich die Tiere aufgehalten haben. Aufgrund von bekannter Position der Tiere, Rufemission und LiDAR-Daten können wir zum ersten Mal den jeweiligen sensorischen Input von einzelnen Tieren in einer Gruppe rekonstruieren indem wir die Schallausbreitung simulieren. Um solche Audioaufnahmen von mehreren Tieren analysieren zu können müssen Herausforderungen wie Rufüberlappung und multi-Kanal-Übereinstimmung überwunden werden. Meiner Meinung nach können derzeitige Analysemethoden allerdings zufriedenstellende Ergebnisse in der akustischen Verfolgung liefern, wenn die Gruppengrößen, wie in der hier beobachteten Gruppe, eine Anzahl von 30 Tieren nicht übersteigt. Ungleich anderer Studien ist „Ushichka“, meines Wissens nach, der erste Datensatz welcher das kollektive Verhalten von Fledermäusen in freier Natur mit Zuhilfenahme von verschiedenen, zeitgleich eingesetzten Sensoren aufnimmt.

Kapitel \@ref(sfscotdoa) markiert den Beginn einer Serie von Methodenbeschreibungen, welche zur Studie von Echoortung in Gruppen beitragen, hierbei sind Multi-Mikrophon-Arrays zentral zu nennen. Akustische Arrays liefern die 3D-Position von rufenden Fledermäusen, tragen aber auch erheblich zum logistischen Aufwand von Feldstudien bei. Die meisten Arrays bestehen aus Mikrophonen welche auf unhandlichen Rahmen platziert wurden und daher schwer zu transportieren sind. Ihre typische rechtwinklige Konstruktion sticht aus natürlichen Umgebungen hervor und resultiert in unnatürlichem Inspektionsverhalten der Tiere. Im Gegensatz zu solchen Arrays, können Mikrophone auch frei im Feld platziert werden, deren Position muss dabei aber jedes Mal exakt ausgemessen und festgehalten werden. In Kapitel \@ref(sfscotdoa) präsentiere ich die Ergebnisse einer Kollaboration deren Ziel es war eine rahmenlose und mit wenig Messaufwand verbundenen Methode zum akustischen Verfolgen von Fledermäusen zu entwickeln. Der Workflow schließt dabei das freie Platzieren von Mikrophonen und das Aufnehmen von bekannten Tönen mit allen Kanälen ein. Die „time-difference-of-arrival“ wischen Kanälen werden dann genutzt um die Mikrophonposition automatisch abzuschätzen. In unserem Bericht zeigen wir eine erfolgreiche Positionsabschätzung von frei platzierten Mikrophonen in einer Höhle mit einer Genauigkeit von $\pm$ 4cm. Dies ist das erste Mal, dass eine solche Methode im Feld der Echoortung angewandt wurde und verspricht damit eine Zunahme an Freiheit und Größenmaßstab für zukünftige Multi-Mikrophon-Arrays im Feld und Labor. Sobald Bioakustiker von der Last der Mikrophon-Rahmen befreit wurden, und damit auch der logistische Aufwand minimiert wurde, können natürliche Strukturen genutzt werden um großflächige, unauffällige Arrays zu installieren.

Die Genauigkeit des akustischen Verfolgens ist beeinflusst von einer Vielzahl an Faktoren, so wie die Array-Geometrie, als auch dem Typ und der Lage der gemessenen Schallquelle. Daher ist es wichtig, beim grundlegenden Konstruieren aber auch beim nachträglichen Vermessen von Arrays, die Grundgenauigkeit eines solchen Systems zu verstehen. Kapitel \@(tacostchapter) präsentiert das „tacost“ Programmpaket, welches multi-Kanal-Audioaufnahmen simuliert, basierend auf die vom Benutzer festgelegten Array-Parameter. Während „tacost“ zwar kein akustisches Verfolgen an sich ausführt, generierte es Daten um dem Nutzer zu erlauben die Konsequenzen von verschiedenen Array-Konstruktionsentscheidungen zu vergleichen. „tacost“ ist ein Werkzeug um die Optimierung eines Tracking-Systems in der konzeptionellen Phase als auch die post-hoc Analyse nach der Aufnahme zu erleichtern. Das Paket wurde mit open-source Lizenz und Onlinedokumentation veröffentlicht.

Der Echoortungsruf ist eine vielstudierte, sensorische „Einheit“. Die akustischen Parameter des Rufs (Länge, Bandbreite) und seine Struktur (Frequenzmodulation) sind eng mit dem damit verbundenen Verhalten verknüpft. Verbreitete Herangehensweisen um solche Rufe zu vermessen beinhalten automatisierte, eigenangefertigte Skripte oder manuelle Vermessung. Eigenangefertigte Skripte erfahren oft keine ausreichende öffentliche Kontrolle, wohingegen manuelle Vermessungen, gerade bei großen Datenmengen, sehr zeitaufwendig sind. In Kapitel \@ref(itsfmchapter) präsentiere ich das “itsfm” Softwarepaket, welches die Einteilung und Vermessung von Echoortungsrufen automatisiert. Ich realisiere damit eine verbreitete Methode der Segmentierung von CF-FM rufen kombiniert mit einem neuen Algorithmus. Dieser neue Algorithmus liefert mit hoher Beständigkeit eine höhere Genauigkeit der Segmentierung als gewöhnlich beschriebene Methoden. Obgleich entwickelt für die Analyse von CF-FM Rufen, können die Routinen in „itsfm“ von einer breiten Anwendung in der bioakustischen Szene sein. Das Paket wurde mit open-source Lizenz und Onlinedokumentation veröffentlicht.

Abschließend möchte ich kurz die Schlüsselerkenntnisse beschreiben und einen Ausblick auf zukünftige Wissenschaft geben, welche den dreigleisigen Ansatz zum Studieren von Tieren mit aktiver Sinneswahrnehmung in Gruppen berücksichtigt. Dieser dreigleisige Ansatz besteht aus 1) Verbessern der Techniken um einfache Datenaufnahme im Feld und die Analyse von Audioaufnahme mit überlappenden Rufen zu vereinfachen, 2) Ausführen von kontrollierten Experimenten um die sensorischen Fähigkeiten von einzelnen Individuen besser zu verstehen, 3) Nutzen der gesammelten Daten von Feldstudien und kontrollierten Experimenten um Computermodelle zu generieren und zu parametrisieren. Diese Thesis liefert einen ersten Einblick, welche Verbesserungen der dreigleisige Ansatz durch Beiträge in Form von Computermodellen, Feldbeobachtungen und neuen Technologien im Feld der Studie von aktiver Sinneswahrnehmung bewirken kann.