

Großskalige biologische Transportnetzwerke – Cargoschiffsverkehr und Vogelzug

Andrea Kölzsch

Kölzsch A 2010: Large-scale biological networks – cargo ship traffic and bird migration. Vogelwarte 48: 59-60.

Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, betreut von Herrn Prof. Dr. Bernd Blasius und Herrn Prof. Dr. Franz Bairlein.

✉ AK: Netherlands Institute of Ecology (NIOO-KNAW), Rijksstraatweg 6, 3631AC, Nieuwersluis, Niederlande, E-Mail: a.koelzsch@nioo.knaw.nl

Bewegung ist eine grundlegende und notwendige Eigenschaft des Lebens. Fast alle Lebewesen bewegen sich in komplexen Mustern und auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen über die Erde. Dabei werden durch Tiere und menschliche Transportvektoren sekundäre Ausbreitungen von z.B. kleinen Organismen, Krankheitserregern und Samen stark begünstigt. Menschliches Reisen und Gütertransport in nie dagewesener Häufigkeit und Geschwindigkeit sowie die Änderung von Migrationsrouten verschiedener Tierarten aufgrund des Klimawandels führen derzeit zu Problemen wie globaler Bioinvasion und Ausbreitung von Epidemien.

Großskalige Tierbewegungen und Transportsysteme besitzen oft eine inhärente Netzwerkstruktur und können leicht als Bewegungsereignisse zwischen diskreten Regionen modelliert werden. Das Ziel dieser Arbeit bestand in der Entwicklung und Beschreibung von Transportnetzwerken, die zum Einen den globalen Güterschiffsverkehr und zum Anderen die Zugbewegungen zweier verschiedener Vogelarten abbilden und vergleichen. Die Bewegungsmuster auf den Netzwerken wurden mit hochaufgelösten Bewegungsdaten (AIS-Trajektorien, Satellitentelemetrie und GPS) quantifiziert und mit verschiedenen Netzwerkmaßen charakterisiert. Die großskaligen Ausbreitungsmuster verschiedener Vogelarten wurden anhand von Beringungsergebnissen statistisch beschrieben. Auf der Grundlage dieser neu gewonnenen Ergebnisse konnten Probleme und Möglichkeiten zur Bekämpfung der fortschreitenden globalen Ausbreitung von Organismen diskutiert werden. Dies bezog sich insbesondere auf bioinvasive Arten, die Ökosysteme schädigen und Infektionskrankheiten übertragen, welche die menschliche Gesundheit gefährden.

Im ersten Teil der Arbeit wurde das Globale Cargoschiffsnetzwerk (GCSN) aus realen Schiffstrajektorien zwischen den Häfen generiert. Seine Netzwerkstruktur weist zahlreiche Gemeinsamkeiten mit anderen Transportnetzwerken auf, die schnelle Ausbreitung auf dem

Netzwerk und Robustheit gegenüber zufälligen Störungen im Schiffsverkehr begünstigen.

Es wurde unter anderem das Thema der marinen Bioinvasion aufgegriffen, insbesondere in Bezug auf den Transport von Organismen im Ballastwasser und den Bewuchs des Schiffsrumpfes. Die derzeitigen Ausmaße von mariner Bioinvasion werden aufgezeigt und ihre ungünstigen Auswirkungen auf die globale Biodiversität, die Funktion von Ökosystemen und die weltweite Ökonomie diskutiert.

Der zweite Teil der Dissertation befasst sich mit der Untersuchung und statistischen Beschreibung von großskaligen Prozessen des Vogelzugs und deren Modellierung als Migrationsnetzwerk. In einer Vorabstudie wurden Satellitentelemetrie- und Wiederfunddaten des Weißstorchs *Ciconia ciconia* bezüglich seiner Bewegungsmuster ausgewertet. Aus Resultaten zur mittleren quadratischen Abweichung und der Drehwinkelverteilung ist zu schließen, dass das Zugverhalten des Weißstorchs zwei verschiedenen Modi zusammengesetzt ist, (i) schnellem, gerichtetem Zug und (ii) langsamem, ungerichtetem Rasten und Futtersuchen. Dies bestätigt das Trittstein-Vogelzug-Konzept, welches bereits für verschiedene andere Vogelarten empirisch beschrieben wurde.

In einer detaillierteren Studie der Verbreitungsdistanzen von Vögeln wurden sodann die Bewegungsmuster von fünf sehr unterschiedlichen Vogelarten verglichen, nämlich von Weißstorch, Zilpzalp *Phylloscopus collybita*, Rauchschwalbe *Hirundo rustica*, Stockente *Anas platyrhynchos* und Höckerschwan *Cygnus olor*. Die Verbreitungsdistanzen für alle diese Arten können durch unbegrenzte und "gestutzte" (truncated) Potenzgesetze besser beschrieben werden als durch Exponential- oder Lognormalverteilungen. Dies deutet darauf hin, dass Langzeit-Vogelbewegungen sogenannten Lévyflügen ähneln. Die Existenz von Lévyflügen in der Natur wurde kürzlich in Frage gestellt. Die hier präsentierte Arbeit zeigt jedoch, dass sie in der Natur viel häufiger vorkommen als bisher vermutet.

Die Lévyflugeigenschaften dominieren die Bewegungsmuster aller untersuchten Vogelarten. Für den Weißstorch können jedoch zwei verschiedene Steigungen der Verbreitungsverteilungen beobachtet werden. Das stimmt mit den gefundenen zwei Bewegungsmodi überein. Deshalb konnten bei der Entwicklung eines Netzwerkmodells der Zugrouten die kleinskaligen Bewegungen des Weißstorchs und anderer Trittstein-Zug-Arten vernachlässigt werden. Knoten und Kanten wurden durch Analysen von Satellitentelemetrie- und GPS-Trajektorien des Weißstorches und der Blässgans *Anser albifrons* bestimmt. Insbesondere wurden Lokalisationen von Vögeln mit geringer Fluggeschwindigkeit in Netzwerkknoten zusammengefasst. Die Vegetationseigenschaften dieser Regionen wurden aus Satellitenbildern abgeleitet und stimmen gut mit den Habitatansprüchen der Störche bzw. Gänse überein.

Das entwickelte einfache Netzwerk aus Brut-, Rast- und Überwinterungsregionen kann den dynamischen Prozess des Vogelzugs nicht vollständig modellieren. Das Phänomen Migration ist sehr komplex und wird zu einem Großteil von der Saisonalität in den verschiedenen Regionen bestimmt. Deshalb wurde eine Abhängigkeit von den Jahreszeiten in unser Vogelzugmodell eingebunden. Mathematisch wurde es als nicht-homogene Markovkette definiert. Die Übertragungswahrscheinlichkeiten, welche mit den Netzwerkkanten assoziiert sind, wurden mit einer zirkulären, unimodalen Funktion der Jahreszeit gewichtet und an die Bewegungszeiten in den Weißstorch- und Blässgansdaten angepasst. Somit wurde ein erstes quantitatives Vogelzugnetzwerkmodell entwickelt.

Darüber hinaus wurden die Struktur und die Ausbreitungseigenschaften der kumulativen und zeitspezifischen Vogelzugnetzwerke analysiert und Gebiete bestimmt, die besonders wichtig für die Erhaltung durchgehender Zugbewegungen sind. Beide Netz-

werke haben sehr kleine gemittelte kürzeste Pfade zwischen den Knoten und sind asymmetrisch. Dies bestätigt, dass die Vögel während des Zugs im Mittel wenige Zwischenstopps einlegen und die Routen des Herbstzuges besonders bezüglich der Nutzung der Rastgebiete von denen des Frühjahrszuges abweichen. Von den Vögeln häufig benutzte und für die Konnektivität des Netzwerks wichtige Regionen sind: (i) das Brutgebiet in Nordeuropa und ein Rastgebiet im zentralen Sudan für die Störche und (ii) das Überwinterungsgebiet in den Niederlanden und einige Brutgebiete an der Sibirischen Küste für die Gänse. Solche Ergebnisse können als vorläufige Hinweise für Umweltschutzentscheidungen und Risikoabschätzungen zur Ausbreitung von Infektionskrankheiten durch Zugvögel dienen.

Diese Arbeit stellt eine besondere Kombination der Entwicklung und Charakterisierung verschiedener Transportnetzwerke dar. Es wurden Netzwerke der globalen Bewegungsmuster von Handelsschiffen und Zugvögeln entwickelt und der Bewegungsfluss darauf mit hochqualitativen Daten parametrisiert. Detaillierte Netzwerkanalysen zeigen typische Eigenschaften anderer Transportnetzwerke. Des Weiteren wurden Ähnlichkeiten der beiden entwickelten Netzwerke hervorgehoben, obwohl die von ihnen beschriebenen Prozesse sehr unterschiedlich sind. Ausbreitungsmodelle auf den Netzwerken sollen nun mit speziellen Fallstudien unter Einbezug von Populationswachstum, Umwelteinflüssen und Bioinvasion bzw. Epidemieausbreitung entwickelt werden. Die vorliegenden Resultate bieten eine wichtige Grundlage dafür. Die dargestellten grundlegenden Ausbreitungseigenschaften der untersuchten Systeme zeigen verschiedene Ansätze zur Bekämpfung der negativen Auswirkungen veränderter globaler Bewegungsmuster, wie mariner Bioinvasion und der globalen Verbreitung von Infektionskrankheiten auf.